



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Informationssammlung

Einsatzbedingungen von Wasserstoff IV

Wasserstoffanwendungen

Autorin: Dr. Julia Rothe



Institut für Sicherheitstechnik / Schiffssicherheit e.V.

Friedrich-Barnewitz-Str. 4c

18119 Rostock-Warnemünde

Telefon: +49 (0)381 77876 140

E-Mail: institut@schiffssicherheit.de

Internet: www.schiffssicherheit.de

Inhaltsverzeichnis

1	Verbrennungsmotor	3
2	Brennstoffzellenantrieb	4
3	Wasserstofffahrzeuge	7
3.1	<i>Wasserstoffautos</i>	7
3.2	<i>Wasserstoffmotorräder</i>	8
3.3	<i>Wasserstoffbusse</i>	8
3.4	<i>Wasserstoff-Lkw</i>	9
3.5	<i>Wasserstoffflugzeuge</i>	10
3.6	<i>Wasserstoffzüge</i>	12
3.7	<i>Wasserstoffschiffe</i>	13
3.8	<i>Sonderfahrzeuge mit Wasserstoffbetrieb</i>	14
4	Wasserstofftankstellen	18
5	Wasserstoff in der Energieversorgung	20
5.1	<i>Gaskraftwerke</i>	20
5.2	<i>Fernwärme</i>	20
5.3	<i>Mobile Wasserstoffgeneratoren/Notstromaggregate</i>	21
6	Wasserstoff in der Stahlverhüttung	22
7	Zusammenfassung	23
8	Literatur	23



1 Verbrennungsmotor

Mit gezielten Modifikationen lässt sich der klassische Hubkolbenmotor auch mit alternativen Kraftstoffen wie Wasserstoff betreiben.¹ Seit DE RIVAZ zu Beginn des 19. Jahrhunderts erstmals Wasserstoff zur Bewegung eines Hubkolbens nutzte und damit ein Fahrzeug in Bewegung setzte,² beschäftigten sich zahlreiche namhafte Fahrzeughersteller zumindest zeitweise mit der Entwicklung von Wasserstoffverbrennungsmotoren.³ In den 2000er-Jahren testete BMW mit der Hydrogen-7-Flotte wasserstoffbetriebene Fahrzeuge. Das Projekt wurde jedoch eingestellt – unter anderem wegen der aufwändigen Handhabung von flüssigem Wasserstoff (LH₂).⁴

Der große Vorteil des H₂-Verbrennungsmotors liegt in der technischen Reife der zugrunde liegenden Motorplattform. Automobilhersteller verfügen über langjährige Erfahrung, bestehende Produktionslinien können weitgehend genutzt werden, und es werden keine seltenen oder kritischen Rohstoffe wie Lithium (Batterien) oder Platin (Brennstoffzelle) benötigt. Auch die Anforderungen an die Reinheit des Wasserstoffs sind niedriger als bei anderen Technologien.⁵

Allerdings besteht derzeit eine zentrale technische Herausforderung in der Abgasnachbehandlung. Bei der Verbrennung von Wasserstoff entstehen Stickoxide – je nach Verbrennungsbedingungen bis zu 8000 ppm.⁶ Für deren Reduktion werden derzeit verschiedene Ansätze wie Abgasrückführung (EGR) oder selektive katalytische Reduktion (SCR) erprobt. Die Forschung in diesem Bereich ist noch nicht abgeschlossen, was den breiten Einsatz bislang einschränkt.

Das Abgas besteht hauptsächlich aus Stickstoff, Sauerstoff und Wasser mit einem geringen Anteil von unverbranntem Wasserstoff (ca. 0,03 %). Obwohl Wasserstoff indirekt als Klimagas wirkt, gibt es bisher keine Bestrebungen, die Freisetzung zu reduzieren.

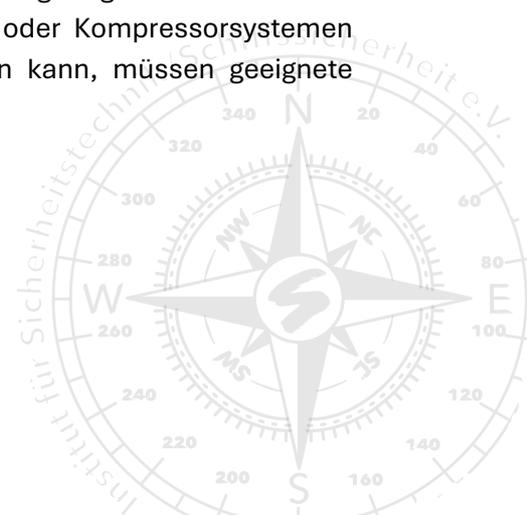
Ein weiterer Nachteil des Wasserstoff-Verbrennungsmotors ist der begrenzte Wirkungsgrad im Vergleich zu anderen Antriebstechnologien: Nur etwa 40–45 % der im Wasserstoff gespeicherten Energie werden in mechanische Leistung umgesetzt. Damit liegt der Wasserstoff-Verbrennungsmotor auf dem Niveau moderner Dieselmotoren, aber deutlich unter Brennstoffzellen (ca. 60 %) und batterieelektrischen Antrieben (bis zu 90 %).

Trotzdem bietet die Technologie Potenzial für spezifische Einsatzbereiche, in denen batterieelektrische oder brennstoffzellenbasierte Systeme an technische Grenzen stoßen – etwa in der Landwirtschaft, im Baugewerbe, im maritimen Bereich oder im militärischen Einsatz. Entsprechend investieren mehrere große Motorenhersteller in Pilotprojekte zur Weiterentwicklung.⁷

Technisch erfordert der Wasserstoffbetrieb bestimmte Anpassungen: Um Rückzündungen zu vermeiden, wird in der Regel Direkteinspritzung bevorzugt. Wegen der geringen volumetrischen Energiedichte von Wasserstoff ist eine Aufladung mittels Turbo- oder Kompressorsystemen notwendig. Da Wasserstoff zur Versprödung von Metallen führen kann, müssen geeignete Materialien eingesetzt werden.

Tabelle 1. Eigenschaften von Wasserstoffmotoren.

Kategorie	Typ
Motorart	Meist Ottomotor mit Fremdzündung



Taktprinzip	Fast immer 4-Takter
Aufladung	Häufig mit Turbo/Kompressor
Kraftstoffsystem	Direkteinspritzung bevorzugt
Abgasreinigung	NO _x -Abgasnachbehandlung notwendig

Fazit: Im Regelbetrieb entweicht Wasserstoff dem Verbrennungsmotor als Schlupf. Das Abgas besteht aus Stickstoff, Sauerstoff und Wasser sowie 0,03 % Wasserstoff und Stickoxiden. Es können im Realabgas zudem Spuren von Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid oder Kohlenwasserstoffen nachgewiesen werden, die auf einen Schmieröleintrag in den Brennraum zurückzuführen sind. Bei einer Verbrennungstemperatur von ca. 2130 °C⁸ ist auch das Abgas entsprechend heiß.

2 Brennstoffzellenantrieb

Im Gegensatz zur Verbrennung im Wasserstoffmotor wandelt eine Wasserstoff-Brennstoffzelle die chemische Energie des Wasserstoffs zusammen mit Sauerstoff direkt in elektrische Energie und Wasser um – ohne Verbrennung und ohne mechanische Umwandlungsverluste. Dadurch erreicht die Brennstoffzelle einen höheren Wirkungsgrad und verursacht keine lokalen Schadstoffemissionen, insbesondere kein NO_x. Die meisten Brennstoffzellen-Fahrzeuge führen lediglich einen kleinen Wasserauffangtank mit, der sich bei Bedarf entleeren lässt.

Zum Antrieb von Fahrzeugen wird der erzeugte Gleichstrom über einen Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt und entweder direkt in einen Elektromotor eingespeist oder zur Ladung einer Traktionsbatterie verwendet. Die Brennstoffzelle übernimmt damit die Rolle eines kontinuierlichen Stromgenerators.

Nur wenn der eingesetzte Wasserstoff nicht auf erneuerbarem Wege, also nicht „grün“, hergestellt wurde, entstehen im Gesamtzyklus CO₂-Emissionen. Da der eigentliche Zellprozess selbst jedoch keinerlei Schadstoffe emittiert, werden Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb (FCEVs) als emissionsfrei eingestuft.⁹

Nachteile:

Komplexer innerer Aufbau: Eine Brennstoffzelle besteht aus mehreren fein geschichteten Elektroden, die durch Membranen und ionenleitende Elektrolyte voneinander getrennt sind. Das erfordert ein hohes Maß an Material- und Fertigungspräzision, wie sie bislang nur wenige Automobilhersteller in großem Maßstab beherrschen. Hinzu kommt der Einsatz seltener und teurer Katalysatorrohstoffe wie Platin, Ruthenium, Palladium oder entsprechende Legierungen. Alternative, kostengünstigere Materialien wie Nickel, Wolframkarbid, Molybdänsulfid oder Phthalocyanin sind noch nicht marktreif.²⁰ Zudem besitzt die Brennstoffzelle eine geringere Leistungsdichte als ein konventioneller Verbrennungsmotor.

Empfindlichkeit auf Verunreinigungen: Partikel oder Restgase im Wasserstoff sowie Vibrationen beeinträchtigen die Lebensdauer und Leistungsfähigkeit der Zelle.

Thermomanagement: Die meisten Brennstoffzellen arbeiten bei Temperaturen zwischen 80 °C und 100 °C. Das ist für klassische Fahrzeugkühlsysteme zu kalt, weil diese über Temperaturunterschiede zur Umgebung funktionieren und Kühlwasser nicht viel kälter als 60–

70 °C sein kann.⁵ Bei hoher Leistungsanforderung produziert die Brennstoffzelle entsprechend viel Wärme, die aufwendig abgeführt werden muss, um z. B. Materialgrenzen einzuhalten oder die Membranstabilität zu gewährleisten. Die niedrige Betriebstemperatur erfordert größere Kühlflächen (z. B. größere Radiatoren), höhere Kühlmittelmengen und mehr Energieaufwand für Lüfter und Pumpen. Das macht das Thermomanagement technisch aufwendig und schwerer ins Fahrzeug integrierbar.¹⁰

Es existieren verschiedene Typen der Brennstoffzelle, die sich vor allem durch den verwendeten Elektrolyten unterscheiden. Dieser bestimmt die Betriebstemperatur und beeinflusst dadurch die Systemanforderungen und typischen Einsatzgebiete (siehe Tabelle 2).

Die technologische Reife der verschiedenen Brennstoffzellen variiert erheblich. Während einige Technologien bereits im praktischen Einsatz stehen, befinden sich andere noch in der Entwicklung oder sind nur in Nischenanwendungen wirtschaftlich sinnvoll.

Am etabliertesten ist die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) im niedrigen Temperaturbereich. Sie reagiert schnell auf Laständerungen und eignet sich daher besonders für den mobilen Einsatz. Auch im Bereich stationärer Kleinanlagen zur Energieversorgung wird sie zunehmend verwendet.¹¹

Die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) ist für den stationären Einsatz prädestiniert, vor allem zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung (KWK) in Industrie, Gebäuden oder Rechenzentren. Sie arbeitet bei sehr hohen Temperaturen, was hohe elektrische Wirkungsgrade ermöglicht und besonders in Kombination mit Wärmenutzung oder Hybridkonzepten (z. B. mit Gasturbine) sehr hohe Gesamteffizienzen erlaubt. Da eine interne Reformierung möglich ist, erlaubt die SOFC eine Nutzung von verschiedenen Brennstoffen, z. B. Erdgas oder Biogas. Allerdings benötigt sie lange Aufheizzeiten und ist mechanisch empfindlicher. Es gibt erste kommerzielle Produkte am Markt. Auch für die Anwendung zur Bordstromerzeugung auf großen Schiffen wird die SOFC diskutiert.¹²

Die Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC) wird vor allem in stationären Anwendungen genutzt, insbesondere in Japan und den USA. Sie gilt als technologisch zuverlässig und langlebig, wird aber zunehmend von effizienteren Systemen wie der SOFC verdrängt. Sie ist technisch ausgereift, aber weniger verbreitet.¹³

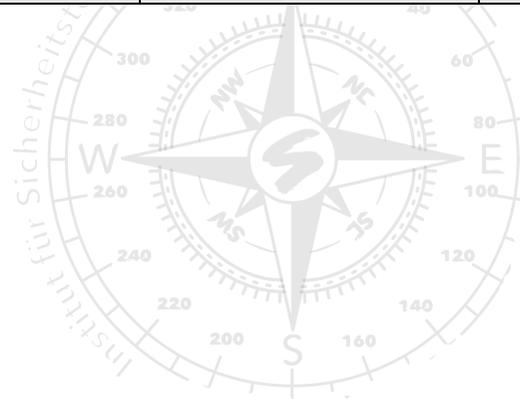
Weniger weit entwickelt sind die Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen (MCFC), die ebenfalls stationär bei hohen Temperaturen arbeiten, aber noch Herausforderungen bei Haltbarkeit und Materialstabilität aufweisen. Sie erlauben ebenfalls interne Reformierung von kohlenwasserstoffhaltigen Gasen. Die MCFC soll sich in Zukunft in lokalen und auch größeren Kraftwerken einsetzen lassen.¹⁴

Die Alkalische Brennstoffzelle (AFC) wurde früher in der Raumfahrt genutzt, spielt heute aber aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber CO₂ kaum noch eine Rolle im zivilen Bereich.¹⁵



Tabelle 2. Arten von Brennstoffzellen.^{16,17,18,19}

Zelltyp	Elektrolyt	Betriebstemperatur	Wirkungsgrad (elektrisch)	Vorteile	Nachteile	Einsatzgebiete
PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	Protonenleitende Polymermembran (z. B. Nafion)	10–100 °C (Niedertemperatur) 120–200 °C (Hochtemperatur)	35–60 %	Schnelles Startverhalten, kompakt, hohe Leistungsdichte	Empfindlich gegenüber CO, Platin benötigt	Pkw, Lkw, Busse, Schiffe
PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	Flüssige Phosphorsäure	110–220 °C	38–40 %	Thermische Nutzung möglich, langlebig	Lange Startzeit, teure Komponenten	Stationäre Kraftwerke, Spitäler
SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	Festelektrolyt (z. B. YSZ)	450–1.000 °C	47–70 %	Hohe Effizienz, Brennstoffflexibilität	Langsames Hochfahren, Materialalterung	Industrie, KWK, Marine
MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	Schmelzkarbonatgemisch	550–700 °C	48–70 %	CO ₂ aus Abgas nutzbar, hohe Gesamtwirkungsgrade	Korrosion, geringe Lebensdauer	Große stationäre Anlagen
AFC (Alkaline Fuel Cell)	Kalilauge (KOH)	150–220 °C	40–60 %	Sehr effizient bei reinem H ₂ /O ₂	CO ₂ -empfindlich, komplexe CO ₂ -Abtrennung	Raumfahrt (z. B. Apollo, ISS)



3 Wasserstofffahrzeuge

Wasserstoff-Fahrzeuge haben sich bisher kaum am Markt durchgesetzt, unter anderem weil die Technik bisher zu teuer und die Infrastruktur nicht ausreichend ausgebaut ist.²⁰ Zum Antrieb kann der Wasserstoff entweder mittels Brennstoffzellen oder in Verbrennungsmotoren umgesetzt werden. Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs) sind derzeit technisch ausgereifter, marktverfügbarer und weiterverbreiteter als Wasserstoff-Verbrennungsmotoren.

3.1 Wasserstoffautos

Derzeit sind in Deutschland zwei Wasserstoffautos serienmäßig erhältlich: der **Toyota Mirai** und der **Hyundai Nexo**.^{21,22} Beide sind mit PEM-Brennstoffzellen ausgestattet und werden seit Mitte 2021 in Deutschland angeboten, konnten sich jedoch bislang kaum durchsetzen.

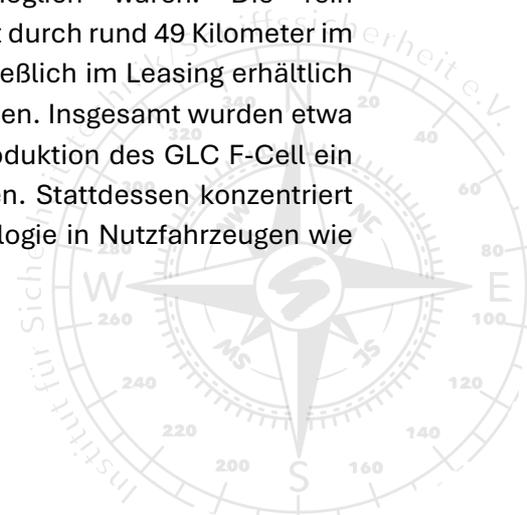
Im Jahr 2024 wurden in Deutschland lediglich 148 **Mirai** neu zugelassen. Der Wasserstofftank fasst 5,6 Kilogramm bei 700 bar und ermöglicht eine Reichweite von bis zu 555 Kilometern.²³ Der Nexo enthält 6,33 Kilogramm Wasserstoff bei 700 bar in drei gleich großen Karbontanks, die unter dem Kofferraumboden und dem Rücksitz montiert sind. Er hat eine Reichweite von 756 Kilometern.²⁴



Abbildung 1. Toyota MIRAI II.²⁵

Es wurden auch Fahrzeuge bereits wieder vom Markt genommen.

Der **Mercedes-Benz GLC F-Cell** wurde von 2018 bis 2020 in begrenzter Stückzahl produziert. Er kombinierte erstmals eine Wasserstoff-Brennstoffzelle mit einem Plug-in-Hybrid-System, wodurch sowohl Wasserstoff- als auch Batteriebetrieb möglich waren. Die rein wasserstoffbasierte Reichweite lag bei etwa 437 Kilometern, ergänzt durch rund 49 Kilometer im batterieelektrischen Modus.²⁶ Allerdings war das Fahrzeug ausschließlich im Leasing erhältlich und richtete sich primär an ausgewählte Flottenkunden und Behörden. Insgesamt wurden etwa 3.000 Exemplare produziert. Im April 2020 stellte Mercedes die Produktion des GLC F-Cell ein und kündigte an, vorerst keine weiteren Wasserstoff-Pkw zu planen. Stattdessen konzentriert sich das Unternehmen auf den Einsatz der Brennstoffzellentechnologie in Nutzfahrzeugen wie Lkw und Bussen.²⁷



Der **Honda Clarity** wurde von 2016 bis 2021 produziert und war ebenfalls mit PEM-Brennstoffzellen ausgestattet.²⁸ Er wurde primär in Kalifornien, Japan und im Rahmen europäischer Demonstrationsprojekte eingesetzt. In Deutschland war der Clarity Fuel Cell nicht regulär erhältlich; einzelne Fahrzeuge wurden jedoch im Rahmen von Pilotprojekten, wie dem HyFIVE-Programm, getestet.²⁹ Er wurde eingestellt, weil Honda sich verstärkt auf batterieelektrische Fahrzeuge konzentrieren will.

BMW kooperiert mit Toyota und hat infolgedessen, die X5-Prototypen entwickelt. Derzeit ist das Fahrzeug jedoch nicht käuflich erhältlich, sondern Teil einer internationalen Pilotflotte von unter 100 Fahrzeugen, die zu Demonstrations- und Testzwecken eingesetzt wird.³⁰

Bis zum Ende des Jahres 2024 wurden weltweit etwas mehr als 100.000 Wasserstoff-Brennstoffzellen-Autos gekauft,³¹ wobei die Verkaufszahlen seit 2022 fallen.³²

3.2 Wasserstoffmotorräder

Die japanischen Motorradhersteller Kawasaki, Honda, Yamaha und Suzuki entwickeln im Forschungsbündnis HySE gemeinsam Wasserstoff-Verbrennungsmotoren.³³

- ⇒ Kawasaki: Entwicklung des Kraftstoffversorgungssystems
- ⇒ Yamaha: Forschung an Wasserstoffbetankungssystemen
- ⇒ Honda und Suzuki: Forschung an wasserstoffbetriebenen Motoren

Kawasaki hat mit der **Ninja H2 HySE** das weltweit erste wasserstoffbetriebene Motorrad mit Verbrennungsmotor vorgestellt. Die Maschine basiert auf dem 998 cm³-Reihenvierzylindermotor der Ninja H2, der für die direkte Einspritzung von Wasserstoff modifiziert wurde. Der Wasserstoff (knapp 2 kg) wird in speziellen Tanks bei 700 bar an den Seiten des Hecks gespeichert. Ein Serienstart ist für die frühen 2030er Jahre geplant.³⁴

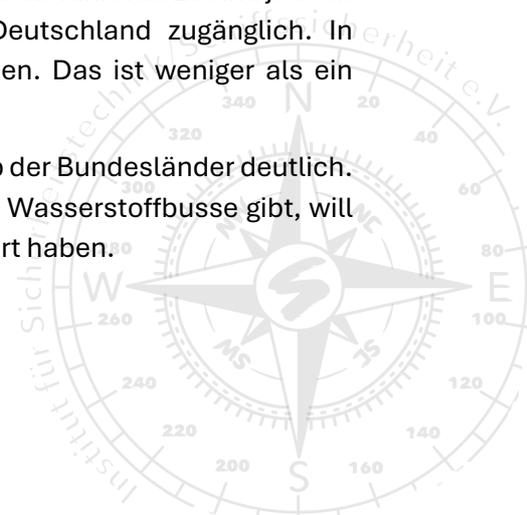
Darüber hinaus hat das Konsortium mit dem **HySE-X2**, einem wasserstoffbetriebenen Buggy, bei der Dakar Rallye 2025 in der Kategorie „Mission 1000“ den zweiten Platz belegte. Dieses Fahrzeug nutzt denselben Wasserstoffmotor wie die Ninja H2 HySE.

3.3 Wasserstoffbusse

Die Kombination aus hoher Reichweite, kurzer Tankzeit und emissionsfreiem Betrieb macht die Wasserstoffbusse besonders attraktiv für längere Linien, in ländlichen Regionen sowie für Betreiber, die eine Alternative zur batterieelektrischen Ladeinfrastruktur suchen.

Die Umstellung auf Wasserstoffbusse scheint weltweit voranzuschreiten. Vorreiter ist China mit 5.400 Bussen im Einsatz in 2022.³⁵ Innerhalb Europas gilt Deutschland als führend. Es sind jedoch keine Erhebungen über die Anzahl von Wasserstoffbussen in Deutschland zugänglich. In Recherchen konnten Angaben über ca. 370 Busse gefunden werden. Das ist weniger als ein halbes Prozent der in Deutschland gemeldeten Kraftomnibusse.³⁶

Der Ausbau der Wasserstoffbusflotten unterscheidet sich innerhalb der Bundesländer deutlich. Während es in Berlin, Sachsen oder Sachsen-Anhalt noch gar keine Wasserstoffbusse gibt, will NRW noch bis Ende 2025 insgesamt 500 Wasserstoffbusse eingeführt haben.



In Deutschland stammen die meisten Wasserstoffbusse von etablierten Herstellern wie CaetanoBus (Portugal), Van Hool (Belgien), Solaris (Polen), Mercedes-Benz (Deutschland, Modell Citaro FuelCELL), sowie zunehmend auch Wrightbus (UK). Diese Hersteller setzen durchweg auf PEM-Brennstoffzellen von Toyota oder Ballard Power Systems. Die Reichweiten der Busse liegen typischerweise zwischen 350 und 450 Kilometern pro Tankfüllung. Die Wasserstofftanks fassen meist zwischen 30 und 40 Kilogramm Wasserstoff und sind in der Regel auf 350 bar Druck ausgelegt, wobei einige Modelle auch 700-bar-Systeme verwenden. Die Betankung dauert im Regelfall etwa 10 Minuten.

Allen Projekten ist gemein, dass sie durch Fördermittel realisiert wurden. Es gibt zahlreiche Fälle, in denen Gemeinden wieder von der Umstellung auf Wasserstoffbusse abgerückt sind, weil es die entsprechenden Fördermittel nicht mehr gab.



Abbildung 2. Wasserstoffbus Urbino 18 Hydrogen des polnischen Herstellers Solaris.³⁷

Die Fernbusanbieter (Eurolines, IC Bus, Regiojet) haben bisher keine Wasserstoffbusse in ihren Flotten. Flixbus hat 2019 Wasserstoff-Fernbusse angekündigt, die gibt aber noch nicht.³⁸

3.4 Wasserstoff-Lkw

Anfang 2025 sind in Deutschland insgesamt 264 Wasserstoff-Lkw zugelassen, ein deutlicher Zuwachs im Vergleich zu nur 5 Fahrzeugen im Jahr 2022.³⁹ Europaweit planen derzeit 62 Unternehmen, darunter Nutzfahrzeughersteller, Energieversorger und Logistikunternehmen, bis 2030 rund 100.000 Wasserstoff-Lkw in Betrieb zu nehmen.⁴⁰

Aktuell wird Wasserstoff in Lkw typischerweise gasförmig bei 350 bar gespeichert, mit einer Tankkapazität von etwa 30 bis 40 Kilogramm. An Speicherung bei höheren Drücken bis 1000 bar und flüssiger Speicherung wird geforscht.⁴¹ So arbeiten zum Beispiel Linde und Daimler Truck gemeinsam an einer Betankungsstrategie mit „sLH₂“ (subcooled liquid hydrogen) und streben an, diese als allgemeinen Betankungsstandard für wasserstoffbetriebene Lkw zu etablieren.⁴²

Als Antriebstechnologien kommen sowohl Brennstoffzellen als auch Wasserstoff-Verbrennungsmotoren zum Einsatz. Die meisten Hersteller – darunter Hyundai, FES und Enginius – setzen auf PEM-Brennstoffzellen (Proton Exchange Membrane), die Reichweiten zwischen 350 und 600 Kilometern ermöglichen.⁴³ Parallel entwickeln Unternehmen wie MAN, BMW und Volvo

Lkw mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren, wobei sich diese Technologie noch in einem früheren Entwicklungsstadium befindet.⁴⁴



Abbildung 3. Wasserstoffbetriebener Lkw mit Wasserstoffdruckflaschen hinter der vorgeklappten Fahrerkabine.⁴⁵

3.5 Wasserstoffflugzeuge

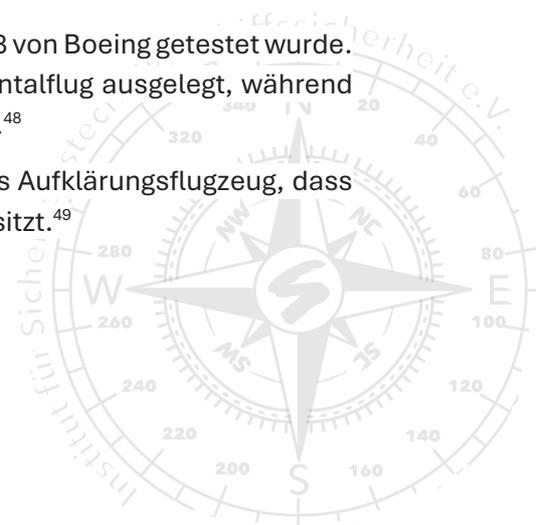
Bisher befinden sich Wasserstoffflugzeuge noch in der Erprobungs- und Entwicklungsphase.

Die **Tupolew Tu-155** war das weltweit erste Experimentalflugzeug, das (teilweise) mit Wasserstoff betrieben wurde. Sie wurde in der Sowjetunion entwickelt und absolvierte ihren ersten Flug mit flüssigem Wasserstoff als Treibstoff 1988. Zwei der drei Triebwerke nutzten Kerosin und das dritte Wasserstoff. Zu einem Einsatz im regulären Flugdienst kam es nicht und die Forschung wurde bei Zusammenbruch der Sowjetunion eingestellt.⁴⁶

Der **e-Genius** ist ein 2011 an der Universität Stuttgart entwickeltes zweisitziges Forschungsflugzeug mit wasserstoffbetriebener PEM-Brennstoffzelle, die einen elektrischen Propeller antreibt.⁴⁷ Der Wasserstoff ist in leichten, druckfesten Verbundstoffbehältern bei 350 bar an Bord gespeichert. Mit dieser Kombination erreichte der zweisitzige Forschungsfieger eine Reichweite von über 750 km und eine Höchstgeschwindigkeit von rund 200 km/h. Das Projekt diente primär der Erprobung von Leichtbauweisen, Energiemanagement und Flugsteuerung für künftige CO₂-neutrale Flugzeuge.

Die **Phantom Works** ist ein bemanntes Elektroflugzeug, dass ab 2008 von Boeing getestet wurde. Die Leistungsabgabe der Brennstoffzellen war dabei für den Horizontalflug ausgelegt, während der Steigflug durch eine Lithium-Ionen-Batterie gewährleistet wurde.⁴⁸

Die **Phantom Eye** (2010), ebenfalls von Boeing, ist ein unbemanntes Aufklärungsflugzeug, dass ein Antriebssystem aus zwei Wasserstoff-Verbrennungsmotoren besitzt.⁴⁹



Die **Antares DLR-H2** wurde bis 2009 von Lange Aviation und dem DLR entwickelt. Sie ist das erste bemannte Wasserstoffflugzeug, das auch beim Start ausschließlich Brennstoffzellenantrieb nutzt. Der Demonstrationsflug betrug 380 km.⁵⁰

Die **HY4** ist das erste viersitzige Wasserstoffflugzeug, das ausschließlich mit Brennstoffzellen und Batteriesystem angetrieben wird.⁵¹

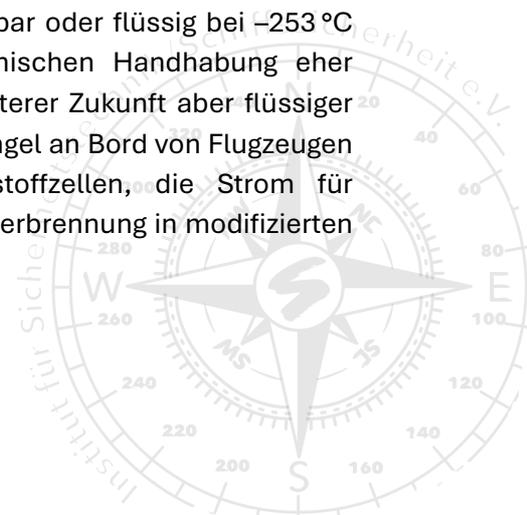


Abbildung 4. Prototyp HY4 (S5-MHY) beim Erstflug am 29. September 2016 in Stuttgart.⁵²

Aktuell fliegt das britische Unternehmen ZeroAvia mit kleineren Maschinen, etwa einer umgebauten Dornier 228 mit 19 Sitzplätzen, die von einer wasserstoffbasierten Brennstoffzelle angetrieben wird.⁵³

Die deutsche DLR sowie Airbus arbeiten ebenfalls an Wasserstofftechnologien – Airbus verfolgt mit dem Projekt ZEROe das Ziel, bis 2035 ein marktreifes Wasserstoffflugzeug zu präsentieren. Dieses Programm wurde jedoch Anfang 2025 auf unbestimmte Zeit pausiert, „wegen langsamer Fortschritte und hoher Herausforderungen“.⁵⁴

Wasserstoff kann in Flugzeugen entweder gasförmig bei 350–700 bar oder flüssig bei $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ gespeichert werden. Bisher wird aufgrund der leichteren technischen Handhabung eher komprimierter Wasserstoff verwendet. Mutmaßlich wird in entfernterer Zukunft aber flüssiger Wasserstoff aufgrund der höheren Energiedichte und dem Platzmangel an Bord von Flugzeugen bevorzugt. Der Verbrauch erfolgt entweder über PEM-Brennstoffzellen, die Strom für Elektromotoren erzeugen, oder – weniger verbreitet – über direkte Verbrennung in modifizierten Turbinen.



Die Herausforderungen liegen in der sicheren Lagerung, dem Volumenbedarf im Flugzeugrumpf, der Entwicklung geeigneter Tanks und der flughafenseitigen Infrastruktur. Dennoch werden Wasserstoffflugzeuge mittelfristig als realistische Option betrachtet, besonders im Regionalflugverkehr.

3.6 Wasserstoffzüge

Wasserstoffbetriebene Züge gelten zwar als vielversprechende Technologie für den klimafreundlichen Schienenverkehr, ihr Durchbruch steht jedoch weiterhin aus. Trotz vereinzelter Einsätze in Ländern wie Deutschland, Österreich und Japan seit 2018 und der Verfügbarkeit serienreifer Modelle ist der tatsächliche Flottenanteil verschwindend gering. Insbesondere auf nicht elektrifizierten Strecken – die in Deutschland noch rund 40 % des Netzes ausmachen – wären sie eine sinnvolle Alternative. Doch fehlende Wasserstofftankstellen, hohe Investitionskosten und unklare politische Förderbedingungen bremsen den Ausbau. Hinzu kommt, dass erste Betriebserfahrungen zeigen: Die Züge sind anfälliger für Störungen als herkömmliche Dieseltriebwagen, was ihre Alltagstauglichkeit in Frage stellt. Von einem breiten Einsatz sind Wasserstoffzüge also noch weit entfernt.

Der weltweit erste Personenzug in Serienfertigung, der von einer Wasserstoff-Brennstoffzelle angetrieben wird, fuhr in Deutschland.⁵⁵ Die von Alstom entwickelten Züge fahren seit 2018 zwischen Cuxhaven und Buxtehude, aber ihr Betrieb wurde zunächst immer weiter eingeschränkt und Ende 2024 aufgrund von Wasserstofflieferengpässen zunächst eingestellt.⁵⁶ Insgesamt hat die Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen LNVG 14 Wasserstoffzüge des Typs Coradia iLint bestellt, es ist aber unklar, wieviel davon bereits auf der Schiene unterwegs sind.⁵⁷



Abbildung 5. Der Brennstoffzellenzug Cordia iLint der Firma Alstom.



Insgesamt kann der iLint 125 kg komprimierten Wasserstoff bei 350 bar in zwei Tanks auf dem Dach speichern. Die Brennstoffzellen mit zweimal 200 kW Leistung stammen von Hydrogenics. Die PEM-Brennstoffzellen werden in Deutschland von Cummins produziert.⁵⁸

Versuche, den Schienenverkehr im Taunus durch Wasserstoffzüge zu ergänzen, sind aufgrund der Störungsanfälligkeit der iLint-Modelle gescheitert.⁵⁹

Andere Hersteller wie Stadler Rail, Siemens oder PESA sind noch in der Entwicklung serienreifer Wasserstoffzüge.⁶⁰

Straßenbahnen

Berichten zu Folge fährt die Straßenbahn in Oranjestad in Aruba seit 2013 mit Wasserstoff. Es verkehren vier Triebwagen mit einer Kombination aus Brennstoffzellenantrieb und batterieelektrischem Antrieb.⁶¹

In Görlitz wird an der ersten Straßenbahn Europas gebaut, die bis Ende 2026 in Betrieb gehen soll.⁶²

3.7 Wasserstoffschiffe

Wasserstoffbetriebene Binnenschiffe befinden sich derzeit in einer frühen Entwicklungsphase. Weltweit lassen sich knapp 30 Schiffe identifizieren, die ganz oder teilweise mit Wasserstoff betrieben werden.⁶³ Darunter finden sich unterschiedlichste Schiffstypen: Fahrgastschiffe, Fähren, Schlepper, Schubboote, Forschungsschiffe, Frachtschiffe, Tanker, Versorger, U-Boote und sogar militärische Einheiten – am häufigsten sind bislang Fahrgastschiffe im Einsatz. Etwa die Hälfte dieser Projekte entfällt auf den Binnenbereich, die andere Hälfte auf den Seeverkehr, wobei letzterer meist in Küstennähe bleibt.

Als Antrieb dient in der Regel eine PEM-Brennstoffzelle (Proton Exchange Membrane), die den Wasserstoff emissionsfrei in elektrische Energie umwandelt. Seltener kommen Wasserstoff-Verbrennungsmotoren zum Einsatz, dann meist als Dual-Fuel-Variante. Der Wasserstoff wird überwiegend gasförmig unter hohem Druck gespeichert, typischerweise zwischen 200 und 500 bar. Flüssige Speicherung bei -253 °C ist bisher selten, kommt aber vor. Eine Besonderheit stellen U-Boote dar, bei denen teilweise Metallhydridspeicher eingesetzt werden.

Beispiele aus der Praxis sind das niederländische Frachtschiff **Antonie**, das im Binneneinsatz zwischen Rotterdam und Delfzijl verkehrt und mit einer 120-kW-Brennstoffzelle betrieben wird, sowie die **Hydroville**, eine Pendlerfähre aus Belgien, die Wasserstoff als Zusatzantrieb nutzt. In Deutschland wurde das Projekt **Elektra** realisiert – ein Schubschiff, das mit einer Kombination aus Batterien und einer Wasserstoff-Brennstoffzelle ausgerüstet ist.





Abbildung 6. Schubschiff Elektra.

Fazit: Ein typisches wasserstoffbetriebenes Schiff ist ein Binnen-Fahrgastschiff auf Kurzstrecken mit Brennstoffzellenantrieb, das den Wasserstoff in 350-Bar-Druckspeichern auf dem Oberdeck lagert.

3.8 Sonderfahrzeuge mit Wasserstoffbetrieb

Wasserstoff wird zunehmend auch in ungewöhnlichen oder spezialisierten Fahrzeugtypen erprobt – vor allem dort, wo elektrisches Laden schwierig ist oder lange Einsatzzeiten gefordert sind.

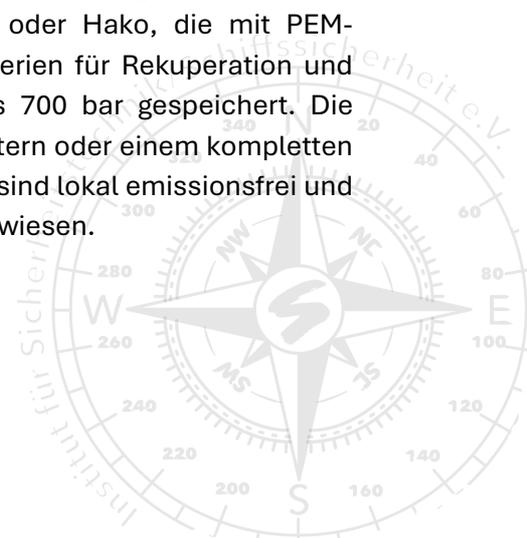
Müllabfuhr und Kehrmaschinen

Eine Reihe von Städten setzt bereits Abfallsammelfahrzeug mit Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb ein. Unter anderem in Heidelberg, Ludwigshafen, Mannheim,⁶⁴ Leipzig, Lübeck, Neumünster, Freiburg und im Landkreis Emsland.^{65,66,67}

Die Abfallsammelfahrzeuge sind immer mit einer Kombination aus Brennstoffzellen- und elektrischem Antrieb ausgestattet und haben 200–350 km Reichweite.

Genauso befinden sich andere kommunale Fahrzeuge wie wasserstoffbetriebene Kehrmaschinen, Sperrmüllautos oder Stadtgrün-Fahrzeuge derzeit in einer frühen, aber wachsenden Entwicklungsphase. Erste Fahrzeuge sind bereits im kommunalen Test- oder Praxiseinsatz – etwa in Städten wie Lüneburg, Bremen oder Ingolstadt.⁶⁸ Häufig handelt es sich um umgerüstete Standard-Maschinen, etwa von FAUN, Bucher oder Hako, die mit PEM-Brennstoffzellen ausgestattet sind, meist in Kombination mit Batterien für Rekuperation und Kurzstreckenbetrieb. Der Wasserstoff wird gasförmig bei 350 bis 700 bar gespeichert. Die Reichweiten liegen – je nach Tankvolumen – bei 150 bis 300 Kilometern oder einem kompletten Tag im kommunalen Einsatz. In der Praxis zeigt sich: Die Fahrzeuge sind lokal emissionsfrei und leise, aber noch teuer und auf eine geeignete Tankinfrastruktur angewiesen.

Bagger und Baumaschinen



Erste Prototypen wasserstoffbetriebener Bagger und Baumaschinen wurden unter anderem von JCB, Komatsu, Caterpillar, Hyundai Construction Equipment und SANY vorgestellt.⁶⁹ Diese Maschinen nutzen meist eine PEM-Brennstoffzelle zur Stromerzeugung, die Elektromotoren antreibt – bei einigen Modellen kommt auch ein Wasserstoff-Verbrennungsmotor zum Einsatz, etwa bei JCB.⁷⁰ Der Wasserstoff wird typischerweise gasförmig bei 350 bar gespeichert; bei größeren Geräten wird auch über flüssige Speicherung nachgedacht.



Abbildung 7. Mobile Wasserstoffbetankungsanlage von JCB bei der Betankung eines wasserstoffbetriebenen Baggers.

Traktoren und Landwirtschaftsfahrzeuge

Wasserstoffbetriebene Landwirtschaftsfahrzeuge stehen noch am Anfang der Marktentwicklung, obwohl bereits 2011 erste Konzepte, etwa von New Holland, vorgestellt wurden. Dennoch kommen sie bislang kaum in der Praxis zum Einsatz. Hersteller wie New Holland und John Deere arbeiten an Prototypen oder kleinen Serien.⁷¹ Die Fahrzeuge nutzen überwiegend PEM-Brennstoffzellen, die elektrische Antriebe versorgen; vereinzelt werden auch Wasserstoff-Verbrennungsmotoren getestet – etwa bei New Holland. Der Wasserstoff wird bei New Holland gasförmig bei 350 bar gespeichert und die Tanks fassen 8,2 kg. John Deere speichert den Wasserstoff als Ammoniak, der vor der Brennstoffzelle mittels Cracker in Wasserstoff umgewandelt wird. Erste Anwendungen finden sich im Versuchsbetrieb, z. B. auf Modellhöfen, Forschungseinrichtungen oder im kommunalen Agrardienst. Die Reichweite variiert je nach Einsatzprofil, liegt aber oft bei einem Arbeitstag unter Volllast.





Abbildung 8. Wasserstofftraktor von New Holland.

Gabelstapler und Reachstacker

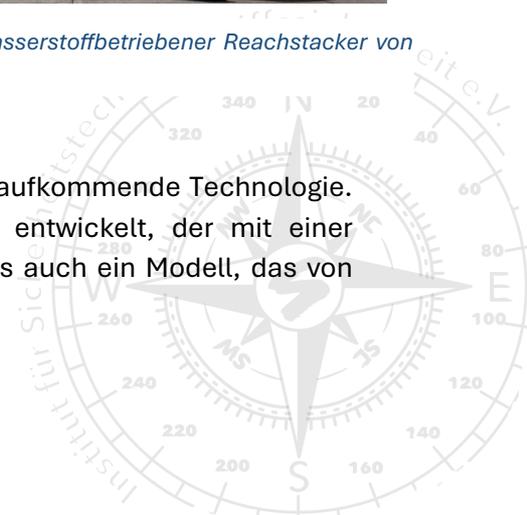
Im Bereich Logistik kommen zunehmend wasserstoffbetriebene Geräte wie Gabelstapler und Reachstacker zum Einsatz – besonders dort, wo emissionsfreier Betrieb in Innenräumen erforderlich ist. Marktführer wie Plug Power, Hyster-Yale und Toyota Material Handling bieten wasserstoffbetriebene Geräte mit PEM-Brennstoffzellen an.⁷² Der Wasserstoff wird in 350-bar-Tanks gespeichert. Diese Fahrzeuge können in weniger als fünf Minuten betankt werden. Obwohl die Technologie in großen Logistikzentren wie bei Amazon und Walmart bereits im Einsatz ist,⁷³ bleibt sie in Europa und auf Baustellen bislang ein Nischenprodukt,⁷⁴ vor allem wegen hoher Kosten und fehlender Tankinfrastruktur.



Abbildung 9. Brennstoffzelleneinheit von Plug Power für Gabelstapler und ein wasserstoffbetriebener Reachstacker von Hyster Yale.

Schneeraupen

Schneeraupen, die ihre Energie aus Wasserstoff ziehen, sind eine aufkommende Technologie. Das Unternehmen Prinoth hat sowohl einen Leitwolf h2Motion entwickelt, der mit einer Brennstoffzelle und einem elektrischen Antrieb ausgestattet ist, als auch ein Modell, das von



einem 6-Zylinder-Reihenmotor von FPT Industrial mit Wasserstoffverbrennung angetrieben wird.⁷⁵



Abbildung 10. Schneeraupe von Pinoth mit Wasserstoffantrieb.



4 Wasserstofftankstellen

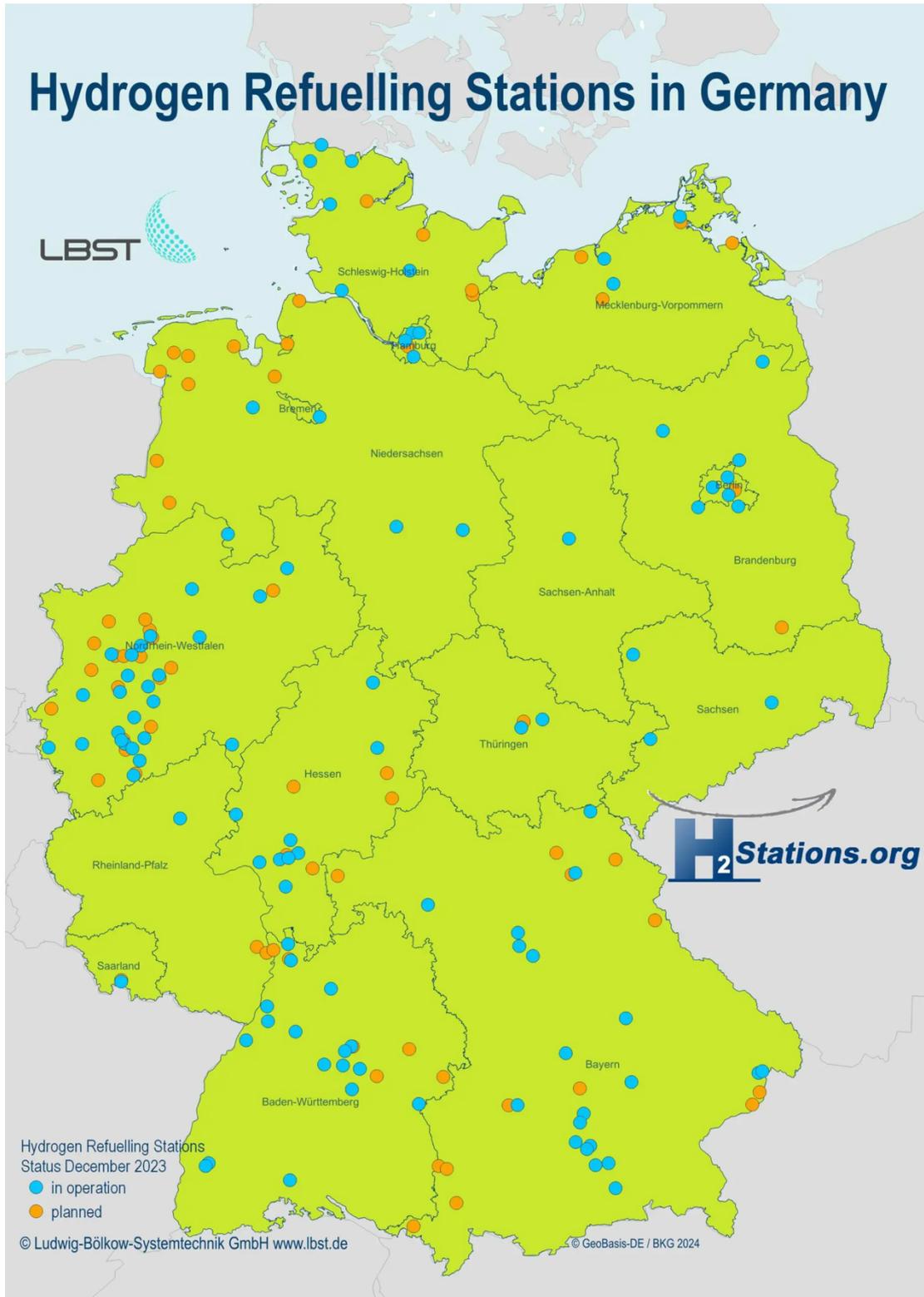


Abbildung 11. Übersicht über die Standorte der Wasserstofftankstellen in Deutschland, Stand Dezember 2023.⁷⁶

Ende 2023 waren weltweit insgesamt 1.068 Wasserstofftankstellen in 35 Ländern in Betrieb.⁷⁷ Obwohl eine Beschleunigung des weltweiten Ausbaus vorausgesagt wurde, ist diese Zahl bis Anfang 2025 nur auf 1160 gestiegen.⁷⁸

In Deutschland schrumpft das Netz an Wasserstofftankstellen. Aktuell sind (Stand 05/25) 79 Tankstellen offiziell in Betrieb, geöffnet sind davon allerdings nur 69.⁷⁹ Im Vergleich wird an ca.14.400 Tankstellen konventioneller Kraftstoff angeboten. Die ursprüngliche Hoffnung auf einen Massenmarkt für Wasserstoff-Pkw hat sich nicht erfüllt – rund 1800 Fahrzeuge sind in Deutschland zugelassen. Die meisten bestehenden Tankstellen sind technisch veraltet, eine flächendeckende Modernisierung lohnt sich angesichts der geringen Nachfrage nicht.

Zudem wird grüner Wasserstoff, wenn er überhaupt verfügbar ist, zunehmend als strategischer Energieträger für Industrie und Schwerlastverkehr betrachtet. Während Pkw-Wasserstoff mit 700 bar getankt wird, benötigen Lkw und Busse Wasserstoff bei 350 bar. Diese technischen Unterschiede führen dazu, dass sich der Ausbau auf Tankstellen für den gewerblichen Verkehr konzentriert. Während Pkw-Standorte zurückgebaut werden, entstehen gezielt neue Wasserstoff-Hubs für den Schwerlastverkehr – etwa in Düsseldorf und Ludwigshafen.

In der Regel wird der Wasserstoff vor Ort in Tube-Trailern bei 200–500 bar gelagert. Vor der Betankung wird der gasförmige Wasserstoff in einem Verdichtungsprozess auf 950 bzw. 500 bar komprimiert und entweder in einem Mittel- oder Hochdruckpufferspeicher zwischengelagert. Bei 700-bar-Systemen ist eine Vorkühlung auf -40 °C erforderlich, um Kompressionseffekte auszugleichen.⁸⁰

Öffentliche Tankstellen für flüssigen Wasserstoff befinden sich im Aufbau bzw. in der Testphase. In Deutschland etwa arbeiten Unternehmen wie Linde und Daimler Truck gemeinsam an einem solchen Konzept unter dem Namen "sLH₂" (subcooled Liquid Hydrogen), um Lkw effizienter und schneller betanken zu können. Erste Pilotanlagen existieren, etwa auf dem Daimler-Testgelände in Wörth.⁴²



Abbildung 12. Erste öffentliche Lkw-Tankstelle für flüssigen Wasserstoff auf dem Industriegelände in Wörth.

Fazit: Am wahrscheinlichsten wird eine LKW/Bus-Tankstelle in Zukunft zu finden sein, an der die Fahrzeuge mit komprimiertem Wasserstoff bei 350 bar versorgt werden. Dafür wird der

Wasserstoff zunächst auf 500 bar komprimiert und könnte also mit 350 oder 500 bar bei ca. Umgebungstemperatur austreten.

5 Wasserstoff in der Energieversorgung

5.1 Gaskraftwerke

In Gaskraftwerken soll Wasserstoff künftig fossiles Erdgas teilweise oder vollständig ersetzen. Innerhalb der nächsten 8 Jahre sollen alle bestehenden und neuen Kraftwerke auf Wasserstoff umgestellt werden. Die zentralen Probleme sind die Verfügbarkeit des Wasserstoffs und fehlende technische Reife der Wasserstoffturbinen. Für einen dauerhaften Betrieb mit reinem Wasserstoff sind aktuell keine marktreifen Turbinen verfügbar; bestehende Modelle können lediglich eine begrenzte Menge H_2 beimischen. Es gibt zwar bereits kleinere Gasturbinen, die mit reinem Wasserstoff betrieben werden können, aber die Hochskalierung ist bisher nicht möglich.⁸¹

Die führenden Hersteller Siemens Energy, General Electric und Mitsubishi Electric arbeiten an der Weiterentwicklung ihrer Verbrennungstechnologien.⁸²

Die Bedingungen, bei denen Wasserstoff in Gasturbinenkraftwerken eingesetzt werden wird, sind unklar. Da Wasserstoff bei 2130 °C verbrennt, kann diese Temperatur ein erster Anhaltspunkt sein. Dabei wird es vermutlich auch zu einem Druckanstieg in der Brennkammer kommen.

5.2 Fernwärme

Die Nutzung von Wasserstoff in Fernwärmenetzen steckt noch in den Anfängen. Theoretisch kann Wasserstoff in Blockheizkraftwerken (BHKW) als Ersatz für Erdgas dienen – derzeit wird dies in mehreren Forschungsprojekten getestet. Auch eine Kombination mit Power-to-Heat ist denkbar, bei der Strom aus Wasserstoff über Heizstäbe oder Wärmepumpen in Wärme umgewandelt wird. Einige Anbieter, wie 2G geben bereits an, wasserstoffbetriebene BHKWs in ihrer Produktpalette zu haben.⁸³ Der Wasserstoff kann direkt verbrannt oder per Brennstoffzelle genutzt werden.





Abbildung 13. "H₂-ready"-Blockheizkraftwerk der Firma 2G.

5.3 Mobile Wasserstoffgeneratoren/Notstromaggregate

Mobile H₂-Generatoren bieten netzunabhängige Stromversorgung auf Baustellen, Events oder in Krisengebieten sowie als Notstromaggregate in Rechenzentren, Krankenhäusern oder Telekommunikationsanlagen. Sie kombinieren meist PEM-Brennstoffzellen mit kompakten Drucktanks (200–350 bar). Die elektrische Leistung reicht je nach Modell von 1–50 kW.⁸⁴

Aktuell sind solche Systeme noch in der Nische, werden aber zunehmend als Ersatz für Dieselaggregate getestet – u. a. im Baubereich, bei Filmproduktionen und im Katastrophenschutz.



Abbildung 14. Mobiler wasserstoffbetriebener Energieerzeuger mit Brennstoffzellen von EFOY.



6 Wasserstoff in der Stahlverhüttung

Traditionell wird in der Stahlproduktion Koks als Reduktionsmittel verwendet, um Eisenoxid zu Roheisen zu reduzieren, was erhebliche CO₂-Emissionen verursacht. Bei der Direktreduktion mit Wasserstoff wird Eisenoxid bei Temperaturen von etwa 800 bis 1000 °C mit Wasserstoff reduziert, wobei als Nebenprodukt lediglich Wasserdampf entsteht.⁸⁵

Ein prominentes Beispiel für die Anwendung dieser Technologie ist das HYBRIT-Projekt in Schweden, bei dem fossilfreier Stahl produziert wird. In Deutschland arbeiten Unternehmen wie thyssenkrupp an der Umstellung ihrer Hochöfen auf wasserstoffbasierte Verfahren. Dabei wird Wasserstoff unter kontrollierten Bedingungen eingesetzt, um die gewünschten metallurgischen Eigenschaften zu erzielen.⁸⁶



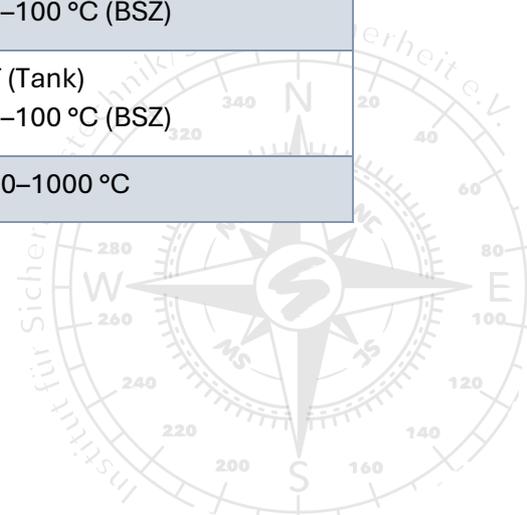
Abbildung 15. Stahlwerk von Thyssenkrupp.

Die Qualität des eingesetzten Wasserstoffs ist entscheidend: Für Anwendungen in der Stahlveredelung muss der Wasserstoff einen Reinheitsgrad von über 99,98 % (Qualität 3.8) aufweisen,⁸⁷ damit Verunreinigungen im Wasserstoff nicht die Qualität des Stahls verschlechtern.



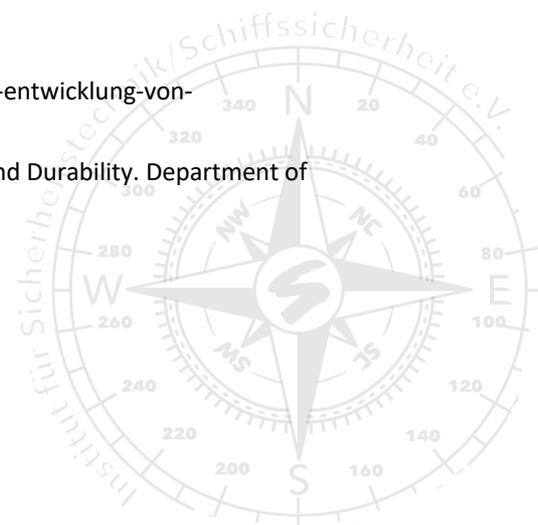
7 Zusammenfassung

Anwendung	Druck	Temperatur
PKW mit PEM-Brennstoffzelle	500 bar (Tank) 1 bar BSZ	RT (Tank) 10–100 °C (BSZ)
Wasserstoffmotorrad	700 bar (Tank) 40–100 bar (Brennraum)	RT (Tank) 60–100 °C (Abgas)
Wasserstoffzug	350 bar (Tank) 1 bar BSZ	RT (Tank) 10–100 °C (BSZ)
LKW mit PEM-Brennstoffzelle	350 bar (Tank) 1 bar BSZ	RT (Tank) 10–100 °C (BSZ)
Flugzeug	350–700 bar (Tank) 1 bar BSZ	RT (Tank) 10–100 °C (BSZ)
Bus mit PEM-Brennstoffzelle	350 bar (Tank) 1 bar BSZ	RT (Tank) 10–100 °C (BSZ)
Reachstacker mit PEM-Brennstoffzelle	350 bar (Tank) 1 bar BSZ	RT (Tank) 10–100 °C (BSZ)
Binnenfahrgastschiff mit PEM-Brennstoffzelle und Drucktank auf dem Oberdeck	350 bar (Tank) 1 bar BSZ	RT (Tank) 10–100 °C (BSZ)
Bagger	350 bar (Tank) 1 bar BSZ	RT (Tank) 10–100 °C (BSZ)
Gabelstapler	350 bar (Tank) 1 bar BSZ	RT (Tank) 10–100 °C (BSZ)
Tankstelle	350-500 bar	5–20 °C
Gaskraftwerk	1–5 bar	Ca. 2000 °C
Notstromaggregat	350 bar (Tank) 1 bar BSZ	RT (Tank) 10–100 °C (BSZ)
Blockheizkraftwerk	350 bar (Tank) 1 bar BSZ	RT (Tank) 10–100 °C (BSZ)
Stahlwerk	1–5 bar	800–1000 °C

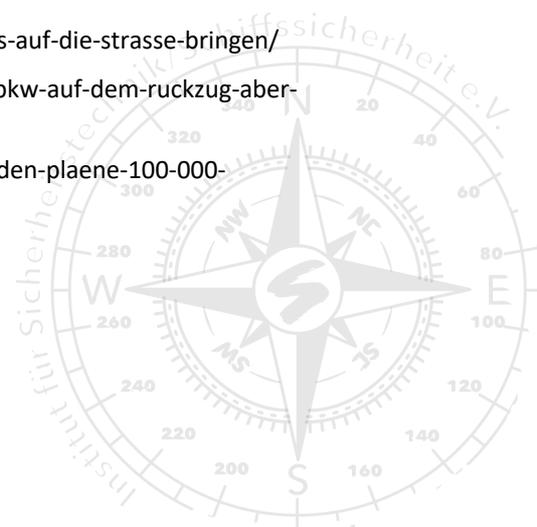


8 Literatur

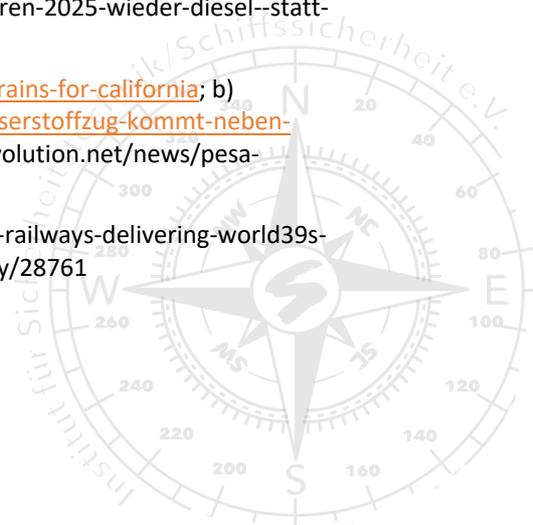
- 1 <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoffverbrennungsmotor>
- 2 R. Seiffert, in Die A`ra Gottlieb Daimlers, 1. Aufl., Teubner-Vieweg, Wiesbaden 2009.
- 3 a) W. Enke, M. Gruber, L. Hecht, B. Staar, Motortech. Z. 2007, 68, 446–453. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf03227411>; b) A. Burkert, Motortech. Z. 2017, 78, 8–13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s35146-017-0029-8>; c) M. Klell, H. Eichseder, A. Trattner, Wasserstoff in der Fahrzeug-technik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung, 4. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden 2018.
- 4 https://de.wikipedia.org/wiki/BMW_Hydrogen_7
- 5 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/cite.202100155>
- 6 T. Wallner, Entwicklung von Brennverfahrenskonzepten für einen PKW-Motor mit Wasserstoffbetrieb, Dissertation, TU Graz 2004.
- 7 a) <https://www.cummins.com/de/engines/hydrogen>; b) <https://www.volvotrucks.de/de-de/news/press-releases/2024/may/Volvo-to-launch-hydrogen-powered-trucks.html>; c) <https://de.toyota.ch/company/news/2021/wasserstoff-motorsport>.
- 8 <https://www.chemie.de/lexikon/Flammentemperatur.html>
- 9 a) <https://www.toyota.de/neuwagen/mirai>; b) <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/hyundai/hyundai-nexo/>
- 10 <https://elib.uni-stuttgart.de/server/api/core/bitstreams/6d749339-0633-4f10-a135-a3bbc548069c/content>
- 11 Dominic A. Notter, Katerina Kouravelou, Theodoros Karachalios, Maria K. Daletou and Nara Tudela Haberlandad: Life cycle assessment of PEM FC applications: electric mobility and μ -CHP. In: Energy and Environmental Science. 8, (2015), 1969–1985, doi:10.1039/C5EE01082A.
- 12 [https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/brennstoffzellen/sofc-brennstoffzelle#:~:text=Die%20Oxidkeramische%2DBrennstoffzelle%20-%20SOFC&text=Die%20Oxidkeramische%2DBrennstoffzelle%20\(Solid%20Oxide,z.B.%20Diesel%2C%20Benzin%20oder%20Erdgas.](https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/brennstoffzellen/sofc-brennstoffzelle#:~:text=Die%20Oxidkeramische%2DBrennstoffzelle%20-%20SOFC&text=Die%20Oxidkeramische%2DBrennstoffzelle%20(Solid%20Oxide,z.B.%20Diesel%2C%20Benzin%20oder%20Erdgas.)
- 13 <https://www.osti.gov/servlets/purl/1332541>
- 14 Holger Watter: Regenerative Energiesysteme. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, ISBN 978-3-658-09638-0, S. 347
- 15 https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d584-2/*/*Alkalische%20Brennstoffzelle?op=Wiki.getwiki#:~:text=Die%20Alkalische%20Brennstoffzelle%20mit%20dem,30%20Prozent%20bis%2045%20Prozent.
- 16 <https://web.archive.org/web/20141209080001/http://www.ceramicfuelcells.de/de/technologie/brennstoffzellen/brennstoffzellen-typen/>
- 17 <https://web.archive.org/web/20170118192817/https://ihr-bhkw.de/technik/systemkomponenten/brennstoffzellen-heizungen#h7-entwicklung-von-brennstoffzellen>
- 18 Samuel Simon Araya: High Temperature PEM Fuel Cells – Degradation and Durability. Department of Energy Technology, Aalborg University, 2012, ISBN 978-87-92846-14-3
- 19 <http://www.diebrennstoffzelle.de/zelltypen/dmfc/index.shtml>



-
- 20 <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/unterschied-wasserstoff-brennstoffzelle-verbrennungsmotor/>
- 21 <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/wasserstoffauto-so-funktioniert-es/>
- 22 <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/wasserstoffauto-so-funktioniert-es/>
- 23 <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/toyota/toyota-mirai/>
- 24 <https://h2.live/wasserstoffautos/hyundai-nexo/#:~:text=Die%20H%C3%B6chstgeschwindigkeit%20betr%C3%A4gt%20179%20km,passen%206%2C33%20Kilo%20Wasserstoff.>
- 25 <https://h2.live/wasserstoffautos/toyota-mirai-ii/>
- 26 https://h2.live/wasserstoffautos/mercedes-benz-glc-f-cell/?utm_source=chatgpt.com
- 27 a) https://www.mobile.de/magazin/artikel/wasserstoffautos-kaufen-das-sind-die-modelle-auf-dem-markt--3702?srsId=AfmBOoqBBBSjdnHy-ZHCrEjHHa3wvRqZhzhRzZ2g7DRZPsG0eiUZalb&utm_source=chatgpt.com; b) https://ecomento.de/2020/04/22/mercedes-stellt-glc-f-cell-ein-kein-weiteres-wasserstoff-auto-geplant/?utm_source=chatgpt.com
- 28 https://www.autocar-co-uk.translate.google.com/translate/car-news/business-tech%2C-development-and-manufacturing/honda-discontinues-hydrogen-fuelled-clarity?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=de&_x_tr_hl=de&_x_tr_pto=rq
- 29 https://hondanews.eu/gb/en/cars/media/pressreleases/100059/first-honda-clarity-fuel-cell-arrives-in-europe3?utm_source=chatgpt.com
- 30 https://www.bmwusa.com/ix5-hydrogen.html?utm_source=chatgpt.com
- 31 <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
- 32 <https://medium.com/%40erofeev.yury/global-hydrogen-car-sales-to-fall-again-in-2024-3afb8996f397>
- 33 <https://www.motorradonline.de/technik/wasserstoff-motoren-hyse-kooperation-japan-kawasaki-honda-yamaha-suzuki/>
- 34 https://www.kawasaki.eu/en/news/2025/april/le-mans-demonstration-of-kawasaki-hyse-hydrogen-motorcycle.html?utm_source=chatgpt.com
- 35 https://juser.fz-juelich.de/record/1010669/files/Energie_Umwelt_611.pdf
- 36 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/155554/umfrage/anzahl-der-busse-in-deutschland/#:~:text=Bus%2DBestand%20in%20Deutschland%20bis%202025&text=Die%20Anzahl%20er%20in%20Deutschland,Prozent%20mehr%20als%20im%20Vorjahr.>
- 37 <https://www.solarisbus.com/de/fahrzeuge/zero-emissions/hydrogen>
- 38 <https://www.trendingtopics.eu/flixbus-will-bis-2024-wasserstoff-fernbus-auf-die-strasse-bringen/>
- 39 https://www.eenews.ch/de/solar/politik/article/56134/wasserstoff-im-pkw-auf-dem-ruckzug-aber-anstieg-bei-den-nutzfahrzeugen?utm_source=chatgpt.com
- 40 https://www.eurotransport.de/fahrzeuge/lkw/62-unternehmen-schmieden-plaene-100-000-wasserstoff-lkw-bis-2030/?utm_source=chatgpt.com



-
- 41 https://www.verkehrsrundschau.de/vr-wissen/alternative-antriebe/wasserstoff-wie-gefaehrlich-ist-der-lkw-treibstoff-der-zukunft-3519950?utm_source=chatgpt.com
- 42 https://www.daimlertruck.com/newsroom/pressemitteilung/sicher-schnell-und-einfach-daimler-truck-und-linde-setzen-mit-slh2-technologie-neuen-standard-fuer-fluessigwasserstoff-betankung-52581266?utm_source=chatgpt.com
- 43 a) https://www.hyundai.news/de/articles/press-releases/hyundai-bringt-wasserstoff-lkw-xcient-fuel-cell-nach-deutschland.html?utm_source=chatgpt.com; b) https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/fahrzeugdatenbank/?_sft_antriebsart=h2-brennstoffzelle,h2-verbrenner&_sft_fahrzeugtyp=lkw
- 44 a) https://www.bmwgroup.com/de/news/allgemein/2025/wasserstoff-lkw.html?utm_source=chatgpt.com; b) <https://www.volvotrucks.de/de-de/news/press-releases/2024/may/Volvo-to-launch-hydrogen-powered-trucks.html>
- 45 <https://heidjers-stadtwerke.de/details-gaskrise/wasserstoff-serien-lkw-mit-straenzulassung-vermietet-4LIUmuwVnwDALFV9FbuZ17mLJcV8jmXQdh0VGem10>
- 46 <https://www.aerotelegraph.com/geschichte/die-tupolev-die-bereits-vor-32-jahren-mit-wasserstoff-flog/dlcdmfl>
- 47 <https://de.wikipedia.org/wiki/E-Genius>
- 48 <https://www.krone.at/97150>
- 49 https://de.wikipedia.org/wiki/Boeing_Phantom_Eye
- 50 https://www.dlr.de/en/latest/news/2010/20100612_antares-shows-off-its-unique-abilities-at-ila-2010_24966
- 51 <https://de.wikipedia.org/wiki/HY4>
- 52 https://de.wikipedia.org/wiki/HY4#/media/Datei:HY4_2016-09-29_ueber_Flughafen_Stuttgart.jpg
- 53 <https://www.electrive.net/2023/01/20/zeroavia-bz-erstflug-mit-umgeruesteter-dornier-228/>
- 54 <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/luftfahrt-airbus-verschiebt-die-entwicklung-von-wasserstoff-flugzeugen/100106494.html>
- 55 <https://www.welt.de/wirtschaft/article158262466/Erster-Wasserstoff-Zug-der-Welt-faehrt-in-Deutschland.html>
- 56 <https://www.spiegel.de/auto/niedersachsen-wasserstoffzuegen-fehlt-wasserstoff-bahnausfaelle-um-bremervoerde-a-3f102e1b-6400-46de-86af-992a9ba06de5>
- 57 https://de.wikipedia.org/wiki/Alstom_Coradia_LINT#iLint
- 58 <https://www.chemietechnik.de/markt/cummins-nimmt-wasserstoff-brennstoffzellenproduktion-in-herten-in-betrieb-85-769.html>
- 59 <https://www.hessenschau.de/wirtschaft/zu-viele-pannen-im-taunus-fahren-2025-wieder-diesel--statt-wasserstoffzuege-v1,wasserstoffzuege-taunus-diesel-100.html>
- 60 a) <https://www.railvolution.net/news/stadler-to-build-more-hydrogen-trains-for-california>; b) <https://www.urban-transport-magazine.com/siemens-mireo-plus-h-wasserstoffzug-kommt-neben-baden-wuerttemberg-auch-in-bayern-zum-einsatz/>; c) <https://www.railvolution.net/news/pesa-presented-its-hydrogen-locomotive>.
- 61 <https://www.altenergymag.com/news/2013/03/27/tigm-modern-street-railways-delivering-world39s-greenest-streetcars-to-aruba-in-island39s-transition-to-100-sustainability/28761>



62 <https://www.mdr.de/wissen/news/wasserstoff-strassenbahn-sachsen-tu-chemnitz-100.html>

63 https://www.hymead.de/_files/ugd/961dde_baff0a92437244628f9854802cddd3d2.pdf

64 <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/heidelberg-setzt-wasserstoffbetriebenes-muellfahrzeug-ein/#:~:text=Die%20Heidelberger%20Müllabfuhr%20bekommt%20ein,mit%20Wasserstoffantrieb%20in%20Betrieb%20nimmt.>

65 <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen/leipzig/leipzig-leipzig-land/stadtreinigung-muell-muellauto-wasserstoff-antrieb-klima-100.html#:~:text=Wasserstoff%20wird%20künftig%20über%20Rohre,Kraftstoff%20durch%20Rohre%20geleitet%20werden.>

66 <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/abfallsammlung-mit-wasserstoff-im-emsland/>

67 <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/suedbaden/freiburgs-muellfahrzeuge-fahren-mit-wasserstoff-100.html>

68 a) <https://www.h2non.de/2022/12/06/erste-kehrmaschinen-mit-wasserstoffantrieb-in-lueneburg/>; b) <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/transport-logistik/bremen-muellabfuhr-mit-wasserstoffantrieb-unterwegs-3178984>; c) <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/wasserstoff-muellfahrzeug-in-ingolstadt-das-erste-in-bayern/>

69 a) https://www.komatsu.jp/en/newsroom/2025/20250219_1; b) https://www.cat.com/en_US/by-industry/electric-power/electric-power-industries/hydrogen.html; c) <https://www.hyundai-ce.eu/en/lp/bauma-2025#hw155h>; d) https://www.sanyglobal.com/press_releases/1730/

70 <https://www.jcb.com/de-de/campaigns/hydrogen>

71 a) <https://agriculture.newholland.com/de-de/europe/unsere-vision/besondere-projekte>; b) <https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/john-deere-traktor-tank-duenger-keine-emissionen-594426>

72 a) <https://www.technische-logistik.net/news/plug-ermoeglicht-den-wasserstoffbetrieb-von-gabelstaplern-jetzt-auch-fuer-kleine-flotten.html>; b) <https://www.materialfluss.de/stapler/alternative-antriebstechnik--reachstacker-mit-wasserstoff-brennstoffzelle.htm>

73 <https://fuelcellworks.com/2024/11/28/clean-energy/thursday-throwback-story-amazon-advances-green-logistics-with-on-site-hydrogen-production-at-colorado-facility>

74 a) <https://info.toyota-forklifts.de/wasserstofftechnologie-stapler/>; b) <https://www.hydrogeninsight.com/production/walmart-replaces-battery-electric-forklifts-with-hydrogen-fuel-cell-models-to-reduce-charging-times/2-1-1500804>

75 <https://www.prinoth-snowgroomers.com/de/produkte/leitwolf-h2motion>

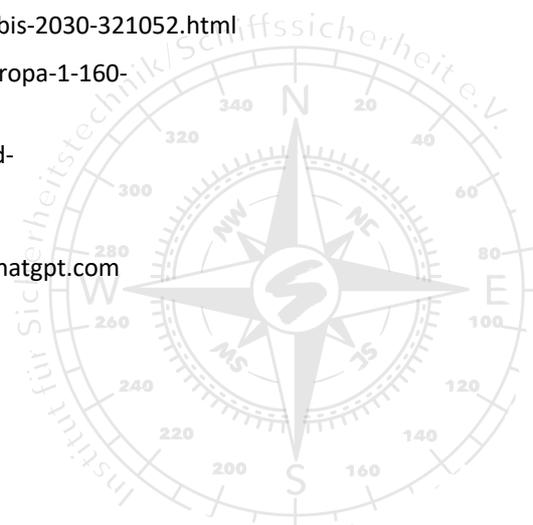
76 <https://www.kommunaldirekt.de/europa-passt-seine-wachsende-infrastruktur-von-wasserstofftankstellen-fuer-die-betankung-schwerer-nutzfahrzeuge-an/>

77 <https://vision-mobility.de/news/6-000-wasserstofftankstellen-weltweit-bis-2030-321052.html>

78 <https://www.autohaus.de/nachrichten/autohersteller/294-fuer-ganz-europa-1-160-wasserstofftankstellen-weltweit-3618775>

79 https://www.autobild.de/artikel/wasserstoff-h2-tankstellen-deutschland-21742143.html?utm_source=chatgpt.com

80 https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L12_HyResponder_L1_DE.pdf?utm_source=chatgpt.com



-
- 81 https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energiewende/241202_Wasserstofff%C3%A4hige_Gaskraftwerke_Hintergrundpapier_DUH.pdf
- 82 <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product-offerings/gas-turbines/hl-class.html>
- 83 https://2-g.com/de/produkte?gad_source=1&gad_campaignid=17689039383&gbraid=0AAAAADJ3XTBxRxyvhv_4Mh1Q5ksyT3TC&gclid=Cj0KCQjwglXCBhDBARIsAELC9Zj0Qx5latYIITCnlZGg69UDzi39tk8QJPuznC9eS7zYkfpiBOKzbmlaAq4nEALw_wcB
- 84 a) https://www.efoy-pro.com/?b2c=https%3A%2F%2Fwww.efoy-comfort.com%2Fde&gad_source=1&gad_campaignid=1092433120&gbraid=0AAAAADB01jgDiwAINzIXBRLH_OderBkOB&gclid=Cj0KCQjwglXCBhDBARIsAELC9Zhc6F3SGsbTigz76_etGSKSHpcBLZ-zXlnlkF9Nc6SmSGWzDage7YaAqj9EALw_wcB; b) <https://h2sys.fr/de/produkte/brennstoffzellen-generatoren/>
- 85 https://www.wissenschaft.de/wp-content/uploads/b/d/bdw_2021-001_96_Sauberer-Strahl.pdf?utm_source=chatgpt.com
- 86 https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/werkstoffe/fossilfreier-stahl-ssab-volvo/?utm_source=chatgpt.com
- 87 https://www.springerprofessional.de/anlagenbau/verfahrenstechnik/wasserstoff-erobert-die-stahlproduktion/16874732?utm_source=chatgpt.com

