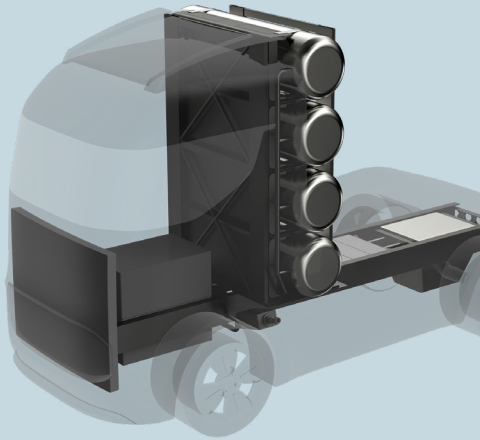


H₂MOBILITY



Wasserstoffbetankung von Schwerlastfahrzeugen – die Optionen im Überblick

#FortschrittTanken





Wir bereiten den Weg: Unsere Wasserstoff-
infrastruktur ermöglicht emissionsfreien
Transport von Gütern und Personen.“

Nikolas Iwan, CEO H2 MOBILITY

INHALT

01	EINLEITUNG	4
02	SICHERHEIT	5
03	WASSERSTOFF-BETANKUNGSINFRASTRUKTUR	
	3.1 STATUS QUO WASSERSTOFFTANKSTELLEN	7
	3.2 DIE ZUKUNFT DER WASSERSTOFF-BETANKUNGS- INFRASTRUKTUR	7
04	SCHWERE BRENNSTOFFZELLENNUTZFAHRZEUGE	
	4.1 STATUS QUO UND ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG	10
05	WASSERSTOFFWERTSCHÖPFUNGSKETTE	
	5.1 WASSERSTOFFTRANSPORT	12
	5.2 WASSERSTOFFSPEICHERUNG	13
06	WASSERSTOFFBETANKUNG	
	6.1 KOMPRIMIERTER GASFÖRMIGER WASSERSTOFF (CGH ₂) 350 BAR	16
	6.2 KOMPRIMIERTER GASFÖRMIGER WASSERSTOFF (CGH ₂) 700 BAR	20
	6.3 SUBCOOLED LIQUID HYDROGEN (SLH ₂)	24
	6.4 KRYOKOMPRIMIERTER WASSERSTOFF (CCH ₂)	28
07	BEWERTUNG DER TECHNOLOGIEN	
	7.1 TECHNOLOGISCHER REIFEGRAD	31
	7.2 KOSTENBEWERTUNG DER INFRASTRUKTUR	33
08	ZUSAMMENFASSUNG	36
09	ÜBER H₂ MOBILITY	37
10	ABKÜRZUNGEN	38

Wir alle streben auf Basis von erneuerbaren Energien einer sauberen Zukunft entgegen, in der Fortschritt, wirtschaftlicher Wohlstand, Arbeitsplätze und Gesundheit erhalten bleiben oder sogar zunehmen. Wasserstoff kann dabei eine zentrale Rolle spielen, denn Wasserstoff macht es möglich, Wind-, Wasser- und Sonnenenergie unabhängig von Ort und Zeit der Erzeugung zu speichern. Dies ist entscheidend für eine erfolgreiche Mobilitätswende.

H2 MOBILITY baut und betreibt das erste flächendeckende Wasserstofftankstellennetz in Deutschland und damit die Voraussetzung für eine elektromobile Zukunft mit kurzen Betankungszeiten und hohen Reichweiten, sauber und leise. Während bisher die Hauptwachstumstreiber Personenkraftwagen (Pkw), leichte Nutzfahrzeuge (LNF) und Busse mit Brennstoffzellenantrieb (BZ) waren, werden zukünftig mittelschwere (MNF) und schwere Nutzfahrzeuge (SNF) mit Brennstoffzellenantrieb (BZ) eine wichtige Rolle einnehmen. Deshalb hat H2 MOBILITY seine Strategie erweitert und baut nun auch für MNF und SNF öffentliche Wasserstofftankstellen, wobei diejenige Betankungstechnologie zum Einsatz kommt, die hinsichtlich der Kosten und der Verfügbarkeit am vielversprechendsten erscheint. Denn während die Betankungstechnologien für Pkw, LNF und Busse mit geringen Betankungsmengen bereits erprobt und im Einsatz sind, befinden sich die Technologien für MNF und SNF mit höheren Betankungsmengen und kurzer Befüllzeit noch in der Entwicklung (mit Ausnahme der 350-Bar-Technologie für MNF).

Für Logistikunternehmen, die über einen Umstieg auf alternative Antriebe nachdenken, sind kurze Betankungszeit, uneingeschränkte Nutzlast, hohe Reichweite sowie vergleichbare Kosten relevante Kriterien. 500 km pro Tankfüllung gelten für die Logistikbranche als Mindestreichweite, denn heute sind

Reichweiten von 1.000 km und mehr pro Tankfüllung üblich. Bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 7 bis 8 kg Wasserstoff pro 100 km ist also ein Wasserstoffspeicher von mindestens 40 kg an Bord des Fahrzeugs erforderlich. Zurzeit werden für die Betankung von MNF und SNF mit Betankungszeiten von 10–15 min und Wasserstoffmengen von 40 bis 100 kg verschiedene Betankungsoptionen entwickelt – mit unterschiedlichen Vorteilen.

In diese Übersicht aufgenommen wurden die vier Optionen der Wasserstoffbetankung, die derzeit bei mindestens einem Automobilhersteller und einem Gaslieferanten bzw. Technologieunternehmen in der Entwicklung sind: Wasserstoffbetankung mit komprimiertem gasförmigem Wasserstoff bei 350 oder 700 Bar (compressed gaseous hydrogen, CGH₂), kryokomprimiertem Wasserstoff (cryo-compressed hydrogen, CcH₂) und ein neues Verfahren zur Betankung mit flüssigem Wasserstoff (subcooled Liquid Hydrogen, sLH₂).

Das Ziel dieser Ausarbeitung besteht darin, einen umfassenden Überblick über die verschiedenen Betankungstechnologien zu geben sowie deren derzeitigen Entwicklungsstand zu zeigen. Dargestellt werden technische Spezifikationen der einzelnen Technologien für die Wasserstoffbetankung, ihre Vor- und Nachteile, die Auswirkungen auf Design und Platzbedarf von Wasserstofftankstellen sowie eine erste Bewertung des technologischen Reifegrades und der Kostenfaktoren. Die Analyse erfolgt ausschließlich aus der Infrastrukturperspektive von H2 MOBILITY Deutschland und ist folglich auch als solche zu verstehen.



Wasserstoff ist ein ungiftiges, geruchloses, nicht selbstentzündliches Gas, das seit über 100 Jahren in der Gasindustrie verwendet wird. Wie bei allen Anwendungen, bei denen hohe Energieströme fließen, gibt es bestimmte Risiken, die beachtet werden müssen. Deshalb hat das Thema Sicherheit bei H2 MOBILITY oberste Priorität.

Um die sichere Handhabung, Beförderung und Lagerung von Wasserstoff sowie den sicheren Betrieb an den Stationen zu gewährleisten, wurden technische Standards und Sicherheitsverfahren etabliert. Alle technischen Komponenten von Wasserstofftankstellen und -fahrzeugen werden regelmäßig und umfassend auf die Einhaltung aller Vorschriften und auf die Gewährleistung eines hohen Sicherheitsniveaus geprüft. Die „Technischen Regeln für die Betriebssicherheit für einen sicheren Bau und Betrieb von Wasserstofftankstellen (TRBS)“ gehören beispielsweise zu den relevanten Vorschriften in Deutschland. H2 MOBILITY erfüllt bei Bau und Betrieb von Wasserstofftankstellen stets alle erforderlichen Zertifizierungs- und Sicherheitsvorgaben nach Stand der Technik. Zusätzlich führt H2 MOBILITY ergänzende Prüfungen und Tests für den sicheren Betrieb der öffentlichen Tankstellen durch. In Zusammenarbeit mit den H2 MOBILITY Shareholdern werden Störfälle während Bau und Betrieb sowie potenzielle Auswirkungen auf die Fahrzeuge systematisch analysiert, um mögliche Fehler frühzeitig zu erkennen und entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Auf nationaler Ebene ist H2 MOBILITY Mitglied der Clean Energy Partnership (CEP), eines Zusammenschlusses von Unternehmen entlang der gesamten Wasserstoff-Wertschöpfungskette. In der CEP werden technologische und sicherheitstechnische Aspekte auf Basis der gemeinsamen Erfahrungen aller Mitglieder gesammelt, um technische Standards für die Zukunft der Wasserstoffmobilität zu entwickeln. Basis für eine Betriebsfreigabe von allen Wasserstofftankstellen sind die CEP-Tests (DIN EN 17127), eine Kombination aus sich ergänzenden Leistungs- und Sicherheitstests, die in Zusammenarbeit mit Wasserstofftankstellen- und Fahrzeugherstellern (engl. Original Equipment Manufacturer - OEM) entwickelt wurden.



WASSERSTOFF TANKEN

Unsere Basisinfrastruktur für Wasserstoff-Pkw und leichte -Nutzfahrzeuge steht: jetzt werden wir Pionier auch für emissionsfreien Schwerlastverkehr.

WASSERSTOFF-BETANKUNGSINFRASTRUKTUR

3.1. Status Quo Wasserstofftankstellen

Das Wasserstofftankstellennetz wächst weltweit. Derzeit führt Asien mit 275 Wasserstofftankstellen, Europa folgt mit etwa 200, von denen sich fast 100 in Deutschland befinden. In Nordamerika sind 75 Wasserstofftankstellen in Betrieb, ca. 50 davon in Kalifornien.

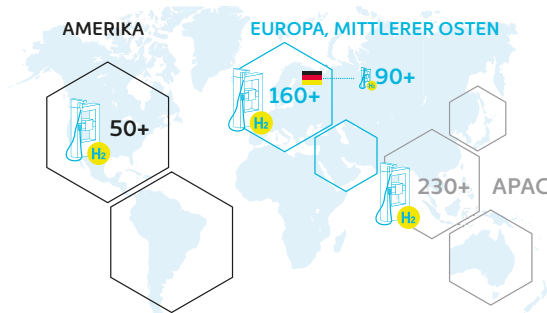


Abb. 1 – Wasserstofftankstellennetz weltweit (2021)

Das deutsche Wasserstofftankstellennetz

In den letzten Jahren wurde in Deutschland ein flächendeckendes und zuverlässiges Wasserstofftankstellennetz errichtet. Die Wasserstoff-Betankungstechnologie hat sich aus dem Forschungs- und Entwicklungsstadium herausentwickelt zu einer leistungsfähigen kommerziellen Anwendung mit hoher Verfügbarkeit für private und betriebliche Kunden. Für den ersten Hochlauf der öffentlichen

Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur wurden kleine Stationen („small“ = S, max. Durchsatz 200 kg H₂/Tag) und mittlere Stationen („medium“ = M, max. Durchsatz 500 kg H₂/Tag) errichtet. Derzeit betreibt H₂ MOBILITY über 90 Tankstellen in Deutschland und Österreich und ist damit der größte Einzelbetreiber von Wasserstofftankstellen weltweit.

Pkw sowie LNF werden nach Stand der Technik mit 700-Bar-CGH₂ betankt, Busse mit 350-Bar-CGH₂. Auch die Wasserstoffbetankung von MNF ist an einigen H₂ MOBILITY Wasserstofftankstellen bereits möglich. Zurzeit wird der Wasserstoff hauptsächlich im gasförmigen Aggregatzustand angeliefert und gespeichert. Einige Stationen werden zudem mit flüssigem Wasserstoff versorgt, der entsprechend in diesem Aggregatzustand gespeichert wird.

3.2. Die Zukunft der Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur

In Europa wird sich die künftige Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur mit der Fahrzeugnachfrage und entsprechend den Kundenanforderungen entwickeln. Ziel muss sein, alle wichtigen Verkehrskorridore für die transeuropäische Wasserstofflogistik zu ertüchtigen und so eine internationale

Infrastruktur aufzubauen. Außerdem werden Wasserstofftankstellen in der Nähe von wichtigen Logistik- und Verteilerzentren errichtet, um Kundenanforderungen zu begegnen.

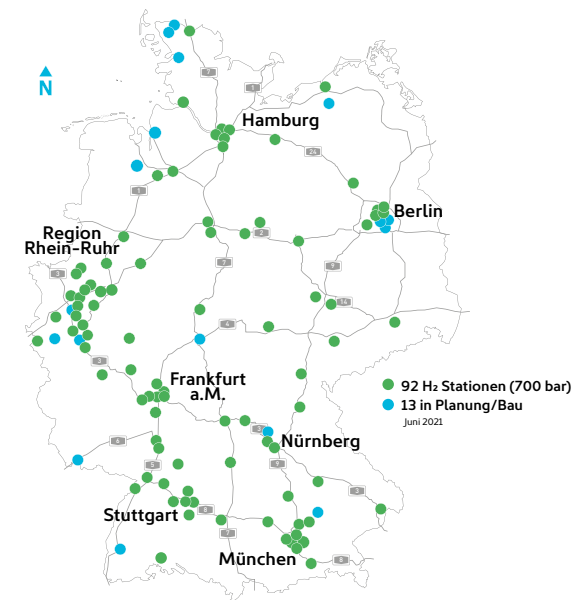



Abb. 2 – Wasserstofftankstellennetz in Deutschland (2021)

WASSERSTOFF-BETANKUNGSINFRASTRUKTUR



Größe	S	M	L	2XL
Maximaler Wasserstoffdurchsatz/Tag	200 kg	500 kg	1,000 kg	4,000 kg
Fahrzeugklassen	Pkw, LNF	(Pkw, LNF, Busse), MNF	(Pkw, LNF, Busse), MNF, SNF	MNF, SNF (Pkw, LNF, Busse)
Durchschnittlicher Wasserstoffdurchsatz/Tag	150 kg	350 kg	700 kg	2.500 kg
Jährliche Nachfrage	1-10 t	> 100 t	> 500 t	> 900 t
Zapfpistolen	1	2	2-3	2-4
Platzbedarf	80-250 m ²	200-350 m ²	250-800 m ²	abhängig von der H ₂ -Technologie

Abb. 3 – Größendefinition Wasserstofftankstellen

Zahlreiche Akteure auf internationaler, europäischer und deutscher Ebene haben sich zum Aufbau einer umfassenden Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur verpflichtet. Dabei macht die zentrale Lage Deutschlands die transeuropäischen Routen zum integralen Bestandteil der hiesigen Transportinfrastruktur.

Insbesondere die benötigten Wasserstoffmengen bei zeitgleicher Betankung mehrerer schwerer Nutzfahrzeuge macht einen weiteren Ausbau des Wasserstofftankstellennetz – entweder durch Nachrüstung oder durch Neubauten – unumgänglich. Dabei liegt der Fokus wegen der steigenden Nachfrage durch

MNF und SNF auf Wasserstofftankstellen der Größen L bis XXL (Definition siehe Abb. 3). Eine Kombination von Nachrüstung und Netzerweiterung gestaltet sich aufgrund von Synergien wirtschaftlich günstig.

Die Nachrüstung von Stationen der Größe S auf Stationen der Größen M, L oder sogar XXL ist technisch möglich. Jede Wasserstofftankstelle kann hinsichtlich des Wasserstoffbedarfs, der Spitzenleistung und der Effizienz an spezifische Kundenbedürfnisse angepasst werden.

WASSERSTOFF-BETANKUNGSINFRASTRUKTUR

Es ist davon auszugehen, dass die künftige Zunahme von SNF-Betankung eine XXL-Konfiguration mit einem durchschnittlichen Wasserstoffdurchsatz von 2,5t/Tag notwendig macht. Bei einem angenommenen durchschnittlichen Wasserstoffbedarf von 60 kg pro Betankung könnten so mehr als 40 Lkw pro Tag und Station betankt werden. Wenn keine besonderen Anforderungen an Spitzenlasten gestellt werden, sind zwei Zapfsäulen je Station ausreichend. Diese Konfiguration würde eine Betankung von bis zu acht SNF stündlich mit einer angestrebten Betankungszeit von 10 bis 15 Minuten ermöglichen. Die sorgfältige Prüfung des Platzbedarfs für eine Wasserstofftankstelle bildet die Grundlage für die Entscheidung darüber, ob eine Aufrüstung der Station möglich

ist oder die Tankstelle neu gebaut werden muss. Darüber hinaus müssen bei einer möglichen Erweiterung der Wasserstofftankstelle die technologische Machbarkeit und die wirtschaftlichen Auswirkungen berücksichtigt werden.

Welche Wasserstoff-Betankungstechnologien und welche Zulieferketten in Zukunft bei H2 MOBILITY zum Einsatz kommen, ist von den Fahrzeugkonfiguration, dem Reifegrad der Technologien, den Gesamtkosten und den möglichen Synergien mit der bestehenden Wasserstofftankstelleninfrastruktur abhängig.

SCHWERE BRENNSTOFFZELLEN-NUTZFAHRZEUGE

4.1. Status Quo und zukünftige Entwicklung

Brennstoffzellenfahrzeuge fahren bereits seit einigen Jahren in mehreren Erdteilen. Während der Langzeitreiber der Pkw sein wird, verlagert sich derzeit der Entwicklungsschwerpunkt des Brennstoffzellenantriebs auf schwere und mittelschwere Nutzfahrzeuge. Vor allem im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen und ihrer Ladeinfrastruktur, die weiterhin Einschränkungen in Bezug auf Reichweite, Nutzlast und Ladezeit verzeichnen, überzeugt die Brennstoffzellentechnologie bei schweren und kommerziell genutzten Fahrzeugen. Weltweit entwickeln, produzieren und verkaufen etablierte Fahrzeughersteller und Newcomer BZ-Fahrzeuge. In den nächsten Jahren werden durch die anhaltende Forderung nach emissionsfreien Antrieben der Markt und die Verfügbarkeit von BZ-Fahrzeugen vor allem in Anwendungsfeldern mit Bedarf für große Reichweite wachsen. Um den Fahrzeughochlauf zu gewährleisten, muss eine passende Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur geschaffen werden. Zwischen der Wasserstoff-Betankungstechnologie und dem Wasserstofffahrzeug bestehen wesentliche Wechselwirkungen, die eine gut koordinierte Zusammenarbeit zwischen Infrastrukturbetreibern und Fahrzeugherstellern erfordern.

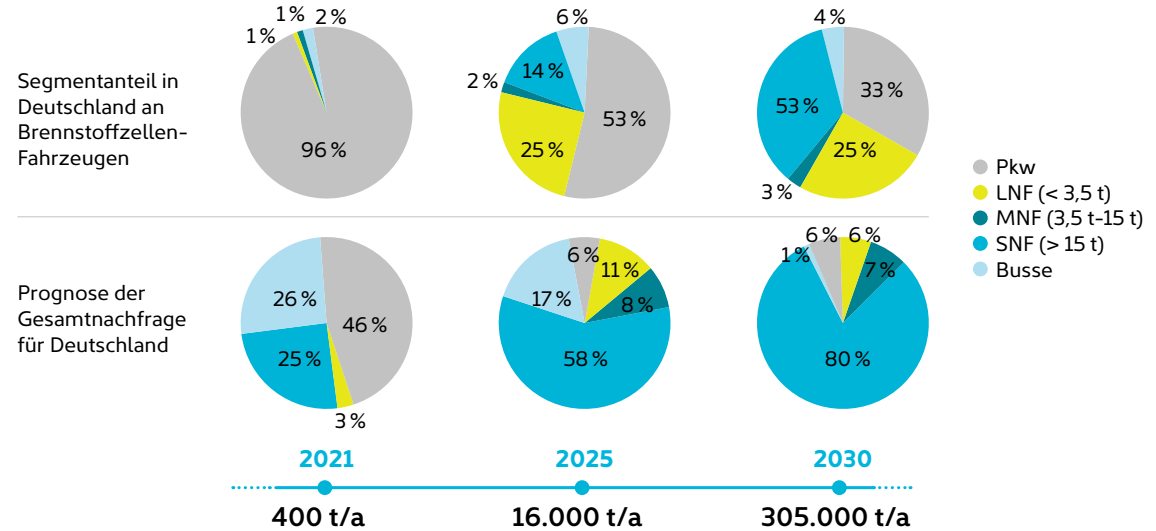


Abb. 4 – BZ-Fahrzeuge und Nachfrageentwicklung bis 2030
(Quelle: McKinsey (2021) & H2 MOBILITY)

SCHWERE BRENNSTOFFZELLEN-NUTZFAHRZEUGE

Mit der flächendeckenden Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen ist zu erwarten, dass aufgrund der hohen Fahrleistung und des damit verbundenen hohen Wasserstoffverbrauchs im Transportsektor der Schwerlastverkehr im Jahr 2030 etwa 80 % des nationalen Wasserstoffbedarfs ausmachen wird. Aber auch wenn die Wasserstoffnachfrage für Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Busse geringer ausfallen wird, liegen hier aufgrund der hohen Stückzahlen wichtige Business-Cases für Fahrzeughersteller.

Auf Grundlage der prognostizierten Fahrzeugzahlen wird die Gesamtwasserstoffnachfrage in Deutschland bis 2030 bei etwa 300.000 Tonnen pro Jahr liegen. Strengere Emissionsnormen innerhalb der EU für alle Fahrzeugsegmente sowie eine hohe Marktnachfrage nach emissionsfreien Antrieben allgemein sind die wichtigsten Wachstumstreiber für die Wasserstoffnachfrage im Mobilitätsbereich.



Abb.5 – Schwere Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb für den EU-Markt

WASSERSTOFF-WERTSCHÖPFUNGSKETTE

Die Wertschöpfungskette für Wasserstoff besteht aus verschiedenen Prozessschritten, von der Wasserstoffproduktion über den Transport bis hin zur Speicherung und Betankung. In diesem Papier steht die Wasserstoffbetankung im Fokus. Die weiteren Prozessschritte werden lediglich angerissen, um ein allgemeines Verständnis zu schaffen.

5.1. Wasserstofftransport

Je nach Betankungstechnologie wird der Wasserstoff in gasförmiger oder flüssiger Form an die Wasserstofftankstelle geliefert. Für die kommerzielle Nutzung gilt die Anlieferung per Trailer (CGH₂- oder LH₂-Trailer) oder Pipeline (CGH₂) als zukunftsträchtig. Außerdem kann Wasserstoff vor Ort durch Elektrolyse erzeugt werden. Andere Transportoptionen, wie flüssige organische Wasserstoffträger (liquid organic hydrogen carriers, LOHC), werden in dieser Übersicht nicht berücksichtigt, könnten aber in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Derzeit kommen beim Transport von gasförmigem Wasserstoff Tankwagen mit einem Druckniveau zwischen 200 und 500 Bar zum Einsatz. Dabei variiert das Verhältnis zwischen Gewicht und Volumen je nach für den Speichertank eingesetztem Material erheblich. Neuere Tanks des Typs IV sind wesentlich leichter und langlebiger als vergleich-

bare Tanks des Typs III. Mit der jüngsten Anpassungen der Sicherheitsvorschriften wird es zukünftig möglich, leichter und damit kostengünstiger Speicherbehälter herzustellen, die bei gleicher Tankkonfiguration durch höhere Druckstufen mehr Wasserstoff transportieren können.

Die Speicherdichte von auf 200 Bar komprimiertem Wasserstoff bei 15 °C beträgt 14,9 kg/m³, bei einem

Druck von 500 Bar verdoppelt sich die Speicherdichte auf 31,6 kg/m³. Mit einem 40-Fuß-Trailer können mit 500 Bar mehr als 1.000 kg nutzbarer Wasserstoff transportiert werden. Mit steigendem Druck erhöht sich die Effizienz der gasförmigen Betankung mit Wasserstoff. Um allerdings höhere Trailerdrücke zu erzielen, sind längere Betankungszeiten und mehr Kompressorleistung an den Abfüllanlagen erforderlich.

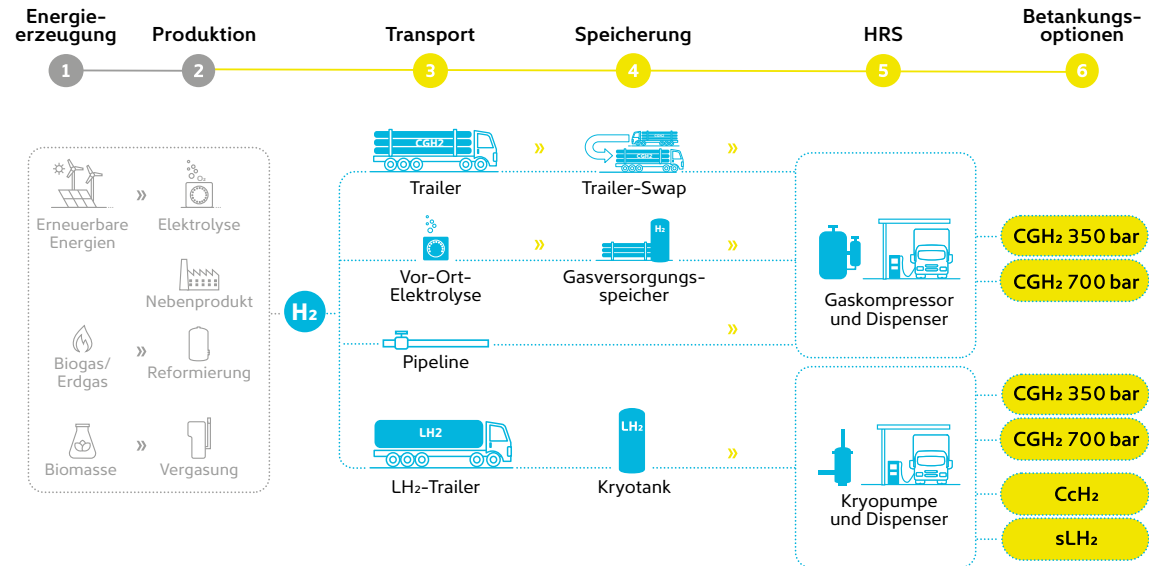


Abb. 6 – Die Wasserstoff-Wertschöpfungskette

WASSERSTOFF-WERTSCHÖPFUNGSKETTE

Alternativ kann Wasserstoff flüssig in LH₂-Trailern mit vakuumisolierten Kryotanks transportiert werden. Aufgrund der besonders hohen Speicherdichte von 71,4 kg/m³ (bei -253 °C und 3 Bar) kann im Vergleich zu einem 500-Bar-CGH₂-Trailer so wesentlich mehr Wasserstoff transportiert werden. Um die Logistikkosten bei Tankstellen der Größe XXL zu senken, erscheint die Anlieferung per LH₂-Trailer als naheliegend, denn so werden weniger Lieferzyklen benötigt. Die Sicherstellung der Verfügbarkeit von LH₂ ist allerdings noch eine große Herausforderung, vor allem bei steigender Nachfrage. Derzeit gibt es in Europa nur drei Anlagen zur Wasserstoffverflüssigung.

Alternativ kann eine Wasserstofftankstelle auch gasförmig mit Wasserstoff via Pipeline versorgt werden. Zurzeit wird die Nutzung der bestehenden Erdgas-Pipeline-Infrastruktur für den künftigen Transport des Wasserstoffs durch ganz Europa erforscht (European Hydrogen Backbone), wobei insbesondere die Verknüpfung von Pipeline-Netz und Wasserstofftankstellennetz untersucht wird. Um die für die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff benötigte Reinheit zu garantieren, wird wahrscheinlich eine Wasserstoffaufbereitung an den Entnahmestellen (z. B. an der Wasserstofftankstelle) nötig sein.

5.2. Wasserstoffspeicherung

Im Allgemeinen kann Wasserstoff physisch oder in chemisch gebundener Form gespeichert werden. Materialbasierte Optionen für die Wasserstoffspeicherung wie Metallhydride oder LOHC befinden sich noch in einer früheren Entwicklungsphase als die etablierten Optionen und können zukünftig für bestimmte Anwendungsfälle eine Alternative werden. Heute ist die am häufigsten genutzte kommerzielle Wasserstoffspeichervariante die durch Kompression und/oder Verflüssigung. Auch an Wasserstofftankstellen wird der Wasserstoff für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge heute meist in gasförmiger Form in Tanks gelagert. Das Druckniveau liegt hier üblicherweise bei 45 Bar bis 200 Bar, in kryogenen Speichertanks wird LH₂ bei 2-3 Bar gelagert. Die stetige Zunahme an BZ-Fahrzeugen wird zu einem Anstieg des Wasserstoffbedarfs an den einzelnen Tankstellen und damit zu höheren benötigten Speicherkapazitäten führen. Statt Nachrüstung einzelner Stationen ist auch der Trailer-Austausch (sog. Trailer-Swap) eine Alternative für Bestandstankstellen. Hier werden die Trailer selbst mobile Speichersysteme und ersetzen stationäre Tanks.

WASSERSTOFFBETANKUNG

Je nachdem, ob der Wasserstoff im Fahrzeug flüssig oder gasförmig gespeichert wird, kommen unterschiedliche Wasserstoff-Betankungstechnologien zum Einsatz. Um vergleichbare Betankungszeiten wie mit Diesel-Lkw und somit die gleiche zeitliche Taktung zu gewährleisten, werden auch mit Wasserstoff Betankungszeiten von 10 bis 15 Minuten angestrebt.

In Deutschland und Österreich kann heute bereits gasförmiger Wasserstoff mit 350 oder 700 Bar getankt werden. Dabei wird der Wasserstoff entweder gasförmig gelagert und gekühlt vertankt oder in flüssiger Form vorgehalten und dann vor dem Eintritt in den Fahrzeugspeicher erwärmt. Während für die Wasserstoffbetankung von Pkw, LNF und Bussen bereits Standards festgelegt wurden, gibt es noch keine Tankprotokolle für schwere Nutzfahrzeuge mit

großen Fahrzeugtanks (bis zu 100 kg H₂). Im Rahmen des europäischen Projekts „PRHYDE“ (Protocol for Heavy-duty Hydrogen Refuelling) werden Protokolle für hohe Durchflussraten entwickelt, um Langstrecken-Lkw in weniger als 15 Minuten betanken zu können.

Weitere Betankungsoptionen wie „subcooled liquid hydrogen“ (sLH₂), also die Betankung mit flüssigem Wasserstoff, und kryokomprimierter Wasserstoff (CCH₂), also die Betankung mit kryogenem Wasserstoff unter Druck, erfordern die Vorhaltung von flüssigem Wasserstoff. Bei der sLH₂-Technologie wird flüssiger Wasserstoff auf bis zu 16 Bar komprimiert, während bei der CCH₂-Technologie der Wasserstoff in einem kryogenen, aber gasförmigen Zustand auf 300 Bar komprimiert wird. Sowohl sLH₂- als auch CCH₂-Betankungs-

protokolle befinden sich noch in der Entwicklung. Die Erkenntnisse werden im Rahmen der Clean Energy Partnership ausgetauscht und betrachtet. In Abbildung 6 ist die maximale Wasserstoffspeicherdichte im Fahrzeugtank für die verschiedenen Speichertechnologien dargestellt. Die Grafik zeigt, dass CGH₂ mit 350 Bar die geringste und CCH₂ potenziell die höchste Speicherdichte aufweisen.

In den folgenden Kapiteln werden die vier Wasserstoff-Betankungsoptionen einschließlich des jeweiligen Technologiestatus, verfügbarer bzw. in Entwicklung befindlicher Wasserstofffahrzeuge sowie möglicher Tankstellenbauweisen beschrieben.

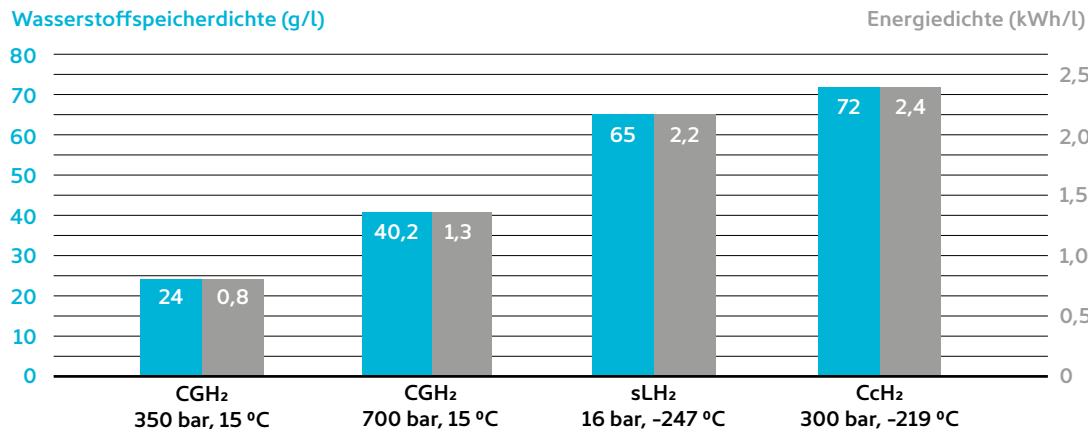
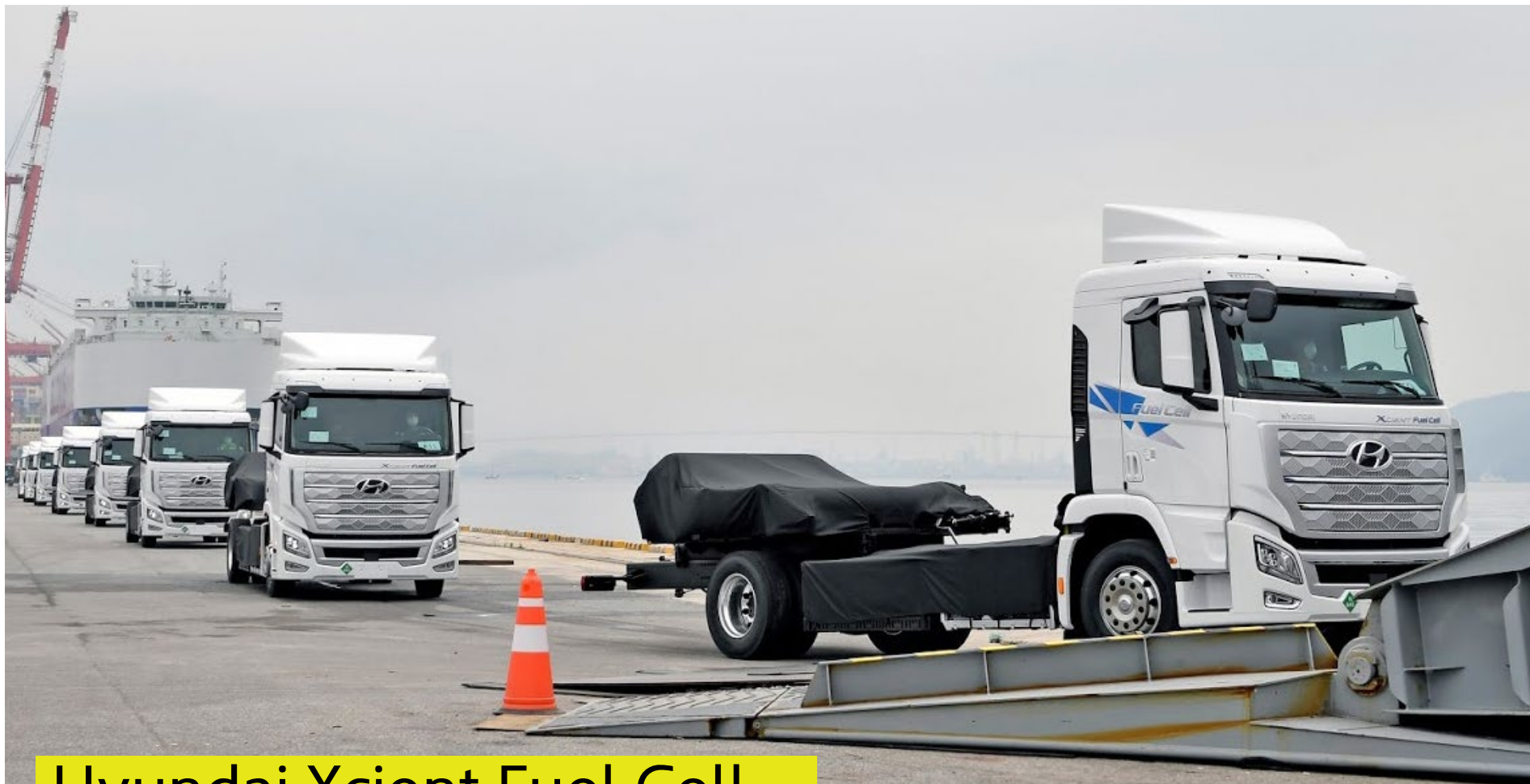


Abb. 7 – Wasserstoffspeicherdichte bei 100 % Füllstand (SOC) im Fahrzeugtank



Hyundai Xcient Fuel Cell -
der erste 350-Bar-Wasserstoff-Lkw
in Serienproduktion

WASSERSTOFFBETANKUNG

6.1 Komprimierter gasförmiger Wasserstoff (CGH₂) 350 Bar

Status Quo

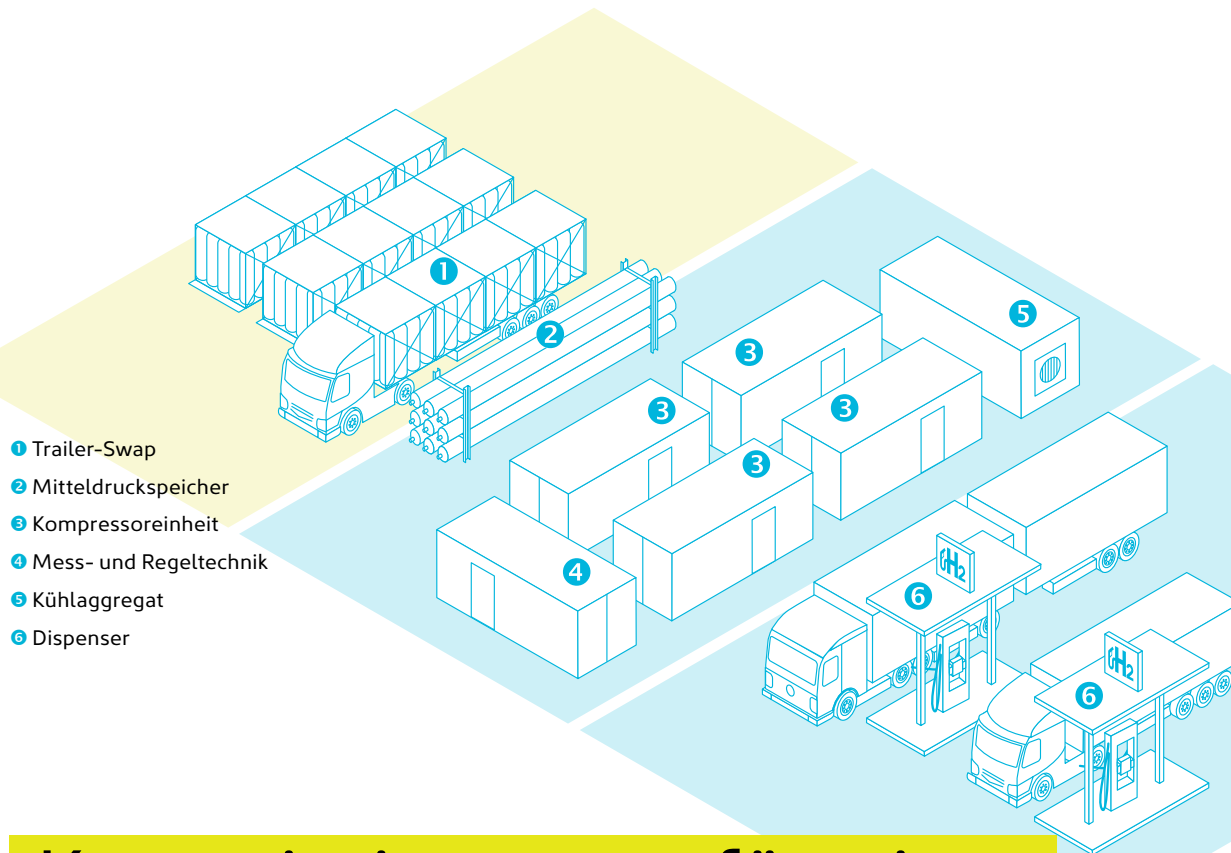
Die meisten BZ-Busse, LNF, MNF und SNF nutzen zurzeit die 350-Bar-CGH₂-Technologie für eine maximale Reichweite von ca. 400 km. Von den in dieser Übersicht beschriebenen Technologien hat die 350-Bar-CGH₂-Technologie die geringste volumetrische Energiedichte (0,8 kWh/l). Fahrzeugaufbau und Speicherkapazität schränken die Reichweite ein. Betankungsprotokolle für bis zu 42,5 kg Wasserstoff sind in der Entwicklung und werden in den nächsten Monaten veröffentlicht. Die maximale Menge an Wasserstoff, die in den BZ-Fahrzeugen gespeichert werden kann, ist sowohl von den Kundenanforderungen als auch von der technologischen Entwicklung und von weiteren Innovationen abhängig.

Fahrzeuge

Heute fahren bereits diverse BZ-Busse, -LNF und -Lkw mit 350-Bar-Fahrzeugtechnologie auf unseren Straßen. Die Fahrzeugtanks sind als Typ III bzw. Typ IV klassifiziert und besitzen daher entweder Aluminium- oder Polymer-Liner. Einer der ersten kommerziell eingesetzten MNF in Europa ist der Hyundai XCIENT Fuel Cell in der Schweiz, der etwa 35 kg Wasserstoff mitführt und eine Reichweite von ca. 400 km hat. Die Fahrzeuge werden vor allem im regionalen Verteilerverkehr eingesetzt. Um die 350-Bar-Technologie auch für 40-Tonnen-Lkw anwendbar zu machen, müssen Fahrzeugdesign und -tanks weiterentwickelt werden.

Wasserstofftankstellen

Eine 350-Bar-CGH₂-Wasserstofftankstelle kann mit gasförmigem oder flüssigem Wasserstoff beliefert werden, so dass alle Optionen der Transportkette möglich sind. Je nach gewählter Option ist ein Kompressor oder eine Kryopumpe für die Betankung der Fahrzeuge erforderlich. Nach Angaben der Society of Automotive Engineers (SAE) sind heute Durchflussraten von bis zu 120 g/s möglich. Im Vergleich zu einer 700-Bar-Tankstelle wird bei 350 Bar weniger Gesamtenergie für Verdichtung und Vorkühlung benötigt. Für den kommerziellen Einsatz und die Back-to-Back-Betankung mehrerer Fahrzeuge mit 80-kg-Speichersystemen sind jedoch deutlich höhere Durchflussraten sowie noch zu entwickelnde Komponenten notwendig. Der Bedarf an Vorkühlung wird in Zukunft stark von der Betankungsstrategie, den Protokollen und der technologischen Entwicklung abhängen.



Komprimierter gasförmiger Wasserstoff (CGH₂) 350 Bar

Möglicher Aufbau einer 350-Bar- CGH₂-Wasserstofftankstelle

Diese Abbildung zeigt den beispielhaften Aufbau einer XXL-Wasserstofftankstelle, die SNF mit 350 Bar Nominaldruck versorgen kann. Die Belieferung der hier abgebildeten Tankstelle erfolgt mit Trailern. Ein Wechseltrailer-Konzept ersetzt den stationären Versorgungsspeicher. Um genügend Wasserstoff für den täglichen Bedarf vorzuhalten, sind etwa drei Trailer pro Tag notwendig. An- und Abfahrt der Trailer kann mit einem Durchfahrt-Konzept realisiert werden. Die Betankung eines oder mehrerer Fahrzeuge erfolgt zuerst durch Überströmen des höher verdichteten Wasserstoffs aus den Trailern, bis eine Druckerhöhung über Verdichter erforderlich wird, um den Fahrzeugtank ganz aufzufüllen. Um einen Trailer nahezu vollständig entleeren zu können, werden Mitteldruckspeicher an der Tankstelle als Puffer eingesetzt. Um die schnelle Betankung ohne Überschreiten von Temperaturgrenzen zu ermöglichen, muss der Wasserstoff vorgekühlt werden.

WASSERSTOFFBETANKUNG

Komprimierter gasförmiger Wasserstoff (CGH₂) 350 Bar

Status

- › bestehende und wachsende Infrastruktur von 350 Bar CGH₂
- › erprobte Technologie für Busse, Pkw und LNF (Betankung von 8 kg als Standard, bis 42,5 kg wird kurzfristig verfügbar sein)
- › wachsender Bus- & LNF-/MNF-Markt

Beispielhafte OEM-Projekte in Europa

- › Xcient Fuel Cell (Hyundai Motors)
- › HyMax 450 (Hyzon Motors)

Vorteile

- › bewährte und etablierte Technologie
- › verschiedene H₂-Anlieferungsoptionen

Nachteile

- › geringe Energiedichte
- › limitierte Reichweite
- › Datenkommunikation erforderlich

HRS Spezifikationen

Anlieferung	CGH ₂ , LH ₂
Baugruppen einer Wasserstofftankstelle	H ₂ -Speicher, Kompressor oder Kyropumpe, Vorkühlung (bei gasförmiger Anlieferung), Dispenser (Kupplung, Schlauch)
Vorratsspeicher	Abhängig von der Ausstattung, Möglichkeiten: › Trailer-Swap › stationärer Versorgungsspeicher › Pipeline
Nominaldruck	350 bar
Erweiterbarkeit auf 700-Bar-Pkw	Aufwendige und kostspielige Integration aufgrund des höheren Speicherdrucks und Kühlbedarfs
Kommunikation zwischen Tankstelle und Fahrzeug	Erforderlich für einen besseren Füllgrad
Angestrebte max. Durchflussrate	300 g/s

Fahrzeug Spezifikationen

Wasserstoffdruck im Fahrzeugtank (max. zulässiger Arbeitsdruck)	350 bar (437,5 bar)
Fahrzeugtank-Temperatur	-40 °C bis +85 °C
Fahrzeug-Speicherkapazität	› heute bis zu 42,5 kg › geplant > 42,5 kg

Viele OEM entwickeln
700-Bar-Brennstoffzellen-Lkw



WASSERSTOFFBETANKUNG

6.2 Komprimierter gasförmiger Wasserstoff (CGH₂) 700 Bar

Status Quo

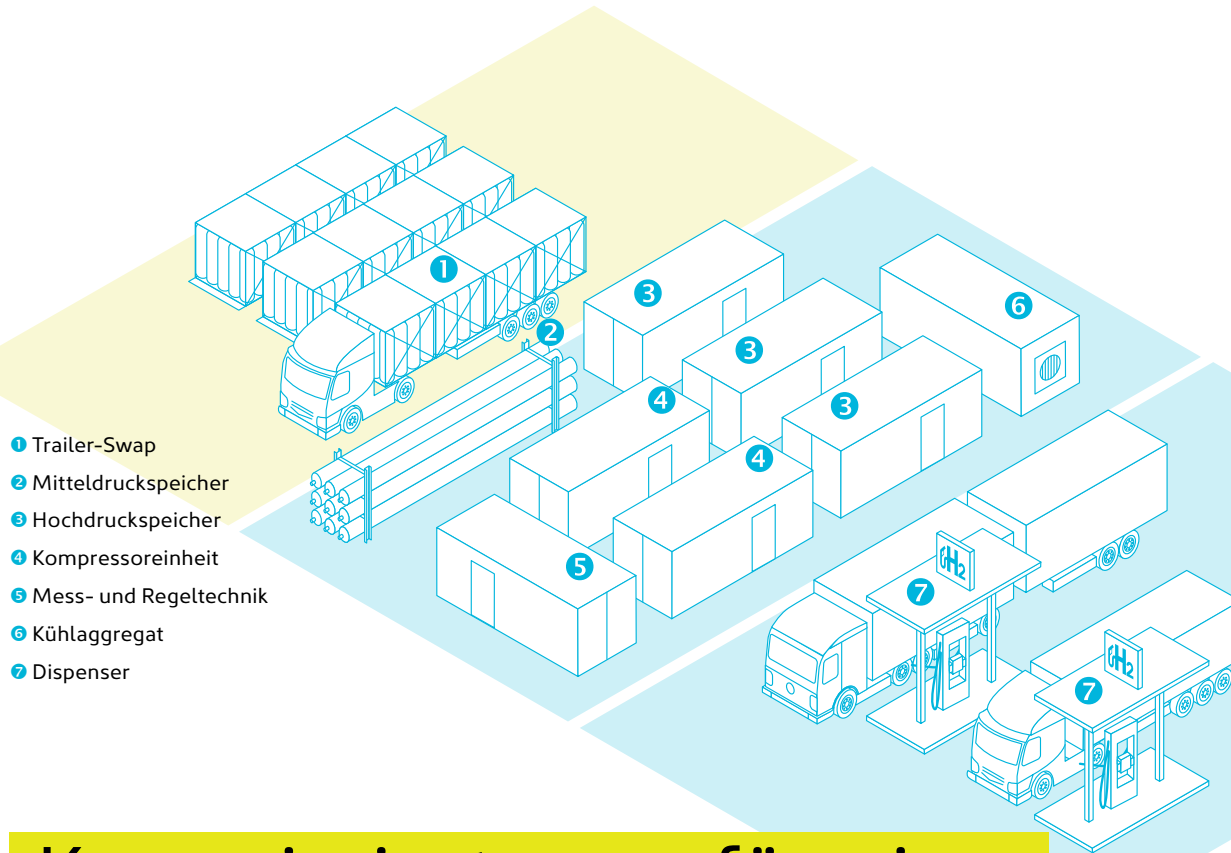
Im Vergleich zu 350-Bar-CGH₂ verfügt die 700-Bar-CGH₂-Technologie über eine höhere volumetrische Energiedichte (1,3 kWh/l) – ein großer Vorteil in Bezug auf die Fahrzeugtankgröße. Heute sind alle BZ-Pkw mit 700-Bar-Fahrzeugtank und einer Speicherkapazität von 4-6,5 kg H₂ ausgestattet. Seit 2021 sind in Deutschland außerdem Müllsammelfahrzeuge mit 700-Bar-Technologie und einer Speicherkapazität von 16 kg H₂ in je zwei 8-kg-Fahrzeugtanks im Einsatz. Weitere Hersteller haben SNF mit 700-Bar-CGH₂-Speichertechnologie angekündigt, die den Reichweitenforderungen ihrer Kunden entsprechen sollen.

Fahrzeuge

Bei den Entwicklungen für der Schwerlasttransport konzentrieren sich einige Fahrzeughersteller auf Fahrzeuge mit 700-Bar-CGH₂-Technologie, um zum einen Synergien mit schon erprobten Pkw-Komponenten nutzen zu können und zum anderen Kundenanforderungen nach Reichweite und kurzen Betankungszeiten zu entsprechen. Die Fahrzeugtanks sind meist leichte Tanks des Typs IV. Schon heute erreicht der Klasse-8-Lkw Toyota Hino mit einem 700-Bar-Speichertank eine Reichweite von bis zu 600 km. Nikola Motors und Iveco entwickeln gemeinsam einen Lkw ebenfalls der Klasse 8 mit einer Reichweite von bis zu 1.200 km für den amerikanischen Markt.

Wasserstofftankstelle

Ähnlich wie bei 350 Bar kann eine 700-Bar-CGH₂-Wasserstofftankstelle mit gasförmigem und flüssigem Wasserstoff über alle in Abschnitt 5.1 beschriebenen Transportoptionen beliefert werden. Die Betankung von 700-Bar-CGH₂ in Fahrzeugtanks von bis zu 100 kg Fassungsvermögen ist noch nicht möglich, da sowohl geeignete Betankungsprotokolle als auch die dafür erforderlichen Komponenten noch in der Entwicklung sind. Vor allem sind standardisierte Betankungsprotokolle für Durchflussraten erforderlich, die Betankungszeiten von 10-15 Minuten ermöglichen. Außerdem gilt es, die technischen Herausforderungen aus dem Zusammenspiel hoher Massenströme und Drücke zur Gewährleistung der Sicherheit und hohen Verfügbarkeit von Anlagen zu überwinden.



Komprimierter gasförmiger Wasserstoff (CGH₂) 700 Bar

Möglicher Aufbau einer 700-Bar-CGH₂-Wasserstofftankstelle

Das in dieser Abbildung dargestellte Layout basiert ebenfalls auf einem Wechseltrailer-Konzept zur Wasserstoff-Belieferung. Im Grundsatz gleichen sich die 350-Bar-CGH₂- und die 700-Bar-CGH₂-Betankung. Sowohl Überströmen als auch Direktverdichtung aus den Trailern sind mögliche Betankungsoptionen. Voraussichtlich wird aufgrund des höheren Zieldrucks von 700 Bar (im Vergleich zu 350 Bar) ein zusätzlicher Hochdruckspeicher zur Unterstützung der Direktverdichtung notwendig. Sowohl die Kompression als auch die Vorkühlung des Wasserstoffs erfordern im Vergleich zu 350 Bar mehr Leistung. Infolgedessen wird die 700-Bar-CGH₂ Wasserstoff-tankstelle nicht nur mehr Platz, sondern auch mehr Energie benötigen.

WASSERSTOFFBETANKUNG

Komprimierter gasförmiger Wasserstoff (CGH₂) 700 Bar

Status

- › bestehende Betankungstechnologie und Protokolle für Pkw, LNF, MNF (Müllsammler usw.)
- › Wasserstofftankstelle und Fahrzeugtank für MNF und SNF in der Validierungsphase

Exemplarisches OEM-Projekt in Europa

- › Nikola TRE (Nikola Motors & Iveco)

Vorteile

- › höchste Reichweite möglich
- › bestehende Betankungsprotokolle für Fahrzeugtanks > 10 kg, aber nicht für Anwendungen mit hohem Durchfluss
- › verschiedene H₂-Anlieferungsoptionen

Nachteile


- › hoher Materialbedarf
→ kostspielige Komponenten
- › hoher Bedarf an Kompressor- und Kühlleistung
- › Datenkommunikation erforderlich

HRS Spezifikationen

Anlieferung	CGH ₂ , LH ₂
Baugruppen einer Wasserstofftankstelle	H ₂ -Speicher, Kompressor oder Kyropumpe, Hochdruckspeicher, Dispenser (Tankstutzen, Schlauch)
Vorratsspeicher	Abhängig von der Ausstattung, Möglichkeiten: › Trailer-Swap › Vorratslagerung › Rohrleitung
Nominaldruck	700 bar
Erweiterbarkeit auf 700-Bar-Pkw	Relativ einfache Erweiterbarkeit durch vorhandene Technologie und geringer Leistungsanforderungen
Kommunikation zwischen Tankstelle und Fahrzeug	Erforderlich für eine bessere Leistung
Angestrebte max. Durchflussrate	300 g/s

Fahrzeug Spezifikationen

Wasserstoffdruck im Fahrzeugtank (max. zulässiger Arbeitsdruck)	700 bar (875 bar)
Fahrzeugtank-Temperatur	-40 °C bis +85 °C
Fahrzeug-Speicherkapazität	Vorgesehen: bis zu 100 kg

A white Mercedes-Benz truck cab is shown in a studio setting. The front of the truck is visible, featuring the Mercedes-Benz logo on the grille. The truck is mounted on a white platform. In the foreground, the engine and fuel system are exposed, showing various components and orange hoses. The background is a blue wall with a pattern of dark blue circles. The lighting is dramatic, with spotlights illuminating the truck and engine.

Daimler startet die Erprobung
beim Kunden mit dem GenH₂-Truck
in 2023 mit sLH₂-Technologie

WASSERSTOFFBETANKUNG

6.3 Subcooled Liquid Hydrogen (sLH₂)

Im Vergleich zu gasförmigem Wasserstoff verfügt die LH₂-Speichertechnologie über eine wesentlich höhere volumetrische Energiedichte. Allerdings stellen Wärmeeintrag und entsprechender Boil-Off (Verdampfen von H₂) bei der Nutzung von Wasserstoff im flüssigen Aggregatzustand eine Herausforderung dar, wie frühere Erfahrungen mit der Betankung von Flüssigwasserstoff in Pkw gezeigt haben (Abdampfungsverluste usw.). Die Weiterentwicklungen sLH₂- (neuere Entwicklung von LH₂) und CcH₂-Technologie (Fortführung der früheren BMW-Entwicklung, siehe nächster Abschnitt) sollen Abdampfungsverluste und Rückleitungslängen minimieren.

Status Quo

Die Technologieentwicklung für tiefkalten Flüssigwasserstoff wird derzeit von der Daimler Truck AG auf der Fahrzeugseite und von der Linde GmbH als Wasserstofftankstellen-Hersteller vorangetrieben. Mit der Verwendung von tiefkaltem Flüssigwasserstoff sollen hohe Speicherkapazitäten an Bord, Betankung mit hohem Durchfluss und große Reich-

weiten bei hoher Energieeffizienz möglich werden. Derzeit befindet sich die Technologie noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium (FuE) mit ersten Prototypen in der Fertigung.

Fahrzeuge

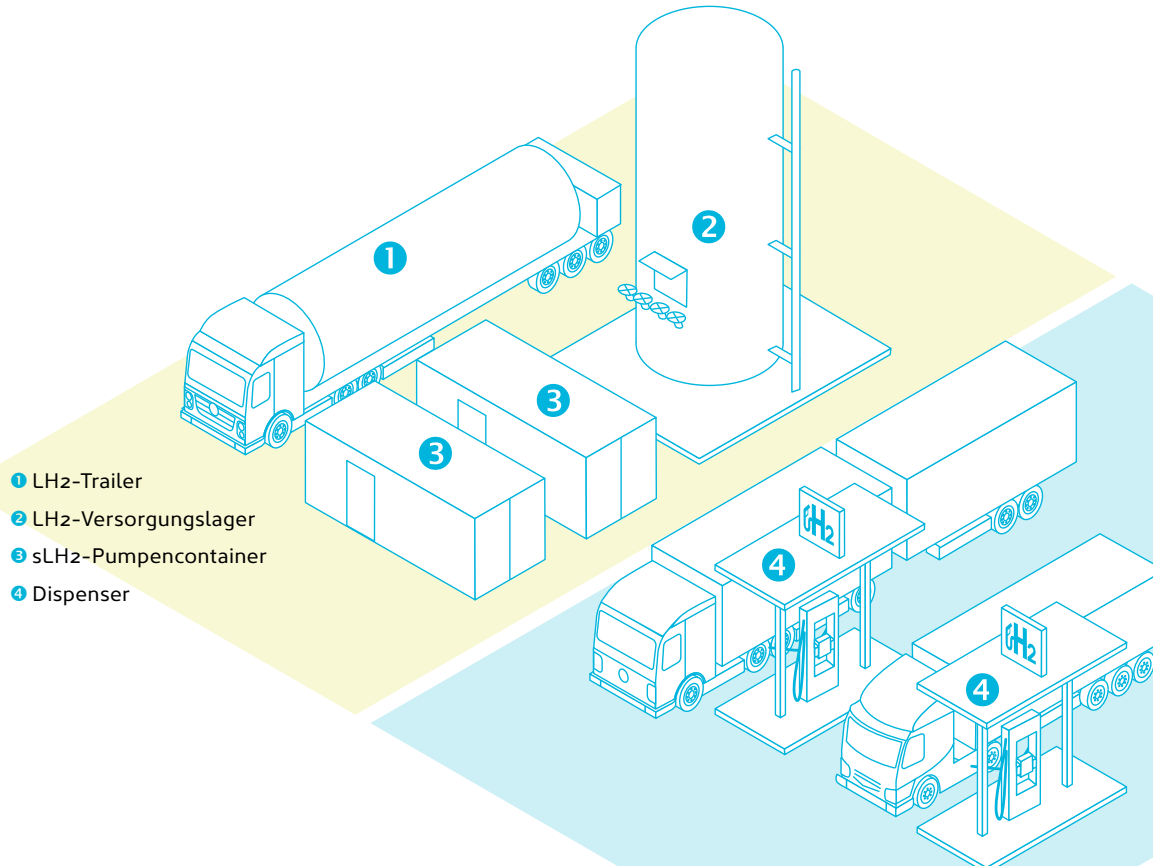
Die Daimler Truck AG hat die Serienproduktion ab 2027 angekündigt und arbeitet zurzeit am ersten Prototypen des Brennstoffzellen-Konzept-Lkws Mercedes-Benz GenH₂ Truck mit sLH₂-Technologie. Die Betankung von sLH₂ für eine Energiedichte von 2,2 kWh/l erfolgt bei ca. -247 °C in einen isolierten Fahrzeugtank mit einem Druck von bis zu 16 Bar. Ziel der sLH₂-Technologie ist, den Siedepunkt auf eine höhere Temperatur zu heben, um so einen größeren Wärmeeintrag bis zur Verdampfung zu ermöglichen und Boil-Off-Verluste zu verringern. Statt der bei CGH₂-Fahrzeugen verwendeten Kohlefasertanks werden sLH₂-Tanks vakuumisoliert, um den direkten Wärmeeintrag zu minimieren und so ein schnelles Boil-Off zu vermeiden. Die Betankung ohne GH₂-Rückgas ist im regulären, kontinuierlichen Betrieb einer Wasserstofftank-

stelle möglich. Lange Stillstandzeiten oder Teilbetankungen unter suboptimalen Bedingungen führen jedoch zu Wasserstoffverlusten.

Wasserstofftankstelle

Da die Betankung direkt mit flüssigem Wasserstoff erfolgt, erscheint die LH₂-Anlieferung als sinnvollste Versorgungsoption. Eine Vor-Ort-Speicherung ist möglich, ebenso wie ein Wechseltrailer-Konzept. Jeder Zapfpunkt benötigt eine eigene sLH₂-Pumpe, die aber im Vergleich zu Gaskompressoren einen wesentlich geringeren Energiebedarf aufweist. Der Betankungsprozess selbst erfordert keine kontinuierliche Datenkommunikation zwischen Tankstelle und Fahrzeug, was die Komplexität weiter reduziert. Die derzeit größten Herausforderungen bestehen in der Erhöhung der Lebensdauer der Komponenten, die den tiefkalten Temperaturen des flüssigen Wasserstoffs ausgesetzt sind, einer präzisen Durchfluss-Messtechnik sowie der Minimierung der Abdampfverluste, beispielsweise durch verkürzte vakuumisolierte Rohrleitungen.

WASSERSTOFFBETANKUNG



- 1 LH2-Trailer
- 2 LH2-Versorgungslager
- 3 sLH2-Pumpencontainer
- 4 Dispenser

Möglicher Aufbau einer sLH2-Wasserstofftankstelle

Die Kraftstoffversorgung erfolgt mit etwa 3,5 t nutzbarem flüssigen Wasserstoff, der von einem Trailer angeliefert und vor Ort in einem Kryotank nahe den sLH2-Pumpen gelagert wird. Um zwei Lkw gleichzeitig betanken zu können, sind zwei Pumpen erforderlich. Im Vergleich zu einer CGH₂-Station fällt der Platzbedarf einer sLH₂-Tankstelle wesentlich kleiner aus, da weniger Komponenten verbaut werden.

Subcooled Liquid Hydrogen
(sLH₂)

Subcooled Liquid Hydrogen (sLH₂)

Status

- › Weiterentwicklung der LH₂-Technologie
- › Wasserstofftankstelle und Fahrzeugtank in der Entwicklungsphase

Exemplarische OEM-Projekte in Europa

- › GenH₂-Truck (Daimler Truck AG)

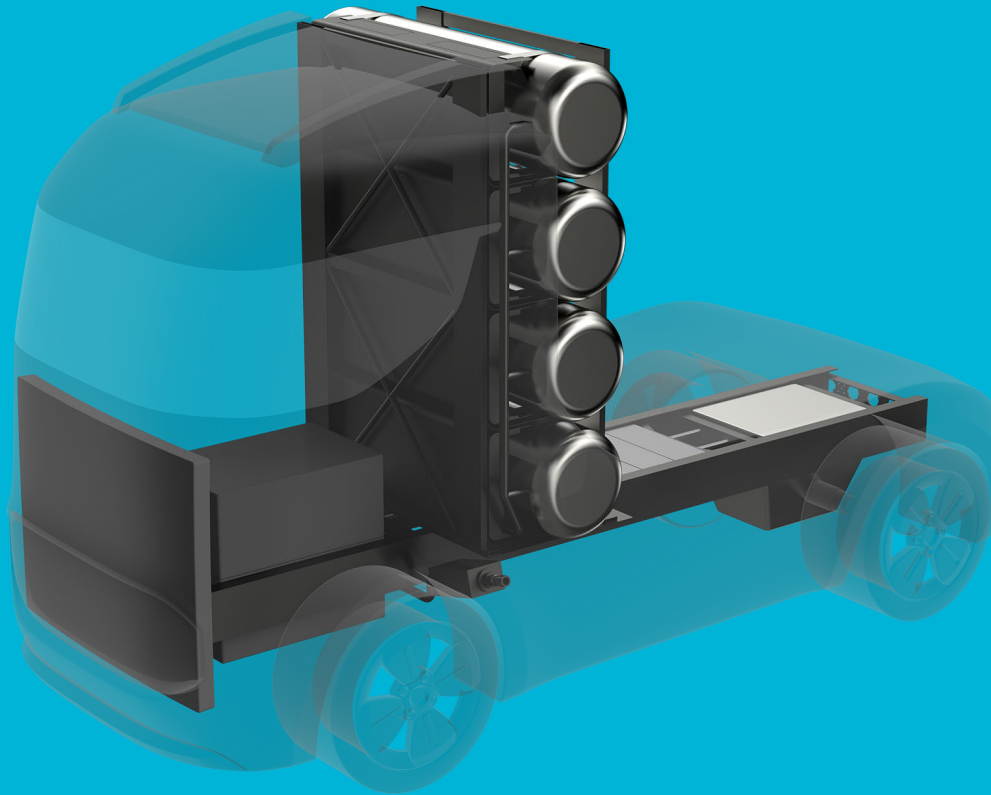
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> › höchste mögliche Reichweite für MNF/SNF › (potenziell) niedrigste Kosten für den Fahrzeugtank › wahrscheinlich keine Datenkommunikation erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> › Boil-Off bei längeren Standzeiten › beschränkte Verfügbarkeit von LH₂-Anlieferungsoptionen › keine Synergien mit der bestehenden CGH₂-Infrastruktur › frühes Entwicklungsstadium der Technologie auf Tankstellen und Fahrzeugseite

HRS Spezifikationen

Anlieferung	LH ₂
Baugruppen einer Wasserstofftankstelle	LH ₂ -Speicher, sLH ₂ -Pumpe, Dispenser, Tankstutzen, Schlauch
Vorratsspeicher	Abhängig von der Ausstattung, Möglichkeiten: › Vorratslagerung oder › Trailer-Swap
Nominaldruck	ca. 16 bar
Erweiterbarkeit auf 700 bar-Pkw	Aufwendige und kostspielige Integration eines zusätzlichen Hochdruck-Kryopumpsystems, einer Düse, eines Schlauchs usw.
Kommunikation zwischen Tankstelle und Fahrzeug	Nicht erforderlich
Angestrebte max. Durchflussrate	400-500 kg/h

Fahrzeug Spezifikationen

Wasserstoffdruck im Fahrzeugtank (ca. 20 bar) (max. zulässiger Arbeitsdruck)	ca. 5 - 16 bar
Fahrzeugtank-Temperatur	-248 °C bis -245 °C
Fahrzeug-Speicherkapazität	> 80 kg



Die CcH₂-Technologie kombiniert
das Beste aus beiden Welten

WASSERSTOFFBETANKUNG

6.4 Kryokomprimierter Wasserstoff (CCH₂)

Die Kryokompression bietet die Möglichkeit, die bereits beschriebenen Speichermethoden zu kombinieren und damit die Speicherdichte weiter zu erhöhen. Die technologischen Grundlagen wurden bereits in den frühen 2000er Jahren von BMW als Weiterentwicklung der LH₂-Technologie geschaffen, bei der ein zu hoher Boil-Off auftrat.

Status Quo

Die Technologie für die Betankung und Speicherung von kryokomprimiertem Wasserstoff in Fahrzeugtanks ist bekannt und für Pkw getestet. Da bei der CCH₂-Technologie der Wasserstoff bei kryogenen Temperaturen nahe dem kritischen Punkt (-240 °C) gehalten und mit bis zu 300 Bar komprimiert wird, ist die volumetrische Energiedichte (2,4 kWh/l) höher als bei den drei vorher beschriebenen Betankungsmethoden. Diese Technologie wird für den zukünftigen Einsatz im SNF von der Firma Cryomotive GmbH entwickelt, wozu u. a. der Bau eines vakuumisolierten Hochdrucktanksystems gehört. Die niedrigen Temperaturen bei hohem Druck erfordern jedoch noch die weitere Forschung an diversen Fahrzeug- und Wasserstofftankstellen-Komponenten.

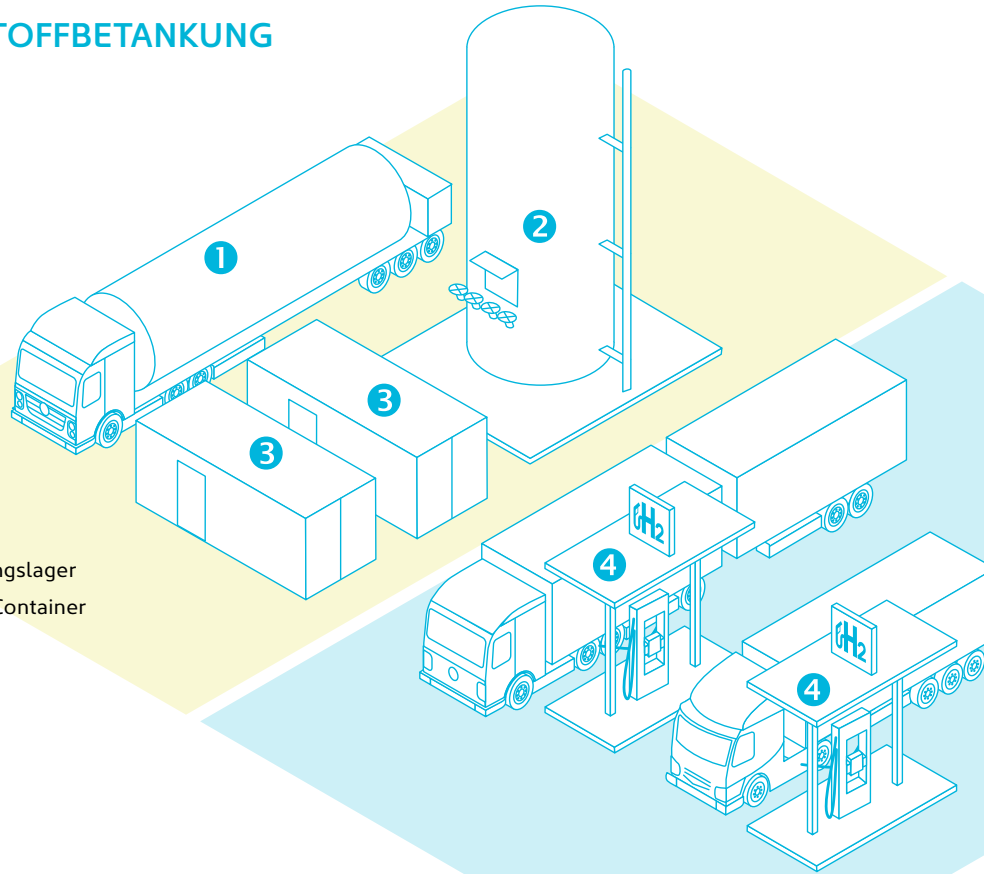
Fahrzeuge

Die Ankündigung erster CCH₂-Lkw-Prototypen wird 2022/23 erwartet.

Wasserstofftankstelle

Um Wasserstoff an Tankstellen aus dem flüssigen Zustand auf ca. 300 Bar zu komprimieren, werden wahrscheinlich Kryopumpen zum Einsatz kommen. Demnach wäre ein Konzept mit LH₂-Versorgungsspeicher oder LH₂-Wechseltrailer möglich, nur ohne zusätzliche Kälteanlage. Die größten Herausforderungen betreffen die Haltbarkeit der Tankstellenkomponenten und Materialien, die mit dem unter Druck stehenden kryogenen Wasserstoff in Berührung kommen, beispielsweise des Befüllschlauchs und der Zapfpistole. Wie bei sLH₂ ist die Präzision der Durchfluss-Messtechnik von entscheidender Bedeutung, um die Technologie zur Marktreife zu bringen. Können die Herausforderungen gelöst werden, lässt sich eine 350-Bar-CGH₂-Betankungsschnittstelle relativ leicht integrieren. Im Vergleich zu sLH₂ ist der CCH₂-Betankungsprozess robuster. So sind Betankungen ohne Rückgas auch mit wärmeren Tanks möglich, auch wenn in diesen Fällen möglicherweise nicht die maximale Speicherdichte erreicht wird.

WASSERSTOFFBETANKUNG



- ❶ LH₂-Trailer
- ❷ LH₂-Versorgungslager
- ❸ Kryopumpen-Container
- ❹ Dispenser

Möglicher Aufbau einer CcH₂-Wasserstofftankstelle

Zur Deckung des Wasserstoffbedarfs einer großen CcH₂-Tankstelle bei kommerzieller Nutzung sind die tägliche Kraftstofflieferung per LH₂-Trailer und die Lagerung in einem vakuumisolierten Versorgungsspeicher ausreichend. Für die zeitgleiche Betankung von zwei Lkw sind zwei Kryopumpen erforderlich, die jeweils einen Zapfpunkt versorgen. Der Platzbedarf einer solchen Wasserstofftankstelle wird voraussichtlich ähnlich groß sein wie bei sLH₂.

Kryokomprimierter
Wasserstoff (CcH₂)

Kryokomprimierter Wasserstoff (CCH₂)

Status

- › Weiterentwicklung bei der LH₂-Technologie
- › bestehende Pilotprojekte und Daten für Pkws
- › Fahrzeugtank und Wasserstofftankstelle für SNF in der Entwicklungsphase

Exemplarische OEM-Projekte in Europa

- › Werden 2022/23 bekannt gegeben

Vorteile

- › Höchste volumetrische Dichte im Fahrzeugtank
- › keine Datenkommunikation erforderlich
- › (potenziell) leichteres Tank-system als bei 350/700 Bar CGH₂

Nachteile

- › hoher Materialbedarf aufgrund von hohem Druck und niedrigen Temperaturen
- › beschränkte Verfügbarkeit von LH₂- Anlieferungsoptionen
- › frühes Entwicklungsstadium der Technologie auf Tankstellen und Fahrzeugseite

HRS Spezifikationen

Anlieferung	LH ₂ (CGH ₂ möglich)
Baugruppen einer Wasserstofftankstelle	LH ₂ -Speicher, Kyropumpe, Dispenser (Tankstutzen, Schlauch)
Vorratsspeicher	Abhängig von der Ausstattung: › Vorratsspeicher oder › Trailer-Swap
Nominaldruck	300 bar
Erweiterbarkeit auf 700 bar-Pkw	Aufwendige und kostspielige Integration eines zusätzlichen Hochdruck-Kryopumpensystems, einer Düse, eines Schlauchs usw.
Kommunikation zwischen Tankstelle und Fahrzeug	Nicht erforderlich
Angestrebte max. Durchflussrate	200-800 kg/h

Fahrzeug Spezifikationen

Wasserstoffdruck im Fahrzeugtank (max. zulässiger Arbeitsdruck)	≤ 300 bar (350 bar)
Fahrzeugtank-Temperatur	ca. -240 °C bis -150 °C
Fahrzeug-Speicherkapazität	> 80 kg

BEWERTUNG DER TECHNOLOGIEN

7.1. Technologischer Reifegrad

Um einen ersten Überblick über den technologischen Reifegrad der einzelnen Wasserstoff-Betankungstechnologien zu geben, werden die verschiedenen Optionen ihrem Entwicklungsstand zugeordnet und der Reifegrad in den folgenden vier Dimensionen bewertet: Lieferkette, Fahrzeugspeichersystem, Wasserstofftankstelle und Stand bei Normen und Standards.

Reifegrad der Lieferkette

Der Transport und die Anlieferung von gasförmigem und flüssigem Wasserstoff ist weltweit seit vielen Jahren etabliert. Die Herausforderung besteht allerdings darin, die benötigten Mengen von mehreren hundert Kilogramm Wasserstoff pro Tag verfügbar zu machen und täglich große Mengen an die Wasserstofftankstellen zu liefern. Heute haben Trailer für gasförmigen Wasserstoff eine Kapazität von etwa 500 bis 1.000 kg. Auch wenn technologische Weiterentwicklungen und neue Standardisierungen die Transportkapazitäten von GH₂-Trailern erhöhen werden, bleibt der LH₂-Trailer aufgrund der hohen Speicherdichte konkurrenzlos.

Die Versorgung per Wasserstoffpipeline ist derzeit nur in wenigen Regionen in Europa möglich und

Reifegrad	Idee/Forschung	Prototype	Validierung	Kommerzialisierung
Lieferkette				LH ₂ CGH ₂
Fahrzeugtanks	CcH ₂	sLH ₂	700 bar CGH ₂	350 bar CGH ₂
Wasserstoff-tankstellen	sLH ₂ CcH ₂		700 bar CGH ₂	350 bar CGH ₂
Standards für Wasserstoff-tankstellen	sLH ₂ CcH ₂		700 bar CGH ₂	350 bar CGH ₂

Abb. 8 - Technologischer Reifegrad

kommt meist nur im Rahmen von Demonstrationsprojekten vor. Ein neues Pipeline-Netz erfordert hohe Anfangsinvestitionen. Eine gute Alternative scheint die Umrüstung bestehender Netze. Langfristig sind Pipelines wahrscheinlich die günstigste Möglichkeit, um große Mengen Wasserstoff über weite Entfernungen zu transportieren.

Ein LH₂-Trailer fasst heute etwa 3,5 t nutzbaren Wasserstoff. Allerdings ist die Produktionskapazität von LH₂ in Europa noch begrenzt. Bislang produzieren nur drei Wasserstoff-Produktionsanlagen eine Gesamtkapazität von 25 t LH₂ pro Tag. Nichtsdesto-

weniger kann LH₂ in den nächsten 5 bis 10 Jahren zu einer wesentlichen Säule werden, um kostengünstige erneuerbare Energie per Schiff zu importieren.

Reifegrad der Fahrzeugtanks

Fahrzeugtanksystem für die 350-Bar-CGH₂-Technologie sind heute bereits etabliert. Um allerdings größere Mengen Wasserstoff im Fahrzeug zu speichern, müssen die Fahrzeugtanks für 700-Bar-CGH₂ weiterentwickelt werden. Die größte Herausforderung für die 350-Bar-CGH₂-Technologie im Schwerlastverkehr liegt in der Reichweitenbegrenzung und dem begrenzten Platz. Neue Längen-

vorschriften und Tankkonfigurationen im SNF-Verkehr könnten dazu beitragen, Reichweiten zu erhöhen. Für Lkw mit 700-Bar-Systemen wären dann bis zu 1.000 km Reichweite möglich.

Fahrzeugtanks für die sLH₂-Technologie im Schwerlastverkehr befindet sich im FuE-Stadium und werden in den nächsten Jahren in ersten Prototypen getestet. Zu den größten Herausforderungen der sLH₂-Technologie gehören der Betankungsprozess und das Thermo-Management, da Boil-Off-Verluste auf ein Minimum reduziert werden müssen. Beim Einsatz in der Logistikbranche, wo Fahrzeuge im täglichen Betrieb mit niedrigen Standzeiten laufen, sind Boil-Off-Verluste eher vernachlässigbar. Allerdings bleibt die Herausforderung durch diese Verluste bei der Betankung kritisch. Pkw-Fahrzeugtanks für geringere Wasserstoffmengen mit CcH₂-Technologie sind bereits getestet und verfügbar. Für den Einsatz im SNF-Bereich muss das Tanksystem nun skaliert und validiert werden, um den höheren Mengenanforderungen zu entsprechen. Auch wenn die Boil-Off-Verluste bei der sLH₂-Technologie eine geringere Herausforderung darstellen, erhöhen die zusätzlichen Temperatur- und Hochdruckanforderungen die Komplexität, insbesondere in Bezug auf die Lebensdauer der Komponenten.

Reifegrad der Wasserstofftankstellen

Busse, LNF und MNF tanken bereits heute mit 350-bar-CGH₂-Technologie. Ein erweitertes Betankungsprotokoll wird im dritten Quartal 2021 veröffentlicht, um Betankungen für Speicherkapazitäten von bis zu 42,5 kg zu ermöglichen. Die Anpassung für größere Wasserstofftanksysteme für den Schwerlastverkehr ist einfach umsetzbar. Um allerdings auch angemessene Betankungszeiten garantieren zu können, werden zudem höhere Durchflussraten mit entsprechenden Anpassungen erforderlich sein. Ähnliches gilt für die 700-Bar-CGH₂-Technologie, die bereits bei Pkw, Bussen, LNF und MNF eingesetzt wird; bei dieser stellen die erforderlichen höheren Durchflussraten jedoch größere Herausforderungen an Vorkühlung und zuverlässige, langlebige Kompressionstechnologien, die es noch zu validieren gilt.

An Prototypen erster LH₂-Wasserstofftankstellen wurden bereits Pkw-Betankungen durchgeführt, eine sLH₂-Befüllung wurde hingegen noch nicht demonstriert. Obwohl die sLH₂-Pumpentechnologie vielversprechend und weniger komplex erscheint, ist das Konzept noch in der Validierung. Bei ersten Betankungen von BZ-Pkw an CcH₂-Wasserstofftankstellen stellten sich Zyklfestig-

keit einzelner Komponenten und Mengenmessung noch als kritisch dar. Vor allem die Komponenten, die mit Wasserstoff in Berührung kommen, müssen hohen Temperaturschwankungen und einem Druck von bis zu 300 Bar standhalten. Heute befinden sich sowohl die sLH₂- als auch die CcH₂-Technologie für den Schwerlastverkehr noch im Stadium der Forschung und Entwicklung, diverse technische Fragen müssen noch geklärt und validiert werden.

Reifegrad der Normen und Standards für Wasserstofftankstellen

Technologiestandards sind für eine erfolgreiche Einführung von Wasserstoff im Schwerlast- und Langstreckenverkehr unerlässlich. Erst standardisierte Betankungsprotokolle ermöglichen eine schnelle und einheitliche Einführung ohne Sicherheitsrisiken wie der Überschreitung von Tanktemperatur- oder Druckgrenzen. Für die 350-Bar- bzw. 700-Bar-CGH₂-Betankungstechnologie mit großen Wasserstoffmengen und hohen Durchflussraten (bis zu 300 g/s) existieren bislang keine Betankungsprotokolle. Die Erstellung der Protokolle für die sLH₂- und CcH₂-Technologien stellt keine besonders große Herausforderung dar, allerdings befinden sich die Technologien noch in der Entwicklungsphase.

BEWERTUNG DER TECHNOLOGIEN

Außer der Erstellung von Betankungsprotokollen gilt es, weitere Komponenten wie Zapfpistole und Tankstutzen zu standardisieren und Messgeräte und Qualitätsstandards für die Wasserstoffmengenmessung samt zulässiger Toleranzen festzulegen. Dies wird bei der 350-Bar- bzw. 700-Bar-CGH₂-Technologie und für höhere Durchflussraten einfacher als bei flüssigen Wasserstoff.

7.2. Kostenbewertung der Infrastruktur

Bei der Bewertung der verschiedenen Technologien müssen die Kosten der Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur berücksichtigt werden. Für diese Übersicht wurden Investitionsausgaben (CAPEX, d. h. Kompressor, Kryopumpe, Rohrleitungen, Lagerung, Kühleinheit, Bauarbeiten, Stromanschluss), Betriebsausgaben (OPEX, d. h. Wartung, Reparatur, Bestandsverluste, Energieverbrauch) sowie Gestehungskosten (COGS) bewertet. Verglichen wurden Wasserstofftankstellen mit denselben Wasserstoffspeicherkapazitäten, wobei die Fahrzeugseite unberücksichtigt blieb.

CAPEX

Bei Bau und Inbetriebnahme von Wasserstofftankstellen mit denselben Kapazitäten gibt es für jede Technologie spezifische Kostentreiber, beispielsweise bei CGH₂-Wasserstofftankstellen Kompressor, Pumpe, Speichereinheiten und Vorkühlung. Im Gegensatz dazu findet sowohl bei CcH₂- als auch bei sLH₂-Wasserstofftankstellen ein Großteil der Vorkonditionierung in der LH₂-Produktionsanlage statt, was zu einer Verringerung des CAPEX auf der Wasserstofftankstellenseite führt.

Wasserstofftankstellen mit Flüssigspeicher haben tendenziell einen geringeren Platzbedarf und verursachen so geringere Kosten für Kauf bzw. Anmietung von Gewerbeimmobilien.

OPEX

Bei CGH₂-Wasserstofftankstellen mit 350 und 700 Bar sind das Kühlaggregat und der Kompressor die störungsanfälligsten und energieaufwendigsten Komponenten. Bei Tankstellen mit Flüssigtank spart die Verflüssigung in der Produktionsanlage Kosten im Betrieb, außerdem ist der Energieverbrauch für die Kryopumpe geringer; dieser Kostenvorteil verfällt jedoch durch einen höheren Boil-Off. Entscheidend für die Bewertung der Technologien ist auch die Verfügbarkeit von Ersatzteilen. Bei CGH₂-Wasserstofftankstellen gibt es eine große Anzahl von Anbietern, die bereits Erfahrungen mit Wasserstoff gesammelt haben. Dies bietet nicht nur den Vorteil niedrigerer Ersatzteilpreise, sondern auch größere Versorgungssicherheit. Bei LH₂-Wasserstofftankstellen sind die Kosten für Ersatzteile aufgrund kleinerer Skaleneffekte und geringerer Anzahl von Lieferanten noch vergleichsweise höher.

COGS

Die Wasserstoffgestehungskosten (engl. costs of goods sold, COGS) hängen stark von den Wasserstofftransportkosten ab, da für den Transport Personal und Trailer benötigt werden. Je größer die Menge, die pro Trailer transportiert werden kann, desto geringer sind die Lieferkosten pro Kilogramm Wasserstoff an die Tankstelle. Im Vergleich zum gasförmigem Wasserstofftransport kann im Flüssigwasserstoff-Trailer bis zur dreifachen Menge transportiert werden.

BEWERTUNG DER TECHNOLOGIEN

Allerdings verlängern sich mittelfristig die Lieferwege aufgrund der geringen Anzahl von Produktionsanlagen für flüssigen Wasserstoff. Langfristig können Transportkosten durch ein Wasserstoffpipeline-Netz verringert werden, dafür müssen allerdings Anfangsinvestitionen getätigt werden, um das Pipeline-Netz aufzubauen bzw. das existierende Gasnetz umzurüsten. Um die geforderte Qualität für die Fahrzeugbetankung sicherzustellen, fallen außerdem zusätzliche Investitionen für die Aufbereitung des Wasserstoffs an.

Schon heute zeigt sich, dass aufgrund der hohen Wasserstoffvolumina im Wasserstoffschwerlastverkehr alle in der Übersicht beschriebenen Technologien langfristig wirtschaftlich betrieben werden können. Die Voraussetzung sind hohe Stückzahlen von BZ-Fahrzeugen und anfängliche staatliche Hilfen bei der Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen und Wasserstoffinfrastruktur.

Ausblick

Technologie	350 Bar CGH ₂		700 Bar GH ₂		sLH ₂	CcH ₂
Anlieferung	CGH ₂	LH ₂	CGH ₂	LH ₂	LH ₂	LH ₂
Kostentreiber (heutige Perspektive)	› CAPEX (Vorkühlung, Lagerkosten)	› COGS (längere Lieferstrecke, Boil-Off) › OPEX (Reparaturkosten)	› CAPEX (Vorkühlung, Lagerkosten) › OPEX (Energiekosten, Wartung- und Reparaturkosten)	› COGS (längere Liefer- strecke, Boil-Off) › OPEX (Reparaturkosten)	› COGS (längere Lieferwege, Prozessgase, Kosten der Moleküle) <i>noch keine Daten der Anlage verfügbar</i>	
Mögliche Entwicklungspfade	› Skalenvorteile › direkte Verdichtung › höherer Versorgungsdruck	<i>Siehe sLH₂ / CcH₂</i>	› Skalenvorteile › direkte Verdichtung	<i>Siehe sLH₂ / CcH₂</i>	› höhere Auslastung der Wasserstoff- tankstelle & Größenvorteile › mehr LH ₂ -Quellen und -Lieferanten › Pilotstationen zur Gewinnung von Daten über die Ausrüstung	

Abb. 9 – Kostentreiber für jede Technologie



Die Zukunft beginnt heute – für einen emissionsfreien Schwerlastverkehr mit kurzen Betankungszeiten und hohen Reichweiten

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Übersicht fasst den Stand von vier Technologieoptionen für die Betankung von Schwerlastfahrzeugen mit Wasserstoff zusammen: zwei mit gasförmigem Wasserstoff (350 Bar und 700 Bar), eine mit Wasserstoff in flüssigem Zustand (sLH₂) und eine mit Kryokomprimierung (CCH₂). Es wurden diese vier Technologien ausgewählt, weil sie derzeit in der Branche im Mittelpunkt der Diskussion über Wasserstoff in der Mobilität stehen. Es gilt als wahrscheinlich, dass eine der Technologien oder eine Kombination zum Standard für die Betankung von SNF mit Wasserstoff werden wird. Alle vier haben Stärken und Herausforderungen: Die 350-Bar-CGH₂-Technologie für bis zu 42,5 kg steht kurz vor der industriellen Standardisierung. Es handelt sich um eine bewährte und etablierte Technologie, die jedoch den meisten Speicherplatz im Fahrzeug benötigt und daher mit Einschränkungen bei speicherbarer Menge und Reichweite verbunden ist*. Auch die 700-Bar-CGH₂-Technologie hat sich bereits etabliert (zumindest für kleinere Mengen von bis zu 8 kg), und ermöglicht höhere Reichweiten durch geringeren Platzbedarf im Fahrzeug. Allerdings ist die Technologie mit deutlich höheren Kosten

auf Seiten der Betankungsinfrastruktur verbunden: Das höhere Druckniveau führt zum Beispiel zu größerer Komplexität und höheren Wartungskosten. Die Flüssigwasserstoff-Technologien lösen das Mengen- und Reichweitenproblem am glaubwürdigsten, befinden sich aber noch in einer relativ frühen Entwicklungsphase hinsichtlich Fahrzeugtank und Tankstellentechnologie mit entsprechenden Unsicherheiten auch auf der Kostenseite.

Die Entwicklungsdynamik bei Wasserstoff im Verkehr ist groß, daher erwarten wir rasche Fortschritte bei Technologieentwicklung und Innovationen. Je schneller sich Wasserstoff (emissionsfrei) gegenüber Diesel im Verkehr durchsetzt, desto besser. Um die Einführung von Wasserstoff als Kraftstoff zu beschleunigen, müssen die Optionen eingegrenzt und die nachhaltigste(n) ausgewählt werden, wobei die 350-Bar-CGH₂-Methode durchaus mit einer anderen koexistieren könnte. Es bleibt wichtig, alle vier Optionen zu erforschen und zu testen, doch wäre es wirtschaftlich ineffizient, sie alle gleichzeitig umzusetzen – Synergien mit der derzeitigen Infrastruktur bzw. zwischen den Technologien sollten

mitgedacht werden. Für H2 MOBILITY – und hier dürften andere Infrastrukturinvestoren und -betreiber ein sehr ähnliches Interesse haben – ist Planungssicherheit von großer Bedeutung. Deshalb wünschen wir uns, dass die nächsten 1-2 Jahre intensiv genutzt werden was Aufbau und Test der Optionen angeht. In diesem Zeitraum sollte sich klar herauskristalisieren, welche Option(en) sich durchsetzen können und dann ausgerollt werden.

Wir von H2 MOBILITY haben eine Basisinfrastruktur für leichte bis mittlere Nutzfahrzeuge in Deutschland aufgebaut. Jetzt freuen wir uns, einen Beitrag für die Einführung von emissionsfreiem Wasserstoff auch im Schwerlastverkehr zu leisten. Dieser Überblick bietet einen Einstieg dafür, die verschiedenen Optionen zu analysieren und das Wissen zu teilen, alle Stakeholder zu informieren und eine Diskussion anzuregen. Diese Ausarbeitung wird deshalb als zugängliches Informationsmittel veröffentlicht.

Wir freuen uns auf Ihr Feedback! Schreiben Sie uns Ihre Meinung oder Fragen gerne an: feedbackoverview@h2-mobility.de

** In einigen Analysen wird die 350-Bar-Lösung nicht in die Diskussion über den Transport von schweren Lastkraftwagen einbezogen, da zumindest für Langstrecken vermutlich Mengen von 80 bis 100 kg benötigt werden. Wir wollten diese Option ausdrücklich nicht ausschließen, da sich auch das Kundenverhalten ändern kann und eine höhere Betankungshäufigkeit für einige Kunden akzeptabel sein kann.*

H2 MOBILITY Deutschland ist verantwortlich für den flächendeckenden Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur. Das Unternehmen demonstriert täglich, dass Wasserstoff im Verkehr funktioniert. In den letzten fünf Jahren hat sich H2 MOBILITY zum weltweit größten Betreiber von Wasserstofftankstellen entwickelt. Unser erstes Ziel ist der Betrieb von 100 Wasserstoffstationen in sieben deutschen Ballungszentren (Hamburg, Berlin, Rhein-Ruhr, Frankfurt, Nürnberg, Stuttgart und München) sowie entlang der verbindenden Fernstraßen und Autobahnen. An allen Stationen können Pkw und LNF bis zu 8 kg H₂ in Form von 700-Bar-CGH₂ tanken. Zusätzlich können an mehreren Wasserstofftankstellen auch kleine Busflotten und MNF/SNF mit 350-Bar-CGH₂ betankt werden.

Shareholders



Associated Partners



Funding



Ab 2022 steht der Ausbau des Wasserstofftankstellennetzes für alle Fahrzeugklassen im Fokus, besonders auch für SNF. Dabei werden bestehende Wasserstofftankstellen erweitert und neue errichtet, wo Nutzfahrzeugnachfrage besteht und eine öffentliche Wasserstofftankstelle für Pkw sinnvoll ist.

Um anderen Firmen zu ermöglichen, Wasserstofftankstellen zu errichten, stellt H2 MOBILITY die weitreichende praktische Erfahrung und das erlangte Fachwissen im Rahmen der H2 MOBILITY SERVICES zur Verfügung. Zu unseren Leistungen gehören Beratung, Planung, Bau und Betrieb von Wasserstofftankstellen. Wir stehen für höchste Sicherheitsstandards im Betrieb, Zuverlässigkeit, Transparenz durch Anlagenüberwachung, digitales Wartungsmanagement, klare Prozesse und die Verfügbarkeit unseres Teams vor Ort.

Gesellschafter von H2 MOBILITY sind Air Liquide, Daimler, Linde, Hyundai, OMV, Shell und TOTAL. Beraten und begleitet wird die Unternehmung von den assoziierten Partnern BMW, Honda, Toyota und Volkswagen sowie von der NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.

Für weitere Informationen siehe: www.h2-mobility.de

ABBREVIATIONS

BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung (Industrial safety regulation)	LOHC	Flüssige organische Wasserstoffträger (engl. liquid organic hydrogen carriers)
CAPEX	Kapitalkosten (engl. capital expenditures)	MNF	Mittelschwere Nutzfahrzeuge
CcH ₂	Kryokomprimierter Wasserstoff (engl. cyro-compressed hydrogen)	OEM	Original equipment manufacturer (dt. Fahrzeughersteller)
CGH ₂	Komprimierter gasförmiger Wasserstoff (engl. compressed gaseous hydrogen)	OPEX	Betriebskosten (engl. operational expenditures)
COGS	Wasserstoffgestehungskosten (engl. costs of goods sold)	PRHYDE	Protocol for Heavy-duty Hydrogen Refuelling
CEP	Clean Energy Partnership	Pkw	Personenkraftwagen
BZ-Busse	Brennstoffzellenbusse	FuE	Forschung und Entwicklung
BZ-Fahrzeuge	Brennstoffzellenfahrzeuge	SOC	Füllstand (engl. state of charge)
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge	TRBS	Technische Regeln für die Betriebssicherheit
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge	TRL	Technologie-Reifegrad (engl. technology readiness level)
LH ₂	Flüssigwasserstoff (engl. liquid hydrogen)		
sLH ₂	Tiefkalter Flüssigwasserstoff (engl. subcooled Liquid Hydrogen)		

Disclaimer: Dieses Ausarbeitung stellt die subjektive Sichtweise von H2 MOBILITY Deutschland dar, basierend auf dem Know-how unserer internen Experten und geführten Interviews mit Ansprechpartnern aus der Industrie. Die aufgeführten Wasserstoffbetankungstechnologien befinden sich noch in der Entwicklung. Die Ausarbeitung spiegelt den Stand August 2021 wider.

