



Linde GmbH / Shell

Gas zapfen

Brennstoffzellenfahrzeuge nutzen Wasserstoff als Treibstoff. Neuartig konzipierte Tankstellen müssen das flüchtige Molekül geeignet vorhalten.

Michael Vogel

Derzeit investiert die Automobilindustrie mehrheitlich in den batterieelektrischen Antrieb. Dagegen fristet die Brennstoffzelle bei Pkws und Nutzfahrzeugen noch immer ein Nischendasein. Bereits heute sind Fahrzeuge mit diesem Antrieb unterwegs – zum Beispiel als Busse oder Taxis. Daher finden sich Tankstellen für Wasserstoff häufig auf Betriebsgelände; im öffentlichen Raum sind sie eher selten. Zum Jahresende 2020 waren laut Ludwig Bölkow Systemtechnik in Deutschland hundert solcher Tankstellen in Betrieb, weltweit rund 550.

Wasserstoff besitzt einige extreme physikalische Eigenschaften, die einen sicheren Tankvorgang erschweren. So hat er als kleinstes Atom und Molekül eine hohe mittlere Geschwindigkeit bei Raumtemperatur und neigt zu starker Diffusion – selbst durch Festkörper (Effusion). Weil nur Van-der-Waals-Kräfte die unpolaren Moleküle zusammenhalten, liegt die Siedetemperatur bei -252 °C . Unter Normaldruck ist Wasserstoff rund 14-mal weniger dicht als Luft. Zudem reagiert Wasserstoffgas bei Zündung an der Luft stark exotherm, wenn es

im passenden Mischungsverhältnis vorliegt. In einem Kilogramm Wasserstoff steckt gut dreimal so viel Energie wie in der gleichen Masse Diesel oder Benzin; doch der Energiegehalt pro Volumen ist bei Wasserstoff aufgrund seiner niedrigen Dichte sehr gering.

Transport und Zwischenlagerung von Wasserstoff und der Betrieb einer Tankstelle erfordern daher einigen technischen Aufwand. Nur selten wird der Wasserstoff heute lokal per Elektrolyse gewonnen, sodass sein Transport zur Tankstelle per Lkw erfolgt. In Europa liegt er dabei meist gasförmig vor, in Kalifornien dagegen in flüssiger Form. Die Lagerung des gasförmigen Wasserstoffs an der Tankstelle erfolgt in Stahltanks bei einem Druck bis zu 50 bar oder in Stahlröhren, die je nach regionaler Vorschrift mit 200 bis 450 bar befüllt sind. Solche Speicher benötigen weder Kühlung noch Wärmeisolierung. Das geht bei flüssigem Wasserstoff nicht: Vakuumisolierte Kryobehälter halten die Verdampfungsverluste bei -253 °C möglichst gering. Dafür lässt sich flüssiger Wasserstoff fast bei Normaldruck lagern, ist etwa 800-mal dichter als das Gas und weniger reaktiv.

Beim Tanken gelangt der Wasserstoff aus den Speichern in das Fahrzeug. Der Tank eines Brenn-

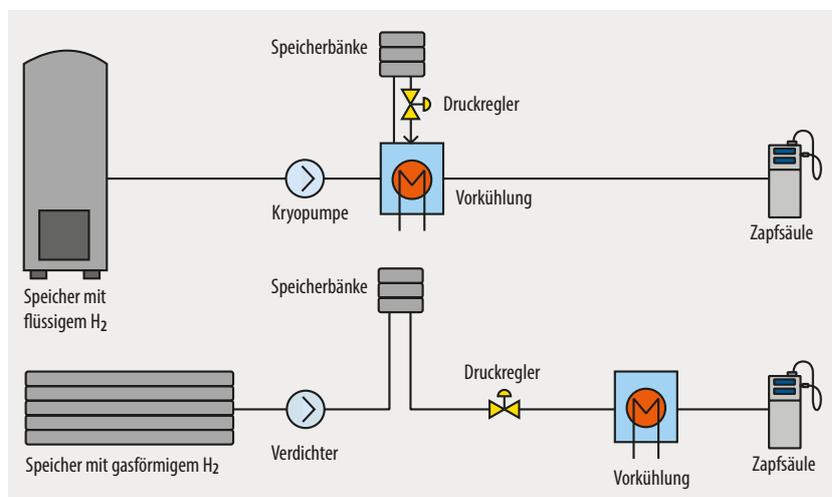


Abb. 1 Zwischen Lagerung und Zapfsäule bereiten verschiedene Komponenten den Wasserstoff für das Tanken auf.

stoffzellen-Pkws nimmt etwa fünf bis sieben Kilogramm Gas auf, bei Umgebungstemperatur oder leicht darüber und einem Druck von 700 bar. Damit besitzt das Fahrzeug eine vergleichbare Reichweite wie ein Diesel oder Benziner: Der Verbrauch beträgt heute etwa ein Kilogramm Wasserstoff auf 100 Kilometer. Bei Nutzfahrzeugen mit deutlich höherem Verbrauch spielen Gewicht und Volumen des Tanks eine untergeordnete Rolle. Daher steht hier das Gas meist nur unter einem Druck von 350 bar, was die Sicherheitsanforderungen deutlich reduziert.

Um den an der Tankstelle gelagerten Wasserstoff in die Hochdrucktanks der Brennstoffzellenfahrzeuge zu überführen, müssen Verdichter den passenden Druck erzeugen (**Abb. 1**). Deren technische Konzepte unterscheiden sich je nach Aggregatzustand des Wasserstoffs und nach Hersteller der Tankstellen. So kann zum Beispiel ein ionischer Verdichter den gasförmig gelagerten Wasserstoff bereitstellen (**Abb. 2**). Eine ionische Flüssigkeit bedeckt die Kolben des Verdichters und erfüllt mehrere Aufgaben: Sie dichtet den Innenraum ab, dient als Schmiermittel, führt Reibungswärme ab und reduziert den Totraum. Die ionische Flüssigkeit und der Wasserstoff verbinden sich nicht miteinander. Nach der Verdichtung scheidet ein Phasentrenner die ionische Flüssigkeit zur Wiederverwendung ab: Der Wasserstoff ist genauso rein wie bei der Anlieferung an die Tankstelle. Eine Alternative stellen Membranverdichter dar, bei denen ein elastisches Bauteil den starren Kolben ersetzt. Eine Kryopumpe verdichtet flüssig gelagerten Wasserstoff. Unabhängig von der Technik hält im Anschluss eine Hochdruckspeicherbank das verdichtete Wasserstoffgas bei bis zu 900 bar bereit, um mehrere Tankvorgänge ohne Pausen zu ermöglichen.

Vorgekühlt in den Tank

Aufgrund des Druckgefälles strömt der Wasserstoff von der Speicherbank in den Fahrzeugtank. Die Temperatur im Tank darf nur gemäß international verschiedener Vorgaben steigen. Die genauen Werte hängen von vielen

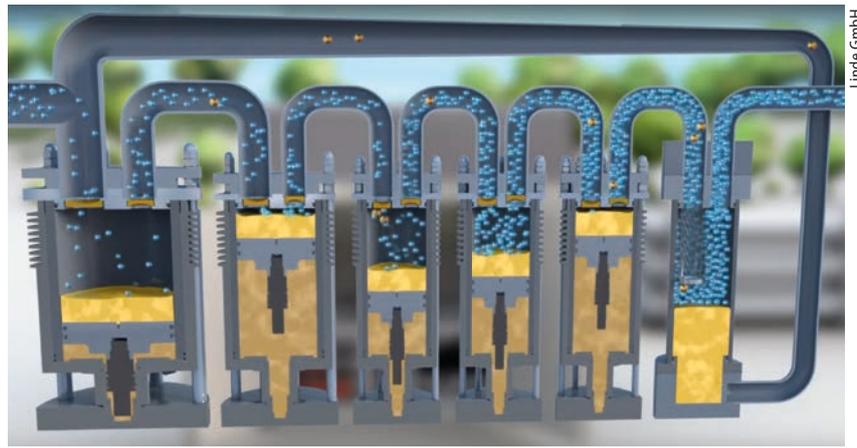


Abb. 2 In einem fünfstufigen ionischen Verdichter bewegen sich die Kolben hydraulisch auf und ab. Die ionische Flüssigkeit (gelb) bedeckt die Kolben und wird gemeinsam mit dem Wasserstoff (blau) durch den Verdichter gepresst. Danach trennt ein Abscheider (rechts) den Wasserstoff vollständig von der Flüssigkeit.

Parametern ab, liegen aber immer unterhalb von 85 °C, für welche die Fahrzeugtanks ausgelegt sind.

Wasserstoff ist ein Gas, das sich – im Gegensatz zu vielen anderen Gasen – im relevanten Druck-Temperatur-Bereich beim Ausdehnen erwärmt. Das liegt an seinem negativen Joule-Thomson-Koeffizient, der sich letztlich aus den Van-der-Waals-Kräften zwischen den Gasteilchen ergibt. Damit das einströmende Gas den Fahrzeugtank nicht zu stark erwärmt, wird der Wasserstoff vorgekühlt. Bei Pkws mit ihrem immer ähnlich dimensionierten 700-bar-Tank beträgt die Vorkühltemperatur –40 °C; Nutzfahrzeuge mit unterschiedlich großen 350-bar-Tanks benötigen zwischen +20 °C und –10 °C.

Diese Ausgangswerte erreicht der Wasserstoff aus der Hochdruckspeicherbank beispielsweise durch eine aktive Kühlung mittels eines Kältespeichers. Lagert der Wasserstoff in flüssiger Form an der Tankstelle, vereinfacht sich die Situation: Da die Kryopumpe beim Verdichten –200 °C kaltes Gas erzeugt, reicht es aus, dieses mit dem warmen Gas aus der Speicherbank passend zu mischen.

Beim Tanken erfolgt zunächst mit einem einzelnen Gasstoß ein Test, ob die Verbindung zwischen Zapfpistole und Fahrzeug sicher und dicht ist. Anschließend ermittelt das System den Tankdruck und die Umgebungstem-

peratur. Diese Werte legen fest, wie schnell der eigentliche Tankvorgang erfolgen kann und welcher Druck anzustreben ist. Einmal Volltanken dauert bei einem Brennstoffzellen-Pkw wenige Minuten – vergleichbar mit einem Diesel oder Benziner. Die Zahl der Fahrzeuge, die in einer bestimmten Zeit zu betanken ist, und die Größe ihrer Tanks entscheiden über die Dimensionierung einer Wasserstofftankstelle: Ein schnelles Betanken beruht auf passend ausgelegten Verdichtern und Wärmetauschern.

Die Entwicklung von Wasserstofftankstellen wird derzeit vorangetrieben. Vor allem Lagerung und Transport des Gases könnten sich in den kommenden Jahrzehnten drastisch verändern. So wird zum Beispiel an verschiedenen chemischen und physikalischen Verfahren zur Speicherung geforscht. Das bestehende Erdgasnetz ließe sich nutzen, um den Wasserstoff zu verteilen. Idealerweise käme an der Tankstelle ein Gemisch aus Biogas und grünem Wasserstoff an, der mit regenerativer Energie erzeugt wurde. An der Tankstelle gilt es dann, den Wasserstoff abzuscheiden. In Deutschland unterstützt unter anderem die Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung die Erforschung solcher Technologien.^{*)}

Der Autor

Dipl.-Phys. Michael Vogel, Journalist,
www.mv-vogel.de

*) Ich danke Michael Vidovitsch (Linde Hydrogen FuelTech GmbH, Wien) für hilfreiche Erläuterungen.