Hessisches Ministerium für Wirtschaft,
Energie, Verkehr und Wohnen

HESSEN

Wasserstoff-Infrastruktur

für Straße, Schiene und Wasserwege

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT 4
EINLEITUNG 6

TECHNISCHE GRUNDLAGEN – VON DER H2-ERZEUGUNG BIS ZUR TANKSTELLE 8
Wasserstofferzeugung 8
Wasserstofftransport und Speicherung 16
H_2-Tankstellen 21

FINANZIERUNGSMÖGLICHKEITEN UND GESCHÄFTSMODELLE 32
Beschreibung des Marktumfelds 32
Betreibermodelle für H_2-Tankstellen 35
H_2-Infrastruktur – mögliche Geschäftsmodelle 37
Einfluss Strompreis 38

PLANUNGSSCHRITTE ZUM AUFBAU DER WASSERSTOFF-INFRASTRUKTUR 40
Übersicht über wesentliche Schritte und Zeitablauf 40
Rechtliche Rahmenbedingungen für den Bau einer H_2-Tankstelle 40
Praktische Hilfestellung zum Bau einer Tankstelle 44

PROJEKTBEISPIELE AUS HESSEN 47
H_2-Tankstelle der ESWE Verkehr 47
Wasserstofftankstelle des Industriepark Höchst 48
Brennstoffzellenzug-Flotte des Rhein-Main-Verkehrsverbund 49
Vorreiter bei der Errichtung von H_2-Tankstellen (Roth) 50
Interview mit Christian Winzenhöler 52

WEITERFÜHRENDE KONTAKTE 54
LITERATURVERZEICHNIS 56
IMPRESSUM 58

GRUSSWORT

Sehr geehrte Leserschaft,

das Land Hessen bietet geradezu ideale Möglichkeiten, die bereits vorhandenen Stärken in den Bereichen Automotive, Chemie und Mobilität im Bereich vernetzter Infrastruktur als Modell zu veranschaulichen und weiter zu entwickeln. Über eine verstärkte Sektorenkopplung kann eines der wichtigsten Drehkreuze des Warenverkehrs innerhalb Europas als Vorreiter für Brennstoffzellen-Technologie, Erneuerbare Energien und Speichertechnologien gelten und für andere als gutes Beispiel dienen.
Mit 368.000 Fahrzeugen pro Tag ist das Autobahnkreuz A3/A5 eines der meistbefahrenen Autobahnkreuze in Europa. Hier wird direkt am Puls des Geschehens die Mobilität der Zukunft getestet und weiterentwickelt; nicht nur auf der Straße, sondern auch inklusive des Flughafens Frankfurt sowie dem Eisenbahnnetz in der RheinMain Region.

Neun der zehn größten Unternehmen Hessens sind entweder im Bereich chemische Industrie oder Automobil- und Maschinenbau zugeordnet. Diese beschäftigen mehr als 90.000 Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer. Dies zeigt den hohen Stellenwert, den das Thema Infrastruktur für die Zukunft darstellt; und dieses Thema muss auch vor den Veränderungen der Energiewende mitgedacht werden.

Die Mobilität ist eine wesentliche Säule der Hessischen Wirtschaft, von der viele Arbeitsplätze und vor allem auch Wohlstand abhängen. Klimawandel und Luftverschmutzung erfordern den Einsatz von emissionsfreien Technologien, wenn wir unsere Mobilität und somit auch den Wohlstand auf Dauer sichern wollen. Hierbei spielt die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie mit ihren vielfältigen Einsatzmöglichkeiten eine wichtige Rolle.

Hessen ist ein Vorreiter im Einsatz von Wasserstoff und der Brennstoffzellentechnologie. Bereits 2004 wurden erste Erfahrungen mit Brennstoffzellenfahrzeugen gesammelt. Die Region RheinMain war an dem europäischen Flottenprojekt ZeroRegio beteiligt, woraus die erste hessische Wasserstofftankstelle in Frankfurt-Höchst hervorging. Seit 2017 läuft im Industriepark Hanau-Wolfgang das Projekt „H2anau“ mit sieben Nutzfahrzeugen. Diese Aktivitäten wurden immer weiter ausgebaut. Mit 27 BZ-Zügen ist das bislang größte Brennstoffzellenzugprojekt durch die RMV-Tochter fahma initiiert worden. Der Aufbau der Infrastruktur ist seitdem weiter vorangeschritten und rückt nun in den Fokus, um die Brennstoffzellentechnologie weiter zu voranzutreiben.

Wasserstoff und Brennstoffzelle bieten für viele Glieder im Verkehrssektor marktreife Lösungen an. Über eine regionale Wasserstoffproduktion sind Wertschöpfungseffekte zu erwarten. Diese Broschüre soll Ihnen zeigen, wie der aktuelle Stand zum Thema Wasserstoffinfrastruktur momentan ist.
Ich wünsche eine anregende Lektüre.

Tarek Al-Wazir,
Hessischer Minister für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen

EINLEITUNG

Europa hat sich als erster Kontinent das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 gesetzt. Um dieses Ziel zu erreichen, ist Wasserstoff (H_2) als Schlüsselelement unverzichtbar. Wasserstoff ist ein vielseitig einsetzbarer Energieträger. Auf der Erde liegt er (fast) nie in Reinform, sondern grundsätzlich in chemischen Verbindungen wie Wasser, Kohlenwasserstoffen und anderen organischen Verbindungen vor. Aus diesen chemischen Verbindungen kann er durch Energiezufuhr herausgelöst werden und steht dann als Kraft-, Treib- und Brennstoff in allen Sektoren zur Verfügung. Die dafür benötigte Energie kann und muss perspektivisch ausschließlich aus Erneuerbaren Energien stammen. Wasserstoff kann also erneuerbar erzeugt werden, was ihn für die Klimaneutralität so interessant macht.

Insbesondere durch seine vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten spielt Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem als Kopplungselement aller Sektoren eine wesentliche Rolle. Mit seinen physikalischen Eigenschaften hat er das Potenzial auch Energiespeicher zu sein. Durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien im Energiesystem und ihrer fluktuierenden Leistung sind langfristige Speichermöglichkeiten von hoher Relevanz.

Zusätzlich bietet Wasserstoff das Potenzial, im Verkehrssektor eine große Rolle zu spielen. Um eine Klimaneutralität im Jahr 2050 zu erreichen, sind tiefgreifende Maßnahmen für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors in die Wege zu leiten, insbesondere da in diesem Bereich die CO_2-Emissionen bislang nicht reduziert werden konnten (vgl. Abbildung 1-1). Wasserstoff bietet zudem das Potenzial, nicht nur den Ausstoß von CO_2-Emissionen, sondern auch gesundheitsschädliche Stickoxide und Feinstaubemissionen zu reduzieren. Insbesondere bei Anwendungen, die hohe Reichweiten und kurze Betankungszeiten erfordern, bietet Wasserstoff optimale Bedingungen. Damit eignet er sich besonders für den Einsatz im Schwerlastverkehr, bei Schienenfahrzeugen, bei Logistikflotten oder auch in der Schifffahrt. Außerdem wird er auf lange Sicht als Grundbaustein für die Herstellung von synthetischem Kerosin vermutlich unverzichtbar.

Um das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen, hat die Europäische Union Anpassungen im rechtlichen Rahmen vorgenommen. Explizit hervorzuheben ist die Clean Vehicles Directive (CVD), die Kommunen und kommunalen Unternehmen die Umstellung auf alternative Antriebe vorschreibt. [9] Hierbei werden bis 2030 Beschaffungsquoten von bis zu 65 % für emissionsarme bzw. -freie Fahrzeuge festgesetzt. Zusätzlich gibt es CO_2-Flottengrenzwerte für das Inverkehrbringen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen [27] sowie für schwere Nutzfahrzeuge [26]. In diesen beiden Verordnungen werden mehrere Zielwerte für die nächsten Jahre festgelegt, welche die Gesamtheit der EU-Fahrzeuge im Durchschnitt nicht überschreiten darf. Dadurch werden verbindliche Ziele für die Beschaffung von emissionsarmen Fahrzeugen

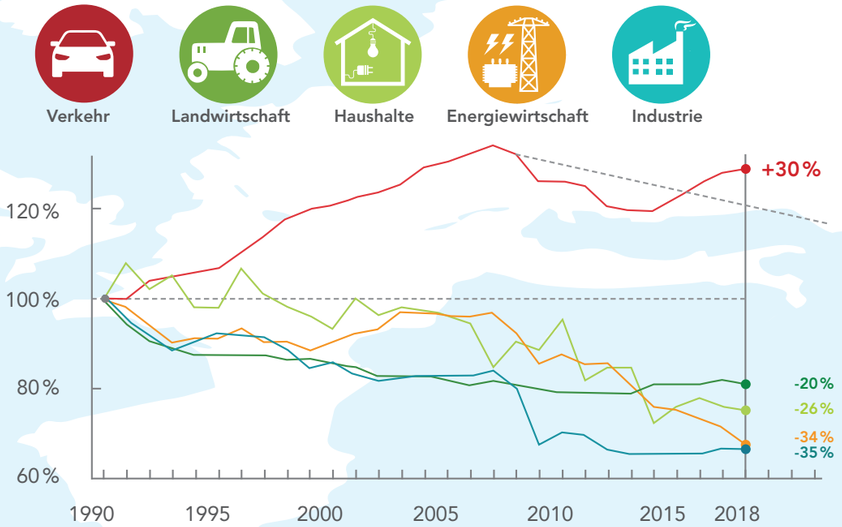


Abbildung 1-1: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen in Europa [1]

gesetzt und eine planbare Nachfrage im Verkehrssektor generiert. Weiterhin werden Kraftstofflieferanten durch die Renewable Energy Directive 2 (RED 2) dazu verpflichtet, bis 2030 ca. 14 % der Energie des straßen- und schienengebundenen Verkehrs auf Grundlage Erneuerbarer Energien abzudecken. Dies bietet ein zusätzliches Potenzial für Wasserstoff. [8] [14]
Um die Nachfrage decken zu können und die Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen, sind unter anderem ein intensiver Ausbau der Erneuerbaren Energien, die Planung einer Wasserstoffinfrastruktur und die Entwicklung geeigneter Geschäftsmodelle zur Finanzierung und zum Betrieb dieser Infrastruktur notwendig [24]. Diese Broschüre dient der Wissensvermittlung rund um das Thema Wasserstoff und als Hilfestellung und Wegweiser für zukünftige Akteure, die sich am Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur beteiligen wollen.

[1] PKW: 95 gCO_2/km bis 2024, LNF: 147 gCO_2/km bis 2024, SNF: Einführung ab 2025

TECHNISCHE GRUNDLAGEN – VON DER H_2-ERZEUGUNG BIS ZUR TANKSTELLE

Wasserstofferzeugung

Es gibt diverse Verfahren zur Produktion von Wasserstoff, welche auf fossilen oder erneuerbaren Energien basieren können. Im Folgenden werden die verschiedenen Verfahren beleuchtet.

Obwohl Wasserstoff ein farbloses Element ist, wird Wasserstoff oft mit verschiedenen Farben in Verbindung gebracht. Dies zielt auf die unterschiedlichen Erzeugungsverfahren und die damit einhergehenden Umweltwirkungen ab. Dabei werden sowohl direkte als auch indirekte CO_2-Emissionen einbezogen. Die gängigsten Farben und die dazugehörigen Verfahren sind in der nebenstehenden Abbildung 2-1 dargestellt.

Reformierung von Erdgas

Das gängigste Verfahren zur Wasserstoffproduktion in Deutschland ist die Dampfreformierung, bei der Erdgas unter Einfluss von Wasserdampf und Wärme in Wasserstoff und CO_2 umgewandelt wird. Wasserstoff per Dampfreformierung wird in der Industrie bereits seit Jahrzehnten in der großtechnischen Produktion kostengünstig erzeugt. Der energetische Wirkungsgrad der Dampfreformierung liegt bei ca. 75 %. Allerdings werden im Prozess erhebliche Mengen CO_2 ausgestoßen (ca. 10 kg CO_2/kg H_2). Wasserstoff, der per Dampfreformierung erzeugt wird, wird als grauer Wasserstoff bezeichnet.

Wird das frei gewordenen CO_2 unterirdisch und langfristig mit Hilfe der CCS-Technik (Carbon Capture Storage) gespeichert, kann die Wasserstofferzeugung über dieses Verfahren bilanziell als CO_2-neutral betrachtet werden (bis zu 90 % des anfallenden CO_2 können durch CCS abgeschieden werden). Hierfür ist die Identifikation von Speicherstätten für Kohlendioxid erforderlich. Aktuell wird CCS ein Technologiereifegrad (TRL)[2] von 6-7 zugeordnet, d.h. eine großskalige Anwendung dieses Verfahrens findet derzeit noch nicht statt [14]. So erzeugter Wasserstoff, bei dem CO_2 abgespalten und nicht in die Atmosphäre entweicht, wird als blauer Wasserstoff bezeichnet.

[2] Der Technologiereifegrad (Technology Readiness Level - TRL) ist eine Skala zu der Bewertung des Entwicklungsstandes von Technologien. Die Skala reicht von 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) bis 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes).

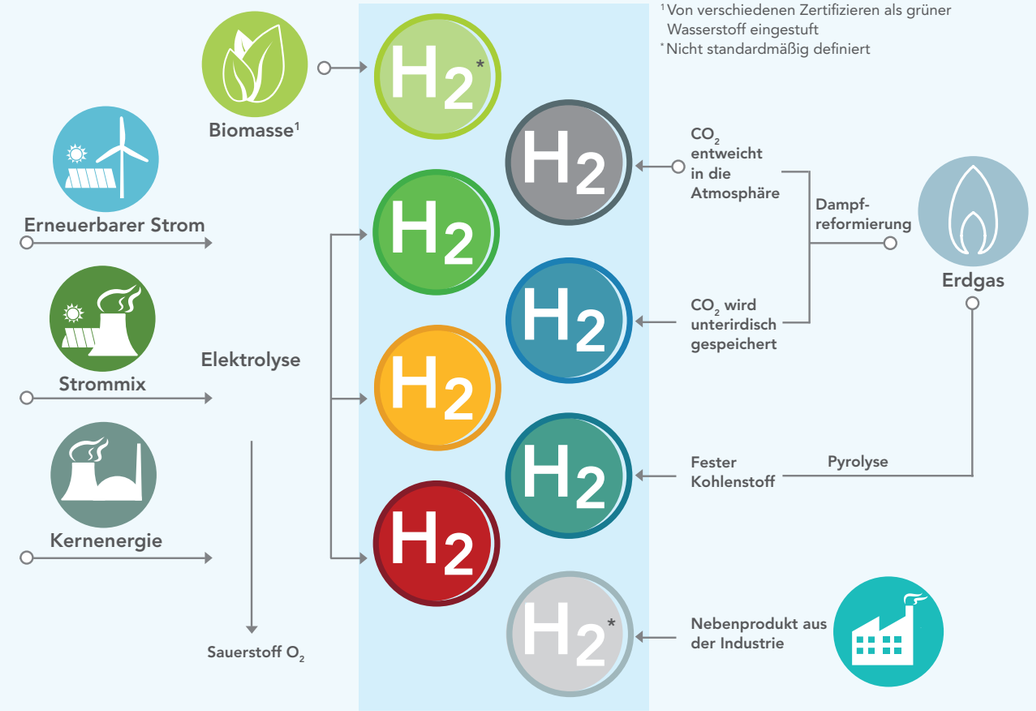


Abbildung 2-1: Erzeugungsarten und Farbenlehre des Wasserstoffs[3], in Anlehnung an [17]

[3] Die in der Abbildung 2-1 gezeigte „Farbenlehre" des Wasserstoffs greift ein in der öffentlichen Debatte häufig verwendetes Schema zur Klassifizierung der Erzeugungsarten auf. Dabei ist zu beachten, dass den Farben i.d.R. keine wissenschaftliche oder gesetzgeberische Definition zu Grunde liegt. Die entsprechenden Regelwerke, insbesondere mit Blick auf ein einheitliches Verständnis von „grünem Wasserstoff", werden derzeit noch erarbeitet. Eine andere Form der Klassifizierung ist z.B. die Erzeugung von Wasserstoff aus a) rohstoffbasierten Quellen mittels stofflicher Verfahren (z.B. Biomasse oder Erdgas) sowie b) strombasierten Quellen mittels Elektrolyse, welche jeweils unterschiedliche Implikationen hinsichtlich der CO_2-Bilanz aufweisen.

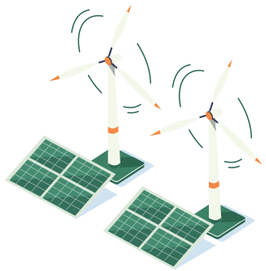
Erdgas-/Methanpyrolyse

Bei der Pyrolyse wird Erdgas oder Methan in einem thermochemischen Verfahren in festen Kohlenstoff und Wasserstoff zerlegt. Sofern die Wärmeversorgung des Hochtemperaturreaktors aus regenerativen Energieträgern bereitgestellt wird, handelt es sich bilanziell um ein CO_2-neutrales Verfahren. Zusätzlich kann der entstandene feste Kohlenstoff weiterverwendet werden.
Das Verfahren befindet sich insgesamt jedoch noch in der Pilotphase. Per Pyrolyse erzeugter Wasserstoff wird als türkiser Wasserstoff bezeichnet.

Nebenprodukt aus Industrieprozessen

In der chemischen Industrie fällt bei bestimmten Prozessen, z.B. bei der Chloralkali-Elektrolyse, Wasserstoff als Nebenprodukt an. Für die Betrachtung der CO_2-Emissionen von Nebenproduktwasserstoff existiert keine eindeutige Betrachtungsweise: teilweise werden die bei der Produktion entstehenden Emissionen nicht bzw. nur teilweise zugerechnet. Nebenproduktwasserstoff steht kostengünstig in begrenzten Mengen zur Verfügung, allerdings muss er zur weiteren Verwendung zusätzlich aufbereitet werden. Zudem hängt die Verfügbarkeit von der regionalen Industrie ab. Mit dem Industriepark Höchst steht in Hessen eine derartige Quelle für Nebenproduktwasserstoff zur Verfügung.[4] Bereits heute wird der dort anfallende Wasserstoff für Anwendungen in der Mobilität genutzt. Nebenproduktwasserstoff wird aktuell noch keiner Farbe zugeordnet.

[4] Mit ca. 50 Millionen Nm^3H_2/a fallen im Industriepark Höchst aktuell somit ca. 5 % das deutschlandweit erzeugten Nebenproduktwasserstoff an.



Wasserelektrolyse

Ein Elektrolyseur spaltet Wasser (H_2O) mithilfe von Strom in die Bestandteile Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) auf. Die Farbe des Wasserstoffs unterscheidet sich in Abhängigkeit der eingesetzten Stromquelle, die für die Elektrolyse genutzt wird. Wird Strom aus Kernenergie verwendet, wird sogenannter roter Wasserstoff erzeugt. Wird er als Strommix dem Netz entnommen, so spricht man vom sogenannten gelben Wasserstoff. Bei aktuellem Strommix weist der Wasserstoff noch hohe CO_2-Emissionen (ca. 25 kg CO_2/kg H_2) auf. Perspektivisch wird Wasserstoff, der mit Strom aus dem Stromnetz produziert wird, mit einem steigenden Anteil Erneuerbarer Energien im deutschen Strommix weniger CO_2-intensiv. Wird der Strom für die Elektrolyse aus Erneuerbaren Energien bereitgestellt, ist der produzierte Wasserstoff CO_2-neutral. In diesem Fall entsteht sogenannter grüner Wasserstoff. In der aktuellen Diskussion gilt die Wasserstoffproduktion aus Erneuerbaren Energien per Wasserelektrolyse als präferiertes Erzeugungsverfahren. Es existieren verschiedene Elektrolyseurarten. Die alkalische Elektrolyse wird bereits seit etwa hundert Jahren eingesetzt. Die Proton-Austausch-Membran-(PEM) Elektrolyse wird seit ein bis zwei Jahrzehnten eingesetzt. Noch im Entwicklungsstadium befindet sich die Hochtemperaturelektrolyse.

	Temperatur °C	Wirkungsgrad	Reifegrad
Alkaline Elektrolyse (AEL)	60 – 80	65 – 82 %	Kommerziell seit 100 Jahren in Industrie genutzt
Proton Exchange Membran Elektrolyse (PEM)	660 – 80	65 – 78 %	Kommerziell in mittleren und kleinen Anwendungen
Solid Oxide Elektrolyse (SOE)	700 - 900	85 %	Forschung und Entwicklung, erste kommerzielle Anwendungen

Tabelle 2-1: Übersicht von Elektrolyse-Arten [25]

PEM-Stacks (Zellstapel) eines Wasser-Elektrolyseurs

Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse / Biogas

Die H_2-Herstellung aus Biomasse kann durch viele verschiedene Verfahren erfolgen. Die Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Vergasungsmittel (Sauerstoff oder Dampf) und der Ausführung des Vergasungsprinzips (Wirbelschicht- oder Flugstromverfahren). Die Auswahl des Verfahrens hängt im Wesentlichen von der Art der Biomasse ab. Nach dem Vergasungsprozess wird das Rohgas gereinigt und Wasserstoff von den weiteren Rohgasbestandteilen getrennt. Die Wasserstofferzeugung durch die Vergasung aus Biomasse wird bislang nicht serienmäßig eingesetzt.

Über die Vergärung von Biomasse unter Ausschluss von Sauerstoff (anaerobe Fermentation) kann Biogas hergestellt werden. Ähnlich wie Erdgas besteht Biogas zu einem hohen Anteil aus Methan. Ähnlich zu der Dampfreformierung von Erdgas kann Wasserstoff auch durch die Reformierung von Biogas hergestellt werden. Aktuell stufen verschiedene Zertifizierer Wasserstoff aus Biomasse auch als grünen Wasserstoff ein, da das CO_2-Aufkommen bilanziell neutral ist.

Auch untersucht wird der Einsatz von autotroph lebenden Mikroorganismen wie Algen, die ihre Energie durch Sonnenlicht beziehen. Die bei der Photosynthese entstehende Energie wird genutzt, um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten. Dieses Verfahren befindet sich derzeit noch im Forschungsstadium und bislang ist keine wirtschaftliche Umsetzung möglich.

Die Spaltung von Wasser durch Sonnenlicht wird auch bei der Photokatalyse verwendet, einem Verfahren, das zur künstlichen Photosynthese zählt. Hierbei wird Wasser an einem entsprechenden Halbleitermaterial durch Photonen in Wasser- und Sauerstoff gespalten. Auch diese Erzeugungsart ist aktuell noch im Forschungsstadium. Aufgrund der vergleichsweise geringen Sonneneinstrahlung in Deutschland würde derartig produzierter Wasserstoff in der Zukunft vermutlich importiert werden.

Emissionsvergleich der Erzeugungsverfahren

Je nach Herstellungsverfahren von Wasserstoff fallen unterschiedliche CO_2-Emissionen an (vgl. Abbildung 2-2). Während Verfahren mit Biomasse grundsätzlich als CO_2-neutral eingestuft werden, sind insbesondere bei der Verwendung von fossilen Energieträgern die CO_2-Emissionen zu berücksichtigen. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass selbst bei der Nutzung von grauem Wasserstoff Emissionsreduktionspotenziale gegenüber dem Einsatz von konventionellen Energieträgern im Straßenverkehr erreicht werden können [17].

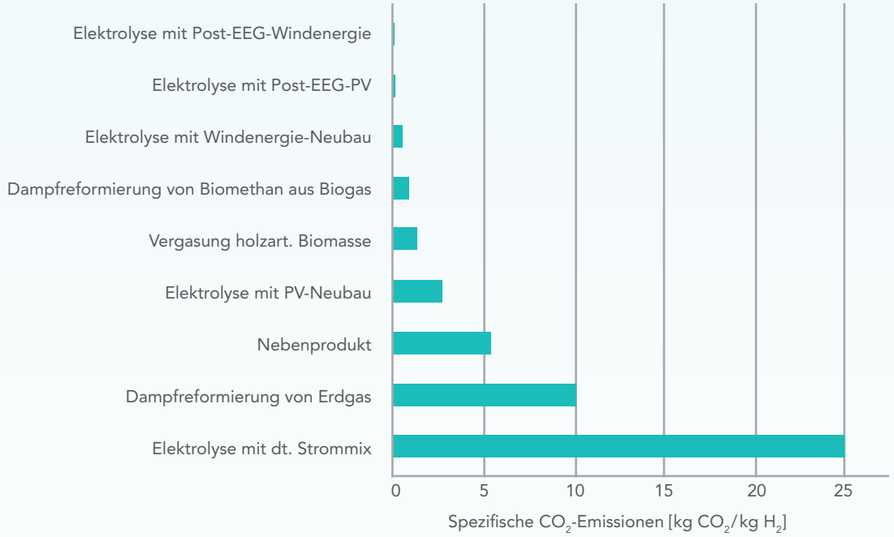


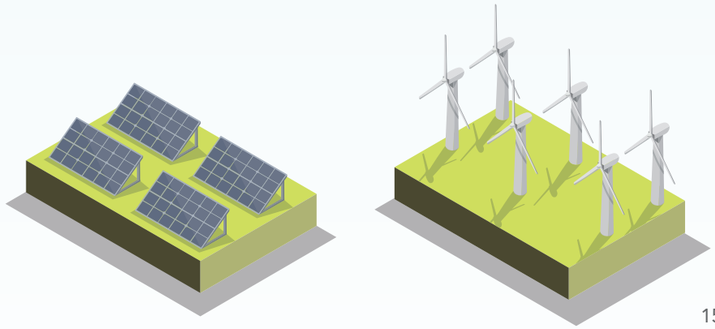
Abbildung 2-2: Spezifische CO_2-Emissionen unterschiedlicher H_2-Erzeugungsverfahren [kg CO_2/kg H2] [15]

Entwicklung der Wasserstofferzeugung

Heutzutage wird Wasserstoff hauptsächlich aus fossilen Quellen, beispielsweise per Dampfreformierung erzeugt. Die heutigen Produktions- und Bedarfszentren sind in der Industrie angesiedelt. Der hier produzierte graue Wasserstoff ist bisher deutlich günstiger als grüner Wasserstoff. Dies ist auf die großen, zentralen Anlagen, aber auch auf die günstigen Ausgangsstoffe (bspw. Erdgas) zurückzuführen.

Langfristig muss vor dem Hintergrund der Klimaneutralität jedoch ausschließlich grüner Wasserstoff produziert werden. Dieser kann für die Industrie zentral aber auch dezentral mit skalierbaren Anlagen erzeugt werden, bspw. durch Elektrolyse direkt an der Tankstelle. Insbesondere in der Transformationszeit ist auch der Einsatz von Nebenproduktwasserstoff wichtig zur Technologieentwicklung. Das Potenzial von blauem Wasserstoff wird derzeit diskutiert, wobei insbesondere die Möglichkeit einer zuverlässigen CO_2-Speicherung als auch das Thema Akzeptanz zu beachten sind.

Insgesamt geht man heute davon aus, dass die Erneuerbaren Energien zur Deckung des Wasserstoffbedarfs in Deutschland nicht ausreichen werden [4] und Deutschland auch zukünftig zu einem bestimmten Anteil ein Energieimportland bleibt.



Wasserstofftransport und Speicherung

Wird der Wasserstoff nicht unmittelbar am Abnahmestandort produziert, muss er zum Verbraucher transportiert werden. Standardmäßig wird der Wasserstofftransport heute überwiegend per Lkw (vgl. Abbildung 2-3) und vereinzelt per Pipeline durchgeführt. Perspektivisch ist auch die Wasserstoffanlieferung über die Schiene eine Option [7]. Typischerweise handelt es sich hierbei um gasförmigen Wasserstoff, der in Druckbehältern gespeichert wird. Abhängig vom Druckniveau können so zwischen 200 und 1.100 kg gasförmiger Wasserstoff mittels LKW transportiert werden.

Der Transport von flüssigem Wasserstoff per Trailer erfolgt bei einer Temperatur von ca. -253 °C. Dies ermöglicht eine Transportkapazität von ca. 3.500 kg. Weitere Transportmöglichkeiten könnten beispielsweise Liquid Organic Hydrogen Carrier (chemisch gebunden in einer Trägerflüssigkeit) oder Metallhydride (chemisch gebunden in einem Trägermetall) sein. Diese befinden sich jedoch noch in der Entwicklungsphase und werden kurzfristig noch keine große Rolle spielen. Eine Übersicht über die Transportarten bietet Tabelle 2-2.

Tube Trailer
200-250 bar, ≈500 kg,
Umgebungstemperatur

Container Trailer
550 bar, ≈1.000 kg,
Umgebungstemperatur

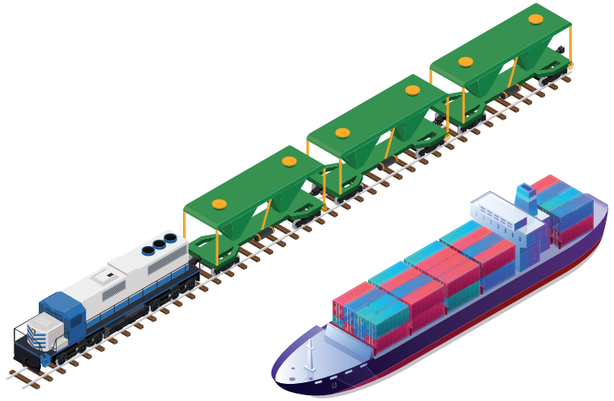
Liquid Trailer
1-4 bar, ≈4.000 kg,
tiefkalt

Abbildung 2-3: Wasserstoff-Straßentransport [25]

Methoden	Fakten	Vorteile	Nachteile	Technologie-Reifegrad (TLR)[5]
Gasförmiger H_2 per Lkw / Schiene (CGH_2) [25]	- Flaschenbündel oder Container-Lösung - Transport bei einem Druck von 200 bar bis 500 bar - Kapazität bis 1.100 kg pro 40 ft-Container (500 bar)	- Wirtschaftlicher Transport bei kurzen und mittleren Entfernungen bei relativ geringen Mengen	- im Vergleich niedrige Kapazität (hohe Lieferhäufigkeit) - im Vergleich großer Platzbedarf (erforderliche Abstellfläche)	TRL: 9
Gasförmiger H_2 per Pipeline	- Transport bei 20 – 100 bar - Kapazität abhängig von Druckniveau und Durchmesser der Pipeline	- Hohe Wirtschaftlichkeit bei hohen Lieferraten - hohe Transportkapazitäten	- verhältnismäßig hohe Investitionen - hoher Genehmigungsaufwand	RL: 9
Flüssiger H_2 per Lkw / Schiene (LH2) [25]	- Transport bei -253°C - Kapazität bis 3.500 kg pro 40 ft-Container	- Wirtschaftlicher Transport bei mittleren und großen Entfernungen	- Im Vergleich hoher Energiebedarf (für die H_2 Verflüssigung) - Geringe H_2-Verluste durch Wärmeeintrag (Boil-Off-Effekt)	TRL: 9
H_2 gebunden in flüssigem Trägerstoff (LOHC) [23] [16] [22]	- Transport bei Normaldruck und -temperatur - Kapazität bis ca. 1.700 kg pro 40 ft-Container	- schwer brennbar - bestehende Infrastruktur kann genutzt werden (Handhabung wie Diesel)	- Energieverluste bei der Ein- und Ausspeicherung	TRL: 4 – 6
H_2 gebunden im festem Trägerstoff (Niedertemperatur-Metallhydride) [20] [22]	- Transport bei ca. 6 bar - volumetrische Speicherdichte von 1kWh/l	- frei wählbarer Speicherdruck - keine Selbstentladung	- niedrige gravimetrische Energiedichte (<380 Wh/kg) - langsame Befüllung - vergleichsweise hohe Kosten	TRL: 4 – 6

Tabelle 2-2: Übersicht von Wasserstoff-Transportarten

[5] Der Technologie-Reifegrad ist eine Skala zu der Bewertung des Entwicklungsstandes von Technologien. Die Skala reicht von 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) bis 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes).



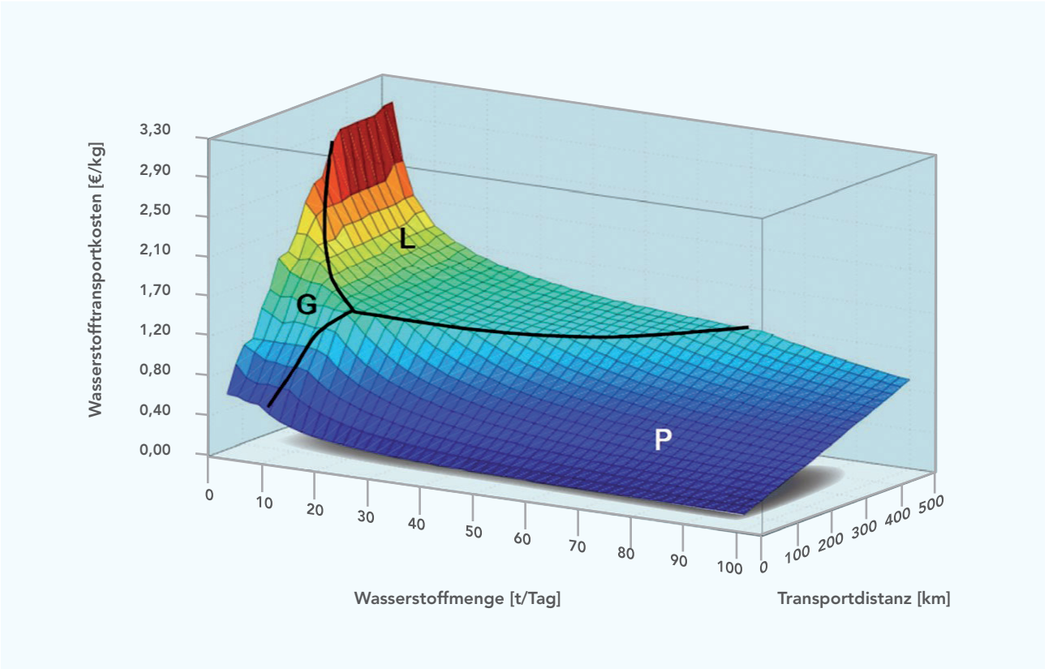


Abbildung 2-4: Wasserstofftransportkosten in Abhängigkeit von Wasserstoffmenge und Transportdistanz [5]

Abbildung 2-4 stellt die Verteilkosten in Abhängigkeit von der Transportdistanz und der transportierten Menge Wasserstoff dar. Die Abbildung ist unterteilt in drei Abschnitte. Diese stehen für den Transport von gasförmigem Wasserstoff im Trailer (‚G'), dem Transport von gasförmigem Wasserstoff per Pipeline (‚P') und dem Transport von flüssigem Wasserstoff im Trailer (‚L'). Handelt es sich um geringe Fördermengen und geringe Transportdistanzen erweist sich der Transport von gasförmigem und flüssigem Wasserstoff per Trailer als kostengünstig. Mit steigender Transportmenge wird der Wasserstofftransport per Pipeline kostengünstiger. Ursache für diese Entwicklung stellen die hohen Investitions- und Genehmigungskosten für den Bau der Pipeline dar.

Mittel- und langfristig gesehen wird sich die Verteilinfrastruktur von Wasserstoff zu einem flächendeckenden Netz entwickeln. Zukünftig ist auch die Umstellung des vorhandenen Erdgasnetzes auf Wasserstoff denkbar. Hierdurch können im Infrastrukturausbau hohe Kostenreduktionen entstehen.

Verschiedene Initiativen treiben deutschland- und europaweit den Ausbau einer Pipelineinfrastruktur voran. Beispielsweise plant die Initiative „European Hydrogen Backbone", gebildet aus zehn führenden Gasunternehmen, den Aufbau eines Wasserstoffnetzes mit einer Länge von bis zu 6.800 km bis 2030, bis 2040 soll die Pipeline eine Länge von ca. 23.000 km aufweisen [3]. Die Initiative „GET-H2" hat sich den Aufbau des Kerns für eine bundesweite Wasserstoffinfrastruktur zum Ziel gesetzt (vgl. Abbildung 2-5). Mit der Rhein-Ruhr-Pipeline in NRW existiert bereits ein 240 km langes Netz für den Transport von Wasserstoff zwischen Industriestandorten. Eine weitere Wasserstoffleitung verbindet den Industriepark Höchst mit dem Industriepark Griesheim.

Ein groß angelegtes Wasserstoffnetz dient nicht nur der Verteilung von Wasserstoff, sondern kann auch eine Speicherfunktion übernehmen. Wie heute für Erdgas wird langfristig die großskalige Speicherung auch von Wasserstoff in Salzkavernen relevant. Die aktuell existierenden Netze und Speicher für Erdgas wird es zukünftig für Wasserstoff geben.

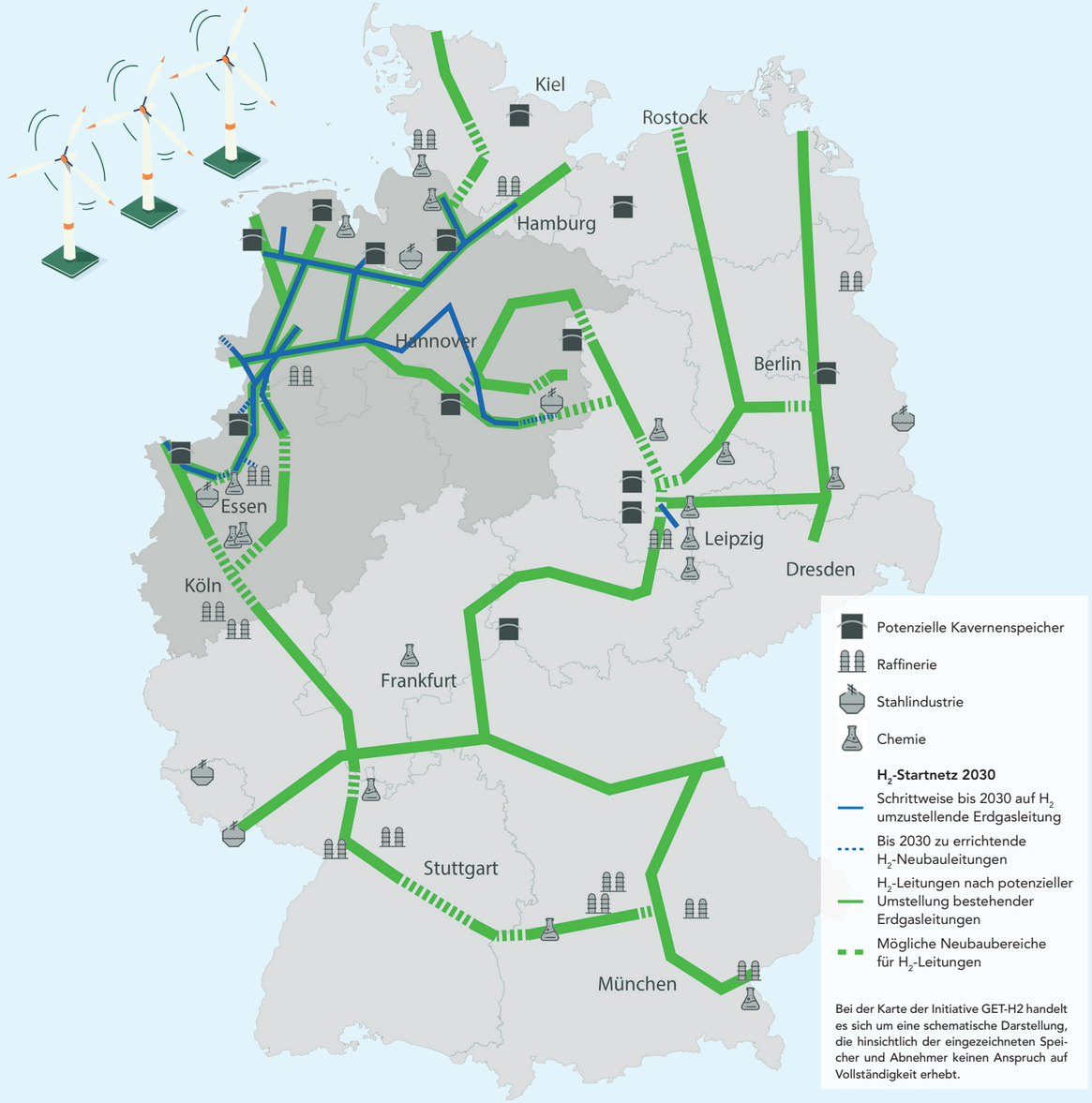


Abbildung 2-5: Die Initiative GET-H2 plant die bundesweite Realisierung von Wasserstoff-Infrastrukturen zur Produktion, Abnahme, Transport und Speicherung von grünem Wasserstoff. [18]

H_2-Tankstellen

Bei H_2-Tankstellen handelt sich um Installationen, die ein schnelles und zuverlässiges Betanken des Fahrzeugs ermöglichen, die Wasserstoff-Zapfsäulen werden bedient, wie man es vom Tanken mit den konventionellen Kraft stoffen gewohnt ist. Sie werden meist in bereits vorhandene, öffentliche Tank- und Servicestationen integriert. Der Prozess an der Tankstelle besteht aus der Anlieferung, Speicherung, Handling und Abgabe (vgl. Abbildung 2-6).

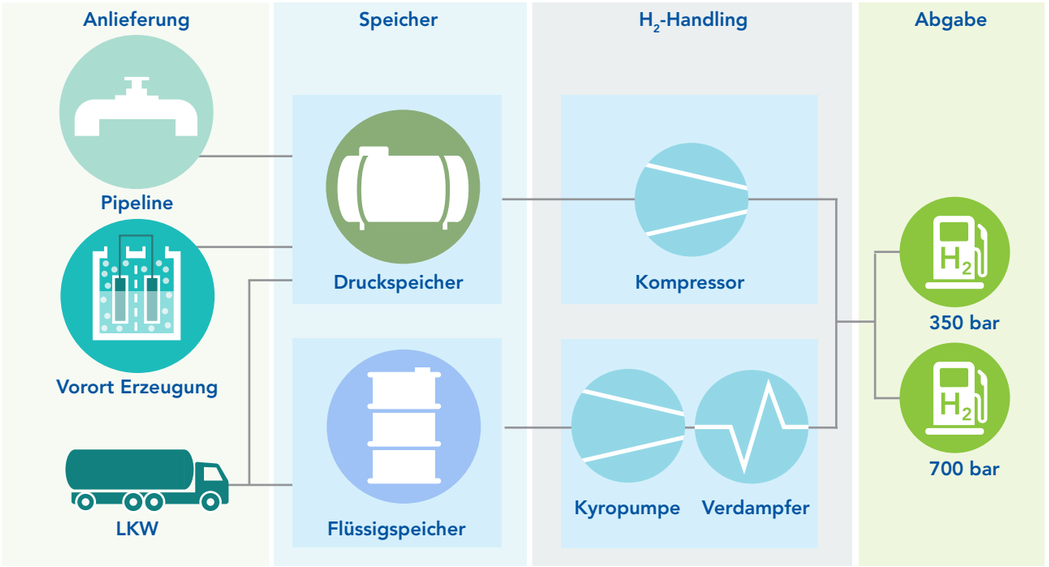


Abbildung 2-6: Schema einer Wasserstofftankstelle

Wasserstofftankstelle mit Niederdruck-Speicher (links), Kompressor (in Container rechts) sowie Hochdruck-Speicher und Dispenser (beides Mitte)

Wasserstoff-Anlieferung

Grundsätzlich werden drei typische Anlieferungsvarianten unterschieden: Die Anlieferung per Pipeline, die Wasserstoffproduktion vor Ort (On-site) oder die Anlieferung von gasförmigem oder flüssigem Wasserstoff per Trailer. Typischerweise wird gasförmiger Wasserstoff per Lkw auf einem Druckniveau von bis zu 500 bar angeliefert. Alternativ kann auch bei größeren Wasserstofftankstellen eine Anlieferung in tiefkalter, flüssiger Form praktiziert werden. Handelt es sich um eine Anlieferung von flüssigem oder gasförmigem Wasserstoff, bildet eine Einfüllstation die Schnittstelle zu den Lieferanten.

Wird der Wasserstoff vor Ort produziert, beispielsweise durch einen Elektrolyseur, liegt er auf einem Druckniveau von typischerweise ca. 3 - 40 bar vor (am Ausgang des Elektrolyseurs).

Eine Anlieferung von gasförmigem Wasserstoff per Pipeline erfolgt typischerweise auf einem Druckniveau von 20 bis 100 bar.

Speicherung

Heute existieren standardmäßig eingesetzte Speichermöglichkeiten, wie Druckgasspeicher auf verschiedenen Druckniveaus oder Flüssigtanks, die bereits standortunabhängig eingesetzt werden.

Die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff kann auf verschiedenen Druckniveaus (typischerweise 30 bar, 400 bar, 900 bar) erfolgen. Dies ist maßgeblich vom zur Verfügung stehenden Platz abhängig. Eine Erhöhung des Drucks führt zu einer höheren volumetrischen Speicherdichte, d.h. es kann mehr Wasserstoff mit geringerem Platzbedarf gespeichert werden. Aktuell werden die meisten H_2-Tankstellen mit gasförmigen Wasserstoffspeichern ausgerüstet.

Wird flüssiger Wasserstoff angeliefert, wird dieser typischerweise in Flüssigtanks gespeichert. Durch die hohe Energiedichte von flüssigem Wasserstoff, ist der Platzbedarf bei einer flüssigen Speicherung geringer. Bei der Verflüssigung von Wasserstoff wird gegenüber der Kompression ein höherer Energiebedarf erforderlich. Weiterhin sind die Investitionskosten für den Verflüssiger höher als für Kompressoren.

Überstrombetankung: Kaskaden-Prinzip

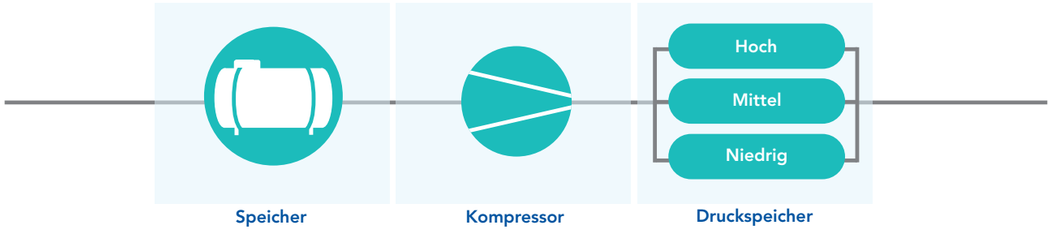


Abbildung 2-7: Überströmbetankung mit mehreren Speichern [10]

Überstrombetankung: Konstantdruckspeicher

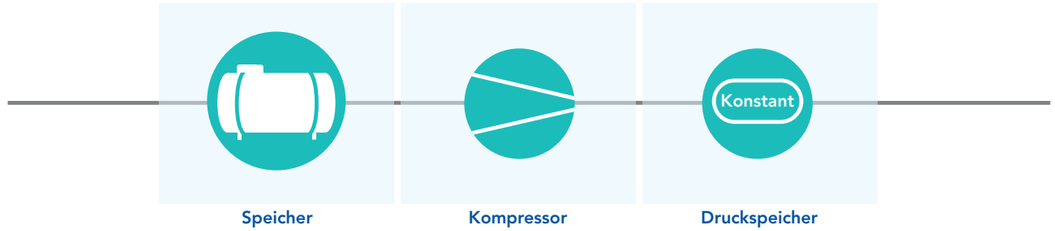


Abbildung 2-8: Überstrombetankung mit einem Speicher [10]

Handling

Es existieren verschiedene Betankungskonzepte für Wasserstoff. Bei dem am weitesten verbreiteten Betankungskonzept, dem Überströmen nach dem **Kaskaden-Prinzip** (vgl. Abbildung 2-7), erfolgt die Betankung des Fahrzeuges aus mehreren Speichern mit unterschiedlichen Druckniveaus. Damit eine Überstrombetankung durchgeführt werden kann, muss der Druck in den Wasserstoffspeichern der Tankstelle höher sein als der Druck im Fahrzeugtank. Durch das vorhandene Druckgefälle in den Speichern strömt Wasserstoff in den Fahrzeugtank. Tankstellenseitig existieren typischerweise drei Druckbänke. Den Speichern vorgeschaltet ist ein Kompressor, der den Wasserstoff auf das jeweilige Druckniveau im Speicher verdichtet. Beim Überströmen startet der Betankungsvorgang mit der Druckbank mit dem geringsten Druckniveau. Sobald der Massenstrom von Speicher zum Fahrzeugtank aufgrund des geringen Druckgefälles einen Schwellenwert unterschreitet, wird der Betankungsvorgang mit Wasserstoff aus der nächsten Druckbank fortgesetzt. Vollständig gefüllt wird der Fahrzeugtank mit der letzten und typischerweise kleinsten Druckbank, die das höchste Druckniveau aufweist.

Um das notwendige Druckniveau zu erhalten, können die Speicher nie vollständig entleert werden. Daraus ergibt sich ein zu berücksichtigender Unterschied zwischen der installierten und nutzbaren Speicherkapazität (typischerweise ein Verhältnis von 3:1).

Ein weiteres Betankungskonzept ist der **Konstantdruckspeicher** (vgl. Abbildung 2-8). Hierbei wird ebenfalls eine Überströmbetankung durchgeführt, jedoch aus nur einem Speicher. Dieses Konzept setzt sich aus einem Niederdruckspeicher (typischerweise deutlich kleiner als 350 bar), einem Kompressor und einem sogenannten Pufferspeicher auf einem höheren Druckniveau zusammen. Durch einen Kompressor wird das Druckniveau im sogenannten Konstantdruckspeicher bei einem Druckniveau gehalten, dass das Druckniveau des Fahrzeugtanks überschreitet. Mit dieser Technik kann der Niederdruckspeicher fast vollständig entleert und nahezu der gesamte eingelagerte Wasserstoff vertankt werden.

Betankung über Booster-Kompressor

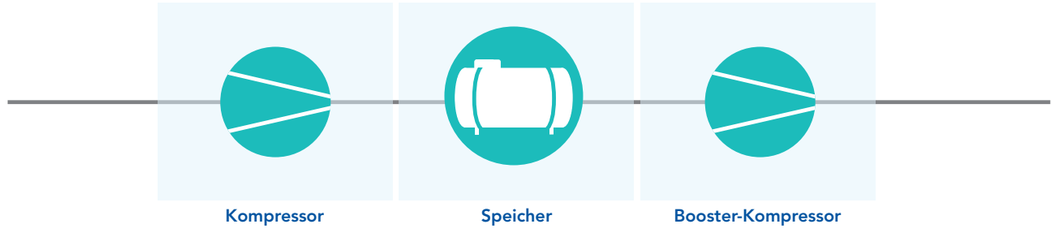


Abbildung 2-9: Betankung mit Booster-Kompressor [10]

Weiterhin kann die Betankung über einen sogenannten **Booster-Kompressor** (vgl. Abbildung 2-9) erfolgen. Hierbei wird Wasserstoff unmittelbar aus einem Niederdruckspeicher (typischerweise deutlich weniger als 350 bar) und ohne Pufferspeicherung auf das erforderliche Fahrzeugdruckniveau komprimiert und so das Fahrzeug befüllt. Dieses Betankungskonzept bietet sich insbesondere für Großverbraucher, die einen hohen täglichen Wasserstoffbedarf aufweisen, an. Die hohe Wasserstoffabnahme erfordert einen Kompressor mit einer hohen Förderleistung. Der Kompressor wird für diese Anforderungen so groß dimensioniert, dass auch die direkte Betankung des Fahrzeuges bei einer kurzen Betankungsdauer möglich ist. Diese Ausführungsart weist somit höhere Kompressorkosten, aber geringere Speicherkosten auf.

Betankung mit Flüssigwasserstoff über Kryo-Pumpe

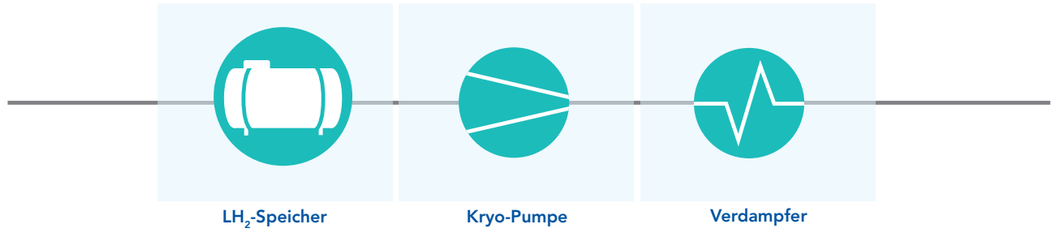


Abbildung 2-10: Betankung aus einem Flüssigwasserstoff (LH_2)-Speicher [10]

Wird Wasserstoff an der Tankstelle in einem Flüssigtank gespeichert, erfolgt die Betankung des Fahrzeugs über eine sogenannte **Kryo-Pumpe** und einen Verdampfer (vgl. Abbildung 2-10) [10]. Technisch ist auch eine Betankung der Fahrzeuge mit flüssigem Wasserstoff möglich. Allerdings sind die derzeit am Markt verfügbaren Fahrzeuge nur mit Tanksystemen zur gasförmigen Speicherung von Wasserstoff ausgestattet.

Trockenlaufender Kolbenkompressor mit elektro-hydrostatischem Antrieb u.a. für Wasserstoff-Tankstellen

Abgabe an der Zapfsäule

In Deutschland existieren zwei Druckniveaus für die Betankung von Wasserstoff. Busse und Lkw nutzen üblicherweise Wasserstoff auf einem Druckniveau von 350 bar, während Pkw standardmäßig einen Druck von 700 bar nutzen.[6]

Für den Kunden ist von der an der Tankstelle verbauten Technik meist nur die Zapfsäule sichtbar, die auch Dispenser genannt wird. Alle H_2-Tankstellen gewährleisten heute eine Betankung auf Basis weltweit einheitlicher Standards. Dieser Standard existiert im Wesentlichen für Pkw bis zu einer Betankung von 7 kg. Einheitliche Betankungsstandards für das in der Entwicklung befindliche Segment der Nutzfahrzeuge werden zurzeit noch definiert, u.a in dem Projekt Prhyde. Drei wesentliche Normen beschreiben die Schnittstelle zwischen Tankstelle und Fahrzeug (SAE J2600, SAE J2601 und SAE J2799).

In diesen Normen ist u.a. die Ausführung der Füllkupplung und ihr Gegenstück am Fahrzeug beschrieben. Außerdem wird beschrieben, ob und in welcher Form die Tankstelle zwecks Datenübermittlung mit dem Fahrzeug kommuniziert. Darüber hinaus wird in sogenannten Betankungsprotokollen beschrieben wie der Befüllvorgang genau ablaufen soll.

Um eine schnelle Betankung (z.B. Pkw < 5 Minuten) zu realisieren, muss Wasserstoff vorgekühlt werden (typischerweise auf bis zu -40°C, „Cold Filling"). Grund für die Vorkühlung ist, dass die Fahrzeugtanks die zulässigen Temperaturgrenzen nicht überschreiten/nicht überhitzen, da der komprimierte Wasserstoff sich in einem teilentleerten Fahrzeugtank zunächst ausdehnt, was physikalisch mit der Freisetzung von Wärme einhergeht. [10]

Verfügbarkeit an der Tankstelle

Für den Betrieb von Brennstoffzellen-Fahrzeugen ist ein reibungsloser Betriebsablauf an der Tankstelle notwendig. Um eine hohe Verfügbarkeit der Tankstelle zu gewährleisten, können einzelne Komponenten der Tankstelle redundant ausgeführt werden (ein typisches Beispiel sind die Kompressoreinheiten).

Abnahme- und Verbrauchsmengen von Fahrzeugen mit Brennstoffzellen-Antrieb

Die typischen Abnahmemengen pro Tankvorgang von verschiedenen Fahrzeugtypen sind unterschiedlich groß und in Abbildung 2-11 dargestellt.

[6]Das aktuell in Serienproduktion gefertigte Müllsammelfahrzeug der Firma FAUN ist mit Tanks auf einem Druckniveau von 700 bar ausgestattet.

Typische Abhahmemengen von Wasserstoff pro Betankungsvorgang

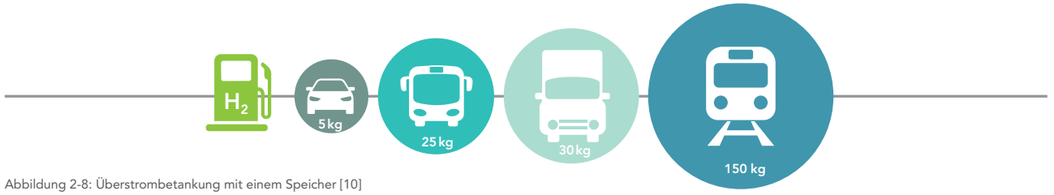


Abbildung 2-8: Überstrombetankung mit einem Speicher [10]

In Abbildung 2-12 sind die Bandbreiten von Verbräuchen der verschiedenen Brennstoffzellenfahrzeuge dargestellt. Die spezifischen Verbräuche sind typischerweise sehr variabel, da sie durch viele Faktoren beeinflusst werden. Hierzu zählen beispielsweise die Beladung des Fahrzeuges, das spezifische Fahrprofil und das Verhalten des Fahrers. Außerdem ist der Wasserstoffbedarf der Fahrzeuge von der jährlichen Gesamtfahrleistung abhängig. So ist die Wasserstoffnachfrage eines typischen ÖPNV-Busses ca. 40-mal so hoch wie die eines Pkws.

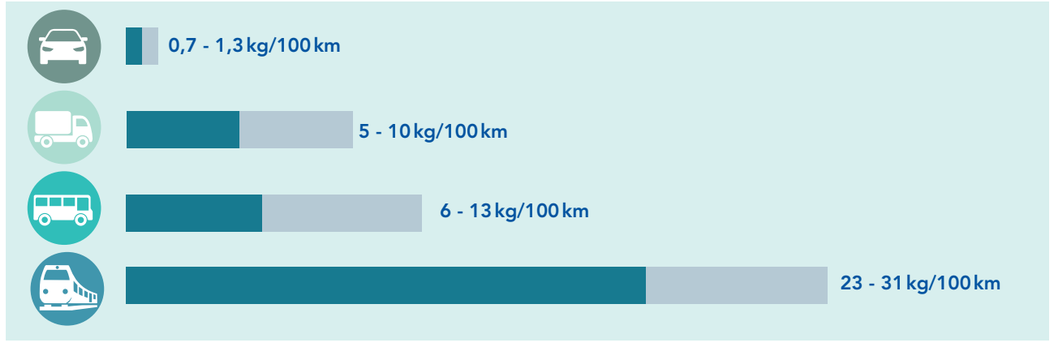


Abbildung 2-12: Wasserstoffverbrauch verschiedener Fahrzeugtypen je 100km Fahrleistung

Weltweit erstes Brennstoffzellen-Schienenfahrzeug-Modell
für den Öffentlichen Personenverkehr Coradia iLint von Alstom

Entwicklung des Tankstellennetzes

H_2-Tankstellen sind skalierbar und in allen Größen denkbar. Aktuell existieren verhältnismäßig wenige H_2-Tankstellen und diese weisen eine geringe Kapazität auf. Beispielsweise baut die H2 MOBILITY[7] aktuell fast ausschließlich Pkw-Tankstellen der Größenkategorie XS und S (vgl. Tabelle 2-3). Aufgrund der geringen Kapazität sind diese nicht für den Schwerlastverkehr ausgelegt, da hier wesentlich höhere Abnahmemengen als bei Pkw auftreten. Die hohen Betankungswerte für Busse machen beispielsweise standardisierte H_2-Tankstellen der Größe M und der Größe L interessant. Perspektivisch werden H_2-Tankstellen in Anzahl und Größe zunehmen. Insgesamt plant H_2-Mobility abhängig vom Hochlauf der Fahrzeugzahlen bis Ende 2023 bis zu 400 H_2-Tankstellen[8] in Deutschland [6].

Ein bis 2050 vollständig ausgebautes Lkw-Tankstellennetz für den Schwerlastverkehr könnte Berechnungen zufolge aus 140 Tankstellen bestehen, die vorwiegend in Industrieregionen und an Transitrouten errichtet werden [21].

	Sehr klein XS	Klein S	Mittelgroß M	Groß L
Zapfpunkte	1	1	2	4
Maximaler Durchsatz pro Tag	80 kg	212 kg	420 kg	1.000 kg
Maximale Betankungen pro Tag	20	38	75	180
Versorgte Fahrzeuge pro Station	100	400	800	1600

Tabelle 2-3: Größenkategorien von H_2-Tankstellen

[7] Vertiefende Angaben zu H2 MOBILITY finden sich ab Seite 32.
[8] Der Ausbau lässt sich über die Website der H_2-Mobility verfolgen (www.h2.live).

FINANZIERUNGSMÖGLICHKEITEN UND GESCHÄFTSMODELLE

Beschreibung des Marktumfelds

Wasserstoff kann flexibel im schienen- und straßengebundenen Verkehr und auf dem Wasserweg als Kraftstoff eingesetzt werden. Die aktuelle Marktsituation variiert stark in diesen Bereichen. Insgesamt sind derzeit weniger als ein Prozent am gesamten Fahrzeugmarkt mit Wasserstoff betriebene Fahrzeuge.[9]

Während in den Segmenten Pkw und ÖPNV erste Flotten von Brennstoffzellen-Fahrzeugen im Einsatz sind und derzeit weiter hochskaliert werden, werden Anfang 2020 erste Pilotflotten im Segment Lkw erwartet. Ab 2025 ist in diesem Segment ein verstärkter Markthochlauf absehbar. Im Schienen- und Schiffsverkehr ist die Lage ähnlich.

Entsprechend dieser Fahrzeugzahlen gibt es nur wenige Tankstellen. Deutschlandweit sind es Momentan rund 100 öffentliche H_2-Tankstellen[10] für Pkw. Damit sind die ersten Schritte für eine wasserstoffbasierte Mobilität bereits gegangen, für ein deutschlandweit flächendeckendes Netz sind jedoch noch viele weitere H_2-Tankstellen erforderlich. Maßgeblichen Anteil am Ausbau der öffentlich zugänglichen Pkw-Infrastruktur hat die H_2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG (H2 Mobility) mit dem Ziel, bis 2023 400 H_2-Tankstellen zu errichten. Die Umsetzung dieses Ziels gelingt unter anderem durch finanzielle Unterstützung unterschiedlichster Akteure.[11]

Neben dem öffentlichen Tankstellennetz existieren auch nicht öffentlich zugänglichen H_2-Tankstellen. Hier handelt es sich oft um Betriebshoftankstellen für BZ-Busse oder Züge.

Heutige Investitionskosten (H_2-Preise)

Aufgrund der noch neuen Technologie und besonders wegen der bisher ausbleibenden Skaleneffekte durch große Stückzahlen, sind Brennstoffzellen-Fahrzeuge und entsprechende Tankstellenanlagen heute noch relativ teuer. Die Kosten für eine Pkw-Tankstelle liegen aktuell bei etwa 1–1,5 Mio. €, eine H_2-Tankstelle für den Dauerbetrieb von ca. 10 bis 20 BZ-Busse liegt bei ca. 1 – 2 Mio € (weitere detaillierte Kostenanalysen können den Studien „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV" [19] sowie „New Bus Fuel" [10] entnommen werden).

Der Preis für Wasserstoff an den öffentlich zugänglichen Pkw-Tankstellen ist vor einigen Jahren auf einen Wert von 7,98 € je kg (zuzüglich Mehrwertsteuer) festgelegt worden. Dieser Preis ist aufgrund der geringen Auslastung und dem geringen Durchsatz an vielen H_2-Tankstellen zum jetzigen Zeitpunkt für den Betrieb der Tankstelle i.d.R. nicht kostendeckend.

Ausblick auf die zukünftige Marktentwicklung

Das Ziel eines klimaneutralen Europas und die daraus resultierenden Richtlinien (bspw. die Clean Vehicle Directive, kurz CVD) führen zu einem erheblich steigendem Wasserstoffbedarf. Die CVD schreibt bis 2025 eine Beschaffungsquote von 45% für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben vor, bis 2030 liegt die Quote bei 65%.

Ähnliche Randbedingungen treffen auf sämtliche Verkehrswege und Fahrzeugarten für Straße, Schiene und Wasserwege zu. In allen drei Bereichen sind derzeit enorme Aktivitäten zur Entwicklung und Produktion von entsprechenden Fahrzeugen im Gange. So hat z.B. Toyota seine Jahresproduktionskapazität für den Modellwechsel des Pkw-Modells Mirai von 3.000 auf 30.000 Stück pro Jahr verzehnfacht.[12] Andere Hersteller haben ähnlich ambitionierte Ziele.

Um diese wachsenden Fahrzeugflotten bedienen zu können, bedarf es einer ausreichenden H_2-Tankinfrastruktur. Auch hier ist bei entsprechenden Anbietern erhebliche Bewegung im Markt. Es formieren sich zahlreiche neue Zulieferer, Anbieter und Hersteller-Konsortien für H_2-Tankstellen. Gab es bis vor wenigen Jahren nur drei bis vier wesentliche Anbieter von entsprechenden einzelnen verfahrenstechnischen Anlagenkomponenten, so wächst die Anzahl an Anbietern stetig, die ihren Kunden maßgeschneiderte schlüsselfertige Wasserstofftankstellen anbieten.

Diese, derzeit zu beobachtende enorme Dynamik wird zu erheblichen Preisreduktionen in allen Bereichen der Wasserstoff gestützten Mobilität führen.

[9] Im November 2020 waren mehr als 1.000 BZ-Pkw in Deutschland zugelassen. (https://www.now-gmbh.de/ / Quelle: KBA)
[10] Tankstellenbestand zum Jahreswechsel 2020/21.
[11] Beispiele für weitere Fördergeber finden sich z.B. über die App bzw. die Website „H2.live". Durch Klicken auf die einzelnen Stationen erhält man Informationen zum jeweiligen Betreiber.
[12] Die erste Generation wurde 2014 auf den Markt gebracht, die zweite Generation wird ab 2020 verkauft.

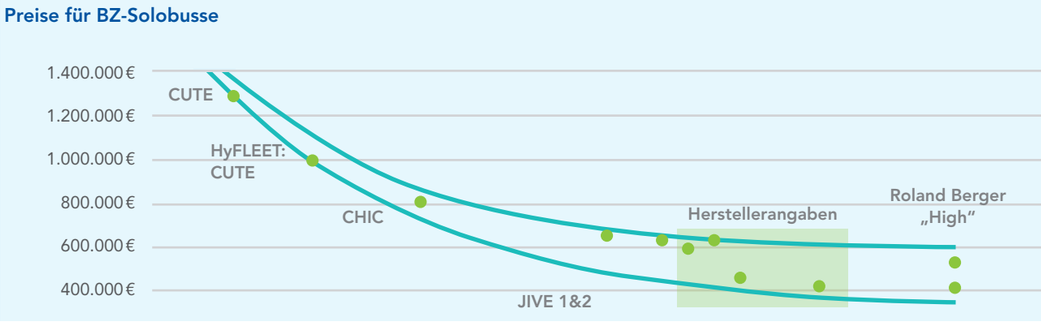


Abbildung 3-1: Preise für Brennstoffzellen-Solobusse [15]

Zukünftige Investitionskosten und H_2-Preise

Die genaue Entwicklung der Investitions- und Kraftstoffkosten für die Erzeugung und Bereitstellung von Wasserstoff sowie auf der Nachfrageseite ist schwer abzuschätzen. Alle H_2-Produktionsschritte besitzen jedoch ein hohes Reduktionspotential durch weitere Technologiesprünge und Skaleneffekte. So zeigen Umfragen, dass Preise von 4 bis 6 € je kg H_2 an großen und gut ausgelasteten Tankstellen in den nächsten Jahren realistisch sind. Offen sind dabei aber noch die Preisekomponenten Steuern und Abgaben. Details dazu sind heute noch nicht beschreibbar.

Für die Wasserstoffmobilität der Zukunft ist aber nicht nur der Kraftstoffpreis an der Tankstelle entscheidend.[13]

Für viele Nutzer geht es letztlich um Kosten pro zurückgelegte Fahrstrecke, wie z.B. im ÖPNV. Dabei zählt neben der Betankungszeit und der Fahrzeugflexibilität auch der Anschaffungspreis entsprechender Fahrzeuge. Die Abbildung 3-1 zeigt am Beispiel von üblichen ÖPNV-Solo-Bussen die Preisreduktion der letzten ca. 20 Jahre und den Ausblick bis 2030.

Bei der Anschaffung der ersten Busse zu Beginn der 2000-er Jahre lagen die Investitionskosten bei ca. 1,3 Mio. €. In den vergangenen 20 Jahren wurden die Kosten um mehr als die Hälfte reduziert. Bis 2030 wird eine weitere Kostenreduktion erwartet, je nach Szenario von weiteren fast 40%. Ähnliches ist auch für andere Fahrzeugklassen und Infrastruktur zu erwarten.

[13] Für die Betrachtung der Gesamtkosten (Total Cost of Ownership) ist die Einbindung der Kosten von Infrastruktur, Fahrzeug, Personal, Service- und Instandhaltung sowie sonstige Kosten (bspw. Maut) einzubeziehen.

Betreibermodelle für H_2-Tankstellen

Insbesondere für Verkehrsbetriebe und Unternehmen mit großen Fahrzeugflotten ist es oft üblich, eine Tankstelle auf dem eigenen Betriebsgelände zu betreiben. Ausschlaggebend für die Entscheidung für eine eigene Tankstelle sind dabei i.d.R. die internen Betriebsabläufe und Kosten. Das gilt auch für bestehende und zukünftige BZ-Fahrzeugflotten. Dabei lassen sich drei wesentliche Modelle unterscheiden. Diese unterscheiden sich in Aspekten der Planung, des Baus und des Betriebs mit verschiedenen Vor- und Nachteilen (vgl. Tabelle 3-1).

1. Bau einer Tankstelle in Eigenregie: Bei diesem Konzept ist der Nutzer in sämtliche Phasen – von der Planung bis zum Betrieb – beim Bau der Tankstelle involviert und er erwirbt sich so ein großes Know-how beim Thema H_2-Tankstellenbau. Das bedeutet konkret, dass der Nutzer eine hohe Kontrolle über die Ausgestaltung der Tankstelle hat. Allerdings erfordert dies einen sehr hohen Zeit- und Personalaufwand.
   Dieses Modell kann für Nutzer interessant sein, die viele H_2-Tankstellen bauen und betreiben wollen.

2. Bau einer Tankstelle nach dem Betreibermodell: Bei diesem Konzept definiert der Nutzer lediglich einen Wasserstoffbedarf (Menge und Zeitraum) der Betankung. Der Tankstellenbetreiber hingegen kümmert sich sowohl um die notwendige Detailplanung und als auch um den Bau und Betrieb der H_2-Tankstelle.
   Dieses Modell ist für Nutzer interessant, die lediglich eine geregelte H_2-Menge benötigen.

3. Bau der Tankstelle durch einen Generalunternehmer: Dieses Konzept stellt eine Zwischenstufe der Modelle 1 und 2 dar. Der Nutzer beauftragt einen Generalunternehmer, der sich um die vollständige Abwicklung von Planung und Errichtung der Tankstelle kümmert. Der Nutzer übernimmt anschließend die fertige Tankstelle und betreibt diese dann in Eigenregie.
   Der Nutzer kann so besondere Wünsche in den Bau der Tankstelle einfließen lassen und ist beim Betrieb freier in der Wahl der Wasserstofflieferanten.
   Dieses Modell ist für Nutzer mit eigenem Betriebsgelände interessant und die die H_2-Lieferung wettbewerblich vergeben wollen.

Pkws und leichte Nutzfahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzelle sind aufgrund kurzer Betankungszeiten und hoher Reichweiten (auch im Winter) in besonderem Maße für häufige Langstrecken-Fahrten mit nur kurzen Pausenzeiten, wie z.B. bei Handwerkern oder Firmen- und Mietwagen, geeignet.

	Vorteil	Nachteil
Bau in Eigenregie	Großer Einfluss auf das Projekt	- Sehr zeitintensiv - Sehr viel Know-How notwendig, das meist nur für den Bau einer Tankstelle aufgebaut wird
Betreibermodell	- Planung, Bau, Genehmigung, Betrieb und Wartung durch Betreiber - Sehr geringer Organsiationsaufwand	- Kein Eigentümer der Tankstelle (ggf. förderrelevant)
Generalunternehmen	- Nutzer ist Eigentümer (ggf. förderrelevant) - Geringerer Organsiationsaufwand	- Eingeschränkte Kontrolle über einzelne Akteure

Tabelle 3-1: Vor- und Nachteile von Betreibermodellen für H_2-Tankstellen

H_2-Infrastruktur – mögliche Geschäftsmodelle

Tragfähige Geschäftsmodelle gelingen bereits dort, wo mindestens eines der drei folgenden Kriterien erfüllt ist:

1. besonders gute Förderbedingungen,
2. großer H_2-Bedarf,
3. Kunden haben weiteren Nutzen.

Wirtschaftlichkeit durch Förderung:
In frühen Marktphasen, so wie sich die H_2-Wirtschaft heute darstellt, sind die Förderbedingungen in der Regel gut. Allerdings reicht das in Punkto H_2-Infrastruktur bisher noch nicht aus, um einen wirtschaftlichen Betrieb von H_2-Tankstellen zu gewährleisten. Die verfügbaren Förderquoten beginnen derzeit bei ca. 40% der Mehrkosten. Um tragfähig zu sein, ist häufig jedoch noch die Förderung von 80% der Investitionskosten erforderlich. Dies wird erst seit Kurzem in ausgewählten Programmen gewährt.

Wirtschaftlichkeit durch hohen H_2-Absatz:
In einigen Bereichen sind sehr große Wasserstoffmengen (einige Tonnen H_2 pro Tag) nötig. Das ist z.B. beim Betrieb von BZ-Zügen oder großen Bus-Flotten der Fall. Die heute noch hohen Anlagenkosten lassen sich in diesen Fällen auf den hohen Wasserstoffabsatz umlegen, wodurch sich die Wirtschaftlichkeit ergeben kann.

Wirtschaftlichkeit durch erhöhten Kundennutzen:
In verschiedenen Bereichen kann dem Kunden ein weiterer Nutzen durch den Einsatz von Wasserstoff als Treibstoff geboten werden. Dadurch ist der Kunde bereit, für den weiteren Nutzen oder den Wasserstoff einen höheren Preis zu bezahlen. Das gelingt zum Beispiel dann, wenn er, wie in dem auf Seite 38 beschriebenen Beispiel „HyWheels Fulda“, als weiteren Mehrwert „grünen Transport“ für seine Produkte anbieten kann.

Einfluss Strompreis

Bei der Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse (z.B. dezentral an H_2-Tankstellen) ist der Strompreis von entscheidender Bedeutung. Abbildung 3-3 zeigt die grundsätzliche Zusammensetzung der Wasserstoffkosten aus Strom-, Investitions- und Instandhaltungskosten. Abbildung 3-4 zeigt den Einfluss der Auslastung der Elektrolyseanlage. Dabei ist zu erkennen, dass der Wasserstoffpreis pro Kilogramm mit steigendem Strompreis erheblich ansteigt. Bei heutigen Elektrolyseanlagen ergibt sich (aufgrund von verschiedenen technischen Zusammenhängen) allein durch den Strompreis von z. B. 10ct/kWh ein Wasserstoffpreis von ca. 6,00 € pro Kilogramm Wasserstoff. Zusätzlich enthalten heutige Strompreise neben den Stromgestehungskosten (z.B. an einer Windkraftanlage) noch viele weitere Komponenten, wie Steuern und Abgaben (Netzentgelt, EEG-Umlage usw.). Wenn alle diese Kostenkomponenten zusammenkommen, ist der wirtschaftliche Betrieb von Elektrolyseuren heute kaum möglich. Daher wird derzeit intensiv diskutiert, welche dieser verschiedenen Preiskomponenten in Zukunft für Elektrolyseanlagen reduziert werden können oder ganz entfallen sollen.

Für den wirtschaftlichen Einsatz von Elektrolyseanlagen (z. B. an H_2-Tankstellen) ist es daher von entscheidendem Belang, neben der technischen Entwicklung auch die regulatorischen Rahmenbedingungen im Auge zu behalten.

Beispiel HyWheels Fulda:
Kundennutzen „grüner Transport“

In der Stadt Fulda wurde im Projekt HyWheels Wert auf „grüne Logistik“ gelegt. Durch das Umlegen der Mehrkosten für den Transport auf das Endprodukt kann sich ein wirtschaftlich tragfähiges Gesamtkonzept ergeben.

Anschaulich lässt sich der Ansatz an einer Tafel Schokolade erläutern. Die Kosten für den üblichen Transport einer Tafel Schokolade liegen bei ca. 17 % des Verkaufspreises. Ein emissionsfreier Transport ist mit Mehrkosten zwischen 10 – 30 % realisierbar. Dies würde den Preis der Schokolade nicht wesentlich verteuern. Lediglich etwa 5 % müsste der Kunde im Laden mehr bezahlen, also bspw. 1,15 € anstatt 1,10 €. Es wird davon ausgegangen, dass Kunden mit einem Bewusstsein für Nachhaltigkeit bereit sind, geringe Mehrkosten für ein Produkt zu tragen, dass sich durch einen emissionsfreien Transport auszeichnet. So kann H_2-Infrastruktur durch „grüne Logistik“ wirtschaftlich sein.

Elektrolysekosten
allgemein

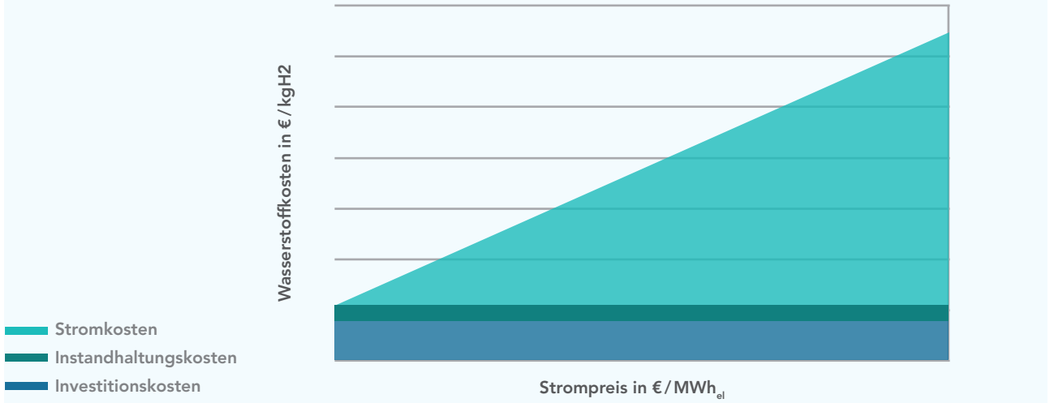


Abbildung 3-3: Qualitative Wasserstoffkosten in Abhängigkeit des Strompreises [15]

Elektrolysekosten
allgemein

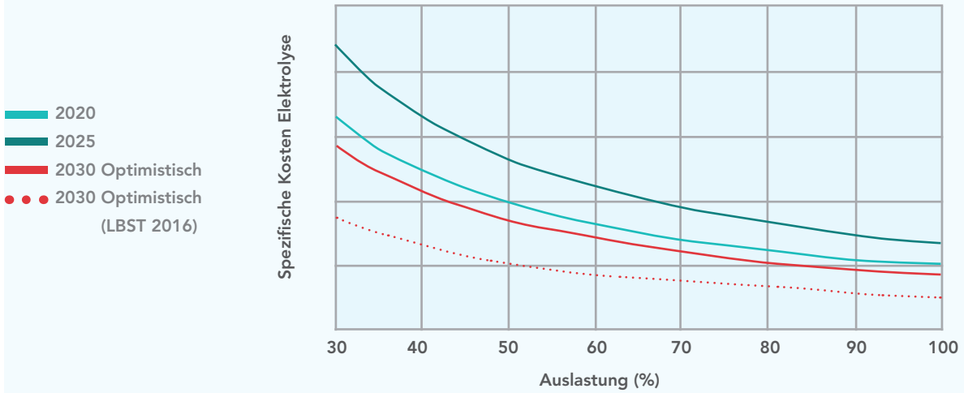


Abbildung 3-4: Qualitative Reduktion der Elektrolysekosten in Abhängigkeit der Auslastung [15]

PLANUNGSSCHRITTE ZUM AUFBAU DER WASSERSTOFF-INFRASTRUKTUR

Um eine emissionsfreie Mobilität auf Grundlage von Wasserstoff zu etablieren, sind neben einer Vielzahl von Produktionsstandorten auch weitere H_2-Tankstellen erforderlich. Der Weg zum Aufbau einer flächendeckenden Wasserstoffinfrastruktur setzt sich aus verschiedenen Planungsschritten zusammen. Dies umfasst einerseits die Auslegung und technische Dimensionierung der H_2-Tankstelle und andererseits die Berücksichtigung der regulatorischen Rahmenbedingungen.

Übersicht über wesentliche Schritte und Zeitablauf

Ein Tankstellenkonzept für eine geplante Wasserstofftankstelle wird durch verschiedene Parameter beeinflusst. In Abhängigkeit des zu betankenden Fahrzeugtyps müssen unterschiedliche Druckniveaus (700 bar für Pkw, 350 bar für Nutzfahrzeuge) bereitgestellt werden können. Die Anzahl der zu betankenden Fahrzeuge sowie die gewünschten Betankungsintervalle definieren die notwendige H_2-Speicherkapazität der Tankstelle. Ferner variieren die technische Auslegung und das Betankungskonzept, je nachdem wie viele Fahrzeuge direkt hintereinander (Back-to-Back) oder über den Tag verteilt betankt werden sollen. Auch die Art der Wasserstoffanlieferung (bspw. per Trailer, Pipeline oder die Produktion von Ort) beeinflussen die Dimensionen und Kosten der Tankstelle.
Es ist sinnvoll, sich frühzeitig mit möglichen Fördermitteln auseinanderzusetzen. Fördermittel für den Aufbau von Wasserstoffinfrastruktur werden sowohl auf EU-, Bundes- und Landesebene bereitgestellt. Eine Übersicht der jeweiligen Ansprechpartner*Innen sind im Kapitel 6 dargestellt.

Rechtliche Rahmenbedingungen für den Bau einer H_2-Tankstelle

Bei der Errichtung von H_2-Tankstellen und Elektrolyseuren sind verschiedene regulatorische Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Diese variieren in Abhängigkeit der gelagerten Wasserstoffmenge sowie in der Art der Wasserstoffversorgung. Die Vor-Ort-Produktion von Wasserstoff durch Elektrolyse ist zum Beispiel genehmigungsrechtlich anders zu bewerten als eine Anlieferung per Trailer. Der Betrieb von BZ-Fahrzeugen und H_2-Tankstellen setzt ein vollständig entwickeltes Produkt voraus, welches nach den einschlägigen Normen und Gesetzen gebaut ist.

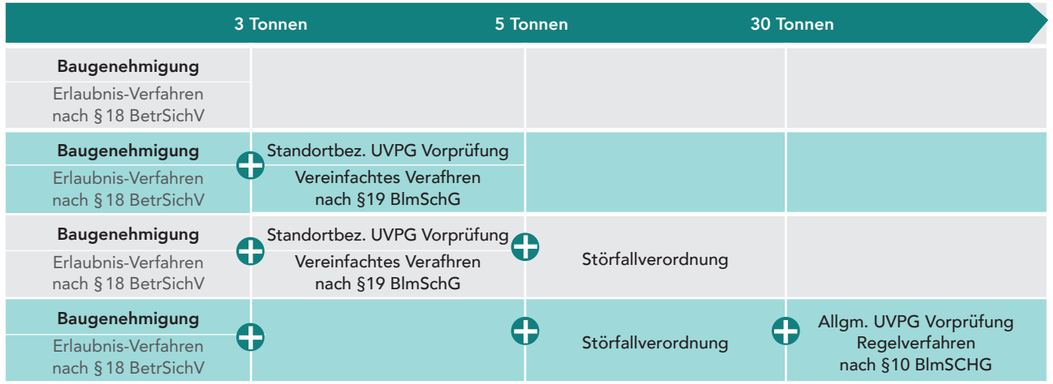


Abbildung 4-1: Regulatorische Rahmenbedingung für Tankstellen mit gelagertem Wasserstoff

Wasserstofftankstelle

Für den Bau einer Wasserstofftankstelle sind vier zentrale regulatorische Rahmenbedingungen zu beachten:

1. Betriebssicherheitsverordnung (§18)
2. Hessische Bauordnung (HBO)
3. Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG)
4. ggf. Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. Bundesimmissionsschutzverordnung) im Falle des Betriebs von Elektrolyseuren
5. Störfall-Verordnung (12. Bundesimmissionsschutzverordnung)

Außerdem ist die gelagerte Wasserstoffmenge vor Ort von Bedeutung. In Abbildung 4-1 sind die zentralen Regulatorischen Rahmenbedingungen in Abhängigkeit der Lagermengen aufgeführt.

Nach den aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen sind bei einer Lagermenge von Wasserstoff unter drei Tonnen ein Erlaubnisverfahren und die Baugenehmigung nach Hessischer Bauordnung zu beachten. Überschreitet die Lagermenge die drei Tonnen Wasserstoff ist ein vereinfachtes Verfahren nach BImSchG durchzuführen, ab einer Lagermenge von fünf Tonnen ist zusätzlich die StörfallV aus dem BImSchG zu berücksichtigen.[14]

[14] Die angegebenen Wasserstoff-Lagermengen gelten, sofern keine anderen gefährlichen Stoffe im Betrieb vorhanden sind. Ansonsten ist die Störfallverordnung anzuwenden, wenn die Mengenschwellen nach Anhang I der StörfallV unter Berücksichtigung der Additionsregel erreicht oder überschritten werden. Das bedeutet, dass eine H_2-Füllanlage die 5 t nicht erreichen muss, sofern noch andere gefährliche Stoffe im Betrieb vorhanden sind und unter Berücksichtigung der Additionsregel nach Anhang I Nr 5. der 12. BImSchV, die Summation der gefährlichen Stoffe eine Anwendung der StörfallV gebietet.

Ab einer Lagermenge von über 30 Tonnen ist das Regelverfahren nach BImSchG § 10 durchzuführen. Ein Regelverfahren nach BImSchG § 10 ist ebenfalls notwendig, wenn die Wasserstofferzeugung vor Ort durch einen Elektrolyseur erfolgt.[15] Wird bei der vor Ort Erzeugung eine Lagermenge von 5 t Wasserstoff nicht überschritten, ist die StörfallV nicht relevant.

Die Mindestbearbeitungszeit der Verfahren zur Sichtung der Unterlagen liegt bei drei Monaten. Lediglich das Regelverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung nimmt mindestens sieben Monate Bearbeitungszeit in Anspruch.
Ist für eine Tankstelle eine Genehmigung nach dem BImSchG erforderlich, so umfasst diese ebenfalls die erforderliche Baugenehmigung sowie die Erlaubnis nach der BetrSichV (Konzentrationswirkung).
Typischerweise dauert der Prozess von der Planung bis zur errichteten Wasserstofftankstelle zwei bis drei Jahre.
Wenn H_2-Tankstellen auf Flächen errichtet und betrieben werden, die dem öffentlich-rechtlichen Fachplanungsrecht unterliegen[16], ist die Durchführung eines Planfeststellungsverfahren erforderlich. Jedoch ist nicht die H_2-Tankstelle, sondern die fachplanerische Änderung der Eigenschaften der Fläche für ein solches Verfahren ausschlaggebend. Insoweit können verschiedenste Konstellationen in Betracht kommen. Ein solches Planfeststellungsverfahren umfasst die Genehmigungen nach BImSchG, BetrSichV und HBO. Die Genehmigung der H_2-Tankstelle wird dann im Rahmen eines Planfeststellungsbeschluss oder einer Plangenehmigung erteilt.
Dies kann beispielsweise auf Betriebsanlagen der Industriepark, Eisenbahn, Hafenanlagen oder Flugplätze zutreffen. Hierbei gilt es das dort vorhandene Fachpersonal mit einzubinden.

Elektrolyseur

Die Planung eines Elektrolyseurs umfasst hauptsächlich die Berücksichtigung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) einschließlich des Baugenehmigungsverfahrens. Für die Prüfung der erstellten Unterlagen infolge der Anforderungen des BImSchG ist das jeweilige Regierungspräsidium bzw. die Bezirksregierung in Hessen zuständig.

[15] Nach derzeitiger Rechtslage der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) ist die Leistung des Elektrolyseurs hierbei nicht ausschlaggebend. Für sehr kleine Elektrolyseure steht jedoch die Vorgabe für ein förmliches Genehmigungsverfahren nach § 10 BImSchG derzeit im Rahmen aktueller Beratungen in den Bund-/Länder-Gremien für Immissionsschutz auf dem Prüfstand.
[16] Dies gilt unter anderem für Bereiche des Schienenverkehrs und der Schifffahrt.

Kanalschubboot ELEKTRA an der Ausrüstungspier der Werft. Die Entwicklung des Schubboots ist ein Demonstrationsvorhaben. Zum Einsatz kommt ein vollelektrisches hybrides Antriebskonzept, bestehend aus Brennstoffzellen und Akkumulatoren. Es soll im Güterverkehr zwischen Berlin und Hamburg verkehren.

CHECKLISTE

Praktische Hilfestellung zum Bau einer Tankstelle

Die folgende Checkliste beinhaltet die grundlegenden Fragestellungen, die für die Planung einer H_2-Tankstelle relevant sind. Zum Beginn eines H_2-Tankstellen-Vorhabens sollten diese Fragen so genau wie möglich beantwortet werden, um in weiteren Gesprächen auch einen Kosten- und Zeithorizont abstecken zu können.

Informationen für die Planung der Tankstelle:

- Welche Arten von Fahrzeugen sollen an der Tankstelle betankt werden (Pkw, Busse, Lieferfahrzeuge (Transporter), Gabelstapler, Sonderfahrzeuge)? Verschiedene Fahrzeuge tanken unterschiedliche Mengen H_2 und können ihn sowohl flüssig oder gasförmig in unterschiedlichen Druckstufen nutzen.
- Welche Mengen Wasserstoff müssen erzeugt bzw. bereitgestellt werden, d.h. wie viele Fahrzeuge werden wie oft betankt (pro Tag, pro Woche)? Schätzen Sie möglichst genau ein, wie viele Fahrzeuge wie oft und in welchen Zeitabständen hintereinander betankt werden sollen.
- Wann muss der Wasserstoff bereitgestellt werden? Gibt es feste Betriebszeiten für die Tankstelle? Muss der Wasserstoff nur zu bestimmten Tageszeiten zur Verfügung stehen (z.B. morgens/abends/gleichmäßig verteilt über den Tag)?
- Wie muss der Wasserstoff an der Zapfsäule bereitgestellt werden (Flüssig, gasförmig bei 350 bar, gasförmig bei 700 bar)?
- Welche Kunden nutzen den H_2 an der geplanten Tankstelle? Wird es eine öffentlich zugängliche Tankstelle sein, an der alle tanken können, oder haben nur ausgesuchte Nutzer mit Genehmigung Zugriff?
- Wo steht die Tankstelle (Außerorts, Industriegebiet, Wohngebiet)? Davon abhängig sind bauliche Anforderungen und Genehmigungen.
- Fläche vor Ort verfügbar? Welche Einheiten (Erzeugung, Speicherung, Abgabe) umfasst die Tankstelle und wie groß ist der Platzbedarf dafür?
- Wer sind die Projektpartner und wie sind die Aufgaben untereinander verteilt?
- Wie ist der Projektzeitraum der Tankstelle geplant? Wird die Tankstelle nur für ein befristetes Pilotprojekt benötigt, oder ist eine dauerhafte, zukünftig gar erweiterbare Installation gewünscht?
- Welche Anträge und Genehmigungen für Bau und Betrieb werden benötigt?
- Welche Informationsstellen und Ansprechpartner gibt es?
- Wie kann die Tankstelle finanziert werden? Gibt es Fördermöglichkeiten?

Informationen für den Betrieb:

- Wer ist der Betreiber der Anlage (Privat, Dienstleister, Kommune)?
- Welcher Informations- und Schulungsbedarf ist für den Betreiber erforderlich?
- Wer übernimmt die Schulung?
- Wer ist Ansprechpartner, wenn Probleme im Betrieb auftauchen?
- Wer ist für die Wartung der Anlage nach Inbetriebnahme zuständig?

TIPP:
Zusätzliche Hilfestellungen bietet der Genehmigungsleitfaden der NOW (https://www.h2-genehmigung.de/).

PROJEKTBEISPIELE AUS HESSEN

H_2-Tankstelle der ESWE Verkehr

Für lange Fahrstrecken setzt die ESWE Verkehrsgesellschaft mbH auf Brennstoffzellenbusse und hat mit Hilfe der Linde AG bereits eine H_2-Tankstelle errichtet und in Betrieb genommen. Die Tankstelle auf dem Betriebshof dient der Versorgung einer im Aufbau befindlichen Flotte an Wasserstoffbussen.

Standort
Tankstelle auf dem Betriebshof des ESWE Verkehr

Ziel
Öffentlicher Personennahverkehr ohne Schadstoffbelastung für Mensch und Umwelt

Technische Daten
Versorgung von bis zu 8 Bussen
H_2-Abnahmemenge von max. 300 kg/d

Wasserstoff-Quelle
Hier wird grüner Wasserstoff aus Windenergie vertankt, der aus dem Energiepark Mainz per Trailer angeliefert wird.

Projektkosten & Förderungen
Fördermittel der Länder Hessen und Rheinland-Pfalz in Höhe von knapp über zwei Millionen Euro

Realisierungszeitraum
Bau 2019,
Inbetriebnahme Februar 2020,
Erster angemieteter Bus März 2020,
Einsatz weiterer Busse 2021

Quelle: [11]

Wasserstofftankstelle des Industriepark Höchst

Seit 2006 gibt es hier eine öffentlich zugängliche Wasserstofftankstelle, die über eine 1,7 km lange Wasserstoffpipeline mit Nebenprodukt-Wasserstoff aus dem Industriepark Höchst versorgt wird. Die Tankstelle wird 2021 ertüchtigt und bietet dann auch eine Wasserstoffkühlung für 350 bar Fahrzeuge.

Standort
Otto-Horn-Straße
Industriepark Höchst
65926 Frankfurt am Main

Ziel
Betankung von Brennstoffzellen-Pkw, Bussen sowie leichten und schweren Nutzfahrzeugen

Technische Daten
- Pipeline mit Nenndruck 1.000 bar
- zwei Zapfsäulen 350 oder 700 bar
- Bezahlung im Shop

Wasserstoff-Quelle
Nebenprodukt aus der Chlor-Alkali-Elektrolyse des Industrieparks Höchst

Projektkosten & Förderungen
Aufbau der Tankstelle im EU-Projekt ZeroRegio, Kofinanzierung der Tankstellen-Ertüchtigung durch Europäischen Fonds für regionale Entwicklung

Realisierungszeitraum
Seit 2006 in Betrieb

Quelle: [12]

Brennstoffzellenzug-Flotte des Rhein-Main-Verkehrsverbund

Der Rhein-Main Verkehrsverbund (RMV) beschafft durch seine Tochter, die Fahrzeugmanagement Region Frankfurt RheinMain, 27 neue Brennstoffzellenzüge von Alstom (iLint 54) um. Die Versorgung der Flotte mit Wasserstoff erfolgt durch Infraserv Höchst, wobei die erforderliche Wasserstofftankstelle ebenfalls auf dem Gelände des Industriepark Höchst entstehen wird. Es handelt sich dabei um eine der ersten Wasserstofftankstellen für Schienenfahrzeuge überhaupt weltweit.

Standort
Einsatz im Taunusnetz des RMV

Ziel
Reduktion der lokalen Emissionen bei Einsatz moderner und größerer Fahrzeuge

Technische Daten
Zugtyp: Coradia iLint 54 mit 160 Sitzplätzen pro Fahrzeug
Reichweite bis zu 1.000 km

Wasserstoff-Quelle
Aus der Elektrolyse des Industrieparks Höchst wird H_2 erzeugt und die Flotte betankt.

Projektkosten & Förderungen
Gesamtauftragsvolumen beträgt ca. 500 Millionen Euro für die Fahrzeugflotte, deren Instandhaltung und Energieversorgung über 25 Jahre

Realisierungszeitraum
Einsatz ab Dezember 2022 geplant

Quelle: [13] und [2]

Vorreiter bei der Errichtung von H_2-Tankstellen (Roth)

Die Roth Holding GmbH & Co. KG plant im Gewerbegebiet in Gießen eine neue Wasserstoff-Tankstelle. Teil der Anlage ist ein Elektrolyseur zur Produktion von Wasserstoff.

Standort
Schiffenbergerweg 123
35394 Gießen

Ziel
Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen (Pkw, Lkw oder Bussen) mit dem erzeugten Wasserstoff aus der Elektrolyseanlage.

Technische Daten
3 MW Elektrolyseanlage, bis zu 600 Nm³/h Wasserstoffproduktion, ca. 600 m² Anlagenfläche (ohne Betankungsfläche)

Wasserstoff-Quelle
Vor Ort-Wasserstofferzeugung per Elektrolyse. Die Stromversorgung der Elektrolyseure erfolgt über Photovoltaik.

Projektkosten & Förderungen
ca. vier Millionen Euro (H_2-Tankstelle & Elektrolyseur, exkl. Planungs-, Bau- und Genehmigungskosten)

Realisierungszeitraum
Im Jahre 2021

INTERVIEW MIT CHRISTIAN WINZENHÖLER

Christian Winzenhöler, Geschäftsführer der Omnibusbetrieb Winzenhöler GmbH & Co. KG, Groß-Zimmern, betreibt u.a. seit 2017 den Werksverkehr des Industriepark Höchst (IPH) in Frankfurt-Höchst mit Brennstoffzellenbussen.

Welche Vorteile bietet der Betrieb von Brennstoffzellen-Bussen?
Durch den Einsatz von BZ-Bussen ist eine Verbesserung der Luftqualität an der Strecke möglich. Dazu wird gleichzeitig ein Beitrag zur Reduzierung der globalen Emissionen geleistet. Der geräusch- und vibrationsarme Betrieb ermöglicht eine Steigerung des Fahrkomforts, welcher nicht nur von den Fahrgästen, sondern auch vom Fahrpersonal selbst, geschätzt wird. Auch entlang der Linien wird der reduzierte Geräuschpegel, vor allem in der Beschleunigungsphase an den Haltestellen, von dem Bürger positiv bewertet. Nicht zuletzt stellen BZ-Busse eine wesentlich sauberere Technik im Vergleich zum Dieselbus dar. Das ermöglicht eine eindeutige Verbesserung der Arbeitsbedingungen in der Werkstatt.

Welche Schwierigkeiten/Probleme sind in Ihren Projekten aufgetreten?
Die öffentliche Wasserstofftankstelle am IPH hat während des ersten Betriebsjahr eine deutlich niedrigere Verfügbarkeit im Vergleich zu der Referenztechnik Diesel gezeigt. Der Einsatz einer redundanten Lösung für die Betankung hat allerdings die Nutzung der Infrastruktur ermöglicht. Die neue Tankstelle in Wiesbaden ermöglich derzeit eine 100% Redundanz, was einen stabilen Betrieb sicherstellt.

Was können Sie empfehlen bei der Beschaffung und dem Betrieb von Brennstoffzellenbussen?
Die Übernahme von Service- und Reparaturtätigkeiten ermöglicht hohe Verfügbarkeiten und einen stabilen Betrieb der Fahrzeuge. Die neue Technik überzeugt sowohl das Fahrpersonal als auch die Mitarbeiter in der Werkstatt, welche in den meisten Fälle neugierig sind und sich engagiert für die Umstellung auf E-Antriebe einsetzten.

Wie ist die Resonanz Ihrer Kunden auf die Brennstoffzellen-Busse?
Omnibusbetrieb Winzenhöler ist das erste Busunternehmen im Großraum Frankfurt, welches Brennstoffzellenbusse in die eigene Flotte integriert hat. Neben den BZ-Bussen im IPH werden seit Mai 2019 ein weiterer BZ-Bus im Rahmen eines Pilotprojektes des Rhein-Main-Verkehrsverbunds (RMV) zwischen Darmstadt und Groß-Umstadt eingesetzt und seit Mai 2020 bedient ein weiteres Fahrzeug das Verkehrsgebiet der Lokalen Nahverkehrsgesellschaft (LNVG) Groß-Gerau. Die BZ-Busse wurden außerdem im Rahmen der E-Bus-Roadshow in Hessen bereitgestellt. Die E-Bus-Roadshow fand von 8. bis 17. Juli 2019 in den Städten Marburg, Gießen, Biedenkopf, Langen, Neu-Isenburg, Hofheim am Taunus und Bensheim statt. Die Bürger sowie Entscheider der ÖPNV-Branche konnten Testfahrten mit dem BZ-Bus erleben.

Ebenso haben Experten der Hessen Agentur sowie Technologiepartner an den Veranstaltungen teilgenommen. Derzeit sind die Busse von anderen Verkehrsunternehmen für kurze Probebetriebe und Testfahrten stark nachgefragt.

Haben Sie in der Zukunft vor, Ihre gesamte Busflotte durch Brennstoffzellen-Busse zu ersetzen? Welche Pläne verfolgen Sie dafür?
Winzenhöler setzt sich aktiv für die Erprobung und Einführung emissionsfreier Mobilitätslösungen ein.
In Zukunft ist eine Umstellung auf Brennstoffzellenbusse angedacht, erste Vorbereitungsarbeiten für die Anschaffung von weiteren vier Bussen sind gestartet.

„Das Tanken von Wasserstoff geht vergleichsweise schnell und ist quasi ‚kinderleicht'",
sagt der erfahrene Brennstoffzellenbus-Betreiber Christian Winzenhöler.

WEITERFÜHRENDE KONTAKTE

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen
Kaiser-Friedrich-Ring 75
65185 Wiesbaden
E-Mail: info@wirtschaft.hessen.de
Tel.: +49 611 815 0

LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH
Wettinerstraße 3
65189 Wiesbaden
E-Mail: lea@lea-hessen.de
Tel.: +49 611 95017 8400
www.lea-hessen.de

Hessen

Innovationsförderung Hessen
Zielgruppe: kleine und mittlere Unternehmen aus Hessen, die mit Partnern (Unternehmen, Hochschulen, Forschungseinrichtungen) angewandte und innovative Forschungs- und Entwicklungsprojekte realisieren.
Weitere Informationen: www.innovationsfoerderung-hessen.de

H2BZ-Initiative Hessen
Die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Initiative Hessen e.V. (H2BZ-Initiative Hessen) ist das hessische Kompetenznetzwerk im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, in dem rund 100 Unternehmen, Hochschulen und Institutionen zusammengeschlossen sind. Ziel ist es, die vorhandenen Kompetenzen zu stärken, die Akteure zu vernetzen sowie bei der Entwicklung von Demonstrationsprojekten und geeigneten Anwendungsfeldern der Technologie zu unterstützen. Weitere Informationen: www.H2BZ-Hessen.de

Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Initiative Hessen e.V.
c/o Überlandwerk Groß-Gerau GmbH
Friedrichstraße 45
64521 Groß-Gerau
E-Mail: info@H2BZ-Hessen.de
Tel.: +49 6152 718 102

Förderprogramm Elektrobusse
Hessen fördert die Anschaffung von Elektrobussen und den Aufbau der Ladeinfrastruktur. Antragsberechtigt sind die hessischen Landkreise, die hessischen kreisfreien Städte, Kommunen sowie öffentliche und private Verkehrsunternehmen, die Aufgaben des ÖPNV erfüllen.
Weitere Informationen: www.innovationsfoerderung-hessen.de/elektrobusse

Energetische Förderung im Rahmen des Hessischen Energiegesetzes (HEG)
Weitere Informationen: www.wirtschaft.hessen.de

Bund

Marktaktivierung im Rahmen des NIP II
Investitionszuschuss Studien / Beratung
Weitere Informationen: www.now-gmbh.de | Tel.: +49 30 311 61 16 00

KfW-Umweltprogramm Programmnr. 240/241
Kredite
Anschaffung von Elektro-, Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen sowie umweltfreundlicher Schienen- und Wasserfahrzeuge und die entsprechende Lade- bzw. Tankinfrastruktur
Weitere Informationen: www.kfw.de | Tel.: +49 800 539 9001

Forschungsförderung im 7. Energieforschungsprogramm „Innovation für die Energiewende“
Investitionszuschuss Studien / Beratung
Systemübergreifende Forschungsthemen der Energiewende, Energienutzung und -bereitstellung, Systemintegration, Energiewende im Verkehr. Erprobung und Demonstration innovativer Konzepte und Geschäftsmodelle.
Weitere Informationen: www.bmwi.de | Tel.: +49 30 18 615 0

BAFA – Elektromobilität (Umweltbonus und Innovationsprämie)
Investitionszuschuss
Förderung des Erwerbs (Kauf oder Leasing) von neuen und gebrauchten Brennstoffzellenfahrzeugen. Fahrzeuge müssen auf der Liste des BAFA stehen. Die zusätzliche „Innovationsprämie“ verdoppelt ab sofort den staatlichen Anteil.
Weitere Informationen: www.bafa.de | Tel.: +49 6196 908 1009

Förderung von energieeffizienten und/oder CO_2-armen schweren Nutzfahrzeugen in Unternehmen des Güterverkehrs
Investitionszuschuss
Anschaffung von Lkw und Sattelzugmaschinen, die für den Güterverkehr bestimmt sind (> 7,5t) und in Serie produziert werden (in einem EU-Mitgliedsstaat). Die Umrüstung von Diesel- auf Elektromotor wird ebenfalls gefördert.
Weitere Informationen: www.bmvi.de | Tel.: +49 30 18 300 0

Europa

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU & FCH 2 JU)
Forschung & Entwicklung, Studien / Beratung
Ideen und Forschung im Bereich Brennstoffzellensysteme: Effizienteren ökologischen und wirtschaftlichen Nutzen schaffen, höhere Wirkungsgrade bei Materialeinsparung erzielen
Weitere Informationen: www.fch.europa.eu

LITERATURVERZEICHNIS

[1] Allianz pro Schiene. 2020. Treibhausgas-Emissionen: Klima schonen? Bahn fahren. Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen in Europa (EU27+UK). https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/umwelt/treibhausgas-emissionen/. Accessed 20 November 2020.

[2] Alstom. 2020. Startschuss für die erste Wasserstofftankstelle für Passagierzüge in Hessen. https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2020/10/startschuss-fuer-die-erste-wasserstofftankstelle-fuer-passagierzuege. Accessed 18 November 2020.

[3] Anthony Wang, Kees van der Leun, Daan Peters, Maud Buseman. 2020. European Hydrogen Backbone. How a dedicated Hydrogen Infrastructure can be created.

[4] BMBF-Internetredaktion. 2020. Woher soll der Grüne Wasserstoff kommen? - BMBF. https://www.bmbf.de/de/woher-soll-der-gruene-wasserstoff-kommen-11766.html. Accessed 5 October 2020.

[5] C. Yang and J. Ogden. 2007. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. International Journal of Hydrogen Energy (Feb. 2007), pp. 268-286.

[6] CEP. 2020. H2 Infrastruktur. Ein Tankstellennetz für Deutschland. https://cleanenergypartnership.de/h2-infrastruktur/tankstellennetz/?scroll=true. Accessed 26 November 2020.

[7] DB Energie GmbH. 2020. Potenzialbeschreibung Wasserstofftransport über das Schienennetz.

[8] DIRECTIVE (EU) 2018/ 2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL - of 11 December 2018 - on the promotion of the use of energy from renewable sources. RED II.

[9] DIRECTIVE (EU) 2019/ 1161 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL - of 20 June 2019 - amending Directive 2009/ 33/ EC on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles.

[10] Dr. Benjamin Reuter, Dr. Michael Faltenbacher, Dr. Oliver Schuller, Nicole Whitehouse, Simon Whitehouse. New Bus ReFuelling for European HydrogenBus Depots. Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling.

[11] ESWE Verkehr. 2020. Zukunftsprojekt Wasserstofftankstelle offiziell gestartet. https://www.eswe-verkehr.de/news/eintrag/zukunftsprojekt-wasserstofftankstelle-offiziell-gestartet.html. Accessed 10 November 2020.

[12] Industriepark Höchst Pressearbeit. 2017. Umweltfreundliche Mobilität mit Wasserstoff.

[13] Industriepark Höchst Pressearbeit. 2019. Infraserv Höchst errichtet Wasserstofftankstelle für Züge im Industriepark Höchst.

[14] Kapetaki Z., Miranda Barbosa E. Carbon Capture Utilisation and Storage Technology Development Report 2018 (CCUS) EUR 29909 EN. European Comission, JRC118297, Luxembourg.

[15] M. Kristuf, J. Kuhn, L. Maier. H2R - Wasserstoff Rheinland. Feinkonzept zum Wettbewerb. Modellregion Wasserstoff-Mobilität NRW.

[16] Menn, A. 2020. Grüner Wasserstoff für Energiewende: Transportlösung aus Erlangen. Wirtschaftswoche (Sep. 2020).

[17] Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. 2020. Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen. MWIDE20-001.

[18] Mit Wasserstoff bringen wir gemeinsam die Energiewende voran. GET H2 – Initiative für den Aufbau einer bundesweiten H_2-Infrastruktur.

[19] NOW GmbH. Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV. Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte.

[20] Otto, A. Workshop Wasserstoffspeicherung in Niedertemperatur-Metallhydriden.

[21] Philipp Rose, Martin Wietschel, Till Gnann. Working Paper Sustainability and Innovation No. S 09/2020. Wie könnte ein Tankstellenaufbau für Brennstoffzellen-Lkw in Deutschland aussehen?

[22] Prof. Dr. Michael Beckmann, Christoph Pieper. 2019. VGB Congress. Technologie-Reifegrad von technischen Prozessen der „Energiewende“: Ergebnisse einer Studie des wissenschaftlichen Beirates des VGB, Munich Unterschleißheim / Germany.

[23] Reuß, M., Forschungszentrum Jülich GmbH. 2019. Technoökonomische Analyse alternativer Wasserstoffinfrastruktur.

[24] Robinius, M., Markewitz, P., Lopion, P. et al. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. (Kurzfassung). Forschungszentrum Jülich GmbH.

[25] Shell Deutschland Oil GmbH. Shell Wasserstoffstudie -Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H2.

[26] VERORDNUNG (EU) 2019/1242 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO2-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates.

[27] VERORDNUNG (EU) 2019/631 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO2-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011 (Neufassung).

IMPRESSUM

Autoren:
Marcel Corneille | Lena Maier
EMCEL GmbH
Am Wassermann 28a | 50829 Köln
www.emcel.com

Redaktion:
Oliver Eich | Caroline Schäfer | Markus Lämmer
LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH
Wettinerstraße 3 | 65189 Wiesbaden
www.lea-hessen.de | lea@lea-hessen.de

Herausgeber:
LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen

LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH
Wettinerstraße 3 | 65189 Wiesbaden
www.lea-hessen.de | lea@lea-hessen.de

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und die Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in der Veröffentlichung geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit der Meinung des Herausgebers übereinstimmen.

© Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen (HMWEVW), Vervielfältigung und Nachdruck – auch auszugsweise – nur nach vorheriger schriftlicher Genehmigung.

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung von Funktions- bzw. personenbezogenen Bezeichnungen, wie zum Beispiel Teilnehmer/Innen, verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung für alle Geschlechter.

Gestaltung, Satz & Grafiken:
Sabine Becker Graphik & Design, Wiesbaden
sabine_becker_design@t-online.de

Lektorat:
n.n.

Druck:
A&M Service GmbH, Elz
www.a-m-service.de

ClimatePartner°
klimaneutral

Gedruckt auf RecyStar Natur, hergestellt aus 100% Altpapier, ausgezeichnet mit den Umweltzertifikaten **Blauer Engel, FSC-Recycling** und der **EU-Blume.**

Auflage: 1.500 Exemplare
August 2021

Fotos:
Umschlag, Seite 1: Ivan Mogilevchik, Adobe Stock/ Bearbeitung: S. Becker | Seite 2: naulicreative, Irina Strelnikova, macrovector, ikuvshinov, macrovector, Siberian Art; alle Adobe Stock/Bearbeitung: S. Becker | Seite 4: HMWEVW – Oliver Rüther | Seite 11: Irina Strelnikova, Adobe Stock | Seite 12: ITM Power | Seite 13: macrovector, Adobe Stock | Seite 15: Siberian Art, Adobe Stock | Seite 16: Golden Sikorka , Adobe Stock/Bearbeitung S. Becker/dabflyer, Adobe Stock / Taras Livyy, Adobe Stock /Bearbeitung S. Becker | Seite 18: ikuvshinov, Adobe Stock / Igor, Adobe Stock | Seite 20: FNB Gas e.V. / Bearbeitung: S. Becker | Seite 22/46/Umschlag, Seite 4: ESWE Verkehr | Seite 27: Sera Hydrogen | Seite 30: HA Hessen Agentur GmbH - Stefan Wildhirt | Seite 36: LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH – Markus Lämmer | Seite 38: vikpit74, Adobe Stock, andrew_rybalko, Adobe Stock | Seite 43: EBMS-TUB | Seite 45: macrovector, Adobe Stock | Seite 48/50: Infraserv GmbH & Co. Höchst KG | Seite 49: Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH | Seite 52: macrovector, Adobe Stock/Bearbeitung: S. Becker/ Siberian Art, Adobe Stock/Bearbeitung: S. Becker | Seite 53: HA Hessen Agentur GmbH – Jan Michael Hosan

KOORDINIERT DURCH

LEA HESSEN
LANDES ENERGIE AGENTUR