

Die Entwicklung einer sicheren, erschwinglichen und energieeffizienten Art der Speicherung ist der Schlüssel für eine effiziente und sinnvolle Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff. Die Wasserstoffspeicherung ist mit besonderen Schwierigkeiten verbunden, da Wasserstoff die niedrigste Dichte, den niedrigsten Atomradius und den niedrigsten Siedepunkt aller Brennstoffe aufweist. In der Praxis bedeutet dies, dass Wasserstoff aufgrund seiner Eigenschaften entweder aus den Speichertanks austritt oder das Material beschädigt, aus welchem die Tanks bestehen (sogenannte Wasserstoffversprödung), oder es wird eine erhebliche Menge an Energie für die sichere Speicherung benötigt.

Für die Nutzung in Brennstoffzellen kann Wasserstoff im Gegensatz zu anderen Brennstoffen sowohl im gasförmigen, flüssigen oder festen Aggregatzustand vorliegen. Dies eröffnet wiederum die Möglichkeit und den großen Vorteil, die ideale Technologie basierend auf der spezifischen Anwendung für den Einsatzzweck auszuwählen.

Wasserstoffspeichertechnologien lassen sich je nach Forschungs- und Entwicklungsstand grundsätzlich in konventionelle (auch physikalische) und alternative (meist chemische) Technologien unterteilen. Zu den herkömmlichen Technologien zählen insbesondere Druckwasserstoffgasbehälter ( $\text{CGH}_2$  - compressed Hydrogen) und Kryo-Behälter für Flüssigwasserstoff ( $\text{LH}_2$  - liquid Hydrogen). Alternativ auch deren Kombination, denn mit steigendem Druck steigt auch der Siedepunkt (Prinzip eines Papin'schen Topfes) und daher ist es nicht erforderlich, Wasserstoff auf eine extrem niedrige Temperatur abzukühlen.

Alternative Technologien umfassen die Speicherung von Wasserstoff in sogenannten Metallhydriden (bekannt von Hydrostiks). Es sind aber auch andere Methoden wie die Absorption in Kohlenstoffnanostrukturen oder Glasmikrokugeln oder die industrielle Umwandlung in andere Chemikalien (Ammoniak, Methan usw.) möglich.



Abbildung 1:  
Klassifizierung von  
Wasserstoffspeichertechnologien

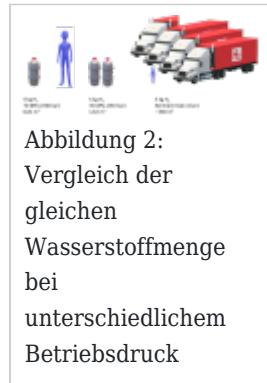
## Speicherung von gasförmigen Wasserstoff

Die Speicherung von Wasserstoffgas ist technologisch relativ einfach, da keine Phasenumwandlung stattfindet und die Auswahl eines "geeigneten" Behälters ausreicht. Für statische Anwendungen, bei denen das Gewicht oder die Abmessungen der Ausrüstung keine Rolle spielen, werden normalerweise nahtlose Stahlflaschen aus kohlenstoffarmem oder legiertem Stahl verwendet. Sie werden in Mengen von 50 bis zu einigen hundert Litern für übliche Anwendungen angeboten.

Bei mobilen Anwendungen ist auf die Abmessungen und insbesondere auf das Gewicht des Speichers zu achten (höheres Gewicht = höherer Verbrauch). Daher werden in der Regel Druckbehälter aus Verbundwerkstoffen verwendet, die in Volumina von mehreren Litern bis zu ungefähr 300 Litern hergestellt werden können. Typische Betriebsdrücke sind hierbei 350 bar bzw. 700 bar (bei Fahrzeugen, bei denen der Wasserstofftank so klein wie möglich gehalten werden muss, wird ein höherer

Betriebsdruck verwendet). In vielen Anwendungen wird die ideale zylindrische Form in Abhängigkeit von den Installationsanforderungen des Fahrzeugstauraums leicht verformt. Die innere Oberfläche der Verbundflaschen ist typischerweise mit einer dünnen Schicht aus Metall oder einem speziellen Polymer, das ein Austreten von Gas durch die Verbundstruktur verhindert, beschichtet.

Wenn wir Wasserstoff in Hochdrucktanks speichern wollen, müssen wir ihn natürlich zuerst auf den erforderlichen Druck komprimieren. Der Druck ist daher ein entscheidender Faktor bei der Speicherung von Wasserstoff in der Gasphase; Sie bestimmt nicht nur das Tankvolumen, sondern auch die Energiemenge, die dem System zugeführt werden muss. Beispielsweise beträgt die Energie, die erforderlich ist, um Wasserstoff auf 350 bar zu komprimieren, ungefähr 30% der Energie im Kraftstoff.



## Speicherung von flüssigen Wasserstoff

Häufig verwendete fossile Brennstoffe können bei normalen Temperaturen und relativ niedrigen Drücken in flüssigem Zustand gelagert werden. Flüssiger Wasserstoff muss dagegen bei  $-253\text{ °C}$  gelagert werden (wegen des sehr niedrigen Siedepunktes). Dies steigert die Anforderungen an die verwendeten Materialien und den hohen Energiebedarf für die Verflüssigung.

Zur Lagerung werden mehrschichtige Behälter mit sehr guten Isoliereigenschaften mit einem maximalen Überdruck von 5 bar verwendet. Wenn flüssiger Wasserstoff in Kryo-Behältern gespeichert wird, kommt es durch Wärmeübertragung zu einer Verdampfung, was den Druck im Tank weiter erhöht. Um eine Beschädigung zu verhindern, wird durch Ablassen des verdampften Wasserstoffs der Überdruck kontrolliert. Bei handelsüblichen Tanks betragen diese Verluste bis zu 3% des Volumens pro Tag. Daher wird der austretende Wasserstoff aufgefangen, gesammelt und in zusätzlichen Zylindern komprimiert gespeichert.

Die Verflüssigung von Wasserstoff ist ein technologisch und energieintensiver Prozess. Die zur Verflüssigung benötigte Energie beträgt ca. 40% der Energie im Kraftstoff. Dennoch hat diese Technologie ihre Vorteile bei der Anwendung insbesondere im Ferntransport von Wasserstoff durch Frachtschiffe oder Tankschiffe.

## Speicherung von festen Wasserstoff

Wasserstoffspeichersysteme dieses Typs basieren auf dem Prinzip der Wasserstoffaufnahme in Materialien auf Metallbasis. Aufgrund des sehr kleinen Atomradius kann Wasserstoff die interstitiellen Positionen zwischen Metallatomen durchdringen. Dies ist eine exotherme Reaktion, d.h. die Wärme bei der Absorption freigesetzt / erzeugt wird. Der umgekehrte Prozess - die Desorption, d.h. die Freisetzung von Wasserstoff aus dem Material, ist im Gegenteil eine endotherme Reaktion und es wird Wärme verbraucht (oder es ist erforderlich, das System zu versorgen). Sie müssten dies bereits bei der Benutzung

der Hydrostiks bemerkt haben.



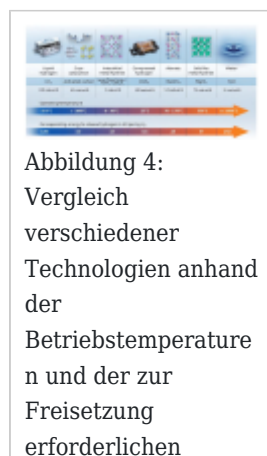
Das Hauptaugenmerk bei Systemen dieser Art liegt also nicht auf dem Betriebsdruck sondern auf der Betriebstemperatur, bei der die Wasserstoffdesorption aus dem Material erfolgt. Zu den anderen wichtigen Eigenschaften gehören das Gewicht, die Kapazität und nicht zuletzt der Preis.

Der höhere Preis für Metallhydridtanks ist hauptsächlich auf die verwendete Legierung zurückzuführen. Für die Wasserstoffabsorption geeignete Werkstoffe sind meist Legierungen aus Magnesium, Aluminium, Titan, Vanadium oder Natrium, die sich je nach Verhältnis oder Kombination in Preis, Absorptionseigenschaften und Gesamtgewicht unterscheiden. Bei Leichtmetallverbindungen wie Magnesium liegt das Gesamtgewicht des Systems nur 30% über dem des Flüssigwasserstoffspeichers. Andererseits verschlechtert die Verwendung dieser leichten Materialien die Anforderungen an eine hohe Desorptionstemperatur und den niedrigen Druck des erzeugten Wasserstoffs.

Die Wasserstoffspeicherung ist daher derzeit noch eine technologische Barriere. Ziel dieses Kapitels war es, die Möglichkeiten und insbesondere die Grenzen von Wasserstoffspeichersystemen zu beschreiben. Einzelne Wasserstoffspeicherkonzepte sind nicht einfach zu vergleichen, die Wahl des Speichersystems hängt immer von der jeweiligen Anwendung ab, und dies ist, wie eingangs erwähnt, zum Teil ein Vorteil.

Darüber hinaus befinden sich die einzelnen Konzepte in sehr unterschiedlichen Entwicklungsstadien, weshalb die angegebenen Parameter mit größter Sorgfalt behandelt werden sollten. Während herkömmliche Wasserstoffspeichermethoden ( $\text{LH}_2$  und  $\text{CGH}_2$ ) sichere und erprobte Systeme sind, ist ihr technologisches Potenzial nahezu ausgeschöpft. Es ist weiterhin mit einer gewissen Entwicklung bei Verbundtanks für die Automobilindustrie zu rechnen, die jedoch die Leistung von Lagertanks nur bedingt verbessern wird. Der limitierende Faktor bleibt das benötigte Volumen, resp. der Betriebsdruck.

Andererseits haben alternative Methoden der Wasserstoffspeicherung ein beträchtliches Potenzial, das mit fortschreitender Entwicklung insbesondere für mobile Anwendungen einen noch günstigeren Preis erbringen könnte.



<HR>