



Hamburg-Hafencity: Hier werden Pkw und die Brennstoffzellenbusse der Hamburger Hochbahn betankt.

## H<sub>2</sub>-TANKSTELLEN – DER STAND DER KUNST

Die Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen erfordert eine komplett neue Wasserstoff-Infrastruktur – von den Produktionsanlagen über den Transport bis hin zum Tankvorgang. Die benötigten Techniken kristallisieren sich langsam heraus.

TEXT: Christina Wulf, Martin Kaltschmitt, TU Hamburg-Harburg FOTOS, GRAFIKEN: Vattenfall, TU Hamburg-Harburg [www.mobility20.net/PDF/M20413300](http://www.mobility20.net/PDF/M20413300)

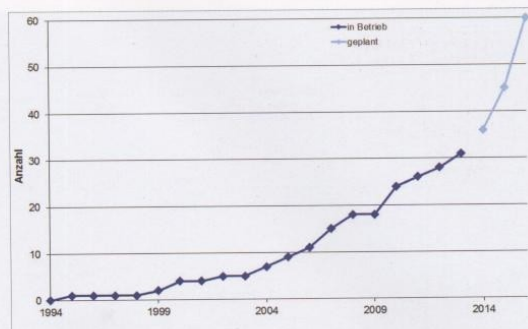
Um im Verkehrssektor einen Umstieg von fossilen Energieträgern zu regenerativen Energiequellen zu verwirklichen und gleichzeitig biologische Ressourcen nicht überzustrapazieren, ist eine Elektrifizierung der Antriebe nötig. Sowohl für batterie-elektrische Fahrzeuge als auch für Brennstoffzellenfahrzeuge ist jedoch der Aufbau einer speziellen Versorgungsinfrastruktur erforderlich. Die Crux: Gleichzeitig wollen Automobilhersteller erst mit dem Vertrieb von Brennstoffzellenfahr-

zeugen beginnen, wenn eine ausreichende Infrastruktur gegeben ist.

### Aufbau von Wasserstofftankstellen

Bis zum heutigen Zeitpunkt sind die meisten Wasserstofftankstellen Spezialanfertigungen, die noch nicht standardisiert sind. Daher gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, Wasser-

Ausbauoffensive: Entwicklung der Anzahl der Wasserstofftankstellen in Deutschland



stoff für Brennstoffzellenfahrzeuge zur Verfügung zu stellen (Abbildung Seite 24). Jedoch hat sich über die letzten Jahre herauskristallisiert, dass die meisten Fahrzeuge gasförmigen Wasserstoff (compressed gaseous hydrogen, CGH<sub>2</sub>) tanken. Sie speichern den Wasserstoff in Tanks entweder bei 350 oder 700 bar. Daher muss der Wasserstoff vorher entsprechend komprimiert werden.

Außerdem muss für eine reibungslose Betankung mit CGH<sub>2</sub> über den Dispenser (Zapfsäule für Wasserstoff) zwischen der Tankstelle und dem Fahrzeug immer ein Druckgefälle bestehen. Daher wird der Wasserstoff zum Teil bis auf 880 bar komprimiert. Beim Betankungsvorgang entspannt sich der Wasserstoff auf 700 bar. Durch seine speziellen Eigenschaften (negativer Joule-Thomson-Effekt) erwärmt sich der Wasserstoff bei der Drosselung allerdings und braucht Kühlung.

Für die Abgabe von CGH<sub>2</sub> gibt es bisher zwei Konzepte: Zum einen wird gasförmiger Wasserstoff direkt aus seinem Anlieferungs-Tank (250 bar) bei Bedarf auf das nötige Druckniveau verdichtet. Oder man nutzt ein Kaskadenprinzip, wobei der Wasserstoff zuerst von einem niedrigen Druckniveau in Mitteldrucktanks und anschließend in einer weiteren Verdichterstufe für den Hochdrucktank komprimiert wird. So ist für die Betankung meistens genug Wasserstoff bei hohem Druck vorhanden und der Betrieb kann trotz eines kurzzeitigen Defektes des Verdichters weiterlaufen. Man braucht dafür allerdings extra Mittel- und Hochdrucktanks.

Bei der Belieferung der Tankstelle mit flüssigem Wasserstoff (liquid hydrogen, LH<sub>2</sub>), ist es nötig, diesen zu verdichten und anschließend zu verdampfen, um ihn als CGH<sub>2</sub> abzugeben. Da er erst bei -252 °C flüssig wird, sind dafür ganz andere Komponenten erforderlich. LH<sub>2</sub> wird an der Tankstelle in Kryo-tanks gelagert, die auf solche Temperaturen ausgelegt sind und den Wasserstoff mit Pumpen an das Fahrzeug abgeben.

Manche Autobauer erforschen auch den direkten Einsatz von LH<sub>2</sub> als Sprit. Dafür muss der Wasserstoff nicht verdampft werden, die Abgabe erfolgt bei Bedarf über einen Dispenser [1].

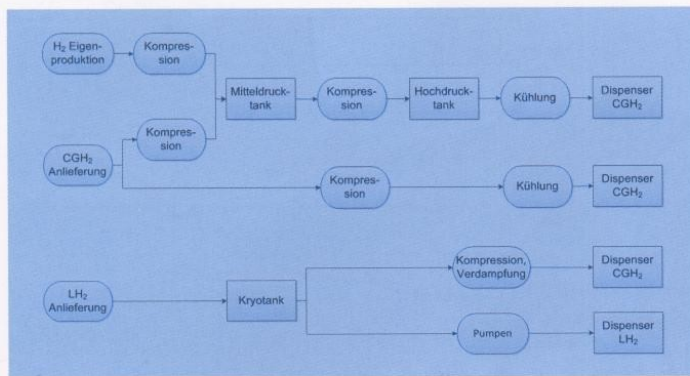
Flüssiger Wasserstoff hat den Vorteil, dass er in größeren Mengen transportiert werden kann: Ein Lkw schafft 3,5 Tonnen flüssigen Wasserstoff oder 0,45 Tonnen gasförmigen Wasserstoff bei 250 bar. Der Transport von flüssigem Wasserstoff ist jedoch nur über sehr weite Strecken zu empfehlen, weil bei der Verflüssigung etwa 30 Prozent der gespeicherten Energie verloren geht, bei der Kompression nur sechs [2]. Wasserstoff kann aber auch direkt vor Ort produziert werden. Dies geschieht meistens mit Elektrolyseuren. Das spart den Transport, ist aber mit mehr technischer Anlagenkomplexität verbunden.

Man muss also im Einzelfall prüfen, ob sich eine Wasserstoffproduktion vor Ort oder eine Anlieferung von flüssigem Wasserstoff lohnt. Weltweit hat sich für Brennstoffzellenfahrzeuge inzwischen ein Standard für die Betankung mit gasförmigem Wasserstoff bei 700 bar durchgesetzt. Der Standard SAE J2601 legt die Betankungsdauer auf drei Minuten fest und regelt weitere Parameter, um zum Beispiel Überhitzung und Überfüllung zu verhindern.

### Verteilung in Deutschland

Wie sich die Anzahl der Wasserstofftankstellen in Deutschland seit 1994 entwickelt hat, ist auf der Abbildung oben zu erkennen. Hierzu zählen alle Abgabestationen, die direkt Pkw, Busse oder Schiffe betanken. Bis zum 1. Januar 2013 waren insgesamt 31 Tankstellen in Betrieb. Diese Zahl ist jedoch mit einer kleinen Unsicherheit verbunden, weil über einige ältere, nicht zugängliche Tankstellen, keine Angaben vorliegen. Errichtet wurden bisher sogar 39 Tankstellen, von denen aber acht Stück schon wieder schließen mussten, weil Forschungs-





Die richtige Technik: Unterschiedliche Konzepte für Wasserstofftankstellen im Überblick

projekte ausgelaufen sind oder inzwischen neuere und bessere Technologie verfügbar ist.

In den 90er Jahren passierte im Bereich der Wasserstofftankstellen sehr wenig. 1999 wurde die erste öffentliche Wasserstofftankstelle am Münchener Flughafen eröffnet. Daraufhin kam es zu einem moderaten Ausbau bis 2003. Seitdem hat sich einiges getan. Einige ältere Tankstellen sind außer Betrieb, neue wurden eröffnet. Diese betreiben unterschiedliche Akteure wie Mineralölunternehmen, Automobilbauer, Energieversorger sowie Forschungseinrichtungen und der öffentliche Nahverkehr. Derzeit sind 16 der Tankstellen öffentlich zugänglich und 13 für Pkw mit einem 700-bar-Tank geeignet. Drei davon stellen Wasserstoff auch in flüssiger Form bereit [9].

Sieht man sich die geografische Verteilung der derzeitigen Wasserstofftankstellen an, fällt auf, dass sie sich auf einige Regionen konzentrieren. In den Städten Hamburg und Berlin stehen verhältnismäßig viele Tankstellen (acht in Hamburg, sechs in Berlin), sowohl öffentlich als auch für Flottenfahrzeuge, wie auf dem Hamburger Flughafen. Beide Städte fördern seit längerem Wasserstoffmobilität ausgehend von Bussen des öffentlichen Nahverkehrs, die mit Brennstoffzellen ausgerüstet sind.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt in Nordrhein-Westfalen. Da dort diverse Industriebetriebe Wasserstoff seit jeher als Nebenprodukt erzeugen, liegt es nahe diesen für den Mobilitätssektor zu nutzen. Dies geschieht beispielsweise mit der Tankstelle in Hürth. Auch im Großraum Stuttgart gibt es Wasserstoff-Tankstellen, weil Daimler und EnBW diese Technologie vorantreiben wollen, was auch von der Landesregierung gefördert wird [3].

In München gab es zwar die erste öffentliche Tankstelle, derzeit ist jedoch keine für private Pkw zugänglich. Darüber hinaus verstreuen sich noch weitere Tankstellen, die aber meis-

tens zu Forschungszwecken bei Automobilbauern wie etwa bei Opel in Mainz oder Forschungsinstituten (Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg) stehen.

### Ausbaustrategien

Um den Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur voranzutreiben haben sich bereits 2009 mehrere Industrieunternehmen zur Initiative H<sub>2</sub>-Mobility zusammengeschlossen. Unter anderem Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell und Total [4]. Seit 2012 fördert außerdem das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung die Initiative im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie mit insgesamt 20 Millionen Euro [5].

Bis Ende 2015 (siehe Diagramm auf Seite 23) sollen insgesamt 50 öffentliche Wasserstofftankstellen für Pkw und Busse zur Verfügung stehen. Clean Energy Partnership (CEP) hat dafür bereits einen konkreten Ausbauplan vorgestellt [6]. Ausgehend von den Ballungsräumen Hamburg, Berlin, Leipzig, Köln, Frankfurt, Stuttgart und München sollen Wasserstoffkorridore ausgebaut werden. Auch regional wird diese Initiative unterstützt. So stellt das Innovationsprogramm Wasserstoffinfrastruktur des Landes Baden-Württemberg weitere vier Millionen Euro zur Verfügung [3]. In der Abbildung auf Seite 23 ist diese Entwicklung als hellblaue Kurve dargestellt. Wird dieser Prozess wie geplant umgesetzt und es werden keine weiteren Tankstellen geschlossen, wird es zu Beginn des Jahres 2016 69 Wasserstofftankstellen geben.

### Brennstoffzellenfahrzeuge kommen später

Über die letzten Jahre hat sich die Wasserstoffinfrastruktur bedeutend weiterentwickelt. Es hat sich gezeigt, dass Techni-

ken zur Abgabe von  $\text{CGH}_2$  statt  $\text{LH}_2$  benötigt werden. Dadurch wurden schrittweise immer mehr Tankstellen eröffnet. Für eine flächendeckende Versorgung, wie sie im Moment geplant wird, reicht dieses Tempo jedoch nicht aus. Dafür müsste es zu einer weiteren Standardisierung und auch Kostenreduktion der Anlagentechnik kommen. Da sich jedoch die Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen verzögert (von Daimler jetzt für 2017 statt 2014 geplant [7], [8]), wird das auch beim Ausbau der Infrastruktur der Fall sein. Letztendlich lohnen sich die hohen Investitionskosten für die Tankstellen nur, wenn eine gewisse Auslastung erreicht wird. Solange die Autobauer nicht mit der Kleinserienproduktion beginnen, ist dies nur für Tankstellen gegeben, die Flottenfahrzeuge versorgen wie zum Beispiel den öffentlichen Nahverkehr. Des Weiteren muss die Technik weiter ausreifen und die Verfügbarkeit erhöht werden. Andernfalls wird die Akzeptanz für Brennstoffzellenfahrzeuge bei den Verbrauchern schwinden. □

#### Weitere Informationen

- [1] Michael Ball und Martin Wietschel: The hydrogen economy, 2009, S. 338-345
- [2] Euroean Commission: HyWays – an integrated project to develop the European Hydrogen Energy Roadmap, 6th Framework Programme, deliverable 1.4: technology fact sheets. 2007.
- [3] Minister für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg:  $\text{H}_2$  BW Innovationsprogramm Wasserstoffinfrastruktur Baden-Württemberg; 13.9.2012
- [4] NOW: Industrieinitiative arbeitet am Aufbau eines Wasserstofftankstellennetzes für Brennstoffzellenfahrzeuge in Deutschland, [www.now-gmbh.de/de/mobilitaet/mobilitaet-von-morgen/autos-busse-und-oeffentlichtankstellen/h2-mobility-aufbau-eines-wasserstofftankstellennetzes-fuer-deutschland.html](http://www.now-gmbh.de/de/mobilitaet/mobilitaet-von-morgen/autos-busse-und-oeffentlichtankstellen/h2-mobility-aufbau-eines-wasserstofftankstellennetzes-fuer-deutschland.html) letzter Aufruf 11.2.2013
- [5] BMVBS: Bundesregierung und Industrie errichten Netz von 50 Wasserstoff-Tankstellen; 20.6.2012 [www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2012/125-ramsauer-wasserstofftankstellen.html?nn=36210](http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2012/125-ramsauer-wasserstofftankstellen.html?nn=36210) letzter Abruf 11.2.2013
- [6] CEP: 50 Wasserstofftankstellen für Deutschland, Juni 2012 [www.cleanenergypartnership.de/uploads/tx\\_cepdownloadsv2/Deutschlandkarte\\_CEP\\_55\\_TS\\_A4.pdf](http://www.cleanenergypartnership.de/uploads/tx_cepdownloadsv2/Deutschlandkarte_CEP_55_TS_A4.pdf); letzter Aufruf 11.2.2013
- [7] Daimler: Mehr Schub für die Brennstoffzellentechnologie: Strategische Kooperation der Daimler AG und Renault-Nissan Allianz trifft Abkommen mit Ford; 28.1.2013 <http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-614233-49-1569543-1-0-1-0-0-1-11694-0-0-1-0-0-0-0.html?TS=1361269386822>; letzter Aufruf 19.02.2013
- [8] Daimler: Geschäftsbericht 2011
- [9] Grobe Übersicht zu Wasserstofftankstellen: <http://h2stations.org>
- [10] Verfügbarkeit der CEP-Tankstellen: [www.cleanenergypartnership.de/h2Tankstellen](http://www.cleanenergypartnership.de/h2Tankstellen)

> MORE@CLICK M20413300



**Dipl.-Ing. Christina Wulf**, wissenschaftliche Mitarbeiterin im Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft an der Technischen Universität Hamburg Harburg.



**Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt**, Institutsleiter des Instituts für Umwelttechnik und Energiewirtschaft an der Technischen Universität Hamburg Harburg.

