



Handout zum Vortrag von Dr. Joachim Wolf, Executive Director Hydrogen Solutions, Linde Gas, München

Die neuen Entwicklungen der Technik

Elemente der Wasserstoff-Infrastruktur von der Herstellung bis zum Tank

- Synergien bei der Produktion
- Flüssigspeicher sind die beste Lösung für den Transport
- Wasserstoff-Zapfsäulen sind kompatibel mit heutigen Tankstellen
- Größere Reichweiten dank neuer Tanks im Auto

600 bis 700 Milliarden Kubikmeter Wasserstoff werden jedes Jahr weltweit produziert, gespeichert, transportiert und verbraucht. Und uns steht eine gewaltige Steigerung dieser Menge bevor: Wasserstoff wird in den nächsten Jahren und Jahrzehnten sukzessive die fossilen Brennstoffe wie Erdöl und Erdgas als Energieträger ersetzen. Für alle Bereiche des Energieverbrauchs – von der portablen Elektronik über Blockheizkraftwerke bis hin zum Verkehr – ist Wasserstoff der Energieträger der Zukunft. Die technischen Voraussetzungen für diesen Durchbruch sind in den vergangenen Jahren geschaffen worden. Mit Produktionsanlagen für die verschiedensten Energiequellen, mit leichten und sicheren Tanks für gasförmigen wie für flüssigen Wasserstoff sowie mit kompatiblen Zapfsystemen für Tankstellen stehen die wesentlichen Elemente einer weltweiten Wasserstoff-Infrastruktur bereit.

Produktion: Alle Quellen nutzen

Für die Herstellung von Wasserstoff werden auf absehbare Zeit fossile Rohstoffe die wichtigste Quelle bleiben. Die derzeit wirtschaftlichste Methode ist dabei die so genannte Dampfreformierung (Steam-Reforming): Wasserdampf und Erdgas werden bei Temperaturen von etwa 800°C



über einem Katalysator zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt. Die Produktion von Wasserstoff aus Erdöl und Kohle verläuft ähnlich. Die Dampfreformierung ist technisch etabliert und wird schon heute im großindustriellen Maßstab eingesetzt. Die Kapazitäten können dabei auch kurzfristig ausgebaut werden: Ein neuer großer Dampfreformer von Linde wurde beispielsweise im Juni diesen Jahres in Leuna eingeweiht. Die gesamte Versorgungseinheit in Leuna kann bis zu 140.000 Kubikmeter Wasserstoff pro Stunde produzieren.

Der Prozess der Reformierung ist nicht nur großtechnisch von Bedeutung. Grundsätzlich bietet er die Möglichkeit, auch im kleinen Maßstab Wasserstoff aus Quellen wie Erdgas oder Methanol zu gewinnen. Auf diese Weise könnte man zum Beispiel in der Hausenergieversorgung auf die bestehende Erdgasinfrastruktur zurückgreifen und aus dem Erdgas vor Ort Wasserstoff herstellen. Auch im Auto wird zum Teil daran gearbeitet, von dieser Möglichkeit Gebrauch zu machen.

Neben der Dampfreformierung entsteht Wasserstoff heute auch als Beiprodukt der Produktion anderer Gase und in der chemischen Industrie. Für einen Hersteller technischer Gase wie die Linde AG ergeben sich hier bedeutende Synergien: Das „Abfallgas“ Wasserstoff wird unversehens zu einem gefragten Produkt. Wichtig ist bei diesem Verfahren jedoch die Reinigung des Gases. Wird Wasserstoff verbrannt, ist keine hohe Reinheit nötig, aber die Brennstoffzelle verträgt kein unreines Gas.

Die steigende Nachfrage nach Wasserstoff wird auch ganz andere Produktionsmöglichkeiten voranbringen. Dazu gehören in erster Linie die erneuerbaren Energien wie Wind-, Wasser- und Sonnenkraft. Hier erschließt der Energieträger Wasserstoff völlig neue Quellen. Schon in den 1980er Jahren war viel von Solarwasserstoff die Rede, aber damals waren die technischen Voraussetzungen für eine weltweite Wasserstoff-Energiewirtschaft noch nicht gegeben. Heute sieht das anders aus: Elemente wie effiziente Energiewandler, Elektrolyseure, Verflüssiger, Pumpen und Speicher sind technisch weitgehend ausgereift. In einigen Jahren werden erneuerbare Energien sicherlich einen deutlich steigenden Anteil an der weltweiten Wasserstoff-Produktion haben.



Speicherung: Flüssig ist die Zukunft

Vor allem zwei Eigenschaften machen Wasserstoff zu einem idealen Energieträger: Er kann aus den verschiedensten Primärenergiequellen hergestellt werden – und er ist transportabel. Wasserstoff kann also wie Erdöl und im Gegensatz zu Elektrizität beliebig gespeichert und unabhängig vom Produktionsort verwendet werden: Mit Wasserstoff kann Solarenergie aus der Sahara Heizkessel in Hamburg befeuern.

Allerdings ist Wasserstoff ein extrem leichtes Gas. Unter normalem Druck enthalten 3.000 Liter Wasserstoff die gleiche Energiemenge wie ein Liter Benzin. Um das Gas trotzdem effektiv zu speichern und zu transportieren, muss es daher stark verdichtet werden. Dafür wird es entweder unter Druck gesetzt (CGH₂, Compressed Gaseous Hydrogen) oder bis auf –253°C abgekühlt, so dass es flüssig ist (LH₂, Liquid Hydrogen). Beide Möglichkeiten stellen hohe Anforderungen an Technik und Sicherheit – und sie kosten auch Energie. Der sichere und möglichst verlustarme Transport von Wasserstoff ist daher eine der wichtigsten technologischen Herausforderungen auf dem Weg in die Wasserstoff-Zukunft. Auch hier sind in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht worden.

Für Industriekunden sind bislang große Tanks für Druckgas die gängigste Lösung. Der Wasserstoff wird dabei unter 50 bis 70 bar Druck gesetzt, wofür etwa sechs bis sieben Prozent der im Wasserstoff gespeicherten Energie benötigt wird. Im Fall von Hochdruckspeichern mit beispielsweise 350 oder gar 700 bar, wie sie in Automobilen eingesetzt werden, steigt dieser Energieaufwand auf zwölf bis 15 Prozent des ursprünglichen Energieinhalts. Der Nachteil von Druckgas-Speichern liegt im hohen Gewicht und dem großen Raumbedarf der Tanks: Je größer der Tank, umso dicker muss dessen Wand sein – und je kleiner der Tank, umso mehr davon sind nötig, um die gleiche Menge Wasserstoff zu speichern. CGH₂-Tanks enthalten daher bei relativ hohem Gewicht und Eigenvolumen relativ wenig Wasserstoff – schlechte Voraussetzungen für einen Transport großer Mengen über große Distanzen. Linde sieht die Zukunft von Druckwassertanks daher überall dort, wo Volumen und Gewicht keine Rolle spielen, etwa bei Speichern auf großen Firmengeländen.

Muss der Wasserstoff dagegen transportiert werden, bietet sich die flüssige Speicherform an. Bei Tanks für Flüssigwasserstoff haben wir einen Technologiesprung hinter uns: Unsere heutigen LH₂-Speicher halten das Gas bis zu zwei Wochen lang bei –253°C, ohne dass etwas davon



entweicht. Kryostate und doppelwandige, superisolierte Behälter verhindern fast vollständig jede Form von Wärmeübertragung. Ausgestattet mit dieser Technik transportieren unsere LKWs heute bei weniger als 40 Tonnen Gesamtgewicht fast dreieinhalb Tonnen Wasserstoff – das ist etwa zehn Mal mehr als die herkömmlichen, noch schwereren Trailer für unter Druck gespeicherten Wasserstoff.

Für die Verflüssigung von Wasserstoff muss derzeit noch etwa 30 Prozent seines Energieinhalts aufgebracht werden – das sind 15 Prozentpunkte mehr als für die Speicherung unter Druck bei ca. 350 bar. Betrachtet man allerdings den gesamten Energieaufwand für die Speicherung und den Transport des Gases, so ist Flüssigwasserstoff fast immer die bessere Lösung: Was die Verflüssigung an Energie mehr kostet, spart der Transport schnell wieder ein, wenn man statt zehn nur noch einen LKW auf die Straße schicken muss.

Alternative Speichermethoden für Wasserstoff – etwa die chemische Bindung in Alanaten und Metallhydriden oder die aus der Nanotechnologie stammenden Graphitspeicher – sind noch in der Entwicklungsphase und derzeit weit von der Leistungsfähigkeit der Druckgas- oder Flüssigwasserspeicher entfernt. Linde beobachtet und fördert die Entwicklung dieser Speicher. Zumindest für spezielle Anforderungen können solche Techniken in einigen Jahren sinnvolle Ergänzungen der vorhandenen Speichermöglichkeiten sein.

Transport: Die bewährten Wege bleiben erhalten

Der Transport von Wasserstoff wird sich nicht grundlegend von dem der heutigen Energieträger wie vor allem Erdgas unterscheiden. Das heißt: Tankschiffe, Tankwaggons und Tanklasten bleiben uns erhalten, wenn auch mit den nötigen Anpassungen für die Speicherung von Flüssigwasserstoff. Auch Wasserstoff-Pipelines werden schon heute betrieben, etwa im Rhein-Ruhr-Gebiet oder von Linde rund um Leuna. Das Gas wird darin unter einem Druck von 30 bis 100 bar gesetzt. Allerdings ist der Wasserstoff recht unrein, also mit verschiedenen anderen Gasen versetzt. Auch erfordern die Pipelines einen großen baulichen und wartungstechnischen Aufwand.

Anders als Erdöl oder Erdgas kann Wasserstoff auch direkt vor Ort hergestellt werden. Grundsätzlich genügt zur Wasserstoff-Produktion ein Stromanschluss und eine Wasserleitung – die Wirtschaftlichkeit dieser Methode wird jedoch vom zukünftig steigenden Strompreis begrenzt. Wir sehen für die Vor-Ort-Herstellung daher nur dort Chancen, wo regenerative



Wir sehen für die Vor-Ort-Herstellung daher nur dort Chancen, wo regenerative Energien im Überfluss zur Verfügung stehen, etwa in sonnen- oder windreichen Gegenden. Anders sieht es mit der Vor-Ort-Produktion von Wasserstoff aus Erdgas aus: Diese Möglichkeit wird sicherlich zumindest in der Übergangszeit überall dort genutzt werden, wo wie in der Haustechnik eine Erdgasinfrastruktur vorhanden ist.

Verwendung: Gestern Raumfahrt, heute Chemie, morgen Verkehr

Eine treibende Kraft für die Wasserstoff-Technik war in der Vergangenheit die Raumfahrt. Viele Konzepte, etwa zur Verflüssigung des Gases, haben hier ihren Ursprung. Zudem war dies bislang nahezu der einzige Bereich, in dem Wasserstoff als Energieträger verwendet wurde. Doch der Wasserstoff-Absatz in dieser Branche stagniert. Außerdem sind nicht alle Konzepte auf andere Einsatzgebiete übertragbar: Zum Beispiel wird eine Rakete 15 Minuten vor dem Start mit 100 bis 150 Tonnen flüssigem Wasserstoff betankt, der dann in weniger als drei Minuten verbraucht wird – eine starke und dauerhafte Isolierung ist daher weit weniger wichtig als in anderen Einsatzbereichen von flüssigem Wasserstoff.

Aktuell ist die Chemie der größte Abnehmer für Wasserstoff. Unter anderem dient er als Rohstoff bei der Aufarbeitung von Erdöl, zur Härtung von Fetten, in chemischen Synthesen und zur Düngemittelherstellung. Je nach Anwendungsbereich sind unterschiedliche Mengen und Reinheitsgrade erforderlich. Die chemische Industrie wird weiterhin ein Hauptabnehmer für Wasserstoff bleiben. Auch hier erwarten wir in den nächsten Jahren Wachstumsraten von sieben bis zehn Prozent.

Die Zukunft aber liegt in der breiten Verwendung von Wasserstoff als Energieträger. Die Schlüsseltechnologie ist dabei die Brennstoffzelle: Sie setzt Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser um und produziert dabei Elektrizität und Wärme. Das Grundprinzip ist einfach und entspricht einer umgekehrten Elektrolyse. Eine Brennstoffzelle besteht aus drei Grundelementen: einer Anode, einer Kathode und einem Elektrolyt dazwischen. An der Anode gibt ein Wasserstoff-Molekül zwei Elektronen ab und wird dabei in zwei positiv geladene Wasserstoff-Ionen (Protonen) gespalten. Diese Protonen wandern durch den Elektrolyten zur Kathode, wo sie sich mit einem negativ geladenen Sauerstoff-Ion zu Wasser vereinigen. Die negative Ladung erhält der Sauer-



stoff wiederum vom Wasserstoff: Dessen Elektronen fließen über einen elektrischen Leiter von der Anode zur Kathode. Dieser Stromfluss kann für elektrische Arbeit genutzt werden

Dieses Prinzip ist seit 1839 bekannt – aber erst jetzt werden seine Potenziale sichtbar und auch nutzbar. Weil eine einzelne Zelle nur eine sehr geringe Spannung erzeugt, werden heute viele Zellen zu einem Stapel („Stack“) hintereinander geschaltet. So erreicht der Brennstoffzellen-Stack hohe und höchste Leistungen, wie sie zum Beispiel zum Antrieb von Fahrzeugen nötig sind. Die Elektroden können je nach Art und Einsatzgebiet der Brennstoffzelle platten- oder röhrenförmig sein. Die Elektrolyte stehen für verschiedene Anforderungen in flüssiger oder fester Form oder als Membran zur Verfügung. Die Arbeitstemperatur kann je nach Funktionsprinzip zwischen Raumtemperatur und 1.000°C liegen. Und neben Wasserstoff kommen teilweise auch wasserstoffreiche Stoffe wie Erdgas, Biogas oder Methanol zum Einsatz.

Entsprechend unterschiedlich sind die Einsatzgebiete der Brennstoffzelle und damit des Energieträgers Wasserstoff: Sie reichen vom Akkuersatz in elektronischen Kleingeräten wie Handys und Laptops über die Strom- und Wärmeversorgung von Haushalten und Industrieanlagen bis hin zum Antriebssystem im Verkehr. Gerade dem Straßenverkehr wird in Zukunft eine zentrale Rolle beim Umstieg auf den Energieträger Wasserstoff zukommen.

Wasserstoff im Verkehr: Neuer Treibstoff für die Mobilität

Damit Wasserstoff sich als Kraftstoff im Verkehr durchsetzen kann, muss er genauso sicher, zuverlässig und bequem zu handhaben sein wie die heutigen Kraftstoffe. Zudem müssen die nötigen Investitionen für Mineralölindustrie, Tankstellenbesitzer und Autofahrer finanzierbar sein. Nach jahrzehntelangem Zweifeln und Zögern wird nun deutlich, dass diese Ansprüche in absehbarer Zeit erfüllbar sind – und dass es Zeit für den Umstieg ist. Fortschritte bei der Technik für Tankstellen und Autos belegen diesen Trend beispielhaft.

Bequem tanken

Der Aufbau eines flächendeckenden Tankstellennetzes ist die Voraussetzung für einen kommerziellen Erfolg von Wasserstoff-Fahrzeugen. Hier muss die neue Technik mit den vorhande-



nen Strukturen kompatibel sein – das heißt sie muss in die Tankstellen eingebettet werden können. Die LH₂-Zapfanlage, die Linde im vergangenen Jahr in Berlin installiert hat, erfüllt diesen Anspruch: Die Technik ist weitgehend äquivalent zur Benzinzapfsäule. Auch der Tankvorgang, der noch vor einigen Jahren fast eine Stunde gedauert hat, erfolgt jetzt in weniger als drei Minuten. Selbst der Preis – bei jeder neuen Technologie zunächst ein Investitionshemmnis – wird auf Dauer vergleichbar sein mit herkömmlichen Zapfanlagen, beispielweise für Erdgas.

Weil in den Fahrzeugen entsprechend den verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten vermutlich zwei Speichervarianten zum Einsatz kommen werden – Flüssigspeicher und Druckgasspeicher – müssen die Tankstellen sowohl LH₂ als auch CGH₂ anbieten. Um nicht auch zwei Lieferformen für Wasserstoff vorsehen zu müssen, schlägt Linde vor, den Wasserstoff flüssig zu den Tankstellen zu bringen, wo er dann wie Benzin in Tanks unter der Erde gespeichert werden kann. Aus dem LH₂-Tank kann der Kraftstoff sowohl flüssig als auch gasförmig verteilt werden. Dieses Vorgehen hat sich bereits bewährt.

Um aus dem flüssigen Wasserstoff beispielsweise gasförmigen bei 700 bar zu erhalten, werden so genannte „kryogene Druckerhöhungspumpen“ eingesetzt. Diese Pumpen drücken den tiefkalten, flüssigen Wasserstoff mit 700 bar in einen einfachen Wärmetauscher, wo er sich bis auf Umgebungstemperatur erwärmt. Weil Flüssigkeiten wesentlich leichter zu pumpen sind als Gase, sind kryogene Druckerhöhungspumpen deutlich kleiner, leiser, wartungsärmer und um bis zu 40 Prozent billiger als Kompressoren.

Diese sind vor allem dann notwendig, wenn der Wasserstoff vor Ort erzeugt und unter Druck gesetzt wird. Aber auch wenn gasförmiger Wasserstoff aus einem Vorrattank in den Fahrzeugtank gepumpt werden muss, kommen Kompressoren zu Einsatz – ein klarer Nachteil von Druckgastanks an Tankstellen. Auch ist es schwierig und in aller Regel nicht wirtschaftlich, aus CGH₂ an der Tankstelle LH₂ zu gewinnen. Zudem brauchen Druckspeicher für Wasserstoff wesentlich mehr Platz als LH₂-Tanks.

Gerade weil die Technik zur Verteilung von Flüssigwasserstoff jener von Benzin ähnelt, werden auch die anderen alltäglichen Anforderungen an eine Tankstelle erfüllt: So können die Zapfanlagen 24 Stunden am Tag, sieben Tage in der Woche in Betrieb sein – selbst während der Anlieferung von Wasserstoff. Auch die üblichen Verbrauchsspitzen am Morgen und am späten



Nachmittag werden problemlos abgedeckt, ohne während der verkaufsschwachen Zeiten teure Überkapazitäten zu haben.

Effizient speichern im Auto

Für die Speicherung im Auto – also das letzte Glied der Wasserstoff-Kette vor dem eigentlichen Verbrauch – haben sich in den vergangenen Jahren zwei Systeme herausgebildet. Wiederum kann der Wasserstoff tiefkalt flüssig oder gasförmig unter Druck gespeichert werden.

Flüssigspeicher erlauben dabei größere Reichweiten, erfordern aber eine aufwändigere Technik. Zudem muss nach einem längeren Zeitraum ohne Verbrauch mit geringen Gasverlusten gerechnet werden. Druckspeicher halten das Gas dagegen theoretisch unbegrenzt zurück, sind aber schwerer und können bei gleichem Platzbedarf deutlich weniger Wasserstoff speichern, was die Reichweite des Fahrzeugs deutlich begrenzt.

Beide Technologien hat Linde in jüngster Zeit erheblich weiter entwickelt. So konnten unsere Ingenieure die Standzeit der Flüssigspeicher – das ist der Zeitraum, in dem ein Tank stehen kann, ohne dass Wasserstoff entnommen werden muss – deutlich erhöhen. Heute kann ein Wasserstoff-Fahrzeug mit Flüssigspeicher zwei Wochen lang unbenutzt parken, ohne dass Verluste auftreten – und selbst nach kurzen Fahrzeiten beginnt diese Frist von neuem. Die Speicher haben zudem in diversen Crashtests ihre herausragende Sicherheit bewiesen.

Gleiches gilt für die Druckgasspeicher. Auch hier setzen wir neue Maßstäbe, und zwar mit der neuen 700-bar-Technologie: Gegenüber den bislang üblichen 350-bar-Speichern können die Hersteller mit dieser Technik die Reichweite ihrer Fahrzeuge fast verdoppeln. Im September vergangenen Jahres haben wir die weltweit erste 700-bar-Tankstelle auf dem Gelände der Adam Opel AG in Dudenhofen bei Offenbach installiert und in Betrieb genommen. Trotz des höheren Drucks sind die heutigen Speicher deutlich leichter als ihre Vorgänger: Moderne Compound-Flaschen aus Kohle- und Glasfasern, die innen einen dünnen Metallüberzug tragen, wiegen gerade einmal halb so viel wie herkömmliche Stahltanks. Das reduzierte Gewicht schlägt sich direkt in einem niedrigeren Wasserstoff-Verbrauch der Autos nieder.

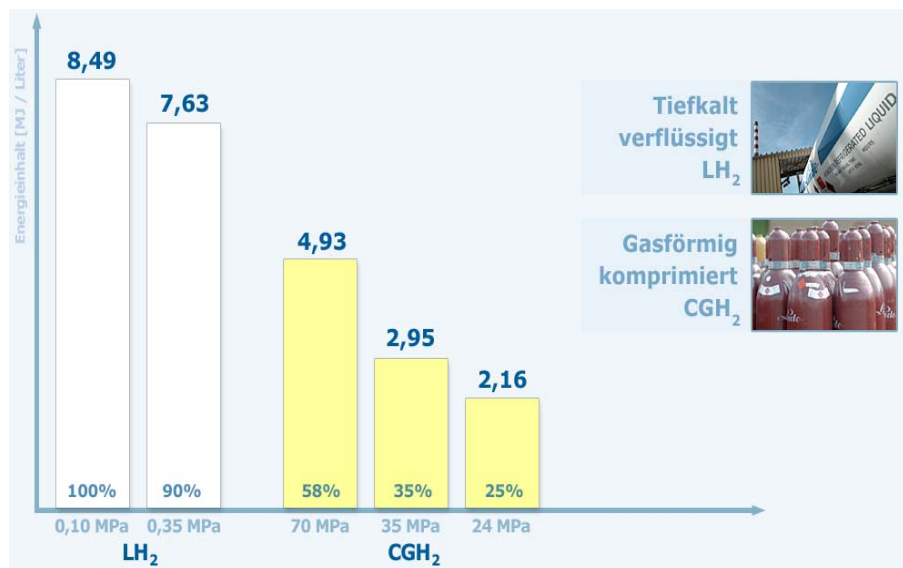


Die Technik ist die treibende Kraft

Die Technik für den Schritt in die Wasserstoff-Zukunft steht also bereit. Und noch mehr: Sie ist zur treibenden Kraft und zum wichtigsten Argument für den Durchbruch von Wasserstoff als Energieträger geworden. Die wirtschaftlichen und technischen Bedenken, die noch vor zehn Jahren dem Umstieg kategorisch im Wege standen, sind heute einer vorsichtig optimistischen Einschätzung gewichen. Überall in der Welt – mit einer besonderen Dynamik in Japan und den USA – wächst die Wasserstoff-Technik aus dem Nischenmarkt heraus. Diese Chance werden wir nutzen.



Pressefotos



Wasserstofftag-03_Wolf_Grafik-Energieinhalt / Quelle: Linde AG

Energieinhalt verschiedener Speicherformen von Wasserstoff: Unter normalem Druck enthalten 3.000 Liter Wasserstoff die gleiche Energiemenge wie ein Liter Benzin. Um Wasserstoff effektiv zu speichern und zu transportieren, muss er daher stark verdichtet werden. Dafür wird er unter hohem Druck komprimiert (CGH₂) oder bis auf -253°C abgekühlt, so dass er flüssig ist (LH₂). Der Energieinhalt von tiefkalt verflüssigtem Wasserstoff ist dabei erheblich höher als der von gasförmig komprimiertem.



Die derzeit wirtschaftlichste Methode zur Herstellung von Wasserstoff ist die so genannte Dampfreformierung (Steam-Reforming): Wasserdampf und Erdgas werden bei Temperaturen von etwa 800°C über einem Katalysator zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt. Ein neuer großer Dampfreformer von Linde wurde im Juni dieses Jahres in Leuna eingeweiht. Die gesamte Versorgungseinheit in Leuna kann bis zu 140.000 Kubikmeter Wasserstoff pro Stunde produzieren.

Wasserstofftag-03_Wolf_Foto-Dampfreformierung / Foto: Linde AG

Alle Grafiken, Bilder und Texte stehen hochauflösend im Internet zum Download bereit:
<http://www.wasserstofftag.de/hydrogen/html/go/rwar-5qfs5z.de.o>



Moderne, doppelwandig isolierte Flüssigwasserstoff-Trailer transportieren bei weniger als 40 Tonnen Gesamtgewicht 3.370 Kilogramm Wasserstoff – das ist etwa zehn Mal mehr als die herkömmlichen Trailer für unter Druck gespeicherten Wasserstoff fassen.

Wasserstofftag-03_Wolf_Foto-LH2-Trailer / Foto: Linde AG



Für Industriekunden wird Wasserstoff meist in großen Druckgas-Tanks gespeichert. Das Gas wird dabei unter 50 bis 70 bar Druck gesetzt. Hochdruckspeicher, wie sie zum Beispiel in Automobilen eingesetzt werden, enthalten dagegen Wasserstoff bei 350 oder sogar 700 bar.

Wasserstofftag-03_Wolf_Foto-Druckgastanks / Foto: Linde AG

Alle Grafiken, Bilder und Texte stehen hochauflösend im Internet zum Download bereit:
<http://www.wasserstofftag.de/hydrogen/html/go/rwar-5qfs5z.de.o>