

Potenziale in der Wasserstoff-Tankstellentechnologie

Infolge des weltweiten Klimawandels ebenso wie aufgrund Versorgungssicherheit ist eine Abkehr von fossilen Energierohstoffen zwingend notwendig. Strom aus Wind und Sonne bietet eine unerschöpfliche Quelle zur Versorgung von Industrie, Energiewirtschaft, Gebäuden und Verkehr. Zum Ausgleich des fluktuierenden Stromangebots von Wind und Sonne werden Speicher wie Pumpspeicherkraftwerke oder zukünftig Batterien bzw. für große Energiemengen oder lange Speicherdauer stoffliche Speicher wie Wasserstoff benötigt.



© sdecoret/AdobeStock

Wasserstoff in der Industrie

Wasserstoff ist ein brennbares Gas, das leichter als Luft ist und bereits heute vielfältige Anwendung als Rohstoff in der Grundstoffindustrie wie der Herstellung von Ammoniak oder Methanol findet. Zur Veredlung von Kraftstoffen und in der Petrochemie wird Wasserstoff darüber hinaus seit Jahrzehnten in großen Mengen sicher eingesetzt. Allein in Deutschland werden jährlich 1,67 Mio. t Wasserstoff industriell eingesetzt, das entspricht einem Heizwert von 55 TWh. Der überwiegende Teil des Wasserstoffs wird aus fossilen Rohstoffen wie Erdgas oder Rohöl gewonnen bzw. entsteht als Nebenprodukt in der chemischen Industrie. [BMWI_2020]

Die Wasserstoffherstellung zieht abhängig vom Rohstoffeinsatz eine Emissionsspur an „Klimagasen“ nach sich, die in einer Farbtabelle [IKEM_2020] kategorisiert wird. Aus Erdgas hergestellter Wasserstoff gilt als „grau“, wenn dabei CO₂ in die Atmosphäre entlassen wird. Einfangen und Deponieren von CO₂ führt zu „blauem Wasserstoff“. Wird der im Erdgas enthaltene Kohlenstoff fest als Ruß abgeschieden, spricht man von türkischem Wasserstoff. Zukünftig soll bei der Wasserstoffherstellung auf fossile Energieträger verzichtet werden. Entsteht Wasserstoff zum Beispiel durch Wasserelektrolyse ausschließlich mittels Strom aus erneuerbaren Energien, spricht man von grünem Wasserstoff. Die Art der Wasserstoffherstellung wirkt sich auf den Preis aus. Grauer Wasserstoff kann zu Kosten von 2 €/kg hergestellt werden. Die Herstellungskosten von grünem Wasserstoff sind von den Energiekosten und der Betriebsdauer der Anlagen abhängig. In der Literatur werden Kosten zwischen 1,5 €/kg und 7 €/kg genannt. Eine Studie des ZSW [ZSW_2017] errechnet 4,85 €/kg bei Einsatz von Strom aus Wasserkraft in der Megawattklasse.

Wasserstoff als Kraftstoff

Wasserstoff kann als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren oder mittels Brennstoffzellen zur On-board-Stromerzeugung in Elektrofahrzeugen genutzt werden. Weltweit sind ca. 43.000 wasserstoffbetriebene PKW im Einsatz. In Deutschland fahren zum Zeitpunkt der Studiererstellung 1.450 PKW, 61 Busse sowie einzelne Nutzfahrzeuge, Züge und Schiffe mit Wasserstoff als Energiequelle.

Für PKW gibt es einen international akzeptierten, bis 10 kg Befüllmenge gültigen Betankungsstandard (SAE J2601 und die ISO-19880-Reihe), wobei im Fahrzeug typischerweise 5–6 kg Wasserstoff bei einem Druck von bis zu 70 MPa vorgehalten werden. Für Nutzfahrzeuge wie LKW im Verteilverkehr, Busse und Züge sind Drucktanks mit einem Speicherdruck bis 35 MPa verbreitet. Ein Vorschlag zur schnellen, standardisierten Betankung existiert. Derzeit sind in Deutschland über 90 öffentlich zugängliche Wasserstofftankstellen (Hydrogen Refuelling Stations, HRS) in Betrieb, 15 weitere sind in Planung. Von den existierenden Tankstellen sind 8 auch zur Betankung von Bussen bzw. LKW geeignet. Abbildung 1 zeigt eine Zapfsäule für Druckwasserstoff bei 70 MPa und 35 MPa, integriert in eine Tankstelle für reguläre Flüssigkraftstoffe. [IEA_2021, NOW_2022 und <https://h2.live>]



Abbildung 1: Integration einer H₂-Zapfsäule für 70 MPa (PKW) und 35 MPa (NFZ) in eine bestehende Tankstelle

Quelle: ZSW/M. Jenne

Wasserstoffqualität

In der technischen Gaseindustrie ist eine Klassifikation der Wasserstoffqualität nach dem Wasserstoffgehalt üblich. Die Qualitätsstufe 3.0 entspricht zum Beispiel einem Wasserstoffgehalt von 99,9 %. Qualität 3.7 enthält 99,97 % Wasserstoff, während Qualität 5.0 99,999 % Wasserstoff enthält. Die Anforderungen an den Kraftstoff Wasserstoff unterscheiden sich signifikant von denen an technische Gase. Daher wurden über eine internationale Norm (DIN EN 17124) zusätzlich die zulässigen Mengen für verschiedene Kontaminanten definiert, die dann im Zuge regelmäßiger Überprüfungen überwacht werden können.

Tabelle 1 zeigt exemplarisch Betankungsmengen und -drücke für verschiedene Fahrzeugklassen. Der an Tankstellen verfügbare Wasserstoff ist derzeit gemischter Herkunft und wird mittels Dampfpreformierung von Erdgas (grauer Wasserstoff) erzeugt, entsteht als Nebenprodukt in der chemischen Industrie oder wird als grüner Wasserstoff durch Wasserelektrolyse mit grünem Strom oder Prozessieren von Biomasse gewonnen, wobei angestrebt wird, den Anteil an grünem Wasserstoff zeitnah zu erhöhen.

H ₂ -Fahrzeug	Typische Tankgröße [kg]	Typischer H ₂ -Verbrauch [kg/100km]
FCEV PKW (70 MPa)	5 .. 6,5	~ 1
FC-Busse, Trucks (35 MPa)	20 .. 42,5	8,5 .. 10,5
Künftige FC-Trucks (div.)	80 .. 120	7 .. 8
H₂-Triebzug 25 m (35 MPa)	180	22
H₂-Triebzug 54 m (35 MPa)	Variiert	33

Quelle: e-mobilBW, 2016; PRHYDE, 2021; CEP, 2021; H2M, 2021 und NOW, 2018]

Tabelle 1: Speicherkapazitäten und Verbräuche typischer H₂-Fahrzeuge

Für schwere Nutzfahrzeuge werden Reichweiten von 800 bis 1.000 km und damit Tankinhalte um 80 kg gefordert. Dies kann nur durch eine Erhöhung des Betankungsdrucks für komprimierten gasförmigen Wasserstoff (Compressed Gaseous Hydrogen, CGH₂) von heute 35 auf 70 MPa, durch Flüssigwasserstoffspeicherung (LH₂) oder durch Druckspeicherung unter Kryobedingungen (CcH₂) erreicht werden.

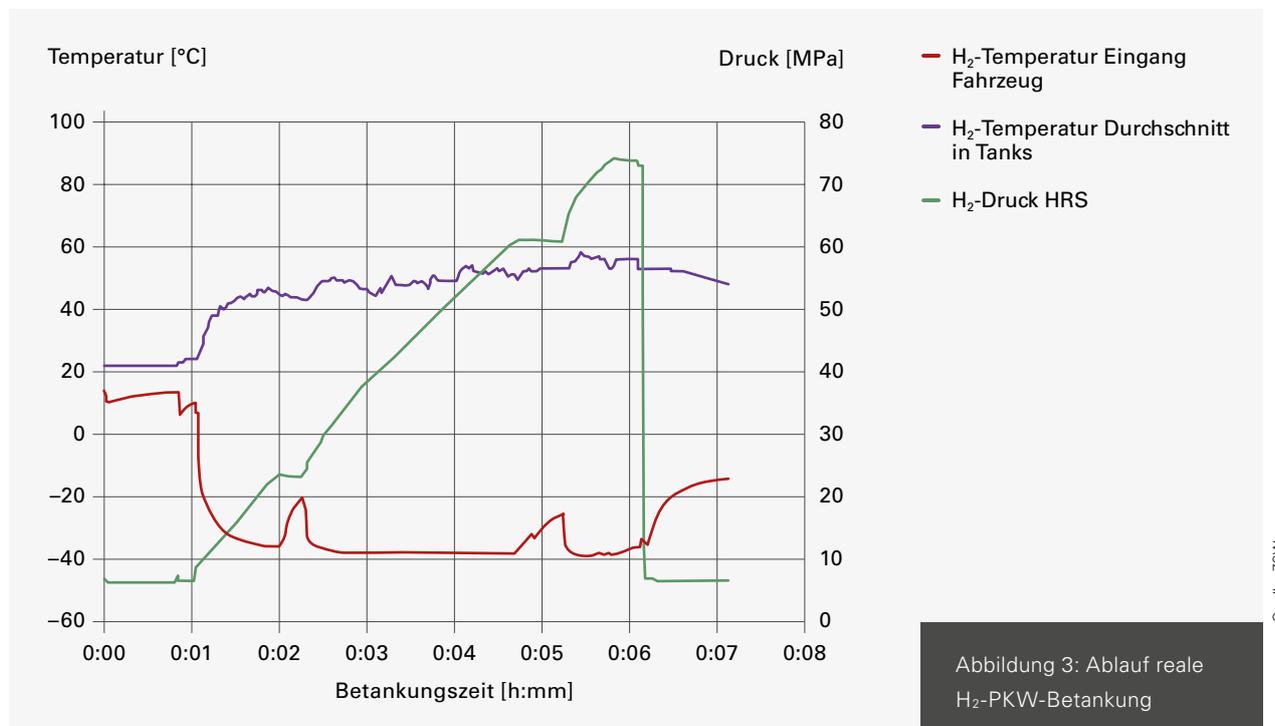
Die Versorgung der H₂-Tankstellen mit Wasserstoff geschieht heute größtenteils über die Anlieferung als komprimiertes Gas und Lagerung vor Ort. An wenigen Standorten wird Wasserstoff flüssig und tiefkalt (LH₂) angeliefert und gespeichert oder vor Ort über Elektrolyse erzeugt. Aktuell sind in Deutschland große Anstrengungen im Gang, um tiefkalte Betankungsformen wie Cryo-compressed (CcH₂) oder subcooled Liquid (sLH₂) mittelfristig für Nutzfahrzeuge einzuführen.

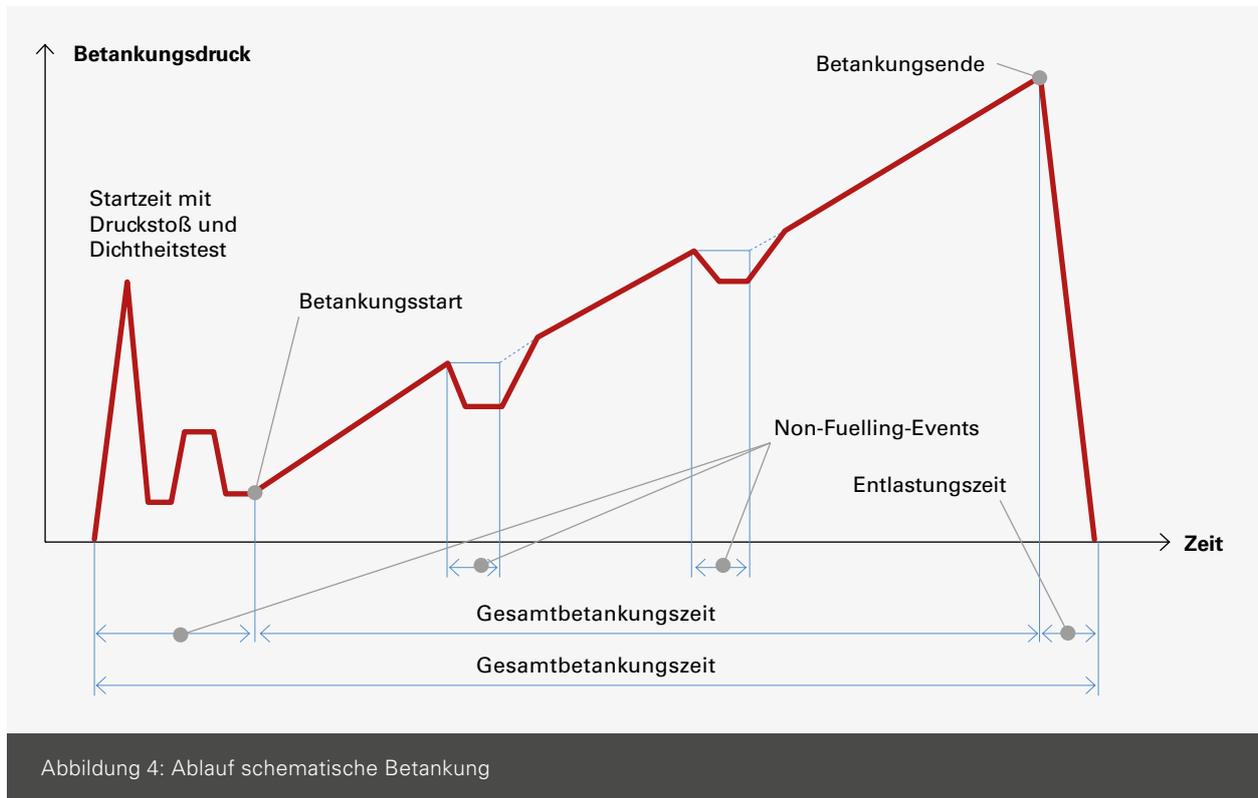
Ablauf einer Wasserstoffbetankung mit CGH₂

Im Unterschied zur Betankung mit flüssigen Treibstoffen, bei der das Fluid vom Tankstellenspeicher direkt in den Fahrzeugtank gepumpt wird, werden gasförmige Treibstoffe vorgängig verdichtet und mithilfe des Druckgefälles vom Endspeicher in der Tankstelle in den Fahrzeugtank überströmt. Eine direkte Befüllung des Fahrzeugs über einen Verdichter ist möglich und wird in einzelnen Fällen auch angewendet, setzt aber eine hohe und dynamische Förderleistung des Verdichters voraus.



Die Befüllung eines Drucktanks ist ein energieaufwändiger Prozess, der von der Gasart, den Drücken im Lagerbehälter, dem Verdichter und dem Druckniveau im Tank beeinflusst wird. Je nach Betankungsart müssen 2,3–4,4 kWh/kg (7 bis 13 % des Brennwertes) für die tankgerechte Verdichtung und Kühlung des Wasserstoffs aufgewandt werden. [Cabal 2018] Aufgrund des Aufbaus der heute überwiegend eingesetzten faserumwickelten Composite-Tanks muss eine Temperaturgrenze von derzeit 85 °C (UNECE GTR 13) im Tank unbedingt eingehalten werden.





Dies wird durch Vorkühlung des Gases, Steuerung des Gasflusses anhand sogenannter Befüllprotokolle mit definierten Druckanstiegsraten und Zieldrücken in Abhängigkeit von der Außentemperatur und des Tankfüllgrads bei Beginn der Betankung bewirkt.

Zu Beginn des Tankvorgangs erfolgt ein Dichtigkeitsstest mittels eines Druckstoßes. Tankstelle und Fahrzeug kommunizieren über eine Infrarotschnittstelle. Aus dem Druckverlauf können zusätzlich Tankgröße und Füllstand berechnet werden. Anschließend wird der Tank durch Zuströmen von Wasserstoff mit einer definierten Druckrampe (Befüllrampe) bis zum Zieldruck befüllt. Parallel wird in der Tankstelle der Füllstand des Tanks errechnet und der Betankungsvorgang gegebenenfalls abgebrochen. Bei Ausfall der Infrarotkommunikation kann ein konservativeres tabellenbasiertes Befüllprotokoll verwendet werden. Die für große Betankungsmengen bei hohem Druck erforderlichen standardisierten Befüllprotokolle und funkbasierten Kommunikationsschnittstellen befinden sich derzeit in der Entwicklung.

Mehrere Anbieter entwickeln und vertreiben für PKW gedachte H₂-Kleintankstellen mit gekoppelter elektrolytischer Wasserstoff-erzeugung z. B. aus Photovoltaik vor Ort. Diese Anlagen mischen Betankung durch Überströmen bis 35 MPa und eine direkte Hochdruckbefüllung mittels Kompressor über Nacht. [Messer_CH]

Neben Straßenfahrzeugen gibt es weltweit zehntausende brennstoffzellenbetriebener Flurförderfahrzeuge. Die Betankungstechnologie wird in Form von Betriebstankstellen zur Befüllung von H₂-Stahlbehältern typischerweise im Mitteldruckbereich 20/30MPa und einfachen kabelbasierten Kommunikationslösungen realisiert.

Anwendbare Regulierungen, Normen und Sicherheitsaspekte

Der Umgang mit Gefahrstoffen an Tankstellen im Allgemeinen und mit Wasserstoff im Besonderen ist Gegenstand einer Vielzahl an Vorschriften und Normen. Im Folgenden sind die für die Wasserstoffbetankung wesentlichen Dokumente gelistet.

- DIN EN 17127:2019-09 Wasserstofftankstellen im Außenbereich zur Abgabe gasförmigen Wasserstoffs und Betankungsprotokolle
- TRBS 3151: Detaillierung BetrSichV, Tankstellenauslegung, Bau, Sicherheitsaspekte und Sicherheitsabstände
- DIN EN 17124:2018: Wasserstoffqualität als Kraftstoff für Straßenfahrzeuge
- SAE J 2601: Betankungsprotokolle CGH₂, (2–10 kg H₂; seit 2020 auch 70 MPa >10 kg, bis 60 g/s H₂)
- CEP-Wenger Betankungsprotokolle für Nutzfahrzeuge 35 MPa CGH₂, 20–42,5 kg H₂, bis 120 g/s H₂ [CEP_2021]
- Weitere anwendbare Protokolle sind im EU-Projekt PRHYDE in Entwicklung [PRHYDE_2021] und werden in der ISO-19885-Reihe veröffentlicht werden

Empfehlenswert als Informationsquelle rund um Regulierung, Vorschriften und Normen für die Wasserstoffinfrastruktur ist die im März 2022 veröffentlichte RCS-Datenbank (Registrierung notwendig): <https://rcs.now-gmbh.de/>

Weiterhin empfehlenswert ist der am 24. März 2022 veröffentlichte aktualisierte „Genehmigungsleitfaden Wasserstoff-Tankstellen“ https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/03/NOW_Genehmigungsleitfaden_H2-Tankstellen.pdf

Wasserstoffbereitstellung

Die Bereitstellung des Kraftstoffs Wasserstoff für mobile Anwendungen an Tankstellen ist grundsätzlich über die Erzeugung vor Ort oder die Anlieferung über Straße oder über eine Wasserstoffleitung möglich (Abbildung 5).

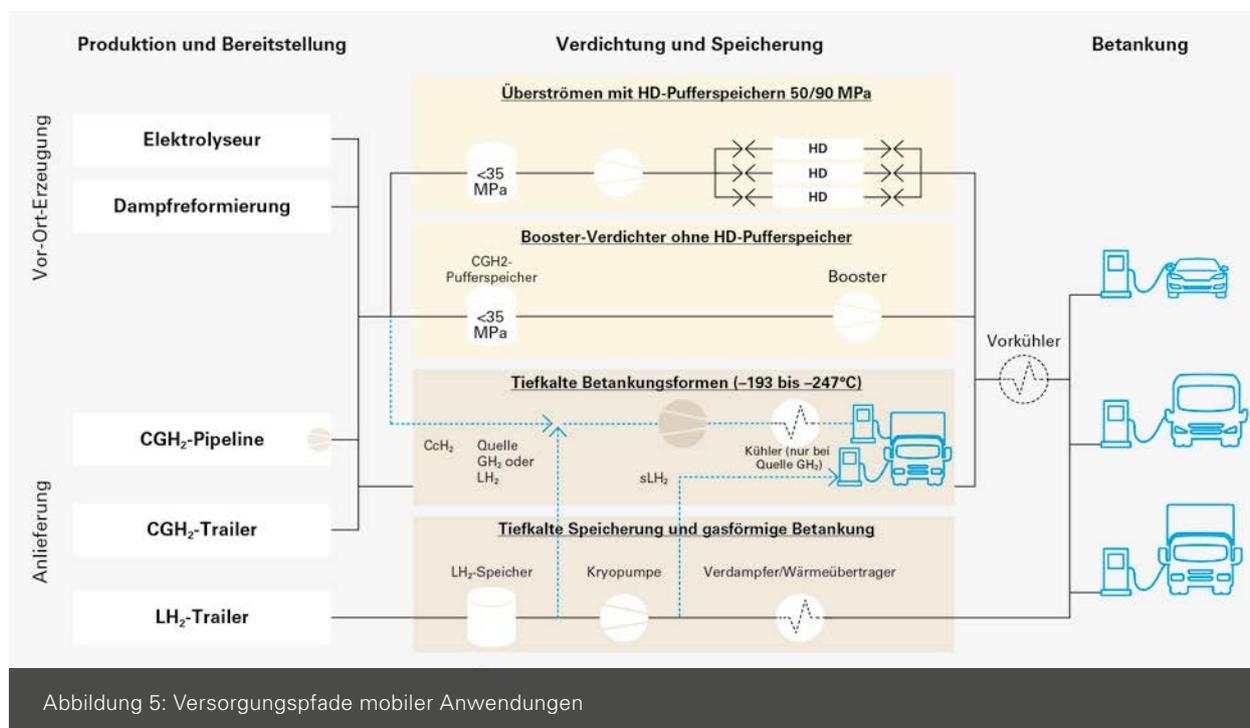


Abbildung 5: Versorgungspfade mobiler Anwendungen

Traditionell wird gasförmiger Wasserstoff mit Sattelzügen transportiert, deren Auflieger eine Transportkapazität von ca. 300 kg haben. Neuere Fahrzeuge können bis 500 kg transportieren. Darüber hinaus existieren Konzepte für Sattelzüge mit einer Transportkapazität bis zu 1 t. Der Transport von Flüssigwasserstoff erfolgt ebenfalls mittels Sattelzügen. Deren Auflieger haben üblicherweise eine Transportkapazität von bis zu 4 t.

Während eine Betankung mit gasförmigem Wasserstoff oder Cryo-compressed Hydrogen über eine Erzeugung vor Ort oder die Belieferung mit gasförmigem oder flüssigem Wasserstoff möglich ist, erfordert die Betankung mit Flüssigwasserstoff eine Belieferung und Bevorratung von Flüssigwasserstoff LH₂ an der Tankstelle. Eine Verflüssigung vor Ort erscheint derzeit unrealistisch. Für die Verflüssigung von Wasserstoff muss bei heutigen Verflüssigern mit einem Energieaufwand von 12–15 kWh/kg gerechnet werden. Als in zukünftigen Großanlagen machbar wird ein Energieaufwand von 6,8 kWh/kg angesehen.

Wasserstoffbevorratung an der Tankstelle

Für die Bevorratung größerer Mengen Wasserstoff an einer Tankstelle sind Druckspeicher aus Stahl oder Composite mit Druckniveaus von 4,5 bis 50 MPa etabliert. Außerdem kann Wasserstoff in verflüssigter Form in Kryotanks an der Tankstelle vorgehalten werden. Die Höchstmengen speicherbaren Wasserstoffs an Tankstellen werden in Deutschland durch die BImSchV bzw. die Störfallverordnung definiert.

Folgende weitere Speichermöglichkeiten am Ort der H₂-Tankstelle sind technisch machbar und werden derzeit im Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit sowie die Ansprüche an die Wasserstofflogistik untersucht.

Metallhydride: Einige Metalle und Metalllegierungen (z. B. auf Ni-, Ti-, Mg- bzw. Al-Basis) sind in der Lage, Wasserstoff durch Einlagerung in das Kristallgitter des Metalls zu speichern. Sie bilden dabei sogenannte Metallhydride. Dort lagern sich die H-Atome – also Wasserstoff in gelöster Form – in sogenannten „Zwischengitterplätzen“ ein. Metall und Gas gehen eine chemische Verbindung ein, bei deren Bildung Wärme freigesetzt wird. Im Gegenzug muss zur Wasserstoffabgabe Wärme zugeführt werden. Es gibt verschiedene Legierungssysteme, die sich durch ihr Speichervermögen und ihre Betriebstemperatur unterscheiden. Metallhydridspeicher werden z. B. in deutschen U-Booten eingesetzt. Ferner werden sie als stationäre Speicher angeboten. Metallhydridspeicher haben eine hohe Energiedichte, jedoch infolge der Metalllegierung eine geringe spezifische Energie. Außerdem begrenzt das Wärmemanagement die Geschwindigkeit der Wasserstoffspeicherung und der Wasserstofffreisetzung. Neben den „thermisch reversiblen“ Hydriden gibt es weitere Verbindungen zur Wasserstoffspeicherung wie Lithiumhydrid, Lithiumaluminiumhydrid, Natriumborhydrid und Aminoboran, die Wasserstoff durch Reaktion mit Wasser freisetzen. Dies ist jedoch verfahrenstechnisch komplex, zudem muss das Reaktionsprodukt aufwändig recycelt werden.

Methanol und synthetische Kohlenwasserstoffe: Wasserstoff kann mit verschiedenen Stoffen zu wasserstoffreichen Verbindungen umgesetzt werden. Aus CO₂ und Wasserstoff kann in einer vergleichsweise einfachen Reaktion zum Beispiel Methan oder Methanol synthetisiert werden. Für beide Stoffe gibt es etablierte Märkte und Transportinfrastrukturen. Gerade Methanol wurde in der Vergangenheit als möglicher erneuerbarer Kraftstoff gehandelt. In China ist eine nennenswerte Anzahl an Fahrzeugen unterschiedlicher Größe in Demonstrationsprojekten in Betrieb. [MI_2019] Etwas aufwändiger ist die Herstellung von synthetischem Diesel, Kerosin oder Benzin (flüssige Kohlenwasserstoffe). Die Weiterverarbeitung von Wasserstoff zu Kohlenwasserstoffen oder Methanol ist außerdem mit Verlusten von ca. 20–30 % in Form von Abwärme verbunden. Kohlenwasserstoffe und Alkohole können wieder in Wasserstoff verwandelt werden, jedoch treten auch hier Verluste auf.

Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC): Die Reaktion sogenannter ungesättigter Kohlenwasserstoffe wie zum Beispiel Toluol oder daraus abgeleiteter Verbindungen mit Wasserstoff (Hydrierung) zur Wasserstoffspeicherung wird aktuell intensiv untersucht und in Demonstrationsprojekten erprobt. [Hydrogs_2022] Die Bildung dieser „Liquid Organic Hydrogen Carriers“ (LOHC) findet bei Temperaturen um 250 °C an einem Katalysator statt, die Freisetzung erfolgt ebenfalls in einer katalytischen Reaktion bei Temperaturen um 300 °C. Bei der Speicherung von Wasserstoff in LOHC werden ca. 30 % der Energie des Wasserstoffs in Form von Wärme frei, die bei der Freisetzung von Wasserstoff aus LOHC wieder benötigt werden. LOHC weisen ähnliche Transport-

und Lagereigenschaften wie Diesel oder Kerosin auf. Ihr Einsatz wird daher für den Ferntransport und die saisonale Speicherung von Wasserstoff diskutiert. Ob sich die thermochemische Beladung und Entladung von flüssigen Toluolverbindungen mit Wasserstoff sowie der Transport für mobile Anwendungen durchsetzen werden, ist heute fraglich.

Ammoniak: Die industrielle Herstellung von Ammoniak aus Wasserstoff und Stickstoff zu Beginn des 20. Jahrhunderts stellte einen Meilenstein in der Geschichte der chemischen Industrie dar. Weltweit wurden 2019 ca. 233 Mio. t umgesetzt. Ammoniak wird bei Umgebungsdruck bei -33 °C oder einem Druck von 0,9 MPa bei 20 °C flüssig. Die Handhabung von Ammoniak wird industriell beherrscht. Ammoniak würde den Transport und die Speicherung von etwa 18 Gew.-% H_2 in Ammoniak ermöglichen. [Shell_2017] Ammoniak gilt als Gefahrstoff (entzündlich, giftig, korrosiv, umweltgefährdend), daher stößt seine Verwendung als Kraftstoff auf große Skepsis. Ammoniak kann durch thermische Zersetzung wieder in Wasserstoff und Stickstoff getrennt werden, allerdings müssen ca. 14 bis 36 % der im ursprünglich Wasserstoff enthaltenen Energie als Wärmeverlust in Kauf genommen werden. [IEA 2019]

Adsorbentien: Neben der Einlagerung von Wasserstoff in Metalllegierungen kann Wasserstoff auch in andere Stoffe eingelagert bzw. an der Oberfläche von Nanoporen adsorbiert werden. Als Adsorbentien kommen hier Aktivkohlen, Zeolithe oder sogenannte Metal-Organic-Framework-Verbindungen (MOF) in Frage. Diese Stoffe adsorbieren bei Raumtemperatur in der Regel nur geringe Mengen an Wasserstoff, jedoch kann ihre Kapazität durch Abkühlen stark erhöht werden. Trotz intensiver Forschungsarbeiten wurden bislang noch keine technischen Anwendungen für adsorptive Wasserstoffspeicher entwickelt.

Fertransport von Wasserstoff



Gasleitungsnetze: Wasserstoff kann als Gas analog Erdgas über ein Rohrleitungsnetz verteilt werden. Dies ist zur Verbindung von Chemiestandorten seit Langem gängige Praxis. In NRW betreibt Air Liquide beispielsweise ein Leitungsnetz von 240 km Länge [AL_01], das in Teilen seit 1940 (!) in Betrieb ist. Wasserstoff aus den existierenden Wasserstoffleitungsnetzen hat in der Regel keine Kraftstoffqualität und muss deshalb an der H₂-Tankstelle aufbereitet und, aufgrund des relativ niedrigen Versorgungsdrucks, vorverdichtet werden. Beispiele für Pipeline-versorgte HRS sind in Rotterdam und in Düsseldorf [AL_02] in Betrieb. Der Firmenverbund European Hydrogen Backbone hat im April 2022 angekündigt, die 2020 ausgegebenen Ziele für Leitungslängen (vgl. Abbildung 5) für 2030 und 2040 nahezu zu verdoppeln. [EHP_2022] Für Baden-Württemberg wurde eine Initiative gestartet, bei der aktuelle und künftige Wasserstoffnutzer ihren Bedarf angeben können, um den Aufbau bzw. die Umnutzung von Verteilstrukturen bedarfsgerecht gestalten zu können: <https://www.h2-fuer-bw.de/bedarfsmeldung>.

Leitungsgebundener Transport ist für große Wasserstoffmengen die kostengünstigste Art des Transports. Bis zum Vollausbau eines Verbundnetzes muss Wasserstoff nach wie vor über die traditionellen Pfade verteilt werden. Zwar öffnen die Gasnetzbetreiber im Rahmen ihrer Regelwerke ihre Leitungsnetze für wasserstoffreiche Gase, allerdings müsste Wasserstoff zur Verwendung als Kraftstoff in einem aufwändigen Prozess aus einer Mischung mit Erdgas entfernt und gereinigt werden. Dies ist aus Kostengründen nicht kurzfristig zu erwarten.

Schifftransport: Die japanische Firma Kawasaki baut seit Langem Flüssigerdgas-(LNG-)Transportschiffe und adaptiert die Technologie gegenwärtig auf den Transport des etwa 100 K kälteren Flüssigwasserstoffs LH₂. [Kawasaki_2019] Im Februar 2022 brachte das Prototypschiff SUISEI FRONTIER den ersten Wasserstoff aus Australien erfolgreich nach Japan. [Kawasaki_2022] Grundsätzlich bietet die Technologie das Potenzial, pipelineunabhängig große Mengen an Wasserstoff weltweit zu handeln. Dies bietet Chancen für Länder mit hohem Potenzial an erneuerbarer Energie wie Saudi-Arabien, die Vereinigten Arabischen Emirate, Australien, Schottland oder auch Norwegen, den Export klimaschädlicher fossiler Energieträger auf grünen Wasserstoff umzustellen. Hierzu gibt es in den genannten Ländern bereits große Anstrengungen. [ENOVA_2021]

Vor-Ort-Erzeugung von Wasserstoff

Übersteigt der Wasserstoffbedarf an der Tankstelle die Zufuhrmöglichkeiten über die Straße und steht kein Anschluss an ein Wasserstoffnetz zur Verfügung, so kommt eine Wasserstofferzeugung am Ort der Tankstelle in Betracht. Voraussetzung dafür ist jedoch ein ausreichend leistungsfähiger Stromanschluss oder Gasnetzanschluss für Biogas oder E-Gas oder die Belieferung über eines der oben genannten Wasserstofftransportmedien.

Wasserelektrolyse: Wasserstoff kann durch elektrolytische Zersetzung von Wasser mittels elektrischen Stroms erzeugt werden. Hierzu gibt es verschiedene etablierte Verfahren, die mittlerweile mit einer Leistungsaufnahme im Megawattbereich angeboten werden. Niedertemperaturverfahren wie alkalische Elektrolyse (AEL) oder Membranelektrolyse (PEMEL) arbeiten bei Temperaturen um 80 °C. Typische Energieaufwände zur Wasserstofferzeugung liegen heute zwischen 50 und 55 kWh/kg. Beide Verfahren erlauben dynamischen, dem Stromangebot folgenden Betrieb, auch bei Abgabedrücken von 1–3 MPa. Das Hochtemperaturverfahren (SOEL) hat einen geringeren elektrischen Energiebedarf (<40 kWh/kg), jedoch benötigt es eine Quelle für Hochtemperaturwärme von 800–900 °C. Der erzeugte Wasserstoff kann jeweils mit vertretbarem Reinigungsaufwand als Kraftstoff eingesetzt werden.

Reformierung von (Bio)Gas oder Methanol: Die Wasserstofferzeugung aus Kohlenwasserstoffen oder Alkoholen durch Dampfreformierung ist ein ebenfalls seit Langem industriell beherrschter Prozess. Im Reformierwerk wird der zu reformierende Brennstoff mit Wasserdampf hoher Temperatur umgesetzt. Das resultierende „Reformat“ enthält noch große Anteile an CO₂ und CO sowie nicht umgesetztem Brennstoff und muss daher mittels geeigneter Verfahren wie Druckwechseladsorption zur Kraftstoffqualität aufgereinigt werden. Die Reformierung erfordert Wärmezufuhr (ca. 20–25 % des Heizwerts).

Zersetzung von LOHC: Die Zersetzung von LOHC an der Tankstelle ist eine weitere Option der Vor-Ort-Herstellung von Wasserstoff. Hierzu wird der wasserstoffbeladene LOHC an einem Katalysator bei Temperaturen um 300 °C thermisch zersetzt. Der

dabei freiwerdende Wasserstoff kann noch Spuren an Zersetzungsprodukten des Grundmaterials enthalten und muss demzufolge zur Kraftstoffqualität aufgereinigt werden. Sofern die Zersetzungswärme nicht über eine externe Wärmequelle aufgebracht werden kann, muss dafür ein Teil des eingesetzten Wasserstoffs (ca. 25–30 %) verwendet werden.

Komponenten einer Wasserstofftankstelle

Wasserstofftankstellen bestehen typischerweise aus drei Baugruppen, die in unterschiedlicher Entfernung voneinander platziert werden können.

- Wasserstoffbevorratung
- Wasserstoffverdichtung und -konditionierung
- Wasserstoffabgabe

Wasserstoffbevorratung

Die Wasserstoffbevorratung kann gasförmig oder als tiefkalte Flüssigkeit erfolgen. Wird Wasserstoff vor Ort erzeugt, so muss dennoch ein gewisser Wasserstoffvorrat vorgehalten werden, um die Wasserstofferzeugungsrate von der Betankungsrate zu entkoppeln. Hierfür bietet sich die gasförmige Speicherung an.

Zur Bevorratung werden üblicherweise Stahlzylinder verwendet, die entweder als Mitteldruckspeicher (bis 90 m³ Inhalt bei bis 4,5 MPa, ca. 250 kg nutzbare Menge) stehend oder liegend oder als liegende Langflaschen bei bis zu 20 MPa Druck (6x 2 m³, ca. 160 kg nutzbare Menge) ausgeführt sind. Daneben sind Stahl- oder Compositeflaschenbatterien für die Bevorratung von Wasserstoff üblich. All diese Vorratsbehälter sind generell handelsüblich. Druckspeicher sind bei unregelmäßiger Entnahme und Tagesbedarfen von bis ca. 200 kg zu empfehlen.

Flüssigwasserstoff wird in vakuumsuperisolierten Tanks bevorratet, die über Straßenzufuhr befüllt werden. Flüssigwasserstoff-Bevorratung bietet sich ab einem stabilen Tagesbedarf von 200 kg an.

Wasserstoffverdichtung und -konditionierung

Wasserstoff kann auf verschiedenste Arten verdichtet werden, jedoch setzen die geringe Molekülgröße und die hohe Diffusivität technologische Grenzen. Für die Anwendung in Brennstoffzellen müssen besondere Schmiermittel, Dichtmittel oder Gleitlager eingesetzt werden. In der Regel werden Verdrängermaschinen eingesetzt. Turbomaschinen sind wegen der hohen Spaltverluste nicht zu empfehlen.

Kolbenverdichter: Jeder Zylinderhub verdichtet das Gas im Verhältnis 1:10. Oft werden mehrere Stufen mit Zwischenkühlung hintereinandergeschaltet. Üblich sind ölfreie Kolbenkompressoren. Als Alternative gilt der ionische Kompressor von Linde mit einem „Flüssigkolben“ aus einer ionischen Flüssigkeit. Kolbenverdichter sind in der Regel Dauerläufer und brauchen eine Aufwärmzeit, um ihre beste Effizienz zu erreichen. Sie können als Langsamläufer sehr geräuscharm ausgeführt werden. Beim Untertyp ionischer Verdichter übernimmt ein Flüssigkolben den Hub. Die Technologie ist daher für kurze Laufzeiten geeignet.

Membranverdichter: Das Gas wird über eine flexible Metallmembran verdichtet. Membranverdichter sind so inhärent ölfrei. Auch sind sie bevorzugt Dauerläufer, da viele Starts und Stopps die Membran schwächen. Wasserstoff wird kontaminationsfrei komprimiert, da dieser nur mit Metalloberflächen in Berührung kommt. Nachteilig ist der begrenzte Durchsatz.

Kryopumpe: Bei flüssiger Wasserstoffbevorratung kann Flüssigwasserstoff als wenig kompressible Flüssigkeit auf hohen Druck gebracht und anschließend verdampft werden. Die Kryopumpe ist vergleichsweise kompakt und energieeffizient, hat aber bei häufigem Stillstand hohe Spülverluste.

Elektrochemischer Verdichter: Wasserstoff kann über elektrochemisches Pumpen durch eine Elektrolytmembran (Protonenpumpe) verdichtet werden. Die Technologie befindet sich in einem frühen Entwicklungsstand.

Metallhydridverdichter: Dieses Verdichterkonzept nutzt die Wärmetönung der Adsorptions- und Desorptionsreaktion von Wasserstoff in Hydridlegierungen. Wasserstoff wird unter Kühlung in der Legierung absorbiert und anschließend unter Wärmezufuhr wieder ausgetrieben. Hierzu ist eine Wärmequelle erforderlich.

Hochdruckbehälter: Hochdruck-Speichereinheiten sind oft in den „Tankstellencontainer“ integriert. Ihre Bauart hängt stark von der Druckstufe der HRS (35 und/oder 70 MPa), der Betankungsstrategie des Herstellers sowie der Anwendung ab. Oft werden Stahlbehälter Typ I oder Typ II verwendet. Der Einsatz von Hochdruckbehältern ggf. in verschiedenen Druckstufen erlaubt das schnelle Überströmen von Wasserstoff, führt aber infolge der regelmäßigen Inspektionsintervalle zu hohen Aufwänden und Betriebskosten, weswegen versucht wird, auf die Hochdruckbehälter langfristig zu verzichten. Zu den Hochdruckbehältern gehören die für die jeweilige Druckstufe erforderlichen Ventile, Rohrleitungen und Anschlüsse.

Wasserstoffabgabe (gasförmig)

Vorkühlung: Wasserstoff muss zum Schutz der eingesetzten Composite-Tanks bei hoher Betankungsgeschwindigkeit vorgekühlt werden. Bei 70-MPa-PKW-Betankungen ist eine Kühlung auf ca. -40 °C vorgesehen. Für den 35-MPa-Bereich sind -10 °C ausreichend. Die aktuell in Entwicklung befindliche 70-MPa-Technologie für den Schwerlastverkehr bietet hier große Herausforderungen. Die Kühlung erfordert effiziente Wärmeübertrager und Kühleinheiten.

Zapfsäule, H₂-Übergabe-Schnittstellen: Wasserstoff darf grundsätzlich in einer Reihe mit flüssigen Regelkraftstoffen abgegeben werden. Materialien, Sensoren, Komponenten und Baugruppen müssen wasserstoffbeständig bei den jeweiligen Betriebsdrücken und auch bei häufigen Schaltvorgängen dauerhaft technisch dicht sein. Ferner müssen sie den Kriterien einer Außenaufstellung (Temperatur, Feuchtigkeit etc.) genügen.

Sensorik: Zur Einhaltung der aktuell geforderten und zu erwartenden Betankungsprotokolle müssen Umgebungstemperatur sowie Kraftstofftemperatur und -druck zuverlässig erfasst werden. Dies geschieht gewöhnlich redundant.

Übergabe zum Fahrzeug: Dies geschieht über die Betankungsgarnitur, bestehend aus Abreißkupplung, Betankungsschlauch und Befüllkupplung, ggf. mit Kommunikationsschnittstelle. Die Abreißkupplung verhindert bei versehentlichem Losfahren des Fahrzeugs ein unkontrolliertes Ausströmen des Wasserstoffs. Abreißkupplung, Befüllschlauch und Befüllkupplung müssen leitfähig miteinander verbunden sein. Die Befüllkupplung darf den Kraftstofffluss nur freigeben, wenn sie dicht mit dem Fahrzeug verbunden ist, und sie darf nur druckentlastet wieder lösbar sein. Befüllkupplungen zur PKW-Betankung sind heute über unidirektionale Infrarotkommunikation mit dem Fahrzeug verbunden. Für zukünftige Anwendungen im Schwerlastverkehr ist eine bidirektionale, sicherheitsgerichtete Kommunikation vorgesehen.

H₂-Mengenmessung: Für PKW-Tankstellen gibt es mittlerweile nach dem Coriolisprinzip arbeitende Mengenzähler, die mit von dem nationalen Metrologieinstitut Deutschlands, der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), zugelassenen Prüfnormen geeicht werden können. Die Übertragung auf Hochdurchflusstankstellen für Nutzfahrzeuge steht noch aus.

Bezahl- und Abrechnungssysteme: In Deutschland sind Bezahlung und Abrechnung noch an vom Betreiber ausgegebene Karten gebunden, während in Österreich und in der Schweiz die regulären Bezahlssysteme der Tankstellen genutzt werden können.

Steuerungstechnik: Die Tankstelle in ihrer Gesamtheit wird mittels einer übergeordneten Einheit gesteuert. Diese ist aktuell noch nicht vereinheitlicht. Die Verantwortung für die Gesamtsteuerung liegt beim Tankstellenhersteller.

Wasserstoffabgabe (Cryo)

Flüssigwasserstoff (subcooled Liquid Hydrogen, sLH₂): Für PKW hat sich die Flüssigwasserstoffbevorratung im Fahrzeug nicht bewährt, weil bei langen Stillstandszeiten erhebliche Wasserstoffmengen als Abdampfverluste ungenutzt verloren gingen. Da bei Nutzfahrzeugen von einer täglichen Nutzung ohne lange Stillstandszeiten ausgegangen werden kann, wurde der Einsatz von Flüssigwasserstoff dafür neu bewertet. In neueren Systemen wird im Flüssigwasserstoffspeicher ein Druck von bis zu 1,6 MPa zugelassen, was bei vollem Tank und Stillstandszeiten bis 10 h nicht zu Boil-off-Verlusten führt. Bei 80 % Tankfüllung ist ein verlustfreier Stillstand bis 130 h möglich, bei halbvollem Tank 200 h. Der höhere Arbeitsdruck erlaubt nach noch zu verifizierenden thermodynamischen Betrachtungen die Betankung von verbundenen Tanks ohne „Rückgas“ über eine einzelne Verbindungskupplung. Als Betankungsgeschwindigkeit werden 400–500 kg/h erwartet. Die Tanks können grundsätzlich in Edelstahl mit einer Druckfestigkeit bis 2 MPa ausgeführt werden. Insgesamt sollen 88 kg Wasserstoff in zwei Tanks mit je 760 l Innenvolumen (Speicherdichte 60 g/l) gefüllt werden können. LKW mit sLH₂-Tanks sollen in der zweiten Hälfte der 2020er Jahre auf die Straße kommen. [Daimler-Linde_2021, Daimler_2022]

Cryo-compressed Hydrogen (CcH₂): Die sogenannte Cryo-compressed-Wasserstoffspeicherung wurde vor einigen Jahren für die Wasserstoffbevorratung in PKW entwickelt. Die Cryo-compressed-Technologie nutzt die besonderen Eigenschaften des Wasserstoffs im Bereich des Phasendiagramms, wo Wasserstoff weder die Eigenschaften einer Flüssigkeit noch eines Gases hat. Hierbei wird der Temperaturbereich von –150 °C bis –230 °C und der Druckbereich bis 45 MPa ausgenutzt. Auch bei CcH₂-Speicherung kann es zu Abdampfverlusten kommen. Jedoch bleiben große Restmengen im Tank, so dass eine Weiterfahrt des Fahrzeugs jederzeit möglich ist. Verlustfreie Stillstandszeiten von 24–48 h bei vollem und 240–720 h bei halbleerem Tank werden angegeben. Befüllraten bis 800 kg/h sind möglich. Bei Befüllung mit Flüssigwasserstoff sind Speicherdichten bis 80 g/l möglich. CcH₂-Tanks können auch aus gasförmiger Bevorratung befüllt werden. Die Speicherdichte reduziert sich dabei auf 60 g/l. Erste CcH₂-betriebene LKW sollen 2024 eingeführt werden. [Cryomotive_2021, Cryomotive_2022]

Literaturverzeichnis

Wenn nicht anders angegeben, wurden aufgeführte Weblinks abgerufen oder geprüft am 25.5.2022.

- [AL_01] Informationsseite, <https://de.airliquide.com/unser-equipment/wasserstoffanlagen>
- [AL_02] Informationsseite, <https://de.airliquide.com/statics/2021-06/Air%20Liquide%20Global%20New%20Energies%20-%20Hydrogen%20Refueling%20Stations%20catalogue%20-%202021.pdf?VersionId=D3W75JTg3dUx7CRSlSjYb31oJ7Fh5RWX>
- [BMW1_2020] „Die nationale Wasserstoffstrategie“, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20
- [CABAL_2018] Urs Cabalzar et. al., Fachartikel: Betankung gasförmiger Kraftstoffe, AQUA & GAS No 9, 2018
- [CEP_2021] Manfred Greisel et. al., Technical Report: Minimum Ambient Precooling (MAP) Hydrogen Refueling Protocol for 35MPa Heavy Duty Vehicles (20–42.5 kg), Wenger Engineering GmbH Ulm im Auftrag der CEP, v1.3, 4.10.2021
- [Cryomotive_2021] T. Brunner, Präsentation NOW & CEP Heavy Duty Event, 21. April 2021, https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/05/Heavy-Duty-Event-CRYOGAS-Technology_BrunnerForstner-Cryomotive.pdf
- [Cryomotive_2022] Online-Interview am 14.2.2022 mit T. Brunner, Cryomotive GmbH
- [Daimler_2022] Online-Interview am 15.2.2022 mit S. Maus und J. Franzen, Daimler Truck AG
- [Daimler-Linde_2021] S. Maus, S. Schäfer, Präsentation NOW & CEP Heavy Duty Event, 21. April 2021, <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/05/Heavy-Duty-Event-Subcooled-Liquid-Hydrogen-sLH2-Schaefer-Linde-Maus-Daimler.pdf>
- [EHP_2022] Berichtsupdate, <https://www.ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf>
- [e-mobilBW_2016] Studie, „Kommerzialisierung der Wasserstoff-Technologie in Baden-Württemberg“, https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Studie_H2-Kommerzialisierung_Neu_RZ_WebPDF.pdf
- [Enova_2021] Webartikel, <https://businessportal-norwegen.com/2021/05/26/norwegisches-projekt-zur-herstellung-von-fluessigem-wasserstoff-in-norwegen-fuer-einstufung-als-ipcei-in-die-engere-wahl-gezogen/>
- [H2M_2021] Broschüre „Wasserstofftanken im Schwerlastverkehr – Die Optionen im Überblick“, <https://h2-mobility.de/wasserstoffbetankung-im-schwerlastverkehr/>
- [H2TOOLS_2016] Daten H2-Produktion weltweit, <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-production> angepasst für D um LH2-Produktion (-Ingolstadt + Leuna II)
- [Hydrogs_2022] Informationsseite, <https://www.hydrogenious.net/index.php/de/hydrogenious-2-2/lohc-technology/>
- [IEA_2019] Bericht „The Future of Hydrogen“, 2019, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [IEA_2021] Informationsseite, <https://www.iea.org/reports/hydrogen>
- [IKEM_2020] Farbenlehre H2, <https://www.ikem.de/projekt/wasserstoff-farbenlehre/>
- [Kawasaki_2019] https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487
- [Kawasaki_2022] <https://www.offshore-energy.biz/suiso-frontier-brings-worlds-1st-lh2-shipment-to-japan/>
- [Messer_CH] Informationsseite, <https://www.messer.ch/wasserstofftankstelle>

[MI_2019] K. Zhao, Report „Review of China’s Methanol Vehicle Pilot and Policy“, <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2019/03/A-Brief-Review-of-Chinas-Methanol-Vehicle-Pilot-and-Policy-20-March-2019.pdf>

[NOW_2018] E. Hof et. al., „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV“, https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2018/12/NOW-Broschuere_Wasserstoffbusse-im-OePNV.pdf

[NOW_2022] Informationsseite, <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemittelungen/infoservice-saubere-mobilitaet-in-deutschland-kennzahlen-und-projekte-1-2022/>

[PRHYDE_2021] C. Sinding et. al., Deliverable D2.6 „Requirements for a future refuelling protocol“ Final Report, Scope_012

[Shell_2017] Shell-Wasserstoff-Studie „ENERGIE DER ZUKUNFT? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂“, <https://www.shell.de/ueber-uns/newsroom/shell-wasserstoffstudie.html>

[TRBS_3151] Technische Regel „Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen ...“, <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/TRBS-3151.html>

[ZSW_2017] Studie im Programm bwplus „Regionale, netzunabhängige Nutzung Erneuerbarer Energien RENEE“, FKZ BWWB17001, <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/54773-RENEE.pdf>

Anhang

Einschätzung Reifegrade einzelner Subsysteme/Komponenten von H₂-Tankstellen

Kriterien, Matrix, Legende	- - großer Handlungsbedarf, keine Lösung
	- Handlungsbedarf
	+ Lösung vorhanden, optimierungsfähig
	+ + Lösung vorhanden und marktüblich

Niedrig-, Mittel- und Hochdruckspeicher

Die gängigen Behältertypen für gasförmige Druckspeicherung in CGH₂-Speicherflaschen sind: Typ I (Stahl) – jahrzehntealter Stand der Technik für den Straßen- und innerbetrieblichen Transport von H₂ als technischem Gas; Typ II (Metallbehälter, kleinere Wandstärke als Typ I, ummantelt mit Carbon- oder Glasfasern im zylindrischen Bereich); Typ III (Karbon- oder Glasfaser, geflochten um Metall, meist Alu-Innenbehälter); Typ IV (Karbon- oder Glasfaser; geflochten um PE- oder PA-Liner). Typ III und Typ IV spielen für die stationäre Speicherung an HRS heute keine Rolle. Die Arten von Gasdruckspeichern sowie deren Vor- und Nachteile werden in der Kurzstudie zur Tanktechnologie beschrieben. Bei den Speichereinheiten werden die benötigten Verbinder und Ventile sowie die Verrohrung jeweils mit bewertet.

Kriterien	ND/MD-Speicher Stahl			HD Stahl Typ I		HD Typ II	
	4,5	20	50	50	100	50	100
Technische Reife	++	++	++	++	++	++	++
Wartungsaufwand	+	+	+	-- **	-- **	-- **	-- **
Platzbedarf/Fußabdruck	++	- *	-	+	++	+	++

Nieder-/Mittel-/Hochdruckspeicher (ND/MD/HD)

*Wenn stehend angeordnete Großflasche.** Oft erschwerte Zugänglichkeit für fünf-/zehnjährige Prüfungen.

Aktuell wird die vorgeschriebene innere Prüfung nach Betriebssicherheitsverordnung an jedem einzelnen Druckbehälter an jeder deutschen H₂-Tankstelle alle 5 Jahre geprüft, um Erfahrung zu sammeln. Dies bedeutet gerade bei Bündeln mit vielen Behältern erheblichen Aufwand. Ziel sind einfachere Prüfkonzepte. Der Prüfaufwand ist z. B. in Österreich geringer, wo die innere Prüfung alle zwölf Jahre vorgeschrieben ist, weil nur trockenes und sauberes Gas verwendet wird.

Verdichtersysteme Hochdruck

Beschreibung vgl. Kapitel „Wasserstoffverdichtung und -konditionierung“

Kriterien	Kolben-Verd.		Ionischer-Verd.		Membran-Verd.		Kryopumpe	
	50	90	50	90	50	90	50	90
Technische Reife	++	++	++	++	++	++	+	-
Energiekosten**	+	-	+	-	+	-	++	++
Wartungsaufwand	+	-	--	--	+	-	++	++
Platzbedarf	-	-	+	+	-	-	++	++
Lärmemission	+	+	-	--	-	--	++	++

*im Auslegungspunkt betrieben.** Abhängig von den Eingangsdrücken.

Zapfsäulen, H₂-Übergabe-Schnittstellen

Betankungsgarnitur als Einheit

Die Abreißkupplung ist bei Befüllanlagen für alle Kraftstoffe vorgeschrieben und dient zur Unterbrechung des Kraftstoffflusses bei versehentlichem Losfahren des Fahrzeugs ohne vorheriges Abkuppeln. Bei gasförmigen Kraftstoffen wie Wasserstoff ist das Bauteil über dem Betankungsschlauch an der Zapfsäule sichtbar angebracht.

Die Befüllkupplung („Zapfpistole“) darf den Durchfluss nur freigeben, wenn sie einwandfrei dicht am Fahrzeug angeschlossen ist. Sie darf nur druckentlastet wieder lösbar sein. Die Füllkupplung muss zur Fahrzeugseite passen, also aktuell der DIN EN ISO 17268:2017 oder gleichwertig entsprechen (Fahrzeug-Anschlussstutzen vgl. Kurzstudie „Tanktechnologie“).

Hilfreiche Hinweise zur Auswahl von Komponenten für die Betankungsgarnitur finden sich in [TRBS_3151, Abschnitt 4.2.5.5].

Verbesserungsbedarf ist bei heutigen Lösungen im Sinne der Kundenfreundlichkeit festzustellen. So ist die Befüllkupplung oft zu schwergängig, zusätzlich treten immer wieder Probleme beim Einhängen in die vorgesehene Armatur an der Zapfsäule auf. Es ist durch die tiefe Kraftstofftemperatur immer wieder ein Vereisen der Armatur infolge der umgebenden Luftfeuchtigkeit zu beobachten, was in seltenen Fällen sogar zum „Festfrieren“ und zu einer nicht unbeträchtlichen Wartezeit für den Kunden führen kann.

Kommunikation zwischen Fahrzeug und HRS

Die heute fast ausschließlich nach SAE J2799 über Infrarot (IR) erfolgende Kommunikation ist weltweit etabliert, aber veraltet und wird in industriellen Anwendungen kaum noch verwendet. Gerade bei Betriebstankstellen für Flurförderzeuge ist darüber hinaus der Einsatz von kabelgebundener Kommunikation gebräuchlich.

Gewisse Anfälligkeiten aufgrund von Verschmutzung oder auch durch mechanische Belastung in der Zapfpistole sowie infolge von Versagen der Steck- und Lötverbinder durch Wittereinflüsse treten immer wieder auf.

Kriterien	Sensorik		Betankungsgarnitur			Kommunikation unidirektional
	p	T	AK	BS	BK	IR
Technische Reife	++	++	++	++	-	+
Zuverlässigkeit/Lebensdauer	++	++	-	-	-	-
Handling*					-	
Wartungsaufwand	+	+	--	--	--	+
Ersatzteile/Service	++	++	--	--	--	+

Druck (p), Temperatur (T), Abreiskupplung (AK), Betankungsschlauch (BS), Befüllkupplung (BK) und Infrarot (IR)

* Handling wird nur für Komponenten bewertet, die vom Kunden separat bedient werden.

Autoren

Markus Jenne, Dr. Ludwig Jörissen (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Ulm)
Marcus Schilling (IGT Industrie Gase Technik GmbH, Ühlingen-Birkendorf)

Herausgeber



Gefördert von



Layout/Satz/Illustration

markentrieb – Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Stand

Juni 2022