

Potenziale in der mobilen H₂-Speichertechnologie

Mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellenfahrzeuge stellen gerade für den Langstrecken- und Schwerlastverkehr eine Möglichkeit da, um abgasfrei mobil zu sein. Sie wandeln gasförmigen Wasserstoff an Bord in Strom um, der dann einen Elektromotor antreibt. Die dafür erforderlichen Wasserstofftanks können an H₂-Tankstellen genauso schnell befüllt werden wie die Tanks von Benzin- oder Dieselfahrzeugen. Momentan sind diese Wasserstoffspeicher entweder noch recht schwer und dafür günstig oder aber leicht und in der Herstellung teuer. Sie sind in den meisten Fällen geometrisch begrenzt auf die Zylinderform, was für die Integration in mobile Anwendungen suboptimal ist. Auch die Ventil- und Schnittstellentechnik bietet Entwicklungsbedarf und damit auch viele Chancen für Unternehmen der Zulieferindustrie, sich im wachsenden Markt früh zu etablieren. Die vorliegende Kurzstudie soll den aktuellen Stand der Technik der Wasserstoffspeicherung erläutern und insbesondere wirtschaftliche Potenziale für heimische Unternehmen darlegen.

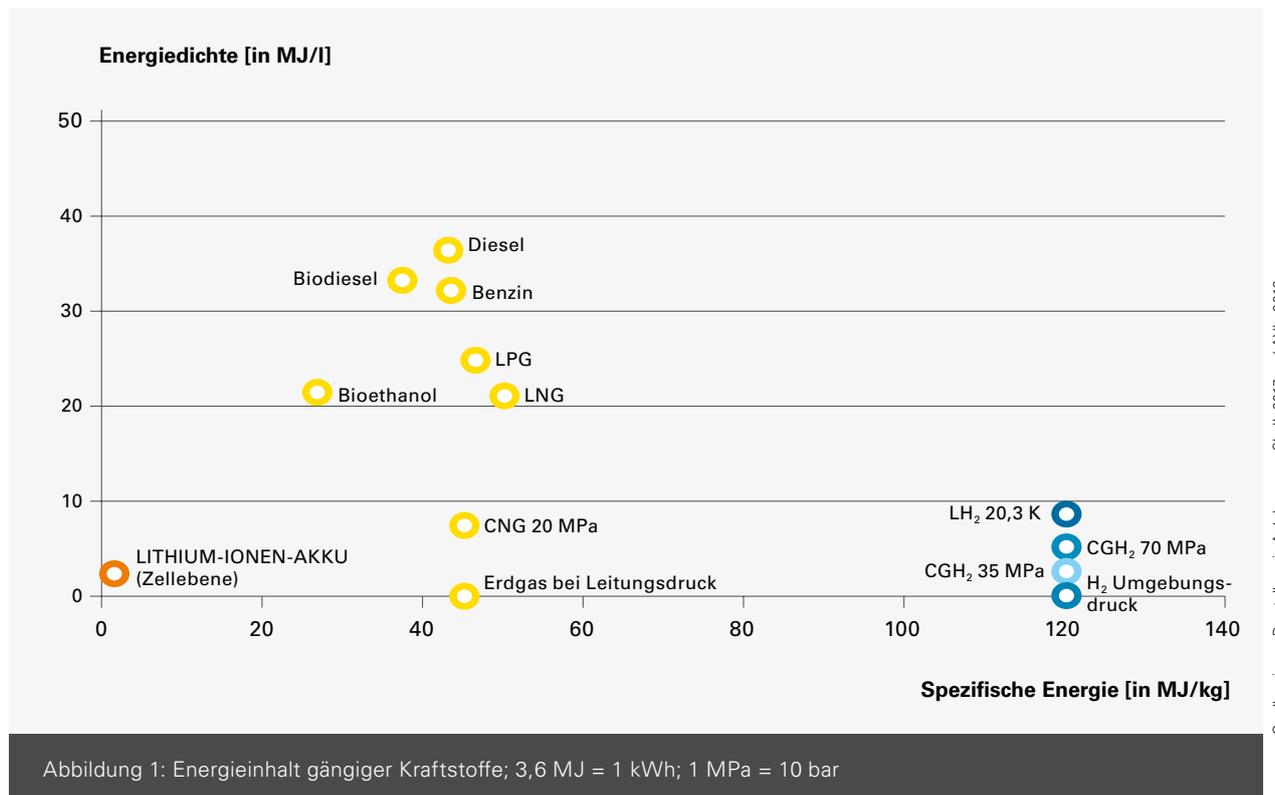


© sdecoret/AdobeStock

Status der Wasserstoffmobilität

Weltweit sind ca. 43.000 Wasserstoff-PKW im Einsatz. In Deutschland fahren zum Zeitpunkt der Studiererstellung 1.450 PKW, 61 Busse sowie einzelne Nutzfahrzeuge, Züge und Schiffe. Viele Hersteller entwickeln H₂-Antriebsstränge für den Einsatz im Schwerverkehr. Etwa 50 Trucks (36 t) sind beispielsweise in der Schweiz bereits im täglichen Betrieb. Der weitere Ausbau der gegenwärtig über 90 öffentlichen H₂-Tankstellen in Deutschland wird vor allem mit dem Fokus auf die Betankung von Nutzfahrzeugen vorangetrieben; aktuell sind acht in der Lage, auch Busse und LKW zu betanken. Der Fokus der vorliegenden Kurzstudie liegt deshalb im Bereich der Schwerverkehrsanwendung. Der aktuelle Stand zur Wasserstoffbetankung ist in der Kurzstudie „Wissen Kompakt: Potenziale in der Wasserstoff-Tankstellentechnologie“ (vgl. Hinweis Seite 15) zusammengefasst.

Abbildung 1 beschreibt verschiedene Energieträger anhand ihrer Energiedichte. Wasserstoff hat mit 120,1 MJ/kg (33,3 kWh/kg) die bei weitem höchste spezifische Energie (bezogen auf den unteren Heizwert), fast dreimal so hoch wie die von flüssigen Kohlenwasserstoffen wie Benzin und Dieselkraftstoff. Allerdings ist die Energiedichte von Wasserstoff unter Umgebungsbedingungen mit nur 0,01 MJ/l (3 kWh/m³) sehr gering. Für die praktische Handhabung muss daher die Energiedichte von Wasserstoff deutlich erhöht werden.

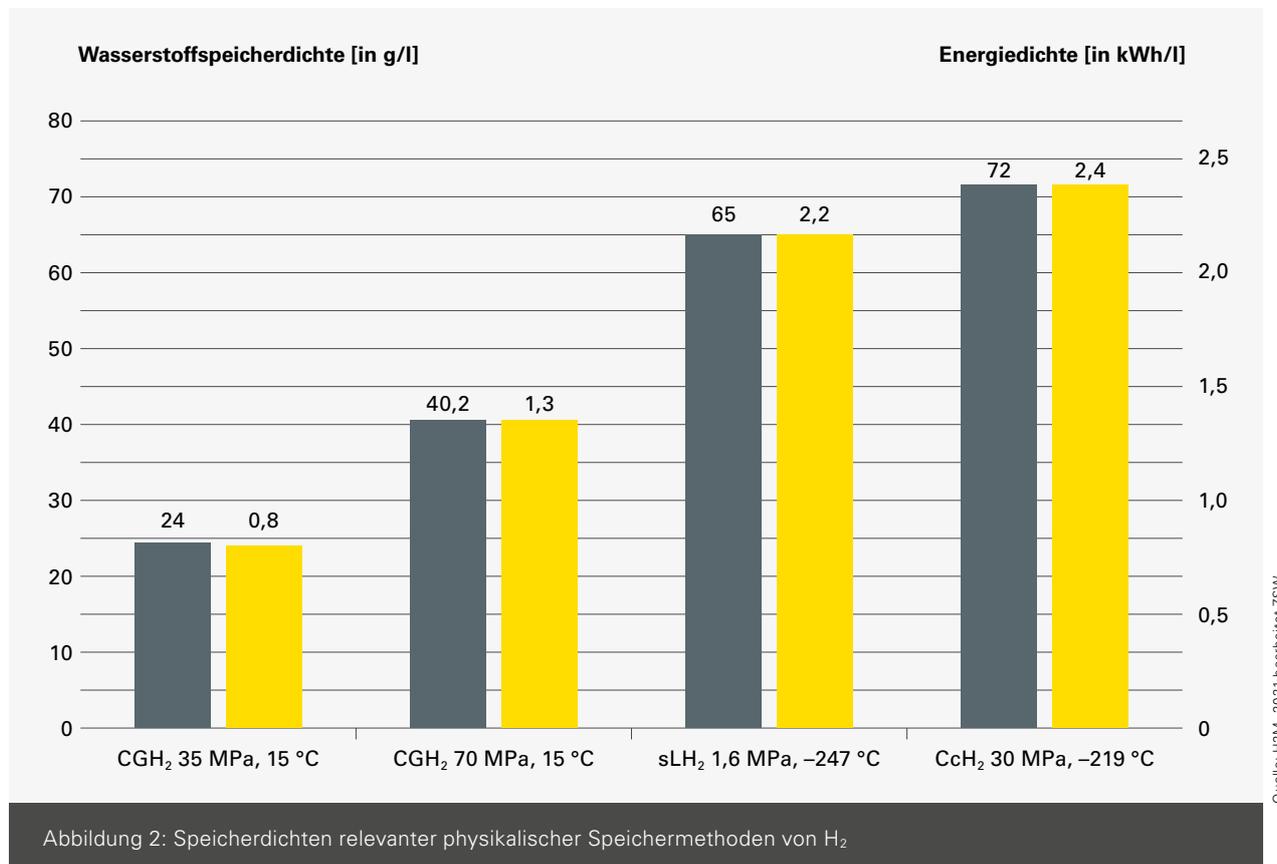


Heutige Batteriezellen für mobile Anwendungen weisen eine spezifische Energie von bis zu 1 MJ/kg und Energiedichten bis zu 2,5 MJ/l auf [AVL_2019]. Informationen zu Speichersystemen siehe Abbildung 4.

Um an Bord von Wasserstoff-PKW genügend Kraftstoff für >500 km Reichweite zu integrieren, wurde für diese Anwendung die Betankung und On-board-Speicherung bei 70 MPa weltweit einheitlich etabliert. Im Nutzfahrzeugbereich (H₂-Busse und LKW) sind bisher 35 MPa üblich.

Noch höhere Speicherdichten können mit kryogenen, also tiefkalten, Speicherformen erreicht werden. Kryokomprimierter Wasserstoff (CcH₂, bis 45 MPa) bietet den Vorteil einer höheren Energiedichte, sogar im Vergleich zu flüssigem Wasserstoff (Liquid Hydrogen LH₂ bis 0,5 MPa oder „subcooled Liquid Hydrogen“ sLH₂ bei leichtem Überdruck bis ca. 2 MPa). Sein Nachteil ist, dass kryogene Flüssigkeiten und hohe Drücke gleichzeitig gehandhabt werden müssen. Bisher sind weder (s)LH₂ noch CcH₂-Fahrzeuge über das Prototypenniveau hinausgekommen. Allerdings verfolgen namhafte Anbieter die Methoden mit Nachdruck als mittelfristige Zukunftsperspektive [Daimler-Linde_2021, Cryomotive_2021].

Bislang sind für die Mobilität nur die physikalische Speicherung durch Kompression und Verflüssigung von kommerzieller Relevanz, weshalb sich die Kurzstudie auf diese Verfahren konzentrieren wird. Abbildung 2 zeigt einen Überblick anhand der gravimetrischen Speicherdichte. Stoffliche Speicherung in Metallhydriden, Adsorbentien oder LOHC spielt on-board von Fahrzeugen bislang keine Rolle. Grundlegende Eigenschaften dieser Speicherformen werden in einer weiteren Kurzstudie (vgl. Hinweis Seite 15) beschrieben.



Anwendbare Regulierungen und Normen

Um zum einen die Sicherheit der eingesetzten Komponenten, zum anderen aber auch die Interoperabilität zu gewährleisten, sind im Wesentlichen die folgenden Regulierungen einzuhalten.

- GTR No. 13: globale technische Regelung für Wasserstoff- und Brennstoffzellenfahrzeuge bis 4.536 kg zul. Gesamtgewicht [UNECE_2013]. Wird aktuell überarbeitet und ist weitgehend harmonisiert mit R 134.
- R 134: einheitliche Regelung für die Genehmigung (...) hinsichtlich der sicherheitsrelevanten Eigenschaften von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen [UNECE_2019]. Keine Gewichtsbeschränkung der Fahrzeuge.
- EC79 (Verordnung über Typp Genehmigung von wasserstoffbetriebenen Kraftfahrzeugen) H₂-Speicherbehälter aller Typen waren im Anhang IV definiert. Die Verordnung einschließlich der Durchführungsverordnung EC 406 wurde durch die Verordnung EU 2144 zum 5.7.2022 außer Kraft gesetzt und durch R134 abgelöst.
- ISO 17268: Definition verwechslungssicherer Medienschnittstellen zwischen H₂-Tankstelle und H₂-Fahrzeug für unterschiedliche Druckstufen und Durchflusskategorien.

Typische Speicherkapazitäten an Bord und Verbrauchswerte heute:

- bei Wasserstoff-PKW ca. 6 kg bei H₂-Verbrauch 1 kg/100 km
- bei Wasserstoff-Bussen und -Trucks ca. 20–40 kg bei H₂-Verbrauch 8,5–10,5 kg/100 km
- bei Langstrecken-Wasserstoff-LKW ca. 60–120 kg bei H₂-Verbrauch 7–8 kg/100 km

Abbildung 3 zeigt Beispiele, wie Wasserstofftanks heute in Fahrzeugaufbauten integriert werden. Für Langstrecken-LKW ist die Positionierung hinter der Fahrerkabine und rechts und links des Chassis (wie heutige Dieseltanks) verbreitet. Bei Bussen und Zügen werden die Tanks, wie auch die Batterie und das Brennstoffzellensystem, auf dem Dach integriert. Bei PKW wird oft die Mittelkonsole sowie der Bereich unter/hinter den Rücksitzen genutzt. Die Heidenheimer Voith Group hat im Juli 2022 ein „Plug& Drive“ H₂-Speichersystem inklusive Montagesystem zur Befestigung in Schwerlastfahrzeugen vorgestellt [Voith_2022].

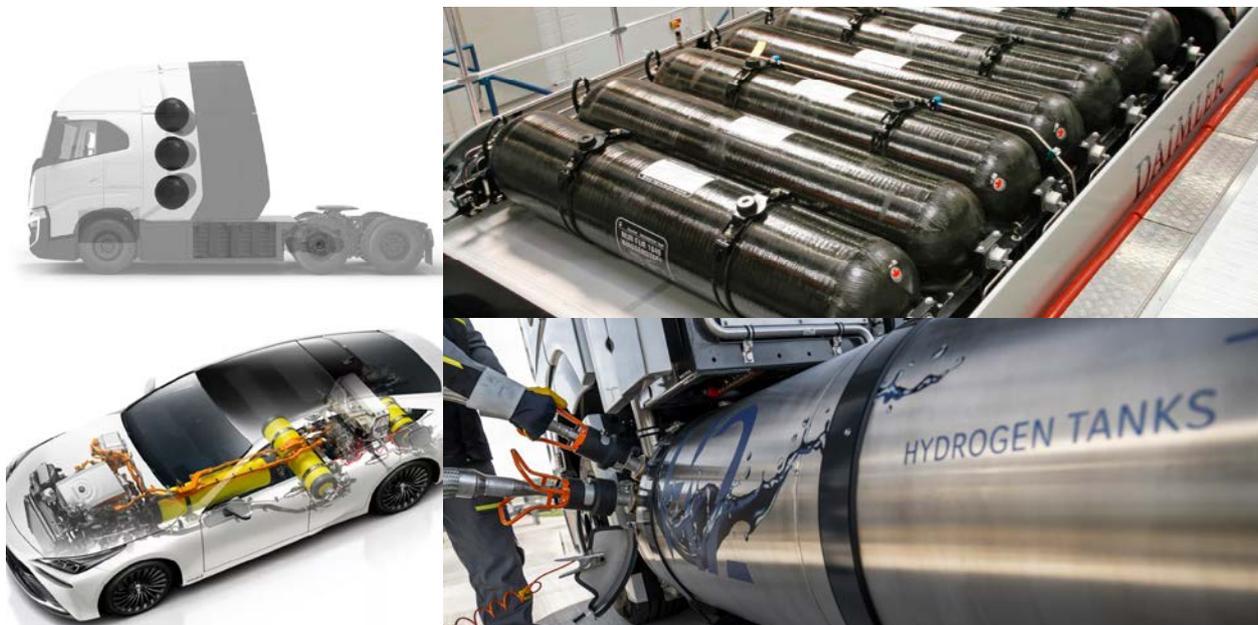


Abbildung 3: Beispiele für die Integration von Wasserstofftanks in Fahrzeuge: Nikola, Toyota Mirai II, Evobus, Daimler GenH2

Quelle: Iveco-Nikola_2022, Toyota_2022, Daimler_2014 und 2022-2

Wasserstoffspeicherung an Bord von Fahrzeugen

Historie und Überblick zur Wasserstoffspeicherung

Die Anfänge der kommerziellen Wasserstoffspeicherung und -verteilung in Europa gehen auf den Beginn des 20. Jahrhunderts zurück, als Flammsschweißen mit H₂ als Brenngas eingeführt wurde. Der Wasserstoff wurde unter Druck gesetzt und in Stahlflaschen oder kleinen Druckbehältern transportiert, wobei Autos oder Lastwagen für die Verteilung des Gases an die verschiedenen Kunden eingesetzt wurden. Dieses grundlegende System der Verteilung von Wasserstoff in Druckbehältern (CGH₂) hat sich im letzten Jahrhundert, bis auf einige regionale, industrielle H₂-Pipelines ab ca. 1940, kaum verändert. Die ständig steigende Nachfrage nach Wasserstoff führte zur Entwicklung neuer und größerer Transportanlagen. Dazu gehören einzelne Bündel von Stahlflaschen, große Behälter/Röhren, die auf LKW montiert sind, und eine Vielzahl von Transportfahrzeugen mit multiplen Tanks an Bord für den Straßentransport.

Ab Ende der 1960er Jahre wurden auch Aluminiumzylinder für die Wasserstoffspeicherung verwendet, doch waren ihre Kosten im Vergleich zu Stahlzylindern höher. Seither handelt es sich bei den meisten Behältern für die Verteilung von technischem Wasserstoff um nahtlose Behälter aus vergüteten Chrom-Molybdän-legierten Stählen. Um den Betriebsdruck von Wasserstofftanks weiter zu erhöhen und das Gewicht (leicht) zu verringern, wurden metallische Zylinder mit einer Ummantelung versehen. Für Weltraum- oder Militäranwendungen wurden in den 80er Jahren vollumhüllte Tanks entwickelt. Aufgrund ihres vergleichsweise geringen Gewichts wurden sie später für portable Anwendungen oder für Fahrzeuge, zunächst für die On-Board-Speicherung von Erdgas, verwendet. Diese vollständig ummantelten Verbundtanks, die sogenannten Typ-III- und Typ-IV-Tanks werden heute für die Speicherung von Wasserstoff benutzt und weiterentwickelt. [EIGA_2020 und Barthélémy_2007].

Tiefgekühlt verflüssigter Wasserstoff, LH₂, zur weiteren Erhöhung der Energiedichte wurde in stationären kryogenen Behältern erstmals in den 1960er Jahren eingesetzt. Nicht zuletzt für die Raketenstarts der Apollo-Weltraummissionen erarbeitete die NASA umfangreiches Wissen um Werkstoffe und den Einsatz von flüssigem (und auch gasförmigem) Wasserstoff [NASA_1997]. Seit etwa 2010 ist eine Mischung aus kryogener und Druckspeicherung, das sogenannte CCH₂, in Entwicklung. Im Kapitel „Entwicklungsaktivitäten tiefkalte Betankungsformen“ werden die wichtigsten Merkmale tiefkalter Arten der H₂-Speicherung dargestellt.

Metallhydridspeicher speichern Wasserstoff bei mittleren Drücken mit hoher volumetrischer, aber niedriger gravimetrischer Speicherdichte als etablierte Technologie vor allem stationär oder in Anwendungen, in denen Gewicht keine Rolle spielt (oder erwünscht ist, z. B. in U-Booten). In der Ausgabe „Wissen Kompakt – Potenziale in der Wasserstoff-Tankstellentechnologie“ (vgl. Hinweis Seite 15) wird diese Speicherart neben anderen, wie LOHC oder Adsorbentien, ausführlicher beschrieben.

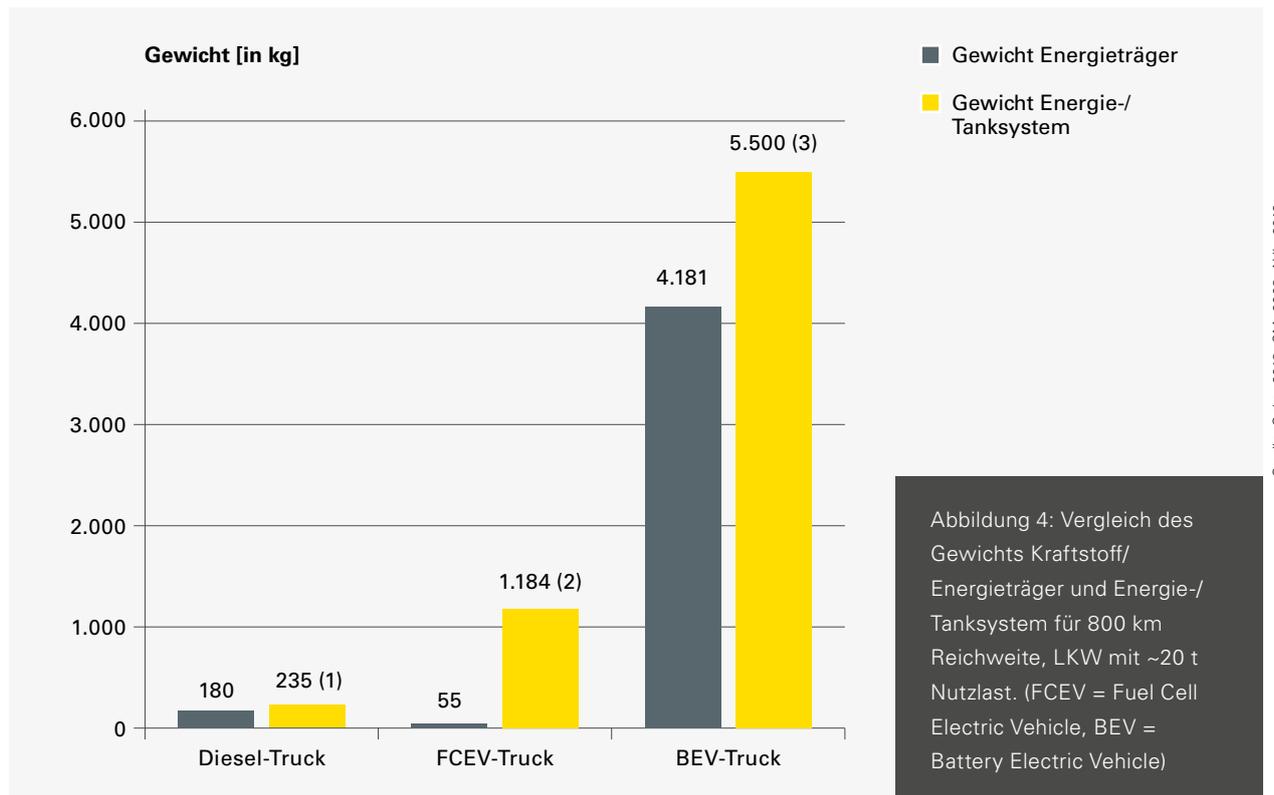
Im Straßen- und Schienenverkehr wird gegenwärtig ausschließlich auf Wasserstoff unter Druck bei 35 MPa oder 70 MPa gesetzt. Mittelfristig könnten die erwähnten tiefkalten Formen einen signifikanten Marktanteil im Schwerlastbereich erobern. In vorliegender Studie wird deshalb der Fokus auf die heute relevante gasförmige CGH₂-Speicherung gelegt.

Stand der Technik: mobile Druckgasspeicher

Die effiziente Speicherung von Wasserstoff gilt als wichtige Voraussetzung für die Verbreitung der Brennstoffzellentechnologie im Verkehrssektor. Da Wasserstoff eine geringe volumetrische Energiedichte hat, wird er in Kraftfahrzeugen üblicherweise in komprimierter Form in Druckgasflaschen mitgeführt.

Von der Produktion über die Zwischenspeicherung bis hin zur Verteilung an den Endverbraucher wird Wasserstoff mit unterschiedlichen Drücken gehandhabt. Während Niederdrucktanks mit nur 5 MPa arbeiten, sind Hochdrucktanks oder Gasflaschen mit Gasdrücken von bis zu 100 MPa technisch etabliert.

70 MPa ist heute der etablierte H₂-Speicherdruck für Personenkraftwagen. Bei ca. 6 kg H₂ an Bord ergibt sich eine Reichweite von ca. 600 km. Der Speicherraum in Bussen oder Zügen (auf dem Dach) ist nicht ganz so begrenzt wie bei PKW, weshalb häufig 35-MPa-H₂-Speichertanks eingesetzt werden. Jedoch gerade bei Langstrecken-Trucks spielen Volumen (Begrenzung der maximalen Länge von Nutzfahrzeuge) und vor allem Gewicht (geht von verfügbarer Nutzlast ab) der Tanksysteme wieder eine maßgebliche Rolle. Eine Auswertung veröffentlichter Quellen zum Gewicht von Tanksystemen im Nutzfahrzeugbereich mit verschiedenen Energieträgern zeigt Abbildung 4. Dargestellt ist die Masse des jeweils benötigten Speichersystems für 800 km Reichweite für ein Nutzfahrzeug mit 19,3 t Nutzlast.



1) Gewicht Tanksystem extrapoliert analog zu [GM_2008], Verbrauchswerte aus [Oeko_2018] (27 Liter Diesel/100 km für ein Referenzfahrzeug 2025). Das Diesel-Tanksystem ist hier ohne AdBlue-Tank und notwendige Abgasreinigung mittels SCR-Einspritzung aufgeführt.

2) Angabe in [Oeko_2018] für ein 70-MPa-Tanksystem für 800 km Reichweite. Toyota gab für den Mirai I eine Speicherdichte für das Tanksystem von 5,7 wt-% H₂ an [Toyota_2014]. Das Systemgewicht, extrapoliert für 55 kg H₂, wäre damit bereits im Jahre 2014 bei 965 kg gewesen.

3) Das Gewicht des BEV-Systems mit 1.200 kWh ist laut [Oeko_2018] für 2025 mit 5–6 t anzunehmen. Eine Extrapolation aus dem Bestwert für das Gewicht der Zellen aus [AVL_2019] von 3,5 kg/kWh führt zum Zellgewicht (Energieträger) von knapp 4.200 kg. Eine Extrapolation des Bestwerts für das Systemgewicht aus [AVL_2019] führt zu knapp 7.000 kg.

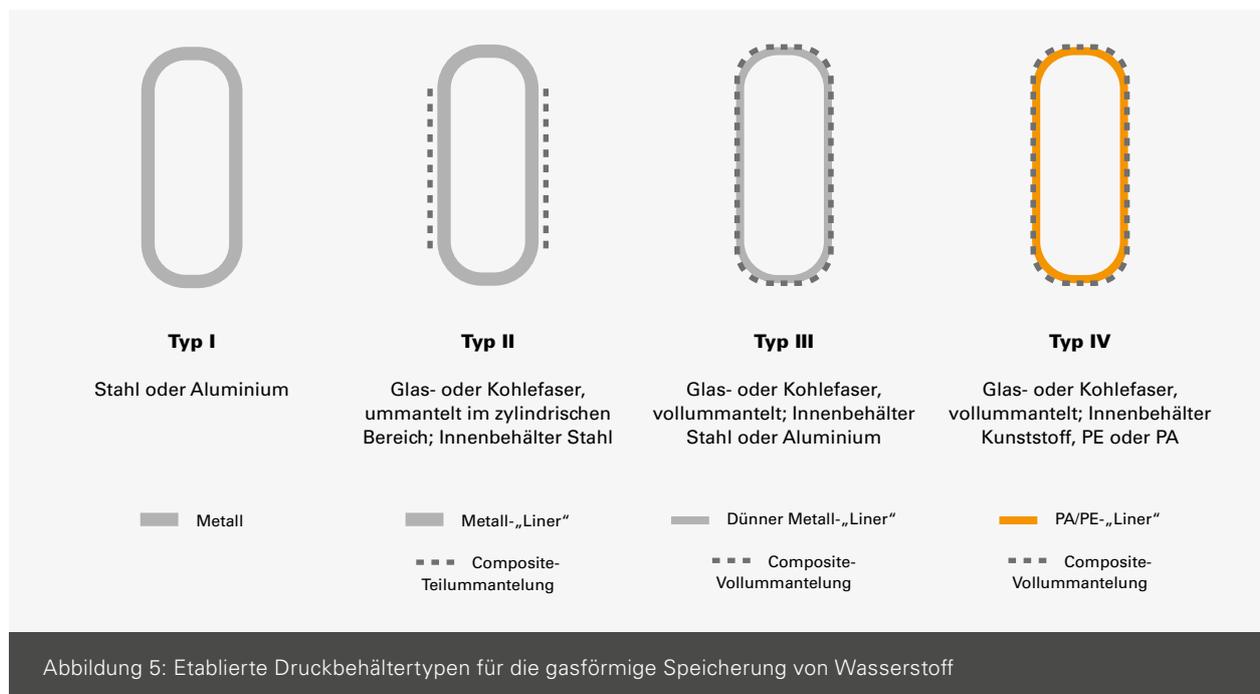
Komponenten von mobilen Wasserstoffspeichersystemen

Alle Komponenten für Wasserstoffspeichersysteme sind den Umgebungsbedingungen für die jeweiligen Anwendungen ausgesetzt. Im Folgenden wird hauptsächlich auf den Bereich der Straßenfahrzeuge referenziert. Zulassungstests von Komponenten umfassen zyklische Simulationen von Brandfällen, Schmutz-, Korrosions-, Temperatur- und Schwingungseinwirkungen unter Fahrzeugumgebungsbedingungen [UNECE_2019].

Speicherbehälter für gasförmigen Druckwasserstoff CGH₂

Die Druckwasserstoffspeicherung ist seit Jahrzehnten technisch etabliert. Bei der Verwendung der richtigen Werkstoffe für Behälter, Ventile und Dichtungen, die alle lange bekannt und erprobt sind (vgl. Abschnitt „Historie und Überblick“), kann Wasserstoff über sehr lange Zeiten quasi verlustfrei unter hohem Druck gespeichert werden.

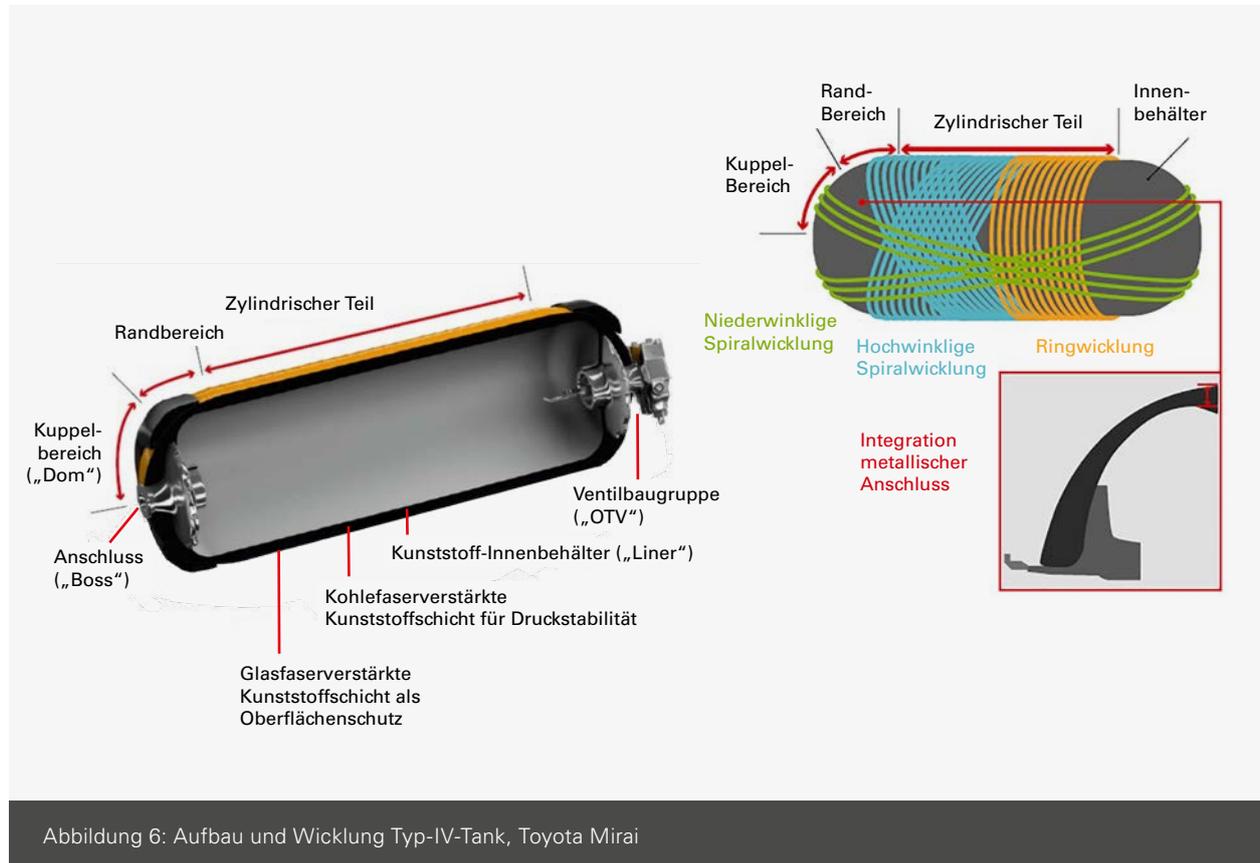
Einen Überblick über die gängigen Wasserstoffspeichertypen gibt die folgende Abbildung:



Der klassische Behälter für technische Gase ist der Typ I aus Stahl. Bei Stahlbehältern kann für Druckspeicherung von Wasserstoff nicht auf hochfeste ferritische Stähle zurückgegriffen werden, da diese anfällig für Wasserstoffversprödung sind. Austenitische Stähle (z. B. gängige Edelstähle wie 1.4404/316L) weisen eine geringere Festigkeit auf, weshalb die Wandstärke für H₂-Behälter typischerweise höher ist als bei anderen technischen Gasen wie Stickstoff oder Methan.

Bei den Behältertypen II und III handelt es sich um Metallbehälter, die mit glas- oder kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (Composite) teil- bzw. vollummantelt sind. Sie weisen eine geringe metallische Wandstärke auf und haben dadurch in Summe weniger Gewicht.

Typ IV besitzt geblasene Innenbehälter („Liner“) aus thermoplastischem Kunststoff, typischerweise aus Polyamid oder hochfestem Polyethylen, und erzielt dadurch weitere Gewichtsvorteile. Durch das Kunststoffmaterial der Innenbehälter entsteht die erwünschte Eigenschaft „Leak before Break“, also eine Vermeidung des Berstens im Falle extrem hoher Temperaturen z. B. bei Bränden.



Quelle: Toyota_2014

Vollumwickelte Behälter der Typen III und IV besitzen Anschlüsse an beiden Enden, von denen üblicherweise einer für den Einbau der Ventilbaugruppe (vgl. nächsten Abschnitt) genutzt wird und der andere blindgestopft ist. Hier kann bei Bedarf auch ein zusätzliches Schmelzventil oder eine Verbindungsleitung zur Integration in ein Tanksystem angeschlossen werden.

Neben der geometrischen Gleichmäßigkeit der Innenbehälter ist die exakte Verbindung der Entnahmeanschlüsse („Bosse“) an beiden Enden der Behälter wichtig [Vogel_2014].

Die effiziente Herstellung der in Abbildung 6 dargestellten Umwicklung wird beispielsweise über Nasswickeltechniken mit harzgetränkten Fasern realisiert. Alternativ kommen sogenannte „Tow-Pregs“ zum Einsatz, bei denen das Harz im teilvernetzten Zustand „eingefroren“ ist und somit auch bei hohen Stranggeschwindigkeiten keine Tropfen den Prozess stören. Die Verbesserung der Verfahren zur Herstellung der Composite-Ummantelung ist Gegenstand umfangreicher Entwicklungsaktivitäten zur Optimierung von Herstellkosten, -geschwindigkeit und -qualität. Eingesetzte und untersuchte Fasertypen sind Kohlenstofffasern für Zugfestigkeit sowie zusätzlich Aramid-, Glas- oder Basaltfasern.

Ventiltechnik, Tankventil-Baugruppe

Um aus Druckbehältern an Bord sicher und zuverlässig Wasserstoff entnehmen zu können, haben sich sogenannte „On-Tank-Valve“ (OTV)-Multifunktionsbaugruppen am Markt etabliert. Diese werden fest in die an Bord befindlichen H₂-Tanks eingeschraubt und enthalten üblicherweise die folgenden Funktionskomponenten (vgl. Abbildung 7):

- Ein- und Auslassanschluss
- Magnetventil zur Entleerung
- Rückschlagventil (um unbeabsichtigte Entleerung zu vermeiden)
- Excess Flow Valve („Abriss-Sicherung“ schließt bei zu hoher H₂-Entnahme)
- Temperatursensor im Tank
- manuelles Auslassventil
- verschiedene Filter
- optional ein integriertes Schmelzventil (TPRD, siehe unten)
- optional einen angebauten Druckregler

Der Entnahmeanschluss bzw. die Ventilbaugruppe (OTV) muss mechanisch gegen Verdrehen geschützt sein. Auf eine Überdrucksicherung wie beispielsweise eine Berstscheibe wird üblicherweise verzichtet, da ein Überdrücken von der Sicherheitstechnik der H₂-Tankstelle her ausgeschlossen wird.

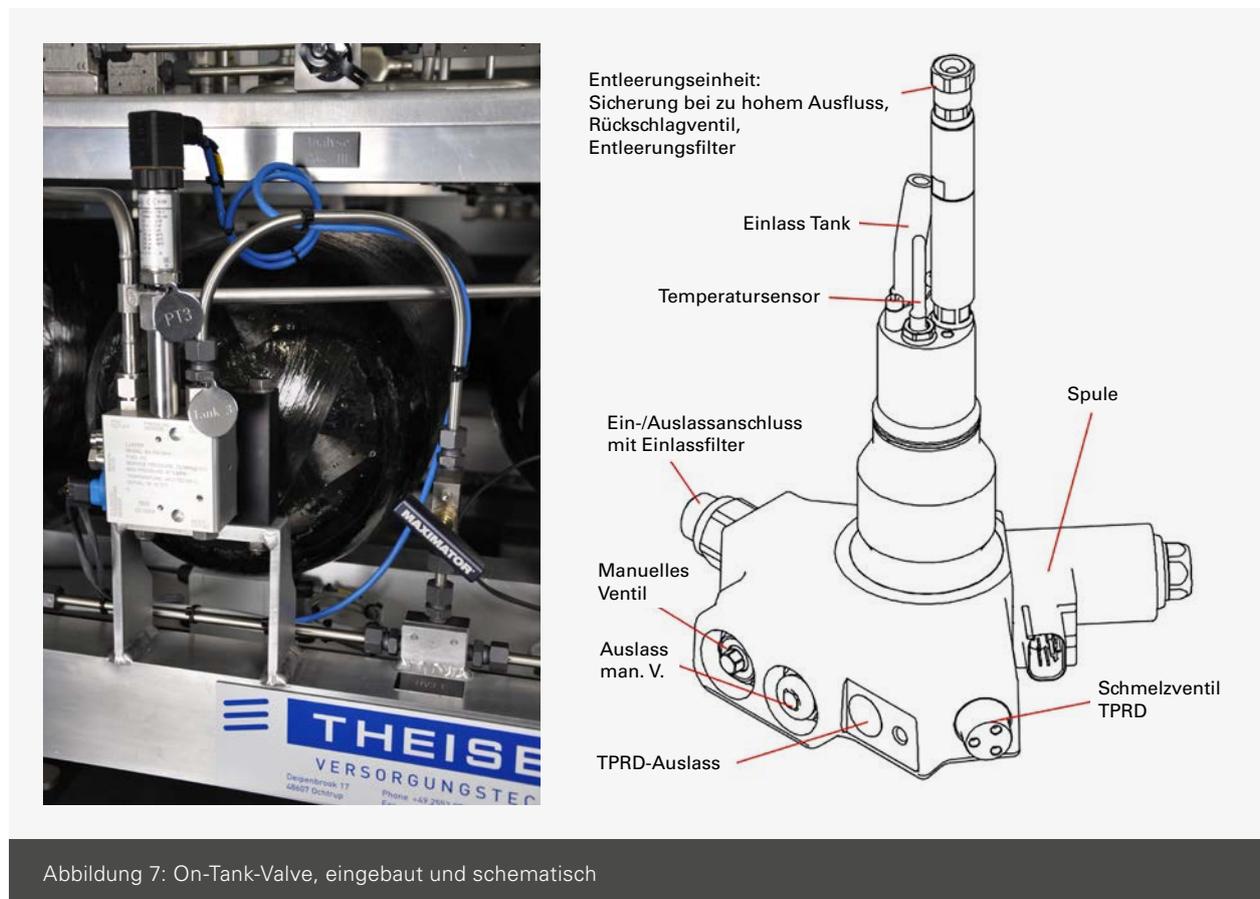


Abbildung 7: On-Tank-Valve, eingebaut und schematisch

Die OTV-Baugruppen für 35 und 70 MPa für die Großserie wettbewerbsfähig zu machen ist das Ziel aktueller Entwicklungen, wie beispielsweise im Rahmen der Ende 2021 abgeschlossenen Lizenz- und Entwicklungsvereinbarung zwischen der Robert Bosch GmbH und dem italienischen Branchenführer OMB Salieri [Bosch_2021].

Schmelzventile (TPRD)

Ein Schmelzventil (thermal pressure relief device, TPRD) ist eine nicht wieder schließende Druckentlastungseinrichtung, die durch Temperaturerhöhung aktiviert wird, um sich zu öffnen und Wasserstoffgas freizusetzen. Im Brandfall wird der enthaltene Wasserstoff durch das TPRD kontrolliert und ohne Bersten des Behälters freigesetzt. Das TPRD wird oft in die Ventilbaugruppe OTV integriert und bläst im Auslösefall geführt ab. Bei einer H₂-Tank-Länge von über 1,65 m sind zwei oder mehr TPRD über die Behälterlänge verteilt anzubringen.

Druckregler, Überdruckventil

Im den Speicherbehältern nachgeschalteten Druckregler wird der Druck von maximal 87,5 MPa bzw. 43,75 MPa auf <2 MPa bei Brennstoffzellenantrieben und <5 MPa bei Wasserstoff-Verbrennungsmotoren reduziert. Die erforderliche Genauigkeit des Nachdrucks wird vom konkreten Antriebssystem vorgegeben. Ein typischer H₂-Durchfluss für ein BZ-System von 100 kW Leistung sind ca. 1,8 g/s oder 72,5 Norm-m³/h. Die Niederdruckseite muss durch ein Sicherheitsabblaseventil vor Versagen des Druckreglers geschützt werden.

Verrohrung und Verbinder, Halterungen

Verwendete Rohre und Verbinder müssen neben der Eignung für die jeweilige Druckstufe aus Werkstoffen bestehen, die gegen Wasserstoffversprödung resistent sind (vgl. Erläuterung zu Stahlbehältern). Die Verbinder dürfen sich bei im Fahrbetrieb auftretenden Schwingungen nicht lösen. Auftretende Werkstoffkombinationen dürfen nicht zu galvanischer Korrosion führen, zusätzlich soll durch geeignete Geometrie Spaltkorrosion vermieden werden.

Bei kleineren Tanksystemen (PKW) erfolgt die Befestigung im Fahrzeug mit Schellen oder Spannbändern um den Behälterumfang. Bei größeren mobilen Behältern und stationären Speichern werden die Zylinder oft am Flaschenhals fixiert. Dann ist wegen thermischer Ausdehnung je ein festes und ein axial verschiebbares Lager vorzusehen.

Schnittstelle Wasserstoff

Die Befüllkupplung („Zapfpistole“) der H₂-Tankstelle darf den Kraftstofffluss nur freigeben, wenn sie dicht mit dem Fahrzeug verbunden ist, und darf nur druckentlastet wieder lösbar sein. Befüllkupplungen zur FCEV-Betankung sind heute mit einer unidirektionalen Infrarot-Kommunikation nach SAE J2799 vom Fahrzeug zur H₂-Tankstelle ausgerüstet. Für zukünftige Anwendungen gerade im Schwerlastverkehr ist eine bidirektionale, sicherheitsgerichtete Kommunikation zwischen Fahrzeug und H₂-Tankstelle vorgesehen. Sie könnte beispielsweise über NFC, WLAN oder Bluetooth erfolgen und ist noch nicht festgelegt.

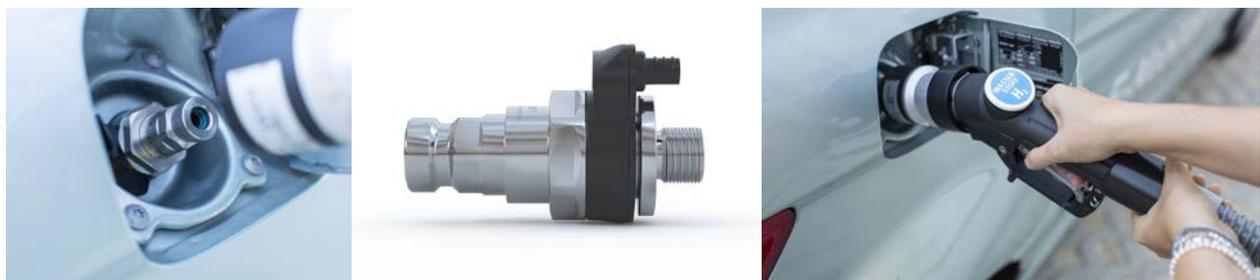


Abbildung 8: Tanknippel nach EC 79/ISO 17268, mit IR-Schnittstelle

Quelle: WEH, ZSW (Bosch)

Die Anschlussstutzen oder „Tanknippel“ am Fahrzeug müssen den Abmessungsanforderungen der ISO 17268 entsprechen, um Verwechslungssicherheit und gleichzeitig Interoperabilität zu gewährleisten. Die Befüllrichtung muss mechanisch gegen Verdrehen geschützt sein.

Die Tanknippel sind mit Tankstellen-Zapfpistolen mit gleichem oder niedrigerem Nennbetriebsdruck kuppelbar, müssen aber geometrisch so konstruiert sein, dass sie nicht mit Zapfpistolen mit höherem Nennbetriebsdruck oder höherem Nenndurchfluss gekuppelt werden können. Ebenfalls müssen sie so ausgelegt sein, dass sie nicht mit anderen Befüllkupplungen als denen von Wasserstoff-Tankstellen gekuppelt werden können.

Entwicklungsaktivitäten für CGH₂-Tanks

Im Bereich der mobilen gasförmigen Druckspeicher stellen sich für die derzeit meistverwendeten Composite-Tanks Herausforderungen beim verwendeten Material, bei der Herstellung und bei der Bauform.

In zahlreichen öffentlich geförderten Projekten wird an deren Lösung geforscht. Im Projekt MaTain-H2 werden unter anderem optimierte Herstellprozesse und Qualitätssicherungskonzepte für Typ-IV-Tanks entwickelt [NOW_Matain_2020]. Am Institut für Verbundwerkstoffe GmbH werden beispielsweise effiziente Wickelverfahren mit der gleichzeitigen Zuführung von bis zu 48 Fasersträngen entwickelt sowie passende, schnellhärtende Harze [IVW_2020].

Im Projekt HyMon entwickeln mehrere Partner eine sensorbasierte On-Board-Strukturüberwachung von 70-MPa-H₂-Druckbehältern. Dadurch soll ein hohes Sicherheitsniveau von Wasserstoff-Fahrzeugen gewährleistet werden, da mögliche Schäden oder Ermüdungszustände detektiert und die Restlebensdauern der Behälter verlässlich abgeschätzt werden können [NOW_HyMon_2021].

Heutige Tanklösungen sind ausnahmslos zylinderförmig, da diese Form ohne Querverstrebungen günstig für die materialsparende Produktion von Hochdruckbehältern ist. Bei der Integration in Fahrzeuge entstehen allerdings ungenutzte Hohlräume. Durch abgeflachte Tanks könnte der vorhandene Bauraum effizienter genutzt werden. An der Hochschule München wird mit Partnern eine abgeflachte Bauform für Composite-Tanks entwickelt [IDW_2021].



Abbildung 9: Querschnitt durch ein an der Hochschule München entwickeltes Baumuster eines zugverstrebt Drucktanks

Quelle: Alexander Horoschenkoff

Um gewichtsoptimiert auch auf den Innenbehälter zu verzichten, werden aktuell sogenannte Typ-V-Tanks für die Raumfahrt mit Nenndrücken bis 8,5 MPa entwickelt. Die Gewichtseinsparung gegenüber Typ IV soll bis 30% betragen. Bisher sind keine kommerziellen Produkte für Landfahrzeuge bekannt [NCC_2021].

EDAG verfolgt mit dem Partner Hexagon Purus ein Konzept flexibler Hybridisierung für PKW-Bordspeicher im erfolgreich abgeschlossenen Projekt H2HYBAT. Hier können in einer skalierbaren Rahmenplattform gegeneinander austauschbare Batterien und Wasserstoff-Composite-Druckbehälter eingebracht werden (Abbildung 10). Auch die Crash-Sicherheit wurde durch ergänzende Sicherheitsmaßnahmen deutlich erhöht. Das Konzept ist auf andere batterieelektrische Fahrzeugplattformen transferierbar [EDAG_2021].

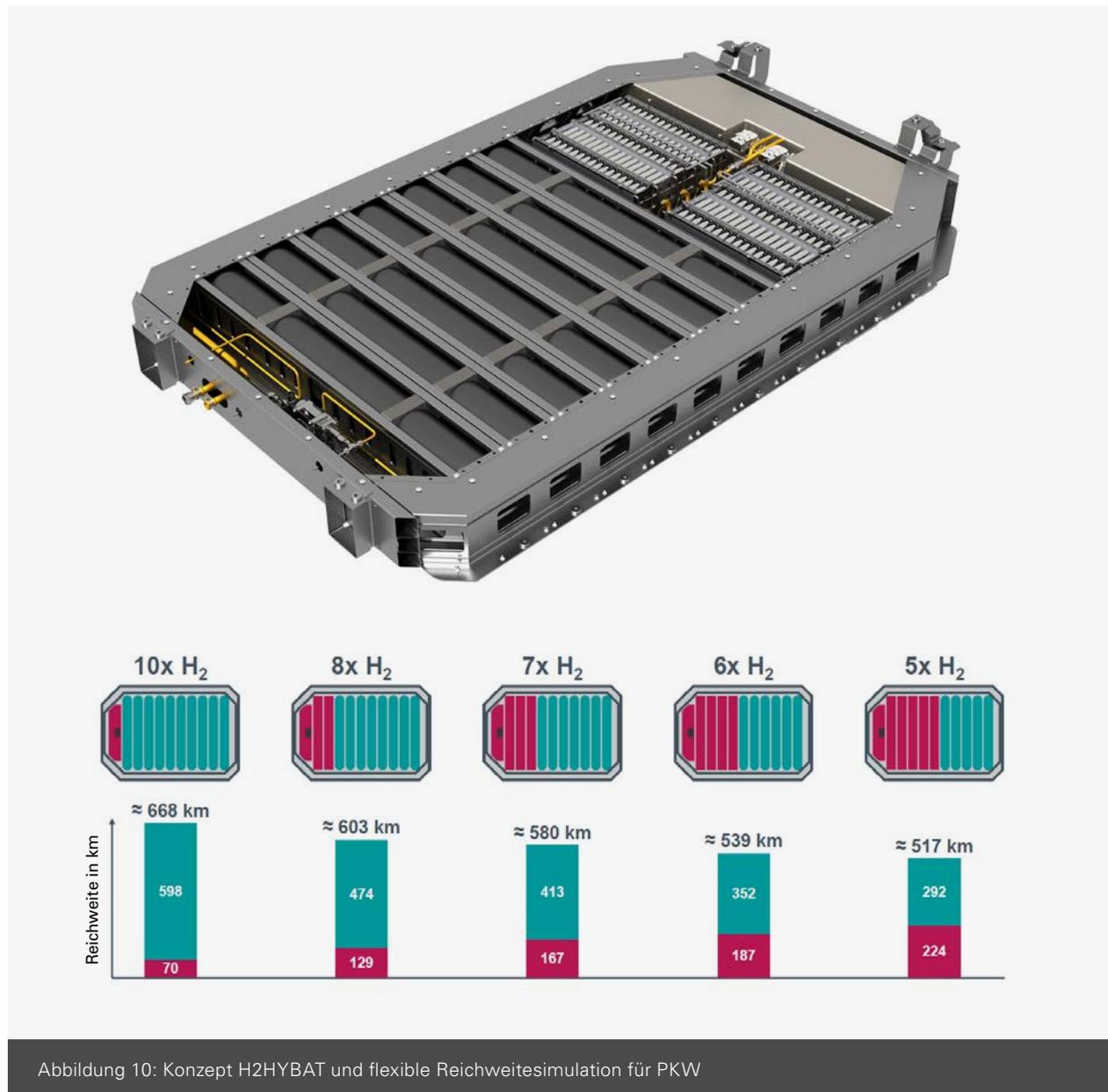


Abbildung 10: Konzept H2HYBAT und flexible Reichweitesimulation für PKW

Im Projekt HySteelStore verfolgt Bosch mit dem Partner Salzgitter ein ähnliches Konzept, allerdings auf Basis von Behältern aus Edelstahl. Das höhere Gewicht im Vergleich zu Composite-Behältern wird in Kauf genommen zugunsten potenziell niedrigerer Herstellkosten und höherer zulässiger Temperaturen [NOW_HySteelst_2020]. Dadurch wäre potenziell der Einsatz von vereinfachter (weniger Vorkühlung) und dadurch kostengünstigerer H₂-Tankstellen-Technologie bei gleicher Betankungsgeschwindigkeit möglich.

Entwicklungsaktivitäten für tiefkalte Betankungsformen

Aktuell sind in Deutschland große Anstrengungen im Gang, um tiefkalte Betankungsformen wie Cryo-compressed Hydrogen (CCH₂) und subcooled Liquid Hydrogen (sLH₂) mittelfristig für Nutzfahrzeuge einzuführen. Zu nennen sind hier als Treiber vor allem die beiden süddeutschen Unternehmen Daimler Truck AG und Cryomotive GmbH. Bei beiden Ansätzen wird eine wesentlich höhere reale Energiedichte der Tanksysteme im Vergleich zu CGH₂ erreicht. Als weiterer Vorteil wird beschrieben, dass eine Kommunikation zwischen Tankstelle und Fahrzeug nicht notwendig ist.

Flüssigwasserstoff (LH₂) und subcooled Liquid Hydrogen (sLH₂)

Im Bereich der Schwerverkehrsanwendung wird die Nutzung von flüssigem, tiefkaltem Wasserstoff (LH₂) bei -253 °C, wie für stationäre Speicher etabliert, vorangetrieben. BMW hatte die Technik für den Anwendungsfall PKW vor einigen Jahren entwickelt und die Forschung aufgrund der hohen Verdampfungsverluste (Boil-off) während Stillstandszeiten schließlich eingestellt. Schwere Nutzfahrzeuge jedoch werden durchgängig mit relativ kurzen Pausen gefahren, so dass hier der durch Boil-off verdampfte Wasserstoff nicht abgeblasen werden muss, sondern permanent genutzt werden kann. Die Firmen Daimler und Linde verfolgen zudem das Konzept des sogenannten subcooled Liquid Hydrogen (sLH₂), das bei Druck bis 2 MPa verlustfreie Nichtentnahmezeiten, je nach Tankfüllgrad, von 10 bis 200 h ermöglicht.

Herausforderung der Technologie in der mobilen Anwendung ist sicherlich die Befüllung ohne Rückgas („einflutig“). Heutige stationäre LH₂-Speichersysteme werden „zweiflutig“ (mit Rückgas) befüllt. Außerdem ist die Befüllung mehrerer sLH₂-Tanks durch eine Anschlusskupplung heute noch nicht Stand der Technik.

Die flächendeckende Versorgung mit LH₂ ist bei einer Verflüssigerkapazität von heute gesamt 10 t/Tag in Deutschland bisher nicht gegeben. Die Firmen erwarten künftig Importe von LH₂ aus erneuerbaren Quellen per Seeschiffen mit Umladeterminals. Ein Vorgehen wie bei heutigen Flüssigerdgas(LNG)-Fahrzeugbetankungen, die nur mit umfangreicher Schutzkleidung der Fahrer erfolgen dürfen, soll durch entsprechende sicherheitstechnische Lösungen vermieden werden. Bei allen genannten Herausforderungen ist großes Potenzial zur Lösung für innovative Unternehmen gegeben.

Als deutlicher Vorteil wird die hohe Energiedichte nicht nur des flüssigen Wasserstoffs alleine (von 60 g/l), sondern auch unter Berücksichtigung der Tanksysteme angesehen. Für ein LH₂-Tanksystem werden ca. 5–11 kg Systemgewicht zur Speicherung von 1 kg LH₂ angegeben, während bei 35- oder 70-MPa-Drucktanks ~17–24 kg Systemgewicht für 1 kg CGH₂ anfallen. Die Befüllgeschwindigkeit beträgt bis 500 kg/h, heutige Nutzfahrzeugbetankungen sind bei ~380 kg/h definiert (max. 432 kg/h) [Daimler_2022], [Daimler-Linde_2021], [SAG_2021].

Mobile LH₂-Tanks können aus Edelstahl hergestellt werden und sollten für die sLH₂-Technologie bis 2,5 MPa druckfest ausgeführt sein. Die Isolierung soll den Wärmedurchgang auf ca. 5 W (bei 88 kg Tankinhalt) begrenzen, was durch Vakuumisolierung möglich ist. Ein innerer Wärmeübertrager kontrolliert die Verdampfungsrate für die Entnahme und wird aus der Abwärme des Brennstoffzellen-Antriebssystems an Bord gespeist.

Ein Beispiel für einen mobilen Flüssigwasserstofftank zeigt Abbildung 11.

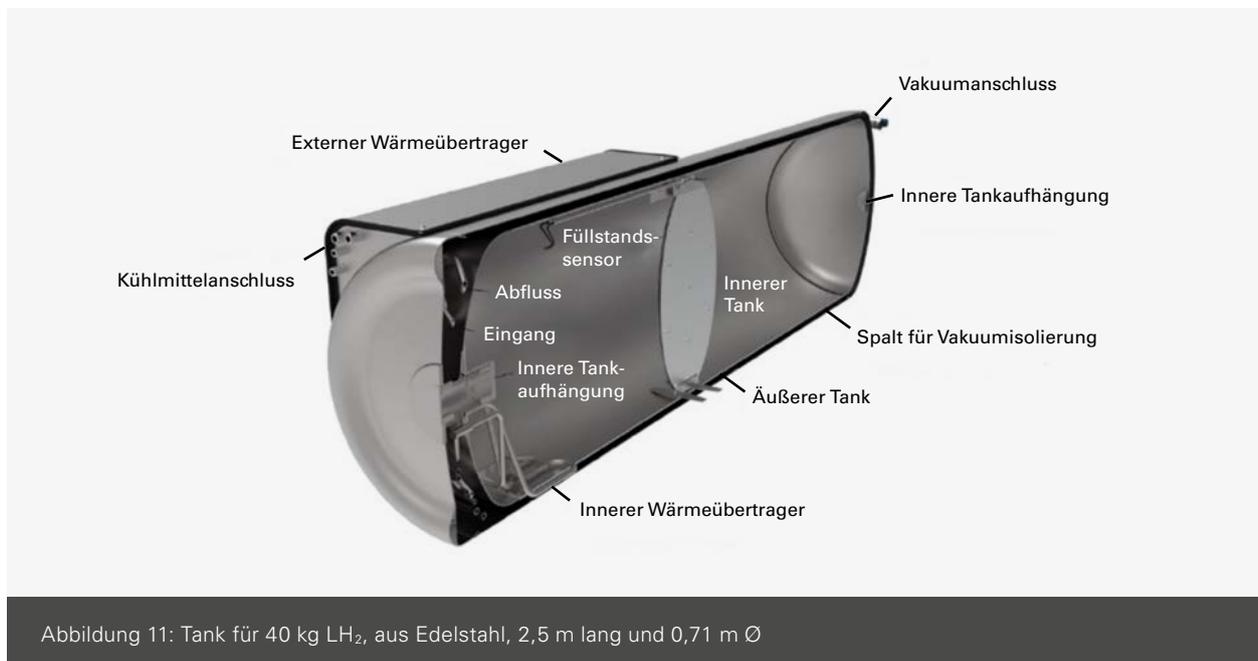


Abbildung 11: Tank für 40 kg LH₂, aus Edelstahl, 2,5 m lang und 0,71 m Ø

Quelle: SAG_2021

LKW mit sLH₂-Tanks sollen in der zweiten Hälfte der 2020er Jahre in größeren Stückzahlen auf den Markt kommen [Daimler-Linde_2021, Daimler_2022].

Cryo-compressed Hydrogen (CCH₂)

Auch die sogenannte „Cryo-compressed Hydrogen Gas“ (CCH₂)-Technologie wurde vor einigen Jahren bereits in einer PKW-Brennstoffzellen-Anwendung erprobt. Bis vor kurzer Zeit konnten in München an einer öffentlichen CCH₂-Zapfsäule PKW betankt werden. Die Technologie unterscheidet sich von (s)LH₂ durch das wesentlich höhere Druckniveau bis 45 MPa. Die Cryo-compressed-Technologie nutzt den Bereich des Phasendiagramms, wo Wasserstoff bereits die Eigenschaften eines Gases hat, die hohen Dichten von Flüssigwasserstoff erhält und sogar übertrifft, im Temperaturbereich von –230 bis –150 °C. Auch bei CCH₂ spielt der Boil-off bei Nichtabnahme von H₂ aus den Fahrzeugtanks eine Rolle, allerdings sind die Auswirkungen hier weniger kritisch. Es werden durch einen Druckpuffer Stillstandszeiten ohne H₂-Verluste, je nach Tankfüllgrad, von 24 bis 720 h erreicht. Die Tankisolation soll den Wärmeeintrag auf 20–50 W für das Tanksystem begrenzen [Cryomotive_2022].

Wenn CCH₂-Abgabestellen mit LH₂-Vorratsspeichern betrieben werden, kann die optimale Speicherdichte von bis zu 80 g/l erreicht werden. Alternativ ist die Kühlung und Verdichtung vor Ort von an der Wasserstofftankstelle Hydrogen Refuelling Station (HRS) gelagertem CGH₂ möglich. Dies erleichtert die zeitnahe Einführung der Technologie, hat aber etwas geringere Speicherdichten an Bord (bis 65 g/l) zur Folge.

CCH₂-Fahrzeugtanks sind tiefemperaturbeständige, bis ca. 50 MPa Nenndruck belastbare, vollumwickelte Metallbehälter (Typ III, vgl. Abschnitt „Speicherbehälter für gasförmigen Druckwasserstoff“), die zusätzlich isoliert sind [BMW_2011, LLNL 2009]. Die Beschaffung von Innenbehältern mit dem geforderten Volumen von 500–650 l ist derzeit nur aus Übersee möglich. Für das Tanksystem werden Befüllraten bis zu 900 kg/h erwartet.

CCH₂-Fahrzeugtanks könnten bei Bedarf (keine CCH₂-HRS in der Nähe) auch mit gasförmigem Kraftstoff H₂ bis 35 MPa befüllt werden, dann jedoch nur noch bis zur Speicherdichte wie bei 35 MPa CGH₂ von 24 g/l. Eine Kleinserienproduktion für FC-Trucks mit CCH₂-Tanktechnologie ist ab 2025 vorgesehen [Cryomotive_2022].

Hinweis auf die ergänzende Kurzstudie in der Reihe Wissen Kompakt „Potenziale in der Wasserstoff-Tankstellentechnologie“

Ergänzende Informationen zu Betankungsprozeduren mit und Speicherformen des Kraftstoffs Wasserstoff für die Mobilität finden Sie unter dem Weblink https://www.transformationswissen-bw.de/fileadmin/media/Publikationen/e-mobil_Studien/Wissen_Kompakt_Potenziale_in_der_Wasserstoff-Tankstellentechnologie.pdf.

Weitere aktuelle Themen zur Transformation der Automobilwirtschaft in Baden-Württemberg unter <https://www.transformationswissen-bw.de/wissensspeicher/publikationsdatenbank>

Literaturverzeichnis

Wenn nicht anders vermerkt, wurden alle Weblinks abgerufen/überprüft am 31.5.2022.

[AVL_2019] Ramaka, Vishwasri, Benchmark Batteries, <https://www.emove360.com/wp-content/uploads/2019/10/AVL-Series-Battery-Benchmarking.pdf>

[Barthélémy_2007] H. Barthélémy, Paper, <http://www.ichs2013.com/images/papers/132.pdf>

[BMW_2011] Kircher et al., Paper, „Validation of Cryo-Compressed Hydrogen Storage (C₂H₂)“, <https://h2tools.org/file/7226/download?token=JSEnRUIw>

[Bosch_2021] Pressemitteilung, <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/bosch-baut-wasserstoff-portfolio-aus-234944.html>

[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_2014] Beispielfoto, <https://dialog.hochbahn.de/wp-content/uploads/2014/12/Wasserstofftanks.jpg>

[Daimler_2022-1] Online-Interview am 15.2.2022 mit S. Maus und J. Franzen, Daimler Truck AG

[Daimler_2022-2] Pressemitteilung mit Fotos, <https://media.daimlertruck.com/marsMediaSite/de/instance/ko/GenH2-Truck.xhtml?oid=47469461>

[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>

[EDAG_2021] <https://www.edag.com/de/h2hybat-hybridspeichersystem-fuer-wasserstoff-und-batterien>

[EIGA_2020] Bericht, „H₂ Cylinders and transport vessels“, <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC100.pdf>

[GM_2008] Vortrag F-Cell Stuttgart 2008, Byron McCormick, General Motors

[H2M_2021] Broschüre „Wasserstofftanken im Schwerlastverkehr – Die Optionen im Überblick“, <https://h2-mobility.de/wasserstoffbetankung-im-schwerlastverkehr/>

[IDW_2021] Pressemeldung Projekt Bryson, <https://nachrichten.idw-online.de/2021/04/13/entwicklung-von-wasserstofftanks-fuer-kraftfahrzeuge/>

[Iveco-Nikola 2022] Produktbeschreibung, <https://nikolamotor.com/tre-fcev>

[IVW_2020] Infoartikel, <https://www.ivw.uni-kl.de/de/aktuelles/news/detail/hocheffiziente-druckbehaelterherstellung>

[LLNL_2009] Aceves et al., “High-density automotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels”, Journal of Hydrogen Energy, 2010

[NASA_1997] Guidelines H₂ Safety, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19970033338/downloads/19970033338.pdf>

[NCC_2021] Presseartikel, <https://www.compositesworld.com/news/nccs-all-composite-type-v-tank-demonstrates-future-composite-space-tank-technology>

[NOW_HyMon_2021] Projektbeschreibung, <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/hymon/>

[NOW_HySteelst_2020] Projektbeschreibung, https://www.now-gmbh.de/projektfinder/00_hysteelstore/

[NOW_Matain_2020] Projektbeschreibung, <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/matain-h2/>

[Oeko_2018] Studie „O-Lkw-Technologievergleich“, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf>

[OMB] Komponentenkatalog, <https://omb-saleri.it/wp-content/uploads/2022/06/catalogo-h2-.pdf>, abgerufen 14.06.2022

[SAG_2021] J. Winklhofer, SAG, Präsentation am „42nd International Vienna Motor Symposium“, 30. April 2021

[Shell_2017] Studie „ENERGIE DER ZUKUNFT? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂“, 2017, <https://www.shell.de/ueber-uns/newsroom/shell-wasserstoffstudie.html>

[Toyota_2014] Infobroschüre Mirai I, https://www.toyota-europe.com/download/cms/euen/Toyota%20Mirai%20FCV_Posters_LR_tcm-11-564265.pdf

[Toyota_2022] Beschreibung, <https://www.toyota.de/elektromobilitaet/wasserstoff/brennstoffzellenautos>

[UNECE_2013] Globale technische Regulierung, <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a13e.pdf>

[UNECE_2019] Regelung für die Genehmigung (...) H₂-betriebener Fahrzeuge, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2019.129.01.0043.01.DEU

[Vogel_2014] Infoartikel, <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/druckbehaelter-mit-potenzial-fuer-die-zukunft-a-455697/?p=2>

[Voith_2022] Pressemitteilung, https://voith.com/corp-de/news-room/pressemeldungen/2022-07-11_vt_iaa-transportation-2022.html, abgerufen am 12.7.2022

[WEH] Produkthomepage, <https://www.weh.de/produkte/h2-betankungskomponenten/weh-tanknippel-tn1-h-produktfamilie/c1-85965>

Autor:innen

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

Hintergrund: Landeslotsenstelle Transformationswissen BW

Im aktuellen Umbruch der Automobilwirtschaft stehen insbesondere mittelständische Unternehmen vor großen Herausforderungen, sei es im Bereich der zukünftigen Entwicklung des Geschäftsmodells, der Mitarbeiterqualifizierung oder der generellen Ausrichtung der Unternehmensstrategie. Die Landeslotsenstelle für den Mittelstand setzt hier an und bietet den Vertretern der Automobilwirtschaft, insbesondere Mittelständlern der Zuliefererindustrie und des Kfz-Gewerbes, Orientierung und Unterstützung in folgenden Themengebieten: zielgruppenspezifisch aufbereitetes Wissen zu Technologien, Prozessen und Trends; Übersicht über Weiterbildungs- und Qualifizierungsangebote; strukturierter Überblick zu Beratungsangeboten und Förderprogrammen des Landes; Informationen zu thematisch passenden Veranstaltungen.

Weitere Informationen unter www.transformationswissen-bw.de

Herausgeber



Gefördert von



Layout/Satz/Illustration

markentrieb – Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Stand

August 2022