



Education in Hydrogen Technologies Area

WASSERSTOFFSPEICHERUNG UND - TRANSPORT



Co-funded by
the European Union

Project is supported
within the Erasmus+ programme
2021-1-CZ01-KA220-VET-000028073

INHALT

| | |
|--|----|
| Inhalt..... | 2 |
| Einleitung..... | 3 |
| 1 Arbeitssicherheit bei der Lagerung und dem Transport von Wasserstoff | 5 |
| 2 Transport von Wasserstoff..... | 8 |
| 2.1 Transport von komprimiertem Wasserstoff in Containern auf der Straße oder der Schiene | 8 |
| 2.2 Transport von Flüssigwasserstoff in Containern auf der Straße, der Schiene oder dem Schiff. | 10 |
| 2.3 Wasserstofftransport per Pipeline mit Erdgasgemisch..... | 12 |
| 2.4 Abtrennung von Wasserstoff aus dem Erdgasgemisch mittels Membrangastrennung | 13 |
| 2.5 Transport von sauberem Wasserstoff durch eine bestehende Gaspipeline, die auf sauberen Wasserstoff eingestellt ist | 15 |
| 2.6 Transport von reinem Wasserstoff durch eine neu gebaute Pipeline | 16 |
| 2.6.1 Das europäische Wasserstoff-Rückgrat..... | 18 |
| 2.6.2 Beispiel für die Realisierung eines nationalen Wasserstoffnetzes..... | 21 |
| 2.7 LOHC..... | 21 |
| 2.7.1 Beispiel für den Einsatz von LOHC in der Praxis | 22 |
| 3 Wasserstoffspeicherung..... | 26 |
| 3.1 Speicherung von komprimiertem Wasserstoff | 27 |
| 3.2 Speicherung von flüssigem Wasserstoff | 30 |
| 3.3 Wasserstoffspeicherung in unterirdischen Behältern im Gemisch mit Methan oder Ammoniak | 32 |
| 3.4 Wasserstoffspeicherung in Hydriden | 33 |
| 3.4.1 Metallhydride | 35 |
| 3.5 Wasserstoffspeicherung in kohlenstoffbasierten Behältern..... | 36 |
| 4 Komponenten..... | 42 |
| 4.1 Druckbehälter..... | 43 |
| 4.2 Kryo-Tanks | 44 |
| 4.3 Hochdruck-Lagertanks..... | 46 |
| 5 Quellenverzeichnis | 49 |
| 6 Liste der Bilder und Tabellen..... | 51 |
| 7 Liste der Abkürzungen..... | 52 |

Gefördert von der Europäischen Union. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind jedoch ausschließlich die der Autoren und spiegeln nicht unbedingt die der Europäischen Union oder der Europäischen Exekutivagentur für Bildung und Kultur (EACEA) wider. Weder die Europäische Union noch die EACEA können dafür verantwortlich gemacht werden.

EINLEITUNG

Wasserstoff kann auf verschiedene Arten gespeichert werden, z. B. als Gas, Flüssigkeit oder in fester Form wie Metallhydrid oder chemische Verbindung. Die gebräuchlichste Methode der Wasserstoffspeicherung ist als komprimiertes Gas in Hochdrucktanks. Diese Methode hat den Vorteil, dass sie relativ einfach und kostengünstig ist, aber die Speicherdichte relativ gering ist, so dass große Tanks benötigt werden, um eine nutzbare Menge Wasserstoff zu speichern.

Wasserstoff kann auch flüssig in Kryotanks gelagert werden, bei denen es sich um Tanks handelt, die für die Lagerung von Materialien bei extrem niedrigen Temperaturen ausgelegt sind. Flüssiger Wasserstoff hat eine viel höhere Speicherdichte als gasförmiger Wasserstoff, so dass er in kleineren Tanks gespeichert werden kann. Die Tanks und Ausrüstungen, die für die Speicherung und Handhabung von flüssigem Wasserstoff benötigt werden, sind jedoch teurer und komplexer als die für die Druckgasspeicherung.

Eine andere Methode der Wasserstoffspeicherung besteht darin, ihn in fester Form zu speichern, z. B. in einem Metallhydrid oder einer chemischen Verbindung. Diese Methode hat den Vorteil, große Mengen Wasserstoff auf kleinem Raum speichern zu können, ist aber in der Regel teurer und weniger effizient als die anderen Methoden.

Es gibt auch verschiedene Methoden für den Transport von Wasserstoff, unter anderem per Lkw, Zug, Schiff und Pipeline. Die gebräuchlichste Methode ist der Lkw, bei dem Tanks verwendet werden, die denen ähneln, die zur Speicherung von Wasserstoff verwendet werden. Wasserstoff kann auch per Bahn oder Schiff in kryogenen Tanks transportiert werden, oder er kann wie Erdgas durch Pipelines transportiert werden.

Insgesamt ist die Entwicklung effektiver und effizienter Methoden zur Speicherung und zum Transport von Wasserstoff ein wichtiger Forschungs- und Entwicklungsbereich, da Wasserstoff das Potenzial hat, Energie zu speichern.

1 ARBEITSSICHERHEIT BEI DER LAGERUNG UND DEM TRANSPORT VON WASSERSTOFF

Wasserstoff ist ein leicht entzündliches Gas und muss mit Vorsicht behandelt werden, um die Sicherheit zu gewährleisten. Bei der Lagerung oder dem Transport muss Wasserstoff bei hohem Druck oder extrem niedrigen Temperaturen gehalten werden, um die Explosionsgefahr zu verringern. Dies kann die Lagerung und den Transport schwieriger und teurer machen als bei anderen Kraftstoffarten.

Eines der Hauptprobleme bei der Wasserstoffspeicherung ist das Potenzial für Leckagen. Aus Lagertanks und Rohrleitungen kann Wasserstoff austreten, was zur Bildung brennbarer oder explosiver Gemische führen kann. Um das Risiko von Leckagen zu minimieren, müssen Lagertanks und Rohrleitungen nach strengen Sicherheitsstandards konstruiert und gebaut werden. Regelmäßige Inspektionen und Wartungen sind ebenfalls von entscheidender Bedeutung, um sicherzustellen, dass diese Systeme in gutem Zustand bleiben.

Der Transport von Wasserstoff erfolgt in der Regel per Lkw, Bahn oder Schiff. Der Transport von Lkw und Schienen erfolgt in der Regel in großen, speziell konstruierten Tanks oder Containern, die den hohen Drücken oder niedrigen Temperaturen standhalten, die für die Wasserstoffspeicherung erforderlich sind. Der Versand von Wasserstoff erfolgt in der Regel in kryogener flüssiger Form, was isolierte Behälter erfordert, die den Wasserstoff bei extrem niedrigen Temperaturen halten.

Ein weiteres wichtiges Sicherheitsproblem ist das Potenzial für Wasserstoffbrände und -explosionen. Wasserstoff ist ein leicht entzündliches Gas, und wenn es austritt und mit einer Zündquelle in Berührung kommt, kann es einen Brand oder eine Explosion verursachen. Um das Risiko von Wasserstoffbränden und -explosionen zu minimieren, müssen sich Lager- und Transporteinrichtungen außerhalb von besiedelten Gebieten befinden und über Brandbekämpfungssysteme verfügen.

Insgesamt erfordert die Speicherung und der Transport von Wasserstoff die strikte Einhaltung von Sicherheitsprotokollen, ein ordnungsgemäßes Design und eine ordnungsgemäße Wartung der Ausrüstung, und es gibt Notfallpläne, um potenzielle Gefahren zu minimieren. Wasserstoff hat zwar das Potenzial, Energie zu speichern, aber es ist wichtig, dass angemessene Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden, um Menschen und Eigentum zu schützen.

Mögliche Risiken im Zusammenhang mit der Speicherung von komprimiertem Wasserstoffgas:

- Schwer zu identifizierende Wasserstofffreisetzung, da das Gas geruch-, farb- und geschmacklos ist.
- Wasserstoff kann Metalle verspröden lassen. Dies kann zu einer Verringerung der Festigkeit des Materials und in der Folge zum Reißen des Behälters führen, was zu einem Wasserstoffleck führt.
- Akkumulation von Wasserstoff über lange Zeiträume in engen Räumen wie einer Garage oder mechanischen Werkstatt, Fahrzeuginsassen. Erstickungsgefahr kann durch Verdrängung der Luft durch Wasserstoff entstehen.
- Bildung von brennbaren Wasserstoff-Sauerstoff- oder Wasserstoff-Luft-Gemischen. Das Ansaugen von brennbarem Gemisch in das Lüftungssystem eines Gebäudes kann zu einer Detonation führen.
- Eine Explosion des Behälters, die von einer Druckwelle begleitet wird, kann zu Schäden am Trommelfell, zum Reißen des Behälters, umherfliegenden Trümmern, Glasbruch usw. führen.
- Wasserstoff lässt sich leicht entzünden, da sein MIE 0,017 mJ beträgt (was im Vergleich zu anderen Kraftstoffen 10-mal niedriger ist). Ein statischer Funke kann den freigesetzten Wasserstoff entzünden.
- Wenn reiner Wasserstoff verbrennt, sind seine Flammen bei Tageslicht unsichtbar.
- Wasserstoff verbrennt schnell und erzeugt keinen Rauch.
- Äußeres Feuer, Hitze oder Wärmestrahlung können aufgrund der thermischen Zersetzung von Polymer- und Verbundwerkstoffen zu einem mechanischen Bruch des Tanks führen (Hy Responder Lecture 3: Hydrogen storage, 2021, s. 13-14).

Allgemeine Richtlinien für den sicheren Umgang mit Wasserstoffgas:

- Befolgen Sie alle Sicherheitsvorschriften und Richtlinien für den Umgang mit Wasserstoffgas. Dies kann das Tragen persönlicher Schutzausrüstung wie Handschuhe, Schutzbrillen und schwer entflammbare Kleidung umfassen.
- Seien Sie vorsichtig beim Umgang mit Wasserstoffgasflaschen oder anderen Behältern. Diese sollten mit Vorsicht behandelt werden, um Schäden am Behälter zu vermeiden, die zu einem Leck oder der Freisetzung von Wasserstoffgas führen könnten.
- Halten Sie Wasserstoffgas von Zündquellen wie offenen Flammen, Funken und elektrischen Geräten fern.
- Achten Sie beim Transport von Wasserstoffgas darauf, dass sich das Gas in einem geeigneten Behälter befindet, der für Wasserstoffgas ausgelegt und in gutem Zustand ist.
- Lagern Sie Wasserstoffgas in einem gut belüfteten Bereich, fern von Zündquellen.

- Seien Sie vorsichtig, wenn Sie Wasserstoffgas von einem Behälter in einen anderen umfüllen. Stellen Sie sicher, dass die Behälter ordnungsgemäß gesichert sind und dass der Transfer langsam erfolgt, um Verschüttungen oder Lecks zu vermeiden.
- Im Falle eines Wasserstoffgaslecks oder -austritts evakuieren Sie den Bereich sofort und lüften Sie den Bereich, um das Gas zu verteilen. Versuchen Sie nicht, das Leck selbst zu reparieren oder zu verschütten. Rufen Sie stattdessen professionelle Hilfe an.
- Überprüfen Sie regelmäßig den Zustand von Wasserstoffgasbehältern und -geräten, um sicherzustellen, dass sie in gutem Zustand sind und kein Sicherheitsrisiko darstellen.
- Stellen Sie sicher, dass alle Arbeiter, die mit Wasserstoffgas umgehen, ordnungsgemäß geschult und mit den mit dem Gas verbundenen Gefahren vertraut sind.



Bild Nr. 1: Warntafel .

2 TRANSPORT VON WASSERSTOFF

EINLEITUNG

Wasserstoff kann auf verschiedene Arten transportiert werden, unter anderem per Lkw, Schiff, Bahn und Pipeline.

Eine gängige Methode für den Transport von Wasserstoff ist der Lkw mit kryogenen Flüssigkeitstankaufliegern. Diese Auflieger sind für den Transport von verflüssigtem Wasserstoff bei extrem niedrigen Temperaturen (-253 °C) ausgelegt, was das Volumen des Wasserstoffs reduziert und einen effizienteren Transport ermöglicht.

Eine weitere Möglichkeit ist der Transport von Wasserstoff per Schiff, entweder als kryogene Flüssigkeit oder als komprimiertes Gas. Kryogener flüssiger Wasserstoff kann in speziellen Tankern verschifft werden, ähnlich denen, die für den Transport von Flüssigerdgas (LNG) verwendet werden. Komprimiertes Wasserstoffgas kann auch in Behältern transportiert werden, die für hohe Drücke ausgelegt sind.

Schließlich kann Wasserstoff auch durch Pipelines transportiert werden, genau wie Erdgas. Diese Methode ist in der Regel nur auf kurzen Strecken praktikabel, da Wasserstoff leichter aus Pipelines austritt als Erdgas. Es kann jedoch eine effiziente Option sein, um Wasserstoff von einem Produktionsstandort zu einem nahe gelegenen Speicher- oder Verteilungszentrum zu transportieren.

SCHLÜSSELWÖRTER

Flüssigwasserstoff, Druckwasserstoff-Pipeline, Container, Transport, Tanker, Zug, LKW, Gas, Schiff, Membrantrennung, LOHC

2.1 TRANSPORT VON KOMPRIMIERTEM WASSERSTOFF IN CONTAINERN AUF DER STRAÙE ODER DER SCHIENE

Wasserstoff kann in Containern auf der Straße transportiert werden, entweder als komprimiertes Gas oder als Flüssigkeit. Wenn Wasserstoff als komprimiertes Gas transportiert wird, wird er in der Regel in Hochdrucktanks gespeichert, die auf einem Anhänger oder LKW montiert sind. Die Tanks bestehen in der Regel aus Kohlefaser oder Stahl und sind so konstruiert, dass sie den hohen Drücken standhalten, bei denen Wasserstoff gespeichert wird.

Beim Transport von Wasserstoff auf der Straße sind eine Reihe von Faktoren zu berücksichtigen, darunter die Größe und das Gewicht der Behälter, das Potenzial für Leckagen oder Unfälle sowie die Notwendigkeit, Sicherheitsvorschriften einzuhalten. Es ist wichtig sicherzustellen, dass die Container ordnungsgemäß konstruiert und gewartet werden und dass die Fahrer für den sicheren Umgang mit den Containern geschult sind. Darüber hinaus ist es wichtig, alle relevanten Vorschriften und Richtlinien zu befolgen.

Der Transport von Wasserstoff auf der Schiene bietet eine Reihe von Vorteilen, darunter die Möglichkeit, große Mengen Wasserstoff über große Entfernungen zu transportieren, die relativ niedrigen Kosten des Schienenverkehrs im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln und die geringere Umweltbelastung im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern. Es gibt jedoch auch einige Herausforderungen zu berücksichtigen, wie z. B. die Einhaltung von Sicherheitsvorschriften und das Potenzial für Unfälle oder Leckagen. Es ist darauf zu achten, dass die Container ordnungsgemäß konstruiert und gewartet werden und dass die Waggons mit den entsprechenden Sicherheitseinrichtungen ausgestattet sind.

Wasserstoff kann in Baumzuständen transportiert werden. Im gasförmigen Zustand kann es hauptsächlich in einer großen Anzahl kleiner Flaschen transportiert oder in mehreren langen horizontalen Behältern gelagert werden.

Die Daten von Platts zeigen, dass ein einzelner Lkw zwischen 500 kg und 1.100 kg Wasserstoff in gasförmiger Form transportieren kann, während ein Lkw mit verflüssigtem Wasserstoff bis zu 3.500 kg transportieren kann (S&P Global Commodity Insights, 2021).

Wasserstoff wird heute meist als komprimiertes Gas in Druckbehältern aus Eisen- oder Kohlenstoffrohrverbundwerkstoffen transportiert. Wasserstoff in Druckbehältern kann in Druckflaschen mit einem Druck von 200 - 300 bar transportiert werden. Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge verwenden kleinere Drucktanks mit einem Druck von 350 oder 700 bar.



Bild Nr. 2: Wasserstofftransport in Containern auf der Straße.

2.2 TRANSPORT VON FLÜSSIGWASSERSTOFF IN CONTAINERN AUF DER STRAÙE, DER SCHIENE ODER DEM SCHIFF

Wasserstoff kann in seiner flüssigen Form, die als kryogener flüssiger Wasserstoff (LH₂) bezeichnet wird, transportiert werden. Es muss bei extrem niedrigen Temperaturen gelagert und transportiert werden, typischerweise bei -253 °C. LH₂ hat als Transportkraftstoff eine Reihe von Vorteilen. Es hat eine hohe Energiedichte, was bedeutet, dass eine relativ kleine Menge LH₂ eine große Menge an Energie enthält. Es ist auch ein sauber verbrennender Brennstoff, der bei der Verbrennung nur Wasser erzeugt.

Es gibt jedoch auch eine Reihe von Herausforderungen, die mit dem Transport von LH₂ verbunden sind. Es erfordert eine spezielle und teure Lager- und Transportinfrastruktur, da es bei extrem niedrigen Temperaturen gehalten werden muss, um flüssig zu bleiben. Es ist auch ein sehr flüchtiger Kraftstoff, der bei unsachgemäÙer Handhabung ein Sicherheitsrisiko darstellen kann. Trotz dieser Herausforderungen hat LH₂ das Potenzial, in Zukunft ein wichtiger Kraftstoff für den Transport von Gütern über große Entfernungen zu sein.

Wasserstoff kann auf der Straße in flüssiger Form in speziellen kryogenen Tankwagen transportiert werden, die für den Transport extrem kalter Flüssigkeiten wie flüssigem Wasserstoff ausgelegt sind. Diese Tankwagen bestehen in der Regel aus Edelstahl und sind isoliert, um die extrem niedrige Temperatur des flüssigen Wasserstoffs aufrechtzuerhalten. Die Tanks selbst sind so ausgelegt, dass sie

dem hohen Druck standhalten, der durch die Ausdehnung des flüssigen Wasserstoffs beim Erwärmen entsteht.

Um den flüssigen Wasserstoff auf den Tankwagen zu laden, wird er über eine Transferleitung von einem Lagertank auf den Tankwagen umgeladen. Die Transferleitung ist mit einer Reihe von Ventilen und Sicherheitsvorrichtungen ausgestattet, um Verschüttungen und Unfälle zu verhindern. Der Tankwagen verfügt außerdem über eigene Sicherheitssysteme, wie z. B. Überdruckventile, um Unfälle während des Transports zu vermeiden.

Sobald der Tankwagen mit flüssigem Wasserstoff beladen ist, kann er auf den gleichen Straßen und Autobahnen wie andere Fahrzeuge an seinen Bestimmungsort transportiert werden. Der Fahrer des Tankwagens muss speziell geschult sein, um mit den einzigartigen Eigenschaften von flüssigem Wasserstoff umzugehen und alle Sicherheitsprotokolle zu befolgen. Der Tankwagen muss auch vorsichtig gefahren werden, um ein Anstoßen des Tanks zu vermeiden, das dazu führen könnte, dass der flüssige Wasserstoff kocht und sich in Gas verwandelt, wodurch der Druck im Tank steigt.

Es ist wichtig zu beachten, dass der Transport von Wasserstoff in jeglicher Form, einschließlich flüssigem Wasserstoff, mit gewissen Risiken verbunden ist und strenge Sicherheitsmaßnahmen erfordert, um Unfälle zu vermeiden.

Der Transport von Wasserstoff per Schiff ist eine mögliche Option, um große Mengen Wasserstoff über große Entfernungen zu transportieren. Es gibt jedoch einige Herausforderungen, die angegangen werden müssen, um dies zu einer praktikablen Option zu machen. Eine Herausforderung ist die Konstruktion der kryogenen Container, die den rauen Bedingungen der Verschiffung auf See standhalten. Darüber hinaus sind bei der Handhabung und Lagerung von kryogenen Flüssigkeiten Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen, wie z. B. das Risiko von Verschüttungen und Leckagen.

Trotz dieser Herausforderungen gibt es anhaltende Bemühungen, sichere und kostengünstige Methoden für den Transport von Wasserstoff per Schiff zu entwickeln. So demonstrierte beispielsweise das Projekt HYFLEET:CUTE der Europäischen Union, dass es machbar ist, Wasserstoff mit einem kleinen Schiff von Offshore-Produktionsanlagen zu Häfen zu transportieren, um ihn zu verteilen. In Zukunft könnte Wasserstoff in größeren Mengen mit speziellen Schiffen transportiert werden, die speziell für den Transport von kryogenen Flüssigkeiten ausgelegt sind.



Bild Nr. 3: Transport von Flüssigwasserstoff in Containerschiffen.

2.3 WASSERSTOFFTRANSPORT PER PIPELINE MIT ERDGASGEMISCH

Wasserstoff kann in einem Gemisch mit Erdgas per Pipeline transportiert werden, erfordert jedoch eine spezifische Infrastruktur und einen sorgfältigen Umgang. Wenn Wasserstoff mit Erdgas gemischt wird, wird das Gemisch als "wasserstoffangereichertes Erdgas" oder "HENG" bezeichnet. Die Wasserstoffkonzentration im Gemisch liegt typischerweise zwischen 10 % und 20 %.

Ein Vorteil des Wasserstofftransports auf diese Weise besteht darin, dass bestehende Erdgasleitungen genutzt werden können, was kostengünstiger sein kann als der Bau neuer Pipelines speziell für Wasserstoff. Es gibt jedoch auch einige Herausforderungen und Überlegungen, die bei der Verwendung von HENG für den Transport zu beachten sind.

Eine Herausforderung besteht darin, dass Wasserstoff hochreaktiv ist und bestimmte Materialien, wie z. B. einige Stahlsorten, korrodieren kann. Das bedeutet, dass die für HENG verwendeten Pipelines aus Materialien bestehen müssen, die mit Wasserstoff kompatibel sind, oder sie müssen mit einer Schutzschicht überzogen sein. Darüber hinaus hat Wasserstoff einen geringeren Energiegehalt als Erdgas, sodass der Heizwert von HENG niedriger ist. Das bedeutet, dass HENG ein größeres Volumen benötigt, um die gleiche Energiemenge wie reines Erdgas bereitzustellen.

Eine weitere Überlegung ist, dass HENG sorgfältig gehandhabt und gelagert werden muss, um Leckagen oder Unfälle zu vermeiden. Zum Beispiel muss HENG unter hohem Druck gehalten werden, um sein Volumen zu reduzieren und den Transport zu erleichtern. Das bedeutet, dass die Lager- und Umschlagsanlagen für HENG so ausgelegt sein müssen, dass sie den hohen Drücken standhalten.

Insgesamt kann mit Wasserstoff angereichertes Erdgas zwar ein effektiver Weg zum Transport von Wasserstoff sein, erfordert jedoch eine spezielle Infrastruktur und eine sorgfältige Handhabung, um die Sicherheit und Effizienz des Prozesses zu gewährleisten.

Wasserstoff hat bei gleichem Druck und Volumen einen geringeren Heizwert als Erdgas. Sein Heizwert liegt bei ca. 30 % des Erdgases. Es wird keine Probleme beim Verkauf von Gas an Kunden geben, da der aktuelle Preis für die Gasverteilung in Energieeinheiten (verteilte kWh) nach Heizwert berechnet wird und die verwendeten Abrechnungssysteme den Heizwert des Gases auf der Grundlage tatsächlicher Messungen ändern müssen.

Um die gleiche Wärmemenge bereitzustellen, muss mehr Wasserstoff als Erdgas geliefert werden. Ein Vorteil von Wasserstoff liegt in einem geringeren Widerstand beim Durchfließen von Pipelines, wodurch das Gemisch von Erdgas mit Wasserstoff somit schneller fließen kann. Die derzeitige Durchflusskapazität von Rohrleitungen stellt keine Begrenzung für das Erdgas-Wasserstoff-Gemisch dar, was die transportierte Wärmemenge betrifft (Vodíková strategie České republiky, 2021, S. 77-78).

2.4 ABTRENNUNG VON WASSERSTOFF AUS DEM ERDGASGEMISCH MITTELS MEMBRANGASTRENNUNG

Die Membrangastrennung ist ein Verfahren, bei dem ein Gasgemisch mit Hilfe einer Membran in seine Einzelbestandteile zerlegt wird. Die Membran lässt einige Gase durch, während andere nicht durchgelassen werden. Bei der Abtrennung von Wasserstoff aus einem Erdgasgemisch kann eine für Wasserstoff selektive Membran verwendet werden.

Es gibt verschiedene Arten von Membranen, die für die Wasserstofftrennung verwendet werden können, darunter Polymermembranen, anorganische Membranen und metallorganische Gerüstverbindungen (MOF). Polymermembranen werden aus Polymeren wie Polysulfone und Polyamiden hergestellt und aufgrund ihrer hohen Selektivität für Wasserstoff häufig zur Abtrennung von Wasserstoff aus Erdgasgemischen eingesetzt. Anorganische Membranen, wie Keramik- und Glasmembranen, werden ebenfalls für die Wasserstofftrennung verwendet, sind aber im Allgemeinen weniger selektiv als Polymermembranen. MOF sind eine relativ neue Art von Membranen, die große

Oberflächen und einstellbare Porengrößen aufweisen, wodurch sie bei der Trennung von Gasen sehr effektiv sind.

Bei der Trennung von Wasserstoff aus einem Erdgasgemisch mithilfe einer Membran wird das Gasgemisch in der Regel auf einer Seite der Membran unter Druck gesetzt, während auf der anderen Seite ein niedrigerer Druck aufrechterhalten wird. Die Wasserstoffmoleküle sind dann in der Lage, die Membran zu passieren und in die Seite mit niedrigerem Druck zu gelangen, während die anderen Gase nicht passieren können. Der abgeschiedene Wasserstoff kann dann aufgefangen und als Brennstoff oder Ausgangsstoff für chemische Prozesse verwendet werden.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Effizienz des Trennprozesses von einer Reihe von Faktoren beeinflusst werden kann, darunter die Art der verwendeten Membran, der Druckunterschied über die Membran und die Temperatur des Gasgemischs. Darüber hinaus hängt die Reinheit des abgeschiedenen Wasserstoffs von der Selektivität der Membran und der Zusammensetzung des Ausgangsgasgemisches ab.

Es ist noch ein recht neues und wenig erprobtes Verfahren. Nichtsdestotrotz ist die Nutzung der vorhandenen Gasinfrastruktur eine große Chance und ermöglicht es, die Kosten für den H₂-Transport erheblich zu senken und den Endpreis für einen Kunden zu senken. Ein Membranseparator selbst ist ein relativ günstiges Gerät, das ein Potenzial an Skalierbarkeit hat. Leider stoßen wir auch hier auf gewisse Unvollkommenheiten, zum Beispiel eine unvollständige Gastrennung. Diese Technologie ist auch in verzweigten Abschnitten nur schwer einsetzbar. In diesem Fall handelt es sich um ein Problem, das mit der ungleichmäßigen Verteilung von Wasserstoff in den einzelnen Zweigen zusammenhängt. Dies könnte dazu führen, dass einige Kunden nicht genügend Wasserstoff erhalten. Die Gefahr einer Verknappung der zugeführten Energie ist in der Regel schon aus der gesamten Idee eines solchen Systems ersichtlich. Wenn beispielsweise nur 20 % der Pipelines für Wasserstoff "reserviert" wären, d. h. für das einzige Medium, das Energie für den Endkunden transportiert, würde sich die Akkumulations- und Übertragungsfähigkeit einer solchen Pipeline erheblich verringern (Galík, 2021, S. 63).



Bild Nr. 4: Membrangastrennung.

2.5 TRANSPORT VON SAUBEREM WASSERSTOFF DURCH EINE BESTEHENDE GASPIPELINE, DIE AUF SAUBEREN WASSERSTOFF EINGESTELLT IST

Es ist möglich, Wasserstoff durch eine bestehende Erdgasleitung zu transportieren, indem die Pipeline an Wasserstoffgas angepasst wird. Dies kann erreicht werden, indem der Druck der Pipeline verringert, die Wandstärke der Pipeline erhöht wird, um den höheren Drücken von Wasserstoffgas standzuhalten, und der Pipeline wasserstoffspezifische Materialien hinzugefügt werden, um Korrosion zu verhindern. Der Prozess der Anpassung einer bestehenden Erdgaspipeline für den Wasserstofftransport wird als "Repurposing" bezeichnet.

Dieser Prozess umfasst eine Reihe von Schritten, darunter:

- Reinigung und Spülung der Pipeline: Die Pipeline muss gereinigt und von Erdgasresten oder anderen Verunreinigungen befreit werden, bevor Wasserstoff durch sie transportiert werden kann.
- Inspektion der Pipeline: Die Pipeline muss auf Defekte oder Schäden untersucht werden, die ihre Integrität während des Wasserstofftransports beeinträchtigen könnten.
- Durchführung notwendiger Reparaturen: Defekte oder Schäden, die während des Inspektionsprozesses festgestellt werden, müssen repariert werden, bevor die Pipeline für den Wasserstofftransport genutzt werden kann.
- Anpassung des Pipelinebetriebs: Der Betriebsdruck und die Durchflussmenge der Pipeline müssen möglicherweise angepasst werden, um den Wasserstofftransport zu ermöglichen.

- Hinzufügen von wasserstoffspezifischer Infrastruktur: Die Pipeline muss möglicherweise mit zusätzlicher Infrastruktur ausgestattet werden, z. B. mit wasserstoffspezifischen Pumpen und Kompressoren, um den Transport von Wasserstoff zu erleichtern.
- Gewährleistung der Sicherheit: Es ist wichtig, Sicherheitsmaßnahmen zu ergreifen, wie z. B. die Installation von Wasserstoffdetektoren und Notabschaltsystemen, um den sicheren Transport von Wasserstoff durch die Pipeline zu gewährleisten.
- Ersetzen Sie die Instrumentierung für elektrische Geräte der Klasse TEX IIC in der Wasserstoffanlage/-pipeline.

Ein potenzieller Vorteil der Nutzung einer bestehenden Pipeline für den Wasserstofftransport besteht darin, dass sie im Vergleich zum Bau einer neuen Pipeline speziell für Wasserstoff Zeit und Geld sparen kann. Es gibt jedoch auch einige Herausforderungen und Risiken, die mit der Umwidmung einer Pipeline für Wasserstoff verbunden sind. So ist es beispielsweise wichtig, den Zustand der Pipeline sorgfältig zu beurteilen und sicherzustellen, dass sie für den Wasserstofftransport geeignet ist. Es ist auch wichtig, die Auswirkungen auf die lokale Gemeinschaft und die Umwelt während des Umwidmungsprozesses zu berücksichtigen.

Die Studie "European Hydrogen Backbone" geht davon aus, dass 75 Prozent des Wasserstoffverteilnetzes auf der bestehenden Infrastruktur basieren sollen, die restlichen 25 Prozent müssen aufgebaut werden. Die EU rechnet mit einem Mangel an sauberem Wasserstoff bis mindestens 2030, was einen Importbedarf bedeuten wird (Galík, 2021, S. 62).

Wasserstoff kann aus viel mehr Ländern kommen als Erdgas. Dadurch werden Importe weniger geopolitisch abhängig.

2.6 TRANSPORT VON REINEM WASSERSTOFF DURCH EINE NEU GEBAUTE PIPELINE

Wasserstoff kann in gasförmiger Form wie Erdgas durch Pipelines transportiert werden. Der Bau einer Wasserstoffpipeline ähnelt dem einer Erdgaspipeline, mit einigen wichtigen Unterschieden, um die einzigartigen Eigenschaften von Wasserstoff zu berücksichtigen.

Hier sind einige wichtige Überlegungen für den Bau einer Wasserstoffpipeline:

- Materialien: Die für den Bau der Pipeline verwendeten Materialien müssen in der Lage sein, der korrosiven Natur von Wasserstoff standzuhalten. Kohlenstoffstahl eignet sich beispielsweise nicht für den Einsatz in Wasserstoffpipelines, da er mit der Zeit korrodieren

kann. Stattdessen können Materialien wie Edelstahl, Aluminium oder spezielle Legierungen wie Inconel oder Hastelloy verwendet werden.

- Rohrdurchmesser: Der Durchmesser des Rohres sollte basierend auf der gewünschten Durchflussmenge und dem Druck des Wasserstoffs gewählt werden. Da Wasserstoff eine geringere Dichte als Erdgas hat, kann der erforderliche Rohrdurchmesser für eine bestimmte Durchflussmenge größer sein.
- Schweißen: Das Schweißen ist ein kritischer Schritt beim Bau jeder Pipeline, und beim Schweißen von Wasserstoffpipelines müssen besondere Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden. Wasserstoff kann mit Luft brennbare Gemische bilden, daher ist es wichtig, die Luft um den Schweißbereich herum zu reinigen und Schutzgase zu verwenden, um die Bildung von explosiven Gemischen zu verhindern.
- Sicherheitssysteme: Wasserstoffpipelines müssen über eine Reihe von Sicherheitssystemen verfügen, um Unfälle und Leckagen zu vermeiden. Dazu können Überdruckschutz, Lecksuchsysteme und Notabschaltsysteme gehören.
- Genehmigung: Wie bei jedem großen Bauprojekt müssen auch beim Bau einer Wasserstoffpipeline die erforderlichen Genehmigungen und Genehmigungen der zuständigen Regierungsbehörden eingeholt werden.

Insgesamt erfordert der Bau einer Wasserstoffpipeline eine sorgfältige Planung und Liebe zum Detail, um einen sicheren und effizienten Transport von Wasserstoff zu gewährleisten.

Der Transport durch Gaspipelines wird im Falle der Kumulation vieler Produzenten und Kunden an einem Ort realisiert. In der Welt gibt es viele ziemlich große Netze, das wichtigste wahrscheinlich in Deutschland, wo die Gesamtlänge des Netzes 200 km übersteigt. Der Betriebsdruck in diesem Netz beträgt 2,5 MPa, die Transportkapazität des Netzes beträgt 50 Mio. MPa · m³ pro Stunde. Die Pipeline hat einen Durchmesser von 20 cm und ist einen Meter unter der Erde verlegt. Der Betriebsverlust beträgt etwa 1 %. In den USA (Texas) gibt es ein 96 km langes Netz mit ähnlichen Parametern. Zwei weitere kleinere befinden sich zum Beispiel in Frankreich, Großbritannien und anderen Ländern. Weltweit gibt es mehr als 1000 km Wasserstoffpipelines (Šváb, 2006, S. 25-26).



Bild Nr. 5: Wasserstofftransport per Pipeline.

2.6.1 DAS EUROPÄISCHE WASSERSTOFF-RÜCKGRAT

Der European Hydrogen Backbone (EHB) ist ein vorgeschlagenes Infrastrukturprojekt, das darauf abzielt, die Nutzung von Wasserstoff als saubere Energiequelle in Europa zu unterstützen. Es soll ein umfassendes Netzwerk von Wasserstoffproduktions-, Speicher- und Verteilungsanlagen sein, das in der gesamten Europäischen Union (EU) gebaut werden soll. Ziel des European Hydrogen Backbone ist es, die breite Einführung von Wasserstofftechnologien in der EU zu ermöglichen, insbesondere in Sektoren, in denen die Dekarbonisierung mit anderen Technologien schwierig ist.

Es wird erwartet, dass das europäische Wasserstoff-Backbone ein Schlüsselement der Bemühungen der EU sein wird, ihr Energiesystem zu dekarbonisieren und ihre Klima- und Energieziele zu erreichen. Es soll die Entwicklung einer Reihe von Sektoren unterstützen, darunter Verkehr, Industrie und Energieerzeugung.

Die konkreten Details des European Hydrogen Backbone, einschließlich des genauen Standorts der Produktions-, Speicher- und Verteilungsanlagen, stehen noch nicht fest. Die Europäische Kommission hat jedoch eine Reihe von zentralen Herausforderungen identifiziert, die angegangen werden müssen, um das europäische Wasserstoff-Backbone Wirklichkeit werden zu lassen. Zu diesen Herausforderungen gehören:

- Entwicklung kostengünstiger und effizienter Produktionstechnologien: Wasserstoff kann mit einer Vielzahl von Technologien hergestellt werden, darunter Elektrolyse, Dampfmethanreformierung und Biomassevergasung. Allerdings sind diese Technologien derzeit relativ teuer und ineffizient, und es bedarf weiterer Verbesserungen, um die Produktion von Wasserstoff gegenüber anderen Energieträgern wettbewerbsfähig zu machen.
- Aufbau der notwendigen Infrastruktur: Um die flächendeckende Nutzung von Wasserstoff zu unterstützen, braucht es ein flächendeckendes Netz von Produktions-, Speicher- und Verteilungsanlagen. Dies erfordert erhebliche Investitionen in die Infrastruktur, einschließlich Pipelines, Lagertanks und Tankstellen.
- Gewährleistung der Sicherheit und Zuverlässigkeit von Wasserstoffsystemen: Wasserstoff ist ein leicht entzündliches Gas, und es muss darauf geachtet werden, dass Wasserstoffsysteme sicher und zuverlässig sind. Dies erfordert die Entwicklung geeigneter Sicherheitsstandards und die Etablierung robuster Sicherheitsverfahren.
- Überwindung regulatorischer Hindernisse: Die Entwicklung des europäischen Wasserstoff-Backbones erfordert die Koordinierung der Anstrengungen in verschiedenen Ländern und Sektoren. Dies erfordert die Entwicklung eines regulatorischen Rahmens, der der Entwicklung von Wasserstofftechnologien förderlich ist.

Insgesamt handelt es sich bei dem European Hydrogen Backbone um ein ehrgeiziges und komplexes Projekt, das erhebliche Investitionen und Koordination erfordert, um erfolgreich zu sein. Im Erfolgsfall hat sie jedoch das Potenzial, eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung des EU-Energiesystems und der Erreichung ihrer Klima- und Energieziele zu spielen.

Die Gesamtinvestitionskosten des geplanten europäischen Wasserstoff-Backbones für 2040 werden sich voraussichtlich auf 27 bis 64 Mrd. EUR belaufen und die gesamten Investitionskosten für den Bau und die Nachrüstung des Backbones decken. Dem stehen Investitionen in dreistelliger Milliardenhöhe in die Produktion von grünem Wasserstoff gegenüber, die die EU-Wasserstoffstrategie bereits für den Zeitraum bis 2030 vorsieht. Das 22.900 km lange Backbone wird zu 75 % aus nachgerüsteten Pipelines mit Durchmessern zwischen 60 und 120 cm bestehen und eine Transportkapazität von 3 bis 13 GW (LHV) pro Pipeline bieten. Im mittleren Fall werden 60 % der Gesamtinvestitionskosten für Rohrleitungsarbeiten und die restlichen 40 % für Verdichtungsanlagen aufgewendet.

Während 75 % des Gesamtnetzes oder fast 18.000 km aus nachgerüsteter Infrastruktur bestehen werden, macht dies nur etwa 50 % der Gesamtinvestitionen aus, was den Wert der Nutzung bestehender Pipelines zeigt (European Hydrogen Backbone Report, 2020, S. 11).

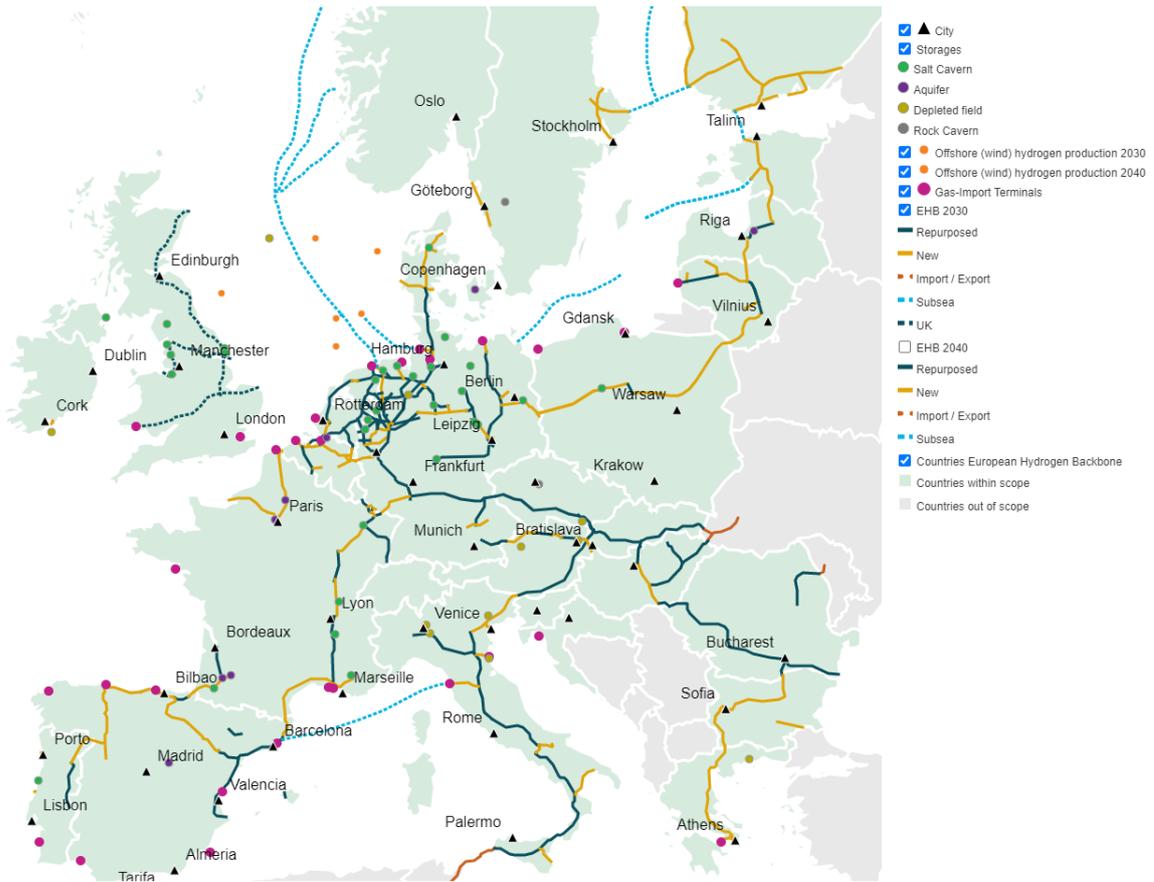


Bild Nr. 6: Das europäische Wasserstoff-Rückgrat 2030.

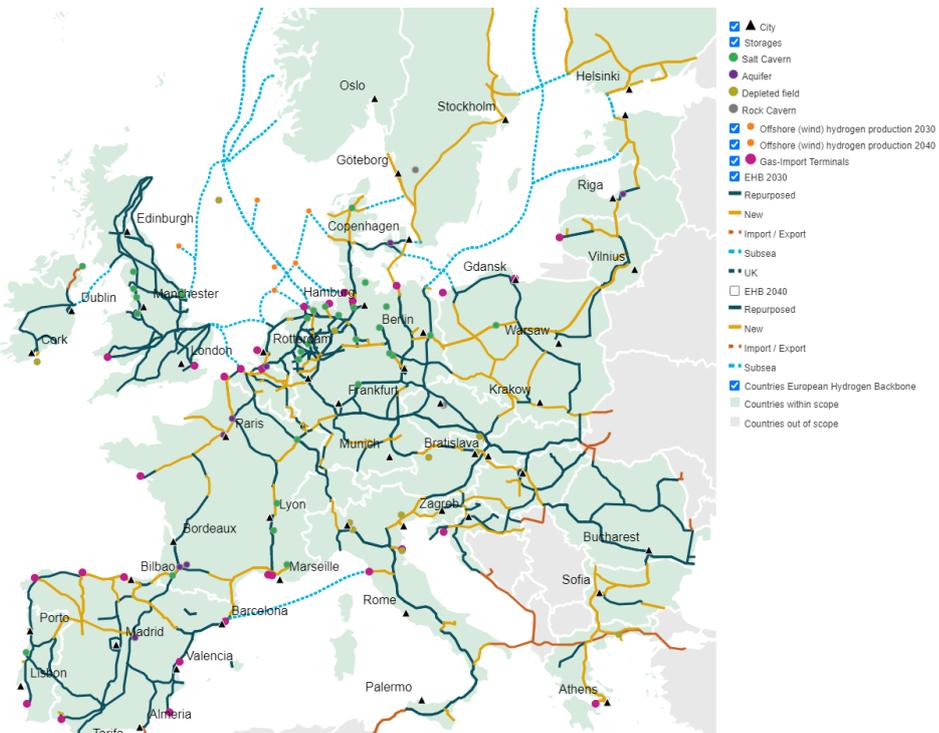


Bild Nr. 7: Das europäische Wasserstoff-Rückgrat 2040.

2.6.2 BEISPIEL FÜR DIE REALISIERUNG EINES NATIONALEN WASSERSTOFFNETZES

HyWay 27: Realisation of a national hydrogen network

The Ministry of Economic Affairs and Climate Policy, together with Gasunie and TenneT carried out the HyWay 27 study. The study concluded that the current natural gas transmission network provides a cost-efficient basis for safe hydrogen transmission. The national hydrogen infrastructure, including connections to storage facilities, is needed to realise the Netherlands' hydrogen ambitions by 2030. This report makes the following recommendations.

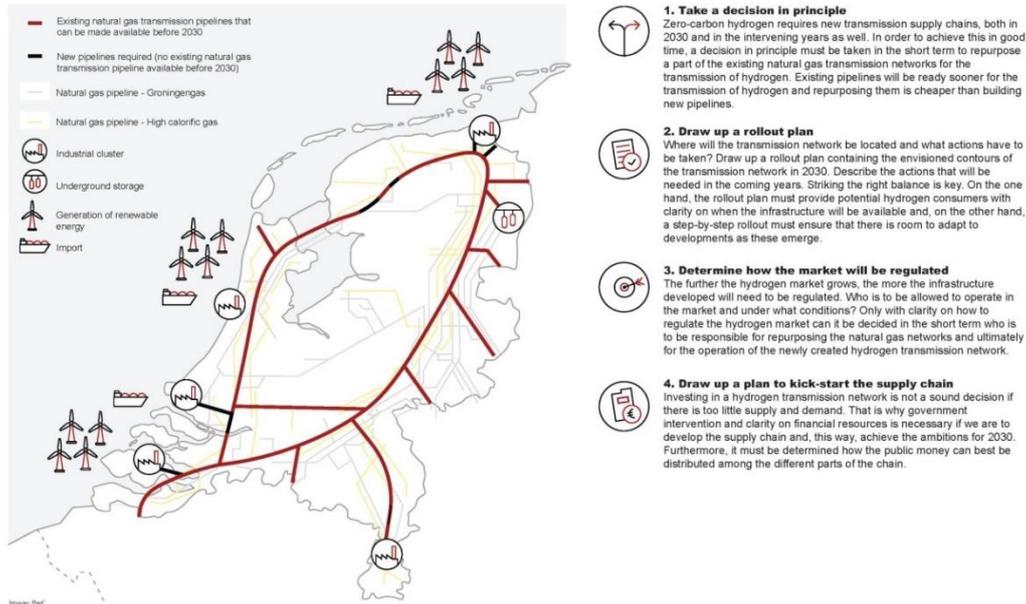


Bild Nr. 8: HyWay 27 Infografiken.

2.7 LOHC

Flüssige organische Wasserstoffträger (LOHC) sind organische Verbindungen, die Wasserstoff durch chemische Reaktionen aufnehmen und wieder abgeben können. Daher kann LOHC als Speichermedium für Wasserstoff verwendet werden. Grundsätzlich kann jede ungesättigte Verbindung (organische Moleküle mit Doppel- oder Dreifachbindungen) bei der Hydrierung Wasserstoff binden.

LOHC sind Materialien, die Wasserstoff in flüssiger Form speichern können, was den Transport und die Verwendung als Kraftstoff erleichtern könnte. Wenn Wasserstoff in einem LOHC gelöst wird, wird er zu einem stabilen und relativ sicheren Speichermaterial. Der Wasserstoff kann durch Erhitzen oder durch Anlegen eines geringen Drucks aus dem LOHC freigesetzt werden.

Es gibt verschiedene Arten von LOHC, die entwickelt wurden, darunter LOHC auf Pyridinbasis, LOHC auf Aminbasis und LOHC auf Alkoholbasis. Diese Materialien haben unterschiedliche Eigenschaften und können für verschiedene Anwendungen mehr oder weniger geeignet sein.

Ein Vorteil von LOHC ist, dass sie Wasserstoff in relativ hoher Dichte speichern können, wodurch es möglich ist, große Mengen Wasserstoff in einem kleinen Volumen zu transportieren. Dies könnte sie für Anwendungen wie Brennstoffzellenfahrzeuge nützlich machen, bei denen der Wasserstoff an Bord des Fahrzeugs gespeichert werden muss.

LOHC sind nach wie vor ein aktives Forschungsgebiet, und es gibt viele Herausforderungen, die angegangen werden müssen, bevor sie breit eingesetzt werden können. So sind beispielsweise weitere Arbeiten erforderlich, um die Effizienz des Lager- und Freigabeprozesses zu verbessern und Materialien zu finden, die über lange Zeiträume stabil und sicher sind.

Im Jahr 2020 baute Japan zwischen Brunei und Kawasaki City die erste internationale Kette von Wasserstofflieferanten der Welt. Dabei kommen LOHC-Technologien auf Toluolbasis zum Einsatz. Hyundai Motor investiert in die Entwicklung von stationären und Bordsystemen LOHC.

2.7.1 BEISPIEL FÜR DEN EINSATZ VON LOHC IN DER PRAXIS

Hydrogenious LOHC-Technologien

Hydrogenious LOHC Technologies ist ein deutsches Unternehmen, das sich auf die Entwicklung von LOHC-Technologie (Liquid Organic Hydrogen Carrier) für die Speicherung und den Transport von Wasserstoff spezialisiert hat. Die LOHC-Technologie des Unternehmens nutzt eine spezielle Klasse organischer Verbindungen, die als Cycloalkane bezeichnet werden, um Wasserstoff in flüssiger Form bei Umgebungstemperaturen und -drücken zu speichern. Der gespeicherte Wasserstoff kann dann einfach transportiert und als Kraftstoffquelle für Fahrzeuge oder in industriellen Prozessen verwendet werden. Die Technologie hat das Potenzial, die Effizienz und Machbarkeit der Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff erheblich zu steigern.



Bild Nr. 9: Stationäre LOHC-Infrastruktur – StoragePLANTS von Hydrogenious.



Bild Nr. 10: Stationäre LOHC-Infrastruktur – ReleasePLANTS von Hydrogenious.

ZUSAMMENFASSUNG

Wasserstoff kann in gasförmiger oder flüssiger Form transportiert werden.

Gasförmiger Wasserstoff: Gasförmiger Wasserstoff kann in Druck- oder Kühltanks auf Spezialschiffen transportiert werden. Diese Tanks sind so konzipiert, dass sie Wasserstoff bei hohem Druck und niedrigen Temperaturen speichern, um das Volumen des Gases zu minimieren. Die Verschiffung von gasförmigem Wasserstoff auf dem Seeweg ist eine relativ neue Entwicklung und derzeit auf kleine Mengen beschränkt.

Flüssiger Wasserstoff: Flüssiger Wasserstoff kann in kryogenen Tanks auf Spezialschiffen transportiert werden. Diese Tanks sind so konzipiert, dass sie Wasserstoff bei Temperaturen unter -253 °C und unter hohem Druck speichern, um ihn in einem flüssigen Zustand zu halten. Der Transport von flüssigem Wasserstoff auf dem Seeweg ist häufiger als der Transport von gasförmigem Wasserstoff, aber aufgrund der hohen Kosten für Spezialschiffe und Umschlaggeräte immer noch relativ begrenzt.

Die Lieferung von Wasserstoff bezieht sich auf den Transport und die Verteilung von Wasserstoff von einem Produktions- oder Lagerstandort zu einem Verwendungs- oder Verkaufsort. Es gibt verschiedene Methoden für die Bereitstellung von Wasserstoff, darunter Pipelines, Tankwagen, Schienen und die Erzeugung vor Ort.

Pipeline: Wasserstoff kann wie Erdgas durch Pipelines transportiert werden, aber die Infrastruktur für Wasserstoffpipelines ist derzeit begrenzt.

Tankwagen: Wasserstoff kann per Tankwagen transportiert werden, entweder in gasförmiger oder flüssiger Form. Wenn Wasserstoff in flüssiger Form transportiert wird, muss er bei einer Temperatur von -253 °C und unter hohem Druck gehalten werden, um flüssig zu bleiben. Dies erfordert spezialisierte Tankwagen und Umschlaggeräte.

Schiene: Wasserstoff kann auch auf der Schiene transportiert werden, entweder in gasförmiger oder flüssiger Form. Der Schienenverkehr wird jedoch aufgrund der hohen Kosten für Spezialwaggons und Handhabungsgeräte nicht häufig für Wasserstoff genutzt.

Vor-Ort-Erzeugung: In einigen Fällen kann Wasserstoff vor Ort am Einsatzort mit Erdgas, Wasserelektrolyse oder anderen Methoden hergestellt werden. Dies kann eine bequeme Option für Benutzer sein, die regelmäßig eine kleine Menge Wasserstoff benötigen und sich in der Nähe einer Erdgasversorgung befinden.

Unabhängig von der Verabreichungsmethode muss mit Wasserstoff vorsichtig umgegangen werden, da er leicht entzündlich ist und bei unsachgemäßer Handhabung gefährlich sein kann.

| Method | Advantages | Disadvantages |
|--|---|---|
| Compressed hydrogen transportation in containers by road or rails | <ul style="list-style-type: none"> - No need to build special infrastructure (pipelines) - Transport capacity can be scaled well to requirements on a small scale | <ul style="list-style-type: none"> - High weight and volume tanks - The pipeline also functions as an accumulator hydrogen storage tank - Small mass transport capacity |
| Liquefied hydrogen transportation in containers by road, rail or ship | <ul style="list-style-type: none"> - No need to build infrastructure (pipelines) - Possibility of transporting larger volumes | <ul style="list-style-type: none"> - Large liquefaction losses - Small mass transport capacity |
| Hydrogen transportation by pipeline with natural gas mixture | <ul style="list-style-type: none"> - Existing natural gas infrastructure (and biogas/bio-methane) - Continuity of supply - Lower costs compared to transport by road/rail - Natural storage capacity | <ul style="list-style-type: none"> - A limited ratio of admixture to a certain percentage - The maximum hydrogen concentration is given by compatibility of the connected end devices (e.g. CNG, boilers, etc.) |
| Separation of hydrogen from the natural gas mixture using membrane gas separation | <ul style="list-style-type: none"> - Use of the existing pipeline network - Relatively cheap technology - Scalable technology | <ul style="list-style-type: none"> - Hydrogen back separation is not 100% - Can only be used on sections without branching - New technology |
| Clean hydrogen transportation through an existing gas pipeline adjusted to clean hydrogen | <ul style="list-style-type: none"> - Means to import large volumes hydrogen - Flexible balancing according to immediate country needs - Active transmission system operator in the latest approaches to decarbonise the EU gas sector - Experience in hydrogen operation in Europe, e.g. Benelux region | <ul style="list-style-type: none"> - Low level of transport experience of pure hydrogen in pipelines in the region Central Europe |
| Pure hydrogen transportation through a new constructed pipeline | <ul style="list-style-type: none"> - Means of importing large volumes of hydrogen - Flexible balancing according to the immediate need in the country - Experience in operating hydrogen pipelines in Europe, e.g. Benelux region - Importing 'cheap' hydrogen from the regions with significantly lower production costs | <ul style="list-style-type: none"> - High investment costs for construction compared to the use of existing infrastructure - Problems with securing rights land rights, EIA, nature protection and landscape |
| Liquid organic hydrogen carriers (LOHC) | <ul style="list-style-type: none"> - Transportation at normal temperature and pressure - Easy liquid handling - High hydrogen content both in terms of both by weight and volume - Great flexibility in terms of what is transported of quantity and distance transported | <ul style="list-style-type: none"> - Hydrogen storage and recovery is expensive - New technology |

Tabelle Nr. 1: Vergleich der Wasserstofftransportmethoden.

FRAGEN ZUR ÜBERPRÜFUNG

1. Was sind die bekannten grundlegenden Methoden für den Wasserstofftransport?
2. Wie hoch ist der übliche Druck in Containern beim Transport von komprimiertem Wasserstoff?
3. Wie hoch ist die Temperatur von flüssigem Wasserstoff?
4. Was ist die typische Konzentration von Wasserstoff beim Transport in Erdgasleitungen?
5. Was ist Membrantrennung?
6. Was wissen Sie über das Projekt "The European Hydrogen Backbone"?
7. Erklären Sie, was das Akronym LOHC bedeutet.

3 WASSERSTOFFSPEICHERUNG

EINLEITUNG

Wasserstoff kann auf verschiedene Arten gespeichert werden, unter anderem als Gas, Flüssigkeit oder in fester Form. Jede Methode hat ihre eigenen Vor- und Nachteile, und welche Methode für eine bestimmte Anwendung am besten geeignet ist, hängt von den spezifischen Anforderungen und Einschränkungen dieser Anwendung ab.

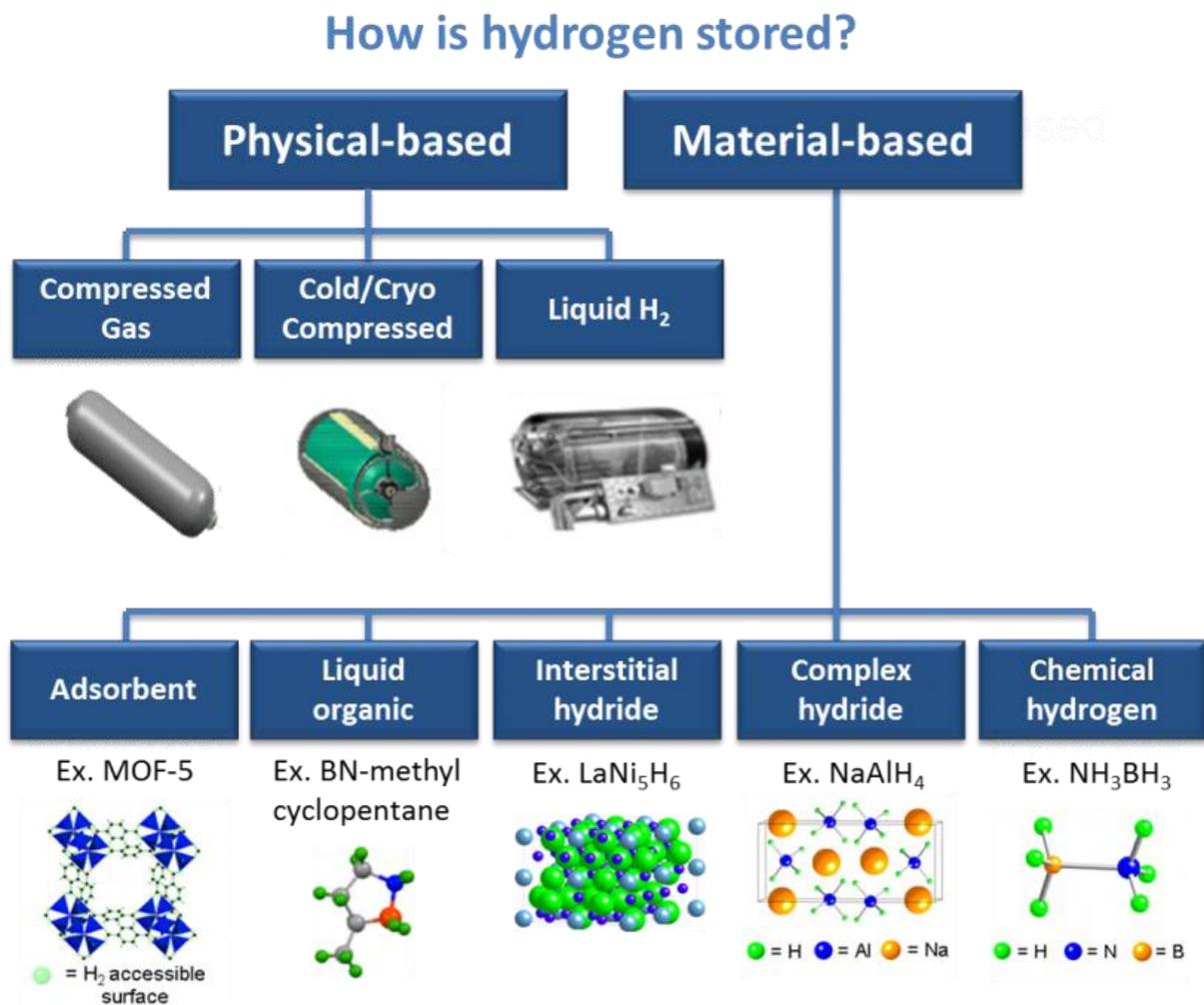


Bild Nr. 11: Wasserstoffspeichermethoden.

Eine Möglichkeit, Wasserstoff zu speichern, ist als Gas, was durch Druckbeaufschlagung in einem Tank oder einer Flasche erfolgen kann. Dies ist eine einfache und relativ kostengünstige Methode, aber die Speicherdichte ist relativ gering, so dass ein großes Volumen erforderlich ist, um eine erhebliche

Menge Wasserstoff zu speichern. Darüber hinaus können Hochdrucktanks schwer sein und können besondere Handhabungs- und Sicherheitsmaßnahmen erfordern.

Eine andere Möglichkeit, Wasserstoff zu speichern, ist die Flüssigkeit, die durch Abkühlen auf eine Temperatur unterhalb seines Siedepunkts erreicht werden kann. Flüssiger Wasserstoff hat eine sehr hohe Speicherdichte, so dass es möglich ist, eine große Menge in einem relativ kleinen Volumen zu speichern. Die kryogenen Temperaturen von flüssigem Wasserstoff (-253 °C) erfordern jedoch den Einsatz spezieller Isolations- und Wärmemanagementsysteme, die teuer sein können.

Wasserstoff kann auch in fester Form gespeichert werden, indem er an die Oberfläche eines porösen Materials adsorbiert wird. Diese Methode hat den Vorteil, dass sie relativ einfach und sicher ist und eine hohe Speicherdichte erreichen kann. Die Geschwindigkeit, mit der Wasserstoff aus dem Speicher material adsorbiert und desorbiert werden kann, kann jedoch langsam sein, was den praktischen Nutzen dieser Methode in einigen Anwendungen einschränken kann.

Es gibt auch andere Methoden der Wasserstoffspeicherung, wie z. B. die chemische Speicherung und die Metallhydridspeicherung. Dabei kommen chemische Verbindungen oder Metalle zum Einsatz, die reversibel mit Wasserstoff zu stabilen Verbindungen reagieren können, die dann gespeichert werden können, bis sie benötigt werden. Diese Methoden können hohe Speicherdichten erreichen und sind relativ sicher, aber sie können durch die Geschwindigkeit, mit der Wasserstoff absorbiert und freigesetzt werden kann, sowie durch die Kosten und die Verfügbarkeit der Speicher materialien begrenzt sein.

SCHLÜSSELWÖRTER

Druckwasserstoff, Druckbehälter, flüssiger Wasserstoff, kryogene Lagertanks, unterirdische Behälter, Gasstrukturen, Wasserstoffhydride, Metallhydride

3.1 SPEICHERUNG VON KOMPRIMIERTEM WASSERSTOFF

Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff ist es notwendig, ihn komprimiert in Drucktanks zu speichern. Sie müssen druck- und zerstörungsfest sein und korrekt anziehen (mit Drehmomentschlüssel festziehen), um ein Auslaufen zu vermeiden. Wasserstoff ist ein Gas mit dem kleinsten Molekül und daher ist es notwendig, spezielle Materialien für seine Speicherung zu verwenden. Wenn Wasserstoff mit jungfräulichem Stahl oder Aluminium in Kontakt kommt, kommt es

zu einer sogenannten Wasserstoffversprödung, die die Haltbarkeit von Druckflaschen verschlechtern kann, was wiederum die Verwendung einiger spezieller Materialien erfordert. Das Pressen von Wasserstoff selbst ist energetisch anspruchsvoll. Wasserstoff ist ein sehr schlecht komprimierbares Gas. Es hat den Joule-Thomson-Koeffizienten umgekehrt, daher wird bei seiner Kompression viel mehr Energie benötigt als bei anderen Gasen. Für die stationäre Speicherung von Wasserstoff werden große Mengen an Stahldruckbehältern oder Verbundwerkstoffen verwendet (Vodíková strategie České republiky, 2021, S. 81).

Der Joule-Thomson-Effekt, auch bekannt als Joule-Kelvin-Effekt, ist die Temperaturänderung eines Gases oder einer Flüssigkeit, wenn es sich ausdehnt oder durch eine kleine Öffnung oder ein poröses Material gedrückt wird. Dieser Effekt ist nach James Joule und William Thomson (Lord Kelvin) benannt.

Der Joule-Thomson-Effekt kann beobachtet werden, wenn sich ein Hochdruckgas durch eine kleine Öffnung oder ein poröses Material ausdehnen kann. Wenn sich das Gas ausdehnt, sinkt seine Temperatur. Dies liegt daran, dass die Ausdehnung des Gases auf die Umgebung wirkt, was Energie erfordert. Die für diese Arbeit benötigte Energie wird der inneren Energie des Gases entzogen, wodurch seine Temperatur sinkt.

Der Joule-Thomson-Koeffizient ist ein Maß für die Temperaturänderung eines Gases oder einer Flüssigkeit bei der Ausdehnung. Der Koeffizient ist für die meisten Gase positiv, was bedeutet, dass die Temperatur des Gases mit zunehmender Ausdehnung abnimmt. Bei Flüssigkeiten kann der Joule-Thomson-Koeffizient je nach den spezifischen Eigenschaften der Flüssigkeit entweder positiv oder negativ sein.

Der Joule-Thomson-Effekt findet praktische Anwendungen in der Kälte- und Klimatechnik sowie in der Öl- und Gasindustrie, wo er zur Messung der Temperatur und des Drucks von Erdgas in verschiedenen Phasen des Produktionsprozesses eingesetzt wird.

Für den stationären Einsatz werden in der Regel nahtlose Stahlzylinder aus kohlenstoffarmem oder legiertem Stahl verwendet. Sie werden in Volumina von einigen Litern bis zu ca. 50 l für gängige Anwendungen hergestellt. Für mobile Anwendungen werden in der Regel einige Druckbehälter aus Verbundwerkstoff verwendet. Sie werden in Volumina von zehn Litern bis zu ca. 300 l hergestellt. Ein typischer Betriebsdruck liegt bei 350 bar, in den neuesten Anwendungen bei 450 – 700 bar. In vielen Anwendungen wird die zylindrische Form je nach Bedarf für den Einbau in den Stauraum eines Fahrzeugs leicht verformt. Will man Wasserstoff in Hochdrucktanks speichern, muss er zunächst mit einem erforderlichen Druck verdichtet werden. Für die Verdichtung von Wasserstoffkolben werden

hauptsächlich Kompressoren eingesetzt. Die Energie, die für die Wasserstoffkompression bei 350 bar erforderlich ist, erreicht etwa 30 % der Energie eines Brennstoffs (Krátky, 2012, S. 37).



Bild Nr. 12: Wasserstoff-Drucktanks.

Die nächste Möglichkeit der Wasserstoffspeicherung in gasförmiger Form besteht darin, ihn in unterirdischen Speichern zu speichern. Es handelt sich in der Regel um einige geförderte Salzminen oder Höhlen mit Erdgas und leeren Gasfeldern. Weltweit wird diese Methode an mehreren Orten angewandt, z.B. in Amarillo in Texas (850 Mio. m³), im französischen Beynes (330 Mio. m³), im englischen Billington (2,2 Mio. m³). Weitere Lagerstätten finden sich z.B. in Deutschland und Holland (Krčák, 2010, S. 20).

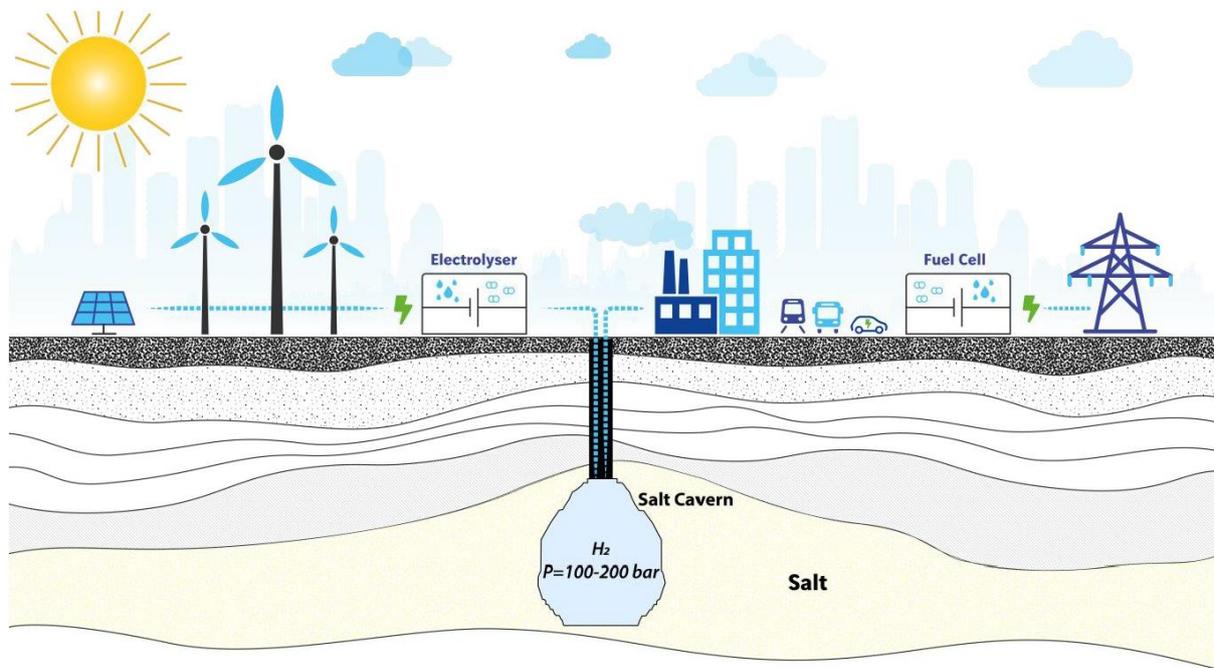


Bild Nr. 13: Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen.

3.2 SPEICHERUNG VON FLÜSSIGEM WASSERSTOFF

Bei der Entwicklung eines Systems zur Speicherung von flüssigem Wasserstoff sind mehrere Schlüsselfaktoren zu berücksichtigen.

Ein wichtiger Faktor ist das Material des Speichers. Der Tank muss in der Lage sein, den extrem niedrigen Temperaturen des flüssigen Wasserstoffs (-253 °C) und dem Druck, der im Tank entsteht, wenn sich das Wasserstoffgas ausdehnt und zusammenzieht, standzuhalten. Edelstahl und Aluminium sind häufig verwendete Materialien für Wasserstoffspeichertanks, müssen jedoch speziell behandelt werden, um sie bei niedrigen Temperaturen korrosions- und rissbeständig zu machen. Der Tank muss auch so konstruiert sein, dass keine Wärme in den Tank eindringt, da dies dazu führen kann, dass der Wasserstoff verdampft und der Druck im Tank erhöht wird. Dies wird in der Regel durch die Verwendung von Isolierungen wie Schaumstoff oder vakuumisolierten Paneelen erreicht.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Größe des Speichers. Der Tank muss groß genug sein, um eine ausreichende Menge Wasserstoff aufzunehmen, um den Anforderungen der Anwendung gerecht zu werden, aber er muss auch klein genug sein, um für den Verwendungszweck praktisch zu sein. Zum Beispiel kann ein zu großer Tank zu schwer sein oder zu viel Platz beanspruchen, während ein zu kleiner Tank möglicherweise nicht genug Wasserstoff aufnehmen kann, um praktisch zu sein.

Schließlich ist es wichtig, die Sicherheit des Speichersystems zu berücksichtigen. Flüssiger Wasserstoff ist ein brennbares Gas, daher ist es wichtig sicherzustellen, dass das Speichersystem so ausgelegt ist, dass es Lecks oder Verschüttungen verhindert, und dass es mit Sicherheitsmerkmalen wie Überdruckventilen und Notabschaltsystemen ausgestattet ist.

Für die Lagerung werden mehrschichtige Behälter mit sehr guten Isolationseigenschaften bei maximalem Überdruck von 5 bar verwendet. Diese Behälter müssen mit einem Druckentlastungsmechanismus ausgestattet sein, der den maximal sicheren Überdruck reguliert. Während der Wasserstoffspeicherung in kryogenen Tanks kommt es zu einer allmählichen Verdampfung, die durch Wärmeübertragung aus der Umgebung verursacht wird, und der Druck im Inneren des Behälters steigt. Um eine Zerstörung des Tanks zu verhindern, muss der zu hohe Druck durch Freisetzung des verdampften Wasserstoffs kontrolliert werden. Bei häufig verwendeten Tanks können die Verluste bis zu 3% des Inhalts pro Tag betragen (abhängig von der Qualität des Tanks). In einigen Anwendungen wird der Abfallwasserstoff zurückgehalten und in zusätzliche Druckzylinder gepresst. Die Verflüssigung ist ein technologisch und energetisch anspruchsvoller Prozess (Krátky, 2012, S. 38).

Die theoretische Mindestenergie zur Verflüssigung von Wasserstoff aus Umgebungsbedingungen (300 K, 1,01 bar) beträgt 3,3 kWh/kg LH₂ oder 3,9 kWh/kg LH₂ mit Umwandlung in para-LH₂ (was in der Praxis üblich ist). Der tatsächliche Verflüssigungsenergiebedarf ist wesentlich höher, typischerweise 10-13 kWh/kg LH₂, abhängig von der Größe des Verflüssigungsvorgangs. Neuartige Verflüssigungsmethoden, wie z. B. ein aktiver magnetischer regenerativer Verflüssiger, können nur 7 kWh/kg LH₂ benötigen. Zum Vergleich: Der untere Heizwert (LHV) von Wasserstoff liegt bei 33,3 kWh/kg_{H₂}. Der Verdichtungsenergiebedarf aus der Produktion vor Ort liegt zwischen ca. 5 und 20 % des Lang-Lkw. Die Verflüssigung (einschließlich der Umwandlung in paraLH₂) mit den heutigen Prozessen erfordert 30 - 40 % des LHV, während der theoretische Energiebedarf für 700 bar und LH₂-Speicher einen Bereich von nur 4-10 % des LHV umfasst (DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, 2009, S. 1)



Bild Nr. 14: Liquid Wasserstofftank.

3.3 WASSERSTOFFSPEICHERUNG IN UNTERIRDISCHEN BEHÄLTERN IM GEMISCH MIT METHAN ODER AMMONIAK

Wasserstoff kann unterirdisch in Behältern in einem Gemisch mit Methan oder Ammoniak gespeichert werden, ein Prozess, der als "Wasserstoffgasinjektion" bekannt ist. Diese Methode wird verwendet, um überschüssigen Wasserstoff, der in Zeiten geringer Nachfrage entsteht, so zu speichern, dass er zurückgewonnen und bei Bedarf als Brennstoff oder Rohstoff verwendet werden kann. Dieser Ansatz bietet mehrere Vorteile:

- Sicherheit: Die Wasserstoffgasinjektion ermöglicht die unterirdische Speicherung von Wasserstoff in einer kontrollierten Umgebung, wodurch das Risiko von Leckagen und Unfällen verringert wird.
- Effizienz: Wasserstoff kann in hoher Dichte gespeichert werden, wenn er mit Methan oder Ammoniak gemischt wird, wodurch mehr Wasserstoff in einem kleineren Volumen gespeichert werden kann.
- Nachhaltigkeit: Die Wasserstoffgasinjektion kann dazu beitragen, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren, indem überschüssiger Wasserstoff gespeichert und als Kraftstoff verwendet werden kann, anstatt in die Atmosphäre freigesetzt zu werden.

Bei der Umsetzung der Wasserstoffgaseinspeicherung gibt es mehrere Herausforderungen, darunter die Notwendigkeit, geeignete Speicherbehälter zu entwickeln, und die Kosten für den Bau und Betrieb der

Speicheranlagen. Dieser Ansatz hat jedoch das Potenzial, eine bedeutende Rolle in der Zukunft der Wasserstoffspeicherung und -verteilung zu spielen.

Bei der Wasserstoffgasinjektion wird überschüssiger Wasserstoff in unterirdischen Behältern in einem Gemisch mit Methan oder Ammoniak gespeichert, ein Prozess, der dazu beitragen kann, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und die Effizienz der Wasserstoffspeicherung zu verbessern. Hier ist eine detailliertere Erklärung, wie dieser Prozess funktioniert:

- Wasserstoff wird durch eine Vielzahl von Methoden hergestellt, darunter Elektrolyse, Dampfmethanreformierung und Biomassevergasung. In Zeiten geringer Nachfrage entsteht überschüssiger Wasserstoff, der so lange gespeichert werden muss, bis er benötigt wird.
- Der Wasserstoff wird in unterirdische Speicherbehälter injiziert, wo er mit Methan oder Ammoniak vermischt wird. Das Methan oder Ammoniak trägt dazu bei, die Dichte des Gemisches zu erhöhen, so dass mehr Wasserstoff in einem kleineren Volumen gespeichert werden kann.
- Das Wasserstoff-Methan-Gemisch wird unterirdisch gelagert, typischerweise in einer Tiefe von mehreren hundert Metern. Die Lagerbehälter sind so ausgelegt, dass sie den Druck- und Temperaturverhältnissen in dieser Tiefe standhalten.
- Wenn der Wasserstoff benötigt wird, wird er aus den Lagerbehältern zurückgewonnen und vom Methan oder Ammoniak getrennt. Dies kann durch eine Vielzahl von Methoden erfolgen, einschließlich Druckwechseladsorption und kryogener Destillation.
- Der gereinigte Wasserstoff kann dann als Kraftstoff oder Rohstoff in einer Vielzahl von Anwendungen verwendet werden, darunter Transport, Stromerzeugung und industrielle Prozesse.

3.4 WASSERSTOFFSPEICHERUNG IN HYDRIDEN

Wasserstoff kann in Hydriden gespeichert werden, bei denen es sich um Materialien handelt, die Wasserstoffgas aufnehmen und wieder abgeben können. Es gibt verschiedene Arten von Hydriden, darunter Metallhydride, kovalente Hydride und ionische Hydride.

Metallhydride entstehen, wenn Wasserstoffgas mit einem Metall zu einer festen Verbindung reagiert. Diese Verbindungen haben eine hohe Kapazität zur Wasserstoffspeicherung, sind aber in der Regel schwer und sperrig und erfordern hohe Drücke, um den Wasserstoff freizusetzen.

Kovalente Hydride entstehen, wenn Wasserstoffatome kovalent mit anderen Atomen zu einer Verbindung verbinden. Diese Verbindungen haben eine mäßige Kapazität zur Wasserstoffspeicherung und können bei niedrigeren Drücken freigesetzt werden als Metallhydride.

Ionische Hydride entstehen, wenn sich Wasserstoffionen mit anderen Ionen zu einer Verbindung verbinden. Diese Verbindungen haben eine hohe Kapazität zur Wasserstoffspeicherung, sind aber in der Regel nicht so stabil wie metallische oder kovalente Hydride und neigen dazu, sich bei hohen Temperaturen zu zersetzen.

Die Verwendung von Hydriden für die Wasserstoffspeicherung birgt mehrere Herausforderungen, darunter die Kosten und Schwierigkeiten bei der Herstellung und Handhabung der Hydride sowie die geringe Effizienz des Wasserstofffreisetzungprozesses. Die Forschenden arbeiten daran, neue Materialien und Methoden zu entwickeln, um diese Herausforderungen zu meistern und die Speicherung von Wasserstoff in Hydriden praktikabler und kostengünstiger zu machen.

Bei normaler Temperatur sind Hydride stabil, lösen sich nicht auf und sind relativ sichere Wasserstofftanks. Ihr Zerfall erfolgt bei hohen Temperaturen, dabei wird Wasserstoff freigesetzt und zu einer Brennstoffzelle gebracht.

Die bei diesen Systemen beobachteten Parameter sind hauptsächlich die Temperatur, bei der die Desorption von Wasserstoff aus einem Material stattfindet, die Gewichtskapazität des Absorbers (im Falle des gesamten Systems), die Volumenkapazität des Absorbers und nicht zuletzt der Preis und die Systemkomplexität.

Eine der Anforderungen besteht darin, die Zersetzung bei etwas höheren Temperaturen (150 - 200 °C) durchzuführen, um durch Hydriderwärmung keine übermäßige Energiemenge zu verbrauchen.

Es wurden effiziente Systeme entwickelt, die in der Lage sind, große Mengen an Wasserstoff aufzunehmen. Bei verschiedenen Arten von Hydriden gibt es unterschiedliche Mengen an Wasserstoff, die die Materialien aufnehmen können. Einige Hydride sind bei Raumtemperatur und atmosphärischem Druck leicht zu verarbeitende Flüssigkeiten, andere sind feste Substanzen.

Diese Materialien haben eine gute volumetrische Energiedichte, aber in Bezug auf ihr Gewicht ist ihre Energiedichte nicht ideal. Bei einigen Verbindungen mit Leichtmetallen, wie z.B. Magnesium, ist das Gesamtgewicht des Systems jedoch nur um 30 % höher als bei den Systemen zur Speicherung von Flüssigwasserstoff. Diese ungünstigen Parameter werden durch einen höheren Bedarf an thermischer Desorption, hohe Temperatur, niedrigen Druck des erzeugten Wasserstoffs und nicht zuletzt durch einen hohen Preis für Hydride kompensiert.

Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die Reversibilität, d. h. die Fähigkeit eines Materials, neuen Wasserstoff wieder aufzunehmen, nachdem der gespeicherte Wasserstoff verbraucht wurde. Dies hängt mit dem "Aufladen" von Hydriden und ihrer wiederholten Verwendung zusammen, ähnlich wie bei Batterien (Krátky, 2012, S. 41).

3.4.1 METALLHYDRIDE

Wasserstoff kann in Metallhydriden gespeichert werden, bei denen es sich um Verbindungen handelt, die zwischen Wasserstoff und einem Metall gebildet werden. Der Wasserstoff wird im Metallgitter gespeichert und kann durch einen Prozess namens Dehydrierung freigesetzt werden, bei dem das Metallhydrid auf eine hohe Temperatur erhitzt wird. Es gibt verschiedene Arten von Metallhydriden, die für die Wasserstoffspeicherung verwendet werden können, darunter intermetallische Verbindungen, komplexe Metallhydride und einfache Metallhydride.

Intermetallische Verbindungen werden zwischen zwei oder mehr Metallen gebildet und können eine große Menge Wasserstoff in ihrem Gitter speichern. Sie sind in der Regel stabil und können zur langfristigen Wasserstoffspeicherung genutzt werden. Sie erfordern jedoch oft hohe Drücke oder hohe Temperaturen, um den Wasserstoff freizusetzen, was in praktischen Anwendungen schwierig zu erreichen sein kann.

Komplexe Metallhydride werden zwischen einem Metall und einem Nichtmetall gebildet und können eine moderate Menge Wasserstoff in ihrem Gitter speichern. Sie neigen dazu, den Wasserstoff bei niedrigeren Temperaturen freizusetzen als intermetallische Verbindungen, aber sie sind nicht so stabil und können sich mit der Zeit zersetzen.

Einfache Metallhydride wie Magnesiumhydrid können eine kleine Menge Wasserstoff in ihrem Gitter speichern und bei niedrigen Temperaturen wieder abgeben. Sie sind jedoch nicht so stabil wie intermetallische Verbindungen und neigen dazu, sich mit der Zeit zu zersetzen.

Insgesamt sind Metallhydride aufgrund ihrer hohen Wasserstoffspeicherkapazität und der Fähigkeit, den Wasserstoff bei relativ niedrigen Temperaturen freizusetzen, eine vielversprechende Option für die Wasserstoffspeicherung. Es sind jedoch weitere Forschungen erforderlich, um ihre Stabilität zu verbessern und die Herstellungskosten zu senken.

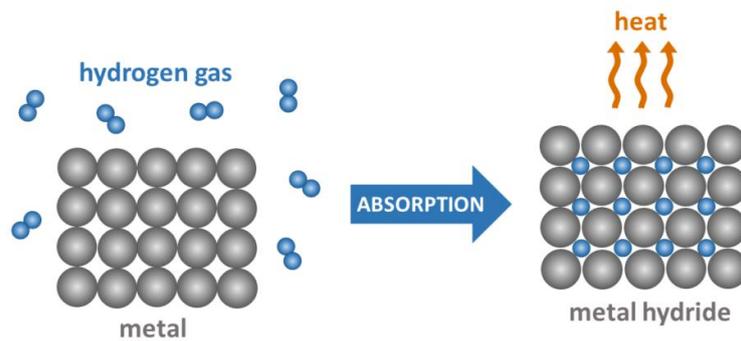


Bild Nr. 15: Exotherme Wasserstoffabsorptionsreaktion.

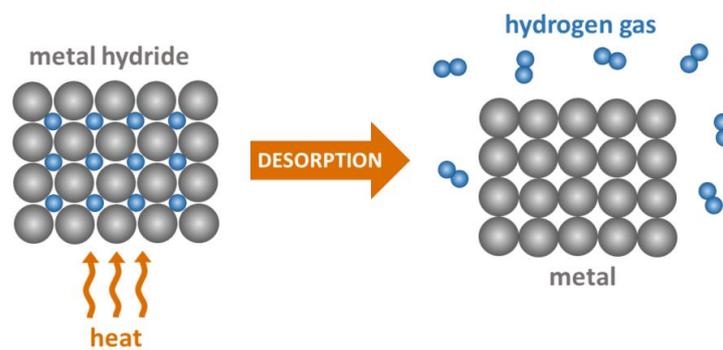


Bild Nr. 16: Wasserstoff-Desorptionsreaktion aus Metalhydrid.

3.5 WASSERSTOFFSPEICHERUNG IN KOHLENSTOFFBASIERTE BEHÄLTERN

Kohlenstoffmaterialien wie Graphen und Kohlenstoffnanoröhren wurden als Mittel zur Speicherung von Wasserstoff untersucht. Diese Materialien haben eine große Oberfläche und können Wasserstoffgas physikalisch absorbieren, so dass sie große Mengen Wasserstoff in einem kleinen Volumen speichern können. Die Wasserstoffspeicherkapazität dieser Materialien ist jedoch durch ihre Oberfläche und Porengröße begrenzt und sie können jeweils nur geringe Mengen Wasserstoff speichern. Darüber hinaus kann der Prozess der Aufnahme und Freisetzung von Wasserstoff aus diesen Materialien langsam sein, was sie für den Einsatz in Wasserstoffspeicheranwendungen weniger praktisch macht.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie Wasserstoff in Kohlenstoffmaterialien gespeichert werden kann, einschließlich physikalischer Adsorption, chemischer Adsorption und chemischer Reaktion.

Physikalische Adsorption tritt auf, wenn Wasserstoffmoleküle aufgrund von Van-der-Waals-Kräften an die Oberfläche des Kohlenstoffmaterials gezogen werden. Diese Art der Wasserstoffspeicherung ist reversibel, d.h. der Wasserstoff kann durch Druckreduzierung oder Temperaturerhöhung leicht aus dem Material gelöst werden. Die physikalische Adsorption kann verwendet werden, um Wasserstoff bei hohen Drücken (bis zu etwa 35 MPa) und bei Raumtemperatur zu speichern, aber die Speicherkapazität ist durch die Oberfläche des Materials begrenzt.

Van-der-Waals-Kräfte sind schwache Anziehungskräfte, die zwischen neutralen Atomen und Molekülen entstehen. Sie sind eine Art nicht-kovalenter Wechselwirkung und werden durch vorübergehende Fluktuationen der Elektronendichte verursacht. Die drei Arten von Van-der-Waals-Kräften sind die Londoner Dispersionskräfte, die Dipol-Dipol-Wechselwirkung und die Quadrupol-Quadrupol-Wechselwirkung. Diese Kräfte sind für das Verhalten von Gasen und Flüssigkeiten verantwortlich und spielen auch eine Rolle bei der Stabilität von Biomolekülen und der Kristallbildung.

Bei der chemischen Adsorption wird eine chemische Bindung zwischen dem Wasserstoff und dem Kohlenstoffmaterial hergestellt. Diese Art der Wasserstoffspeicherung ist ebenfalls reversibel, aber die Bindung ist stärker als die Van-der-Waals-Kräfte, die an der physikalischen Adsorption beteiligt sind, so dass mehr Energie benötigt wird, um den Wasserstoff freizusetzen. Die chemische Adsorption kann verwendet werden, um Wasserstoff bei niedrigeren Drücken (unter 10 MPa) und bei niedrigeren Temperaturen zu speichern.

Bei der chemischen Reaktion wird eine neue Verbindung gebildet, indem Wasserstoff mit dem Kohlenstoffmaterial reagiert. Diese Art der Wasserstoffspeicherung ist nicht reversibel und der Wasserstoff kann nicht ohne weiteres aus dem Material gelöst werden. Durch chemische Reaktionen können jedoch große Mengen Wasserstoff in einem kleinen Volumen gespeichert werden.

Insgesamt haben Kohlenstoffmaterialien mehrere attraktive Eigenschaften für die Wasserstoffspeicherung, darunter eine große Oberfläche, eine hohe Festigkeit und ein geringes Gewicht. Die Speicherkapazität dieser Materialien ist jedoch begrenzt und der Prozess der Aufnahme und Freisetzung von Wasserstoff kann langsam sein, was sie für den Einsatz in vielen Wasserstoffspeicheranwendungen weniger praktisch macht.

Zu den Kohlenstoff-Nanostrukturen gehören hochporöser Graphit und Kohlenstoff-Nanoröhren. In jüngster Zeit hat sich die Aufmerksamkeit auf die Untersuchung von einwandigen Nanoröhren

konzentriert, die ein großes Potenzial für die Wasserstoffspeicherung haben. Viele Forschungsteams auf der ganzen Welt arbeiten an diesem Thema.

Das elementare Bauelement von Nanoröhren ist Graphit. Nanoröhren bestehen aus einer oder mehreren Schichten, die in das Röhrchen einer Endlänge eingewickelt sind. Der Durchmesser der Röhren beträgt 0,7 – 3 nm (Krček, 2010, S. 22).

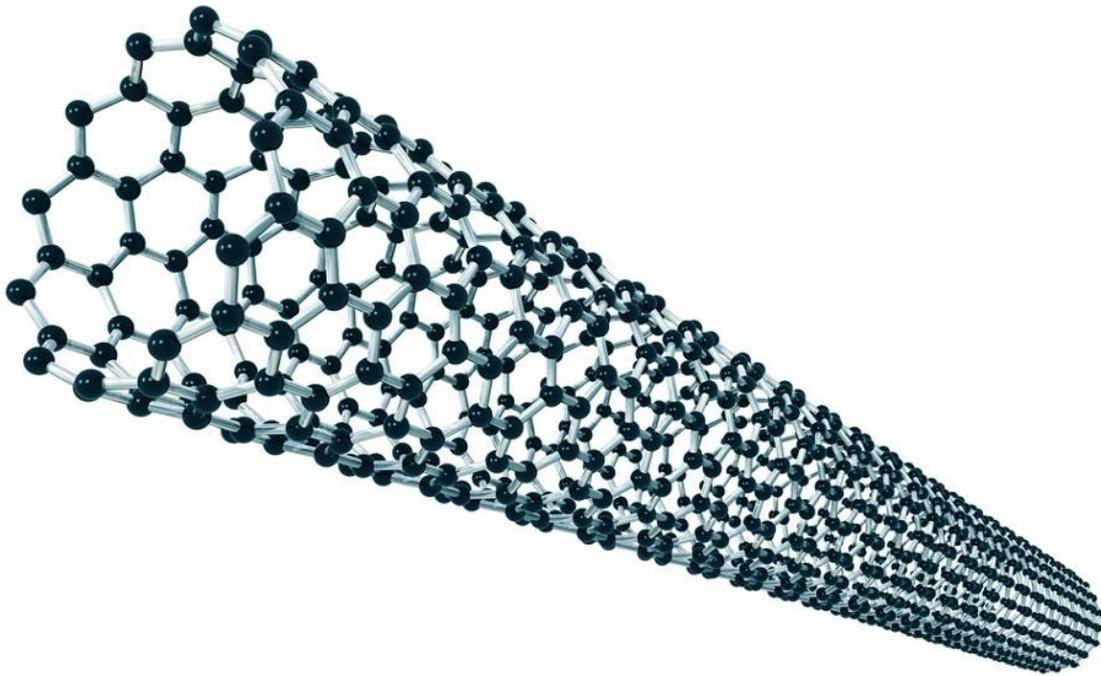


Bild Nr. 17: Kohlenstoff-Nanoröhren.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Speicherung von komprimiertem Wasserstoff bezieht sich auf die Speicherung von Wasserstoffgas bei hohen Drücken, um das Volumen, das es einnimmt, zu reduzieren. Dies kann auf verschiedene Arten geschehen, einschließlich der Verwendung von Hochdrucktanks oder -zylindern.

Die Speicherung von komprimiertem Wasserstoff besteht darin, dass sie die Speicherung einer relativ großen Menge Wasserstoff auf relativ kleinem Raum ermöglicht. Dies macht es zu einer attraktiven Option für den Einsatz in Fahrzeugen und anderen Anwendungen, bei denen der Platz knapp ist. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die hohen Drücke, die für die Speicherung von komprimiertem Wasserstoff erforderlich sind, Sicherheitsrisiken darstellen können, und die Tanks und Flaschen, die

zur Speicherung des Gases verwendet werden, müssen sorgfältig ausgelegt und gewartet werden, um diese Risiken zu minimieren.

Die Speicherung von flüssigem Wasserstoff bezieht sich auf die Speicherung von Wasserstoff in flüssiger Form und nicht als Gas oder Feststoff. Um Wasserstoff in flüssiger Form zu speichern, muss er auf eine Temperatur von etwa -253 °C abgekühlt werden, die deutlich unter seinem Siedepunkt liegt.

Die Speicherung von flüssigem Wasserstoff ermöglicht die Speicherung einer sehr großen Menge Wasserstoff in einem relativ kleinen Volumen. Dies macht es zu einer attraktiven Option für den Einsatz in einer Vielzahl von Anwendungen, einschließlich der Raumfahrt, bei denen Gewicht und Volumen eine entscheidende Rolle spielen.

Die niedrige Temperatur, die für die Speicherung von flüssigem Wasserstoff erforderlich ist, erschwert die Handhabung und den Transport und erfordert spezielle Ausrüstung und Isolierung, um Wärmeübertragung und Verdampfung zu verhindern. Darüber hinaus kann die niedrige Temperatur von flüssigem Wasserstoff dazu führen, dass er anfällig für die Versprödung bestimmter Materialien ist, was zu Problemen mit Tanks und anderen Lagerbehältern führen kann.

Es ist möglich, Wasserstoff in unterirdischen Behältern in einem Gemisch mit Methan oder Ammoniak zu speichern, was als "Wasserstoffbeimischung" bezeichnet wird. Dieser Ansatz kann potenziell genutzt werden, um überschüssigen Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energiequellen wie Wind- oder Solarenergie hergestellt wird, zu speichern und dann mit Erdgas als Kraftstoff zu mischen.

Wasserstoffbeimischung bedeutet, dass Wasserstoff über bestehende Infrastrukturen, wie z. B. Erdgaspipelines, gespeichert und transportiert werden kann. Dies kann kostengünstiger und logistisch einfacher sein als der Aufbau einer neuen Infrastruktur speziell für die Speicherung und den Transport von Wasserstoff.

Eines der Hauptprobleme ist, dass Wasserstoff und Methan oder Ammoniak unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften haben, was es schwierig machen kann, sie auf sichere und wirksame Weise miteinander zu mischen. Darüber hinaus ist Wasserstoff in der Herstellung teurer als Methan, so dass die Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffbeimischung möglicherweise nicht immer günstig ist.

Die Wasserstoffspeicherung in Hydriden bezieht sich auf die Verwendung von Materialien, die große Mengen Wasserstoff aufnehmen und abgeben können, sogenannte "Hydride", um Wasserstoff zu

speichern. Es gibt verschiedene Arten von Hydriden, die für die Wasserstoffspeicherung verwendet werden können, darunter Metallhydride, chemische Hydride und komplexe Hydride.

Der Hauptvorteil der Wasserstoffspeicherung in Hydriden besteht darin, dass Wasserstoff in einer relativ kompakten und leichten Form gespeichert werden kann. Dies macht es zu einer attraktiven Option für den Einsatz in einer Vielzahl von Anwendungen, wie z. B. tragbaren elektronischen Geräten und Brennstoffzellenfahrzeugen.

Hydride haben eine relativ geringe Kapazität zur Wasserstoffspeicherung, was bedeutet, dass ein großes Volumen des Materials benötigt wird, um eine praktikable Menge Wasserstoff zu speichern. Darüber hinaus ist der Prozess der Aufnahme und Freisetzung von Wasserstoff aus Hydriden oft langsam und erfordert den Einsatz von Wärme, was energieintensiv und ineffizient sein kann.

Die Wasserstoffspeicherung in kohlenstoffbasierten Behältern bezieht sich auf die Verwendung von Materialien aus Kohlenstoff, wie Kohlenstoffnanoröhren oder Graphen, als Möglichkeit zur Speicherung von Wasserstoff. Diese Materialien sind bekannt für ihre große Oberfläche und ihre starken chemischen Bindungen, die sie in die Lage versetzen, große Mengen Wasserstoff zu adsorbieren und zu speichern.

Einer der Hauptvorteile der Wasserstoffspeicherung in kohlenstoffbasierten Behältern besteht darin, dass sie eine hohe Kapazität für die Wasserstoffspeicherung haben, was bedeutet, dass ein relativ kleines Volumen des Materials benötigt wird, um eine praktische Menge Wasserstoff zu speichern. Darüber hinaus sind kohlenstoffbasierte Materialien relativ leicht und stabil, wodurch sie für den Einsatz in einer Vielzahl von Anwendungen geeignet sind.

| Method | Advantages | Disadvantages |
|--|---|---|
| Compressed hydrogen storage | <ul style="list-style-type: none"> - Compared to batteries, an increasingly convenient form of energy storage for longer periods - Long-term experience | <ul style="list-style-type: none"> - Losses (leakages) - Hydrogen compression is energy intensive - Technologically no longer practically possible further improvements - Restriction of routes according to ADR conditions |
| Liquid hydrogen storage | <ul style="list-style-type: none"> - Higher energy concentration than for compressed hydrogen - Can be handled at low pressure - Good energy content ratio to the weight of the container | <ul style="list-style-type: none"> - Losses (leakages) - Liquefaction of hydrogen is energetically intensive - Cryogenic storage vessels and transport are very expensive |
| Hydrogen storage in underground containers in a mixture with methane or ammonia | <ul style="list-style-type: none"> - High-capacity storage - Existing storage infrastructure - Connection to the gas system - Experience with hydrogen storage as a component of luminescent gas | <ul style="list-style-type: none"> - Storage of a higher proportion of hydrogen is needs to be technically verified and may vary from tank to tank - Losses (leakages) from storage of higher concentrations of hydrogen mixed with methane or hydrogen alone |
| Hydrogen storage in hydrides | <ul style="list-style-type: none"> - Transportation at normal temperature and pressure - Easy handling of solids - High hydrogen content both in terms by weight and volume - Great flexibility in terms of quantity transported and distance transported | <ul style="list-style-type: none"> - New technology |
| Hydrogen storage in carbon-based containers | <ul style="list-style-type: none"> - Very lightweight material - High strength-to-weight ratio - Chemically and thermally stable | <ul style="list-style-type: none"> - Carbon materials are not completely impermeable to hydrogen - Degrade over time - More expensive and technically difficult to manufacture |

Tabelle Nr. 2: Vergleich der Wasserstoffspeichermethoden.

FRAGEN ZUR ÜBERPRÜFUNG

1. Erklären Sie den Joule-Thomson-Effekt.
2. Wie hoch ist der typische Druck in Hochdruck-Wasserstoffspeichertanks?
3. Mit welchem Mechanismus müssen Tanks ausgestattet sein, um flüssigen Wasserstoff zu speichern?
4. Beschreiben Sie die Vorteile der Speicherung von Wasserstoff in unterirdischen Speichern gemischt mit Methan oder Ammoniak.
5. Welche Arten von Hydrid eignen sich für die Wasserstoffspeicherung?
6. Welche Kohlenstoffmaterialien eignen sich für die Wasserstoffspeicherung?

4 KOMPONENTEN

EINLEITUNG

Es gibt mehrere Möglichkeiten, Wasserstoff zu speichern, abhängig von der Art und den gewünschten Druck- und Temperaturverhältnissen. Einige gängige Komponenten für die Speicherung von Wasserstoff sind:

- Druckwasserstoffflaschen: Hierbei handelt es sich um Hochdruckbehälter aus Stahl, Aluminium oder Verbundwerkstoffen. Sie werden verwendet, um Wasserstoff zu speichern, der sich in einem komprimierten flüssigen oder gasförmigen Zustand befindet.
- Kryotanks: Diese Tanks werden zur Lagerung von Gasen verwendet, die sich in einem kryogenen Zustand (sehr niedrige Temperatur) befinden, wie z. B. flüssiger Wasserstoff oder flüssiger Sauerstoff.
- Hochdruckspeicher: Hierbei handelt es sich um große Tanks, die zur Speicherung von Gasen mit hohem Druck verwendet werden. Sie können aus Stahl, Aluminium oder anderen Materialien bestehen und werden typischerweise zur Speicherung von Wasserstoff im gasförmigen Zustand verwendet.
- Pipeline-Speicherung: Wasserstoff kann auch in Pipelines gespeichert werden, mit denen das Gas von einem Ort zum anderen transportiert wird. Diese Pipelines sind in der Regel unterirdisch vergraben und können zur Speicherung von Gasen über lange Zeiträume verwendet werden.

Es ist wichtig, bei der Lagerung von Wasserstoff die richtigen Sicherheitsverfahren und -vorschriften zu befolgen, um das Risiko von Unfällen oder Freisetzungen zu minimieren.

SCHLÜSSELWÖRTER

Verdichtete Zylinder, Kryotanks, Hochdrucklagertanks, Reservebehälter

4.1 DRUCKBEHÄLTER

Wasserstoffdrucktanks sind Behälter, die für die Lagerung von Wasserstoffgas unter hohem Druck ausgelegt sind. Sie bestehen oft aus Verbundwerkstoffen wie Kohlefaser oder Glasfaser, die leicht und stark genug sind, um dem Druck des Gases im Tank standzuhalten.

Wasserstoffgas wird in Drucktanks gespeichert, um die Gasmenge zu erhöhen, die in einem bestimmten Volumen gespeichert werden kann. Wenn Wasserstoff unter hohem Druck gespeichert wird, erhöht sich seine Energiedichte, wodurch er viel weniger Platz beansprucht. Dadurch ist es möglich, große Mengen Wasserstoff in einem relativ kleinen Tank zu speichern, was ihn zu einer attraktiven Option für den Einsatz in Brennstoffzellenfahrzeugen und anderen Anwendungen mit begrenztem Platzangebot macht.

Es gibt verschiedene Arten von Wasserstoffdrucktanks, darunter solche, die zum Nachfüllen ausgelegt sind, und solche, die nach dem Entleeren entsorgt werden können. Einige Tanks sind auch für die Kombination mit anderen Arten von Speichersystemen ausgelegt, wie z. B. Kryotanks, die zur Speicherung von Wasserstoff in flüssiger Form bei sehr niedrigen Temperaturen verwendet werden.

Um die Sicherheit des Gases im Tank zu gewährleisten, sind Wasserstoffdrucktanks mit verschiedenen Sicherheitsmerkmalen wie Überdruckventilen und Berstscheiben ausgestattet. Diese Eigenschaften tragen dazu bei, dass der Tank im Falle einer Überdrucksituation nicht reißt oder platzt.

Insgesamt sind Wasserstoffdrucktanks ein wichtiger Teil der Infrastruktur, die für die Speicherung und den Transport von Wasserstoffgas benötigt wird, und sie spielen eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung und dem Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellentechnologien.

Druckbehälter können sowohl zur stationären Speicherung als auch zur mobilen Wasserstoffspeicherung eingesetzt werden. Für statische Anwendungen werden in der Regel nahtlose Stahlzylinder aus kohlenstoffarmem oder legiertem Stahl verwendet. Sie werden je nach geplantem Verwendungszweck in unterschiedlichsten Mengen produziert.

Bei mobilen Anwendungen werden in der Regel Druckbehälter aus Verbundwerkstoffen verwendet. Sie werden in Volumina von zehn Litern bis zu etwa 300 l hergestellt. Ein typischer Betriebsdruck beträgt 350 bar, in den neuesten Anwendungen von 450 bis 700 bar (temporäre technologische Grenze liegt bei 1000 bar).

Die 12 Meter langen Zylinder mit einem Außendurchmesser von ca. 80 cm können als Tanks für Tankstellen von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen oder als Tanks für Energieüberschuss aus erneuerbaren Energien verwendet werden (Vodíková strategie České republiky, 2021, S. 111).

Die Tatsache, dass es sich um eine geprüfte Technologie handelt, die verifiziert ist und alle steigenden Anforderungen an die Wasserstoffspeicherung erfüllt, wird als Vorteil angesehen. Es eignet sich für die Lagerung von geringen Mengen in unregelmäßigen Vorräten. Mit der Entwicklung von Wasserstofftechnologien werden sich die Bedingungen für die Wasserstoffspeicherung dramatisch verbessern. Es bleibt die Frage, ob die derzeitige Entwicklung der Technologien nicht zu einem Rückgang des Speicherbedarfs und des Hochdruckwasserstofftransports führen wird. Ein Nachteil von Druckbehältern können ihre Sicherheitsaspekte und technologischen Grenzen sein, wie z. B. Druck, Material oder Volumen von Druckzylindern (Vodíková strategie České republiky, 2021, S. 111-112).



Bild Nr. 18: Druckbehälter aus Verbundwerkstoff.

4.2 KRYO-TANKS

Kryotanks sind speziell konstruierte Lagerbehälter, die zur Lagerung von Materialien bei extrem niedrigen Temperaturen verwendet werden. Sie werden verwendet, um eine Vielzahl von Materialien zu speichern, darunter Gase wie Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff sowie biologische Materialien wie menschliche Zellen und Gewebe.

Kryotanks bestehen aus Materialien, die diesen extrem niedrigen Temperaturen standhalten können, wie z. B. Edelstahl oder Aluminium. Sie sind auch stark isoliert, um die Kälte drinnen und die Hitze draußen zu halten.

Es gibt zwei Haupttypen von Kryotanks: stationäre Tanks und tragbare Tanks. Stationäre Tanks werden zur Lagerung großer Materialmengen verwendet und werden in der Regel an einem festen Ort installiert, während tragbare Tanks zur Lagerung kleinerer Mengen verwendet werden und von einem Ort zum anderen bewegt werden können.

Kryotanks werden in einer Vielzahl von Branchen eingesetzt, darunter die Medizin-, Chemie- und Energieindustrie. Sie sind ein wichtiges Werkzeug für die Lagerung und den Transport von Materialien bei extrem niedrigen Temperaturen und spielen in vielen wissenschaftlichen und technologischen Anwendungen eine wichtige Rolle.

Kryotanks können verwendet werden, um Wasserstoff in flüssiger Form bei einer Temperatur von -253 °C zu speichern. Dies ist eine der effizientesten Möglichkeiten, Wasserstoff zu speichern, da es eine viel dichtere Speicherung des Gases ermöglicht.

Die Speicherung von Wasserstoff in einem kryogenen Tank erfordert jedoch eine spezielle Ausrüstung und eine sorgfältige Handhabung, da die extrem niedrige Temperatur gefährlich sein kann. Der Tank muss stark isoliert sein, um den Wasserstoff kalt zu halten und zu verhindern, dass er sich erwärmt und verdampft. Darüber hinaus muss der Tank mit Sicherheitsmerkmalen wie Überdruckventilen ausgestattet sein, um ein Reißen des Tanks durch Überdruck zu verhindern.

Kryotanks werden in der Regel verwendet, um große Mengen Wasserstoff zu speichern, und sie werden in der Regel an einem festen Ort installiert. Sie werden häufig in der Chemie- und Energieindustrie sowie in der Forschung und Entwicklung eingesetzt.

Insgesamt sind Kryotanks ein wichtiges Werkzeug für die Speicherung und den Transport von Wasserstoff, erfordern jedoch aufgrund der extremen Temperatur und des extremen Drucks eine besondere Handhabung und Ausrüstung.



Bild Nr. 19: Kryotanks.

4.3 HOCHDRUCK-LAGERTANKS

Hochdruckspeicher sind große Druckbehälter, die zur Speicherung von Gasen mit hohem Druck verwendet werden. Sie können aus einer Vielzahl von Materialien hergestellt werden, darunter Stahl, Aluminium und faserverstärkte Kunststoffe, und sind so konzipiert, dass sie stark und dennoch leicht sind. Diese Tanks werden in der Regel zur Speicherung von Gasen verwendet, die sich in einem gasförmigen Zustand befinden, wie z. B. Wasserstoff.

Hochdruckspeichertanks werden in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, unter anderem bei der Kraftstofflagerung für Wasserstofffahrzeuge. Sie sind in der Regel so konzipiert und konstruiert, dass sie die Sicherheitsvorschriften und -normen erfüllen, um das Risiko von Unfällen oder Freisetzungen des gespeicherten Gases zu minimieren.

Es ist wichtig, bei der Handhabung und Lagerung von Hochdruckspeichertanks die richtigen Sicherheitsverfahren zu befolgen. Dazu gehört auch, dass die Tanks an einem sicheren Ort fern von

Zündquellen gelagert werden und dass sie sorgfältig behandelt und transportiert werden, um Schäden zu vermeiden. Darüber hinaus ist es wichtig, Hochdrucklagertanks regelmäßig zu überprüfen und zu warten, um sicherzustellen, dass sie in gutem Zustand sind und um Leckagen oder andere Probleme zu vermeiden.

Hochdruckspeicher können eine große Menge Wasserstoff auf relativ kleinem Raum speichern. Eine große Chance für die Hochdruckspeicherung ist der strategische Bereich, der für die Weiterentwicklung von Wasserstoff und die Einsparungen, die sich aus dem Umfang der möglichen Wasserstoffspeicherung ergeben, unbedingt notwendig ist. Beim Bau von Hochdruckspeichern muss mit einem hohen Anfangsinvestitionsbedarf gerechnet werden. Bauen lohnt sich nur am Ort der Produktion oder des Verbrauchs und ist bedingt durch Wasserstoffkompression und Energieverlust. Auch Sicherheitsaspekte dürfen nicht vernachlässigt werden (Vodíková strategie České republiky, 2021, S. 115).

ZUSAMMENFASSUNG

Druckwasserstoffflaschen sind Hochdruckbehälter, die zur Speicherung von Wasserstoffgas im Druckbereich von 350 bis 700 bar verwendet werden. Diese Zylinder bestehen aus hochfesten Materialien wie Stahl oder Verbundwerkstoffen und sind so konzipiert, dass sie stabil und dennoch leicht sind. Sie werden häufig als Kraftstoff für Wasserstofffahrzeuge, als chemischer Rohstoff und für andere industrielle und kommerzielle Anwendungen verwendet.

Kryogene Wasserstofftanks sind Speicherbehälter, die zur Speicherung von Wasserstoffgas bei extrem niedrigen Temperaturen verwendet werden, typischerweise im Bereich von -253 °C oder kälter. Diese Tanks bestehen aus Materialien, die der extremen Kälte und dem Druck des gespeicherten Wasserstoffs standhalten, wie z. B. Edelstahl oder hochfeste Verbundwerkstoffe.

Hochdruck-Wasserstoffspeicher sind Druckbehälter, die zur Speicherung von Wasserstoffgas bei hohen Drücken verwendet werden. Diese Tanks bestehen aus hochfesten Materialien wie Stahl oder Verbundwerkstoffen und sind so konzipiert, dass sie stark und dennoch leicht sind. Sie werden häufig als Kraftstoff für Wasserstofffahrzeuge, als chemischer Rohstoff und für andere industrielle und kommerzielle Anwendungen verwendet.

Hochdruck-Wasserstoffspeicher haben mehrere Vorteile gegenüber anderen Arten der Kraftstoffspeicherung. Sie sind relativ leicht und eignen sich daher gut für den Einsatz in Fahrzeugen.

Außerdem lassen sie sich leicht nachfüllen und können in einem breiten Temperaturbereich eingesetzt werden. Wasserstoff ist jedoch ein leicht entzündliches Gas, daher ist es wichtig, bei der Handhabung und Lagerung von Hochdruck-Wasserstoffspeichertanks die richtigen Sicherheitsverfahren zu befolgen. Dazu gehört auch, dass die Tanks an einem sicheren Ort fern von Zündquellen gelagert werden und dass sie sorgfältig behandelt und transportiert werden, um Schäden zu vermeiden.

FRAGEN ZUR ÜBERPRÜFUNG

1. Welche Komponenten kennen Sie für die Wasserstoffspeicherung?
2. Was ist der Unterschied zwischen einem Druckbehälter und einem Kryotank?
3. Wo wird die Hochdruck-Wasserstoffspeicherung am häufigsten eingesetzt?

5 QUELLENVERZEICHNIS

- GUPTA B. Ram. *Wasserstoffkraftstoff, Produktion, Transport und Speicherung*. CRC Press, New York 2009. 611 str. ISBN 978-1-4200-4575-8.
- *Wasserstoffstrategie der Tschechischen Republik*. Tschechische Republik: Ministerium für Industrie und Handel der Tschechischen Republik, 2021.
- KAKERLAKE, Michal. Trends in der *Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft in der Welt und Anwendungsmöglichkeiten in der Tschechischen Republik*. Tschechische Republik: Tschechische Energieagentur, 2006.
- KRČEK, Martin und Lukáš RADIL. *Analyse des Wasserstoffeinsatzes in der Stromversorgung*. Brunn: Technische Universität, Fakultät für Elektrotechnik und Kommunikation, 2010.
- BŘOUŠEK, L. *Wasserstoff und Automobil*. Brunn: Technische Universität Brunn, Fakultät für Maschinenbau, 2015. 51 Seiten. Betreuer der Dissertation Doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.
- KRÁTKÝ, Š. *Herstellung und Speicherung von Wasserstoff*. Brunn : Technische Universität Brunn, Fakultät für Maschinenbau, 2012. 51 S. Betreuer der Bachelorarbeit Jiří Hejčík, Ph.D.
- JUREČKA, R. *Möglichkeiten der Wasserstoffnutzung in der Luftfahrt*. Brunn : Technische Universität Brunn, Fakultät für Maschinenbau, 2013. 98 S. Doktorvater Prof. Ing.
- GALÍK, Thomas. Bewertung der *Auswirkungen der Nutzung von mit Wasserstoff angereichertem Erdgas* [online]. Brunn, 2021 [abgerufen am 17.05.2021]. Erhältlich bei: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132166>. Dissertation. Technische Universität Brunn, Fakultät für Maschinenbau, Energieinstitut. Betreuer der Dissertation Marek Baláš.
- *European Hydrogen Backbone Report* [online], 2020 [cit. 2022-9-8]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjOxautrtHvAhXGu6QKHWpnDMgQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.gasunie.nl%2Fen%2Fnews%2Fgas-infrastructure-companies-present-a-european-hydrogen-backboneplan%2F%245741%2F%245742&usg=AOvVaw2HDA_t_6gG1ZBmw_EUMdh9s
- Die Zukunft der Gastrennung durch Membrantechnologien [Foto]. *Monteco* [online], 9.5.2017 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://monteco.com/the-future-of-gas-separation-through-membrane-technologies/>
- Stationäre LOHC-Infrastruktur [Foto]. *Wasserstoffhaltiges LOHC* [online]. [zit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://hydrogenious.net/what/>

- SATYAPAL, Sunita. DOE-Programmaufzeichnung für Wasserstoff und Brennstoffzellen [Foto]. *Energiebedarf für die Verdichtung und Verflüssigung von Wasserstoffgas in Bezug auf den Speicherbedarf von Fahrzeugen* [online]. 26.10.2009 [zit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf
- Forschungsinstitut für Metallhydride [Foto]. *Hystorsys* [online]. [zit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.hystorsys.no/our-story/>
- Kohlenstoff-Nanoröhrchen für Energiespeicheranwendungen [Foto]. *AZONANO* [online], 21.10.2016 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4298>
- Wasserstoffspeicherung: Büro Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien [Foto]. *ENERGY.GOV* [online]. [zit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- Realisierung eines nationalen Wasserstoffnetzes [Foto]. *HyWay 27* [online]. 30.7.2021 [zit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.hyway27.nl/en/latest-news/hyway-27-realisation-of-a-national-hydrogen-network>
- *Vorlesung 3 Wasserstoffspeicherung: Europäisches Train-the-Trainer-Programm für Einsatzkräfte* [online]. HyResponder, 2021 [zit. 2023-01-16].
- Flüssiger Wasserstoff gilt als "heiliger Gral" für die Einführung von Wasserstoff im Mobilitätssektor: Linde COO. *S&P Global Commodity Insights* [online], 16.11.2021 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/111621-liquid-hydrogen-seen-as-holy-grail-for-hydrogen-uptake-in-mobility-sector-linde-coo>

6 LISTE DER BILDER UND TABELLEN

Tabelle Nr. 1: Vergleich der Wasserstofftransportmethoden.

Tabelle Nr. 2: Vergleich der Wasserstoffspeichermethoden.

Bild Nr. 1: Warntafel

Bild Nr. 2: Wasserstofftransport in Containern auf der Straße

Bild Nr. 3: Transport von Flüssigwasserstoff im Containerschiff

Bild Nr. 4: Membran-Gastrennung

Bild Nr. 5: Wasserstofftransport per Pipeline

Bild Nr. 6: Das europäische Wasserstoff-Rückgrat 2030

Bild Nr. 7: Das europäische Wasserstoff-Rückgrat 2040

Bild Nr. 8: HyWay 27 Infografiken

Bild Nr. 9: Stationäre LOHC-Infrastruktur – StoragePLANTS von Hydrogenious

Bild Nr. 10: Stationäre LOHC-Infrastruktur – ReleasePLANTS von Hydrogenious

Bild Nr. 11: Wasserstoffspeicherverfahren

Bild Nr. 12: Wasserstoff-Druckbehälter

Bild Nr. 13: Wasserstoffspeicherung in Salzkaverne

Bild Nr. 14: Flüssigwasserstofftank

Bild Nr. 15: Exotherme Wasserstoffabsorptionsreaktion

Bild Nr. 16: Wasserstoff-Desorptionsreaktion aus Metalhydrid

Bild Nr. 17: Kohlenstoff-Nanoröhrchen

Bild Nr. 18: Composite-Druckbehälter

Bild Nr. 19: Kryotanks

7 LISTE DER ABKÜRZUNGEN

EHB - Das europäische Wasserstoff-Rückgrat

MIE - minimale Zündenergie

LNG - Flüssigerdgas

LOHC - flüssige organische Wasserstoffträger

LH2 - flüssiger Wasserstoff

HENG - mit Wasserstoff angereichertes Erdgas

CO₂ - Kohlendioxid

CNG - komprimiertes Erdgas

MOF - Metallorganische Gerüste

EU - Europäische Union

Vereinigtes Königreich - Vereinigtes Königreich

UVP - Umweltverträglichkeitsprüfung

LHV - niedrigerer Heizwert

DOE - Versuchsplanung

ADR - Abkommen über gefährliche Straßen