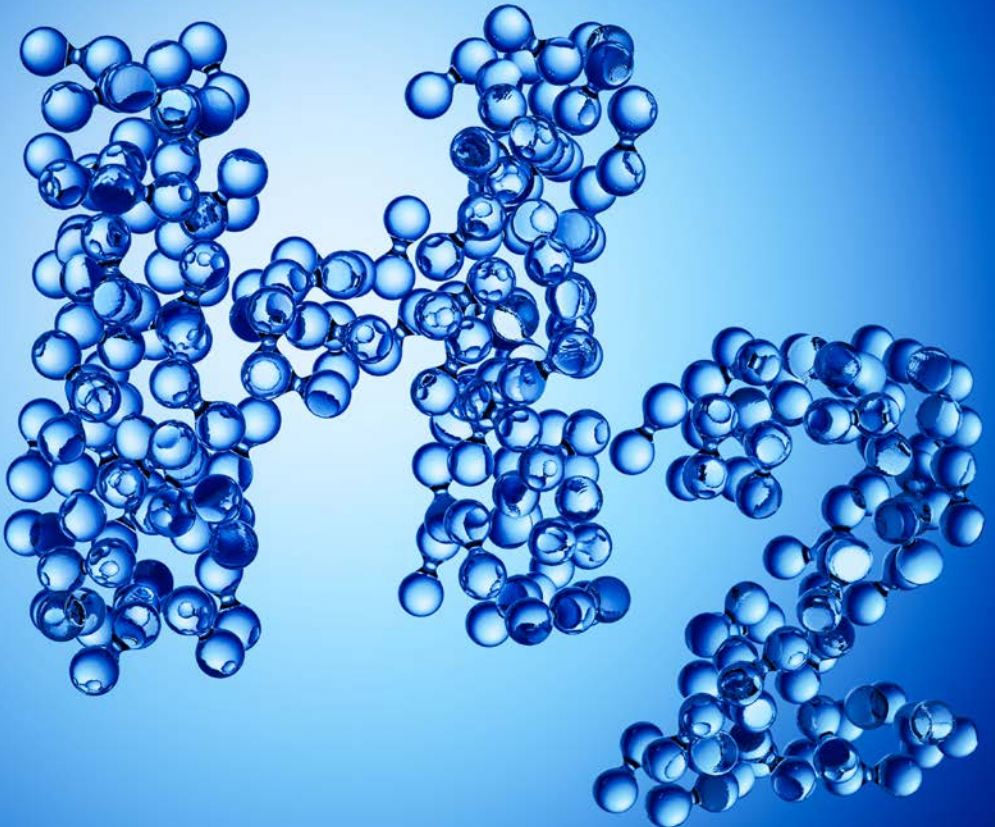


Informationspapier

Wundermittel Wasserstoff?



UND WEITER GEHT'S



Inhalt

Vorwort	3
Was ist Wasserstoff?	4
Exkurs: Klimaschutz	5
Wie wird Wasserstoff hergestellt?	6
Grüner Wasserstoff	7
Blauer Wasserstoff	8
Türkiser Wasserstoff	8
Stand der Technologie und Marktentwicklung	10
Exkurs: Die Wasserstoffstrategie der Bundesregierung	11
Die Brennstoffzelle	12
Exkurs: Die Wasserstoffstrategie der Europäischen Kommission	16
Fazit	17
Exkurs: Die Energiewende im Verkehr	19
Schlussfolgerungen des ACE	20
Quellen/Impressum	22

Vorwort

Mit der Verabschiedung einer nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) im Juni 2020 bekannte sich die Bundesregierung zur Bedeutung des Wasserstoffs für die Erreichung der Klimaziele¹. Sein Beitrag zur Senkung der CO₂-Emissionen in allen Energie-Verbrauchsbereichen soll nun größer werden.

Im Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) der Bundesregierung fördert der Bund seit Jahren die Technologieentwicklung und den Markthochlauf entsprechender Produkte. Viele der in der nationalen Wasserstoffstrategie beschlossenen Maßnahmen verfolgen Ansätze, die bereits im NIP entwickelt wurden oder sind anschlussfähig an bestehende Projekte. Durch die im Rahmen von Klimaschutzprogramm, Corona-Konjunkturpaket und Wasserstoffstrategie ergriffenen Maßnahmen ist mit erneuerbaren Energien hergestellter Wasserstoff ein relevanter Teil der Zukunft geworden.

Die Rolle von Wasserstoff in der Mobilität wird sehr unterschiedlich bewertet. Das hat seine Ursache einerseits in der hohen Unsicherheit bezüglich der Kostenentwicklung (seitens der Fahrzeuge bei der Brennstoffzelle und dem Wasserstofftank; angebotsseitig wegen der Kosten der Wasserstoff-

Herstellung; logistisch wegen der noch fehlenden Tankstelleninfrastruktur). Andererseits ist da der gegenüber der batterieelektrischen Mobilität deutlich geringere Wirkungsgrad von der Erzeugung bis zum Rad. Es soll in dem vorliegenden Papier explizit nicht darum gehen, die beiden Antriebstechnologien Batterie und Brennstoffzelle gegeneinander „auszuspielen“, wie dies in der aktuellen Diskussion häufig der Fall ist.

Nach Ansicht des ACE handelt es sich hier nicht um einen Verdrängungswettbewerb, sondern um eine Effizienzentscheidung: abhängig von Reichweite, Gewicht und Anwendungsbereich sind entweder batterie- oder brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge effizienter. Dort, wo der batterieelektrische Energiespeicher an seine Grenzen stößt, kann Wasserstoff eine Ergänzung oder sogar die Lösung sein. Auch gibt es Bereiche, in denen es sinnvoll sein kann, die Entwicklung synthetischer Kraftstoffe² zu beobachten. Deren Herstellung ist bislang teuer und verbraucht viel Energie.³

Klimaneutrale Mobilität wird künftig im Luft-, Schienen-, Schiffs- und Straßenverkehr relevant sein. Letzterer umfasst den Personen- und Güterverkehr (Pkw und Lkw), Busse, Fahrräder und Flurförderzeuge⁴.

¹Siehe Exkurs auf Seite 5.

²Die synthetischen Kraftstoffe – sogenannte E-Fuels – werden über elektrochemische Prozesse aus dem CO₂ der Atmosphäre gewonnen. Ihre Verbrennung setzt also genauso viel CO₂ frei, wie in der Luft war. Damit sind E-Fuels klimaneutral – solange die Elektrizität für ihre Herstellung aus erneuerbaren Energien stammt. Für sie müsste die Produktion der derzeitigen Verbrennungsmotoren kaum umgerüstet werden. Auch das bestehende Tankstellennetz könnte weiterbetrieben werden (bdew.de).

³Ein Gutachten der Deutschen Energie-Agentur (dena) für den Verband Deutscher Automobilhersteller kam Ende 2017 zu dem Schluss, dass ein Liter E-Diesel 4,50 Euro kosten würde (bdew.de).

⁴Flurförderzeuge sind nicht schienengebundene Fahrzeuge für den Transport von Material und Waren innerhalb von Unternehmen (Gabelstapler, Schlepper).

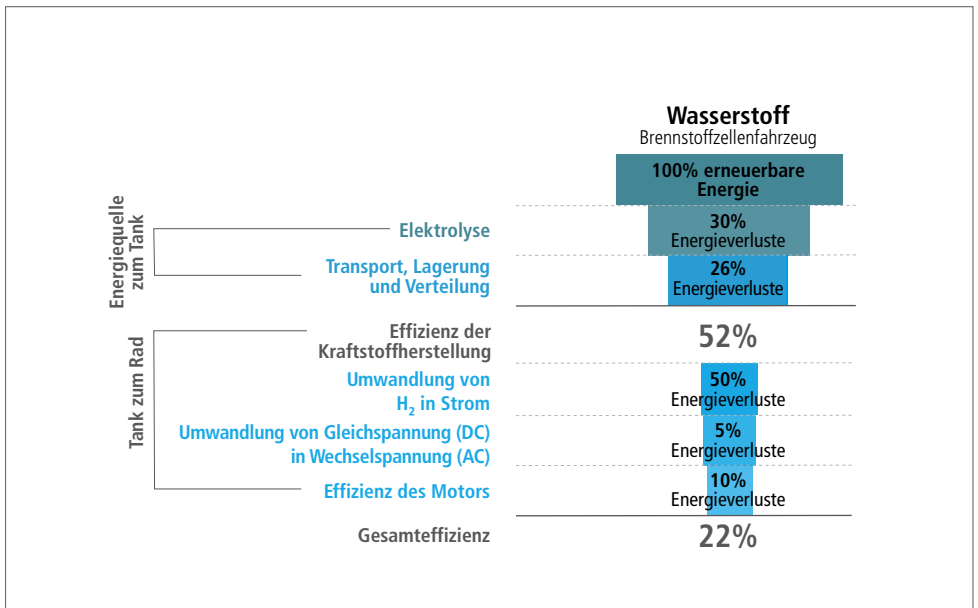
Was ist Wasserstoff?

Wasserstoff ist – unter Normal- oder Standardbedingungen – ein farb- und geruchloses Gas. Wasserstoff ist nicht toxisch und verursacht keine Umweltschäden – ist also umweltneutral. Wasserstoff ist ein chemisches Element, das in der Natur meist in gebundener Form auftritt. Einzelne Wasserstoffatome verbinden sich zu Molekülen und reagieren dann mit Sauerstoff zu Wasser. Die Siedetemperatur von Wasserstoff ist niedrig (minus 252 °C), so dass reiner Wasserstoff, wie er beispielsweise für die Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEVs)⁵ verwendet wird, bei Umgebungstemperatur als Gas auftritt. In Bezug auf das Gewicht ist die Energiedichte von Wasserstoff sehr hoch, bezogen auf das Volumen jedoch gering. Deshalb muss Wasserstoff für die Nutzung als Kraftstoff hoch

verdichtet werden, was einerseits die Energiebilanz verschlechtert, andererseits aber hohe Fahrzeugreichweiten ermöglicht.ⁱ Ein Kilogramm Wasserstoff enthält ungefähr dreimal so viel Energie wie ein Kilogramm Erdöl.ⁱⁱ

Wasserstoff kann als Einsatzstoff, Brennstoff oder Energieträger und -speicher mit zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie, im Verkehr, im Energie- und im Gebäudesektor genutzt werden. Wasserstoff wird in der EU bisher nur begrenzt eingesetzt und weitgehend mit fossilen Brennstoffen gewonnen.

Abbildung 1: Energieeffizienz von Brennstoffzellenfahrzeugen



⁵Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs).

Exkurs Klimaschutz

Im Rahmen des deutschen Bundes-Klimaschutzgesetzes, das im Dezember 2019 in Kraft getreten ist, werden die Klimaschutzziele und die Klimaneutralität im Jahr 2050 gesetzlich verankert und als Zwischenschritt bis zum Jahr 2030 die Verminderung der Treibhausgasemissionen um 55% gegenüber dem Jahr 1990 festgeschrieben. Das Klimaschutzgesetz schreibt zum ersten Mal verbindlich vor, wie viel CO₂ die Sektoren Verkehr, Energie, Industrie, Gebäude, Landwirtschaft und Abfall bis zum Jahr 2030 in jedem Jahr ausstoßen dürfen und legt damit jährliche Minderungspflichten für diese Sektoren fest. Ein Überprüfungs- und Nachsteuerungsmechanismus verpflichtet bei Zielverfehlung zur Auflage eines Sofortprogramms mit Maßnahmen, die den jeweiligen Sektor wieder auf Kurs bringen.

Zweck dieses Gesetzes ist es, die Erfüllung der nationalen Klimaschutzziele sowie die Einhaltung der europäischen Zielvorgaben sicher zu stellen. Grundlage bildet die Verpflichtung

nach dem Übereinkommen von Paris aufgrund der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen. Danach soll der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C und möglichst auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt werden, um die Auswirkungen des weltweiten Klimawandels so gering wie möglich zu halten. Auch soll damit das Bekenntnis Deutschlands auf dem UN-Klimagipfel am 23. September 2019 in New York gestützt werden, bis 2050 Treibhausgasneutralität als langfristiges Ziel zu verfolgen.

Die CO₂-Emissionen sind in den letzten Jahren jedoch angestiegen.⁶ Um das Klimaschutzziel zu erreichen, braucht es eine Energie- sowie eine Verkehrs- und Antriebswende. Eine umfassende Dekarbonisierung des Verkehrssektors kann nur gelingen, wenn – neben einem Wandel hin zu mehr öffentlichem Nah- und Fernverkehr und mehr Intermodalität⁷ – der verbleibende Individualverkehr großflächig elektrifiziert wird.

⁶Der zeitweilige Corona-Lockdown in zahlreichen Staaten im Frühjahr 2020 hat zwar gezeigt, dass sich dadurch die CO₂-Emissionen stark senken lassen – allerdings auch nur kurzfristig in einem Maße, das dauerhaft notwendig wäre, um die Klimaziele zu erreichen (Umweltbundesamt 2020).

⁷Intermodalität wird häufig als Sonderform der Multimodalität bezeichnet. Allerdings sind die beiden Begriffe klar voneinander abzugrenzen. Während Multimodalität den Einsatz verschiedener Verkehrsmittel auf verschiedenen Strecken erklärt, bezeichnet Intermodalität die Kombination von mindestens zwei Verkehrsmitteln auf einer einzigen Strecke. Wenn man montags mit dem Fahrrad zur Arbeit fährt, dienstags den Bus nimmt und am Mittwoch mit der Straßenbahn fährt, fällt man in das Prinzip der Multimodalität. Wenn man aber montags erst mit dem Fahrrad zur Bushaltestelle fährt und anschließend in den Bus einsteigt, um ans Endziel zu gelangen, hat man die Strecke intermodal zurückgelegt.

Wie wird Wasserstoff hergestellt?

Wasserstoff kann mit einer Vielzahl von Verfahren unter Nutzung fossiler wie auch erneuerbarer Energien hergestellt werden. Weit über 90% des weltweit verwendeten Wasserstoffs wird seit Jahrzehnten

- zu möglichst geringen Kosten,
- auf Basis fossiler Energien,
- in großen Produktionsanlagen der chemischen Industrie produziert und
- weil nur ein minimaler Anteil dieser Menge gehandelt wird, gibt es gegenwärtig keinen signifikanten Transport.ⁱⁱⁱ

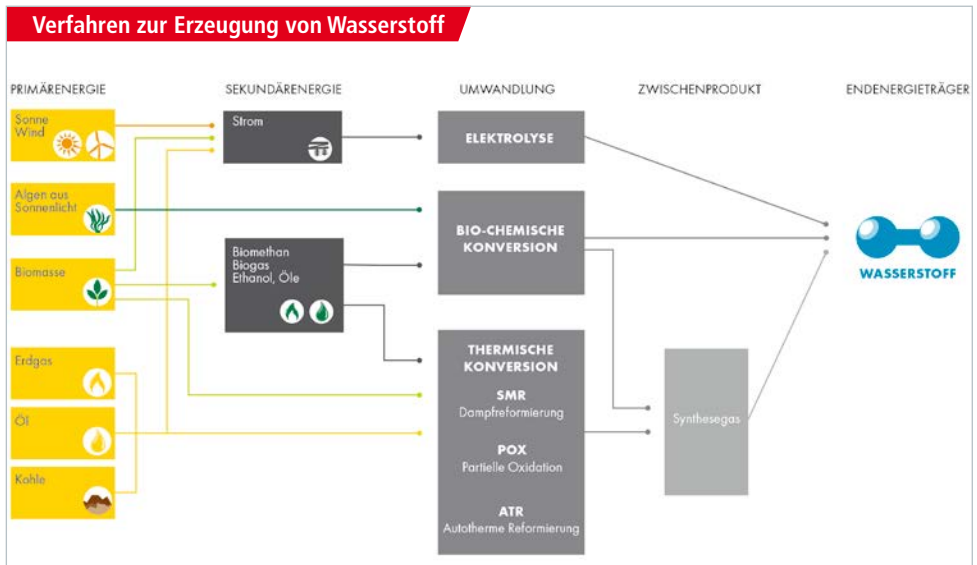
Dieser **graue Wasserstoff** ist klimaschädlich, denn im Herstellungsprozess wird der Kohlenstoff aus dem Erdgas freigesetzt und als CO₂ in die Luft abgegeben. Wird auf diese Weise gewonnener Wasserstoff verbrannt oder mit einer Brennstoffzelle in Strom umgewandelt, richtet das einen erheblich größeren Klimaschaden an, als

durch die direkte Nutzung der Erdgase entstanden wäre.

Aktuell gewinnt aus Gründen des Klimaschutzes die Herstellung von Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energien stark an Bedeutung.

Wird der Wasserstoff kohlenstofffrei beziehungsweise -arm hergestellt, spricht man von grünem, blauem oder türkischem Wasserstoff.

Abbildung 2: Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff



Grüner Wasserstoff^{iv}

Herstellung:

- Elektrolyseure spalten Wasser mit Elektrizität in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff.
- Die bereits existierenden Anlagen gibt es in verschiedenen Größen, Großanlagen befinden sich in der Planung.
- Nur, wenn der verwendete Strom ausschließlich aus erneuerbaren Quellen stammt (Windparks, Solaranlagen, Wasser- oder Geothermiekraftwerke), ist der Wasserstoff „grün“.

Ökobilanz:

- Grüner Wasserstoff ist so umweltfreundlich wie der Strom, aus dem er hergestellt wird.
- Beim Transport von grünem Wasserstoff wird viel Energie verbraucht, weil er stark gekühlt oder komprimiert werden muss.
- Bei seiner Verwendung entstehen dann keine Schadstoffe mehr.

Kosten:

- Aktuell ist grüner Wasserstoff noch mehr als doppelt so teuer wie grauer Wasserstoff.
- Durch verbesserte Technik, Massenproduktion und sinkende Strompreise könnte sich der Preis bis zum Jahr 2050 halbieren.⁸
- Dann ist er bei gleichem Energieinhalt noch immer teurer als Erdgas, Benzin oder Diesel heute.

Sein Beitrag zur Energiewende:

- Bereiche, wo es weder einen Stromanschluss gibt, noch Strom aus wiederaufladbaren Akkus sinnvoll genutzt werden kann (Flug-, Schiffs- oder Schwerlastverkehr), können emissionsfrei werden.
- Bei der Herstellung von grünem Wasserstoff (Elektrolyse) geht rund ein Viertel der eingesetzten elektrischen Energie verloren.
- Anschließend muss das Gas komprimiert, transportiert und in einer Brennstoffzelle in Strom zurückverwandelt werden.
- Am Ende können nur noch 20% der ursprünglich aufgewendeten elektrischen Energie genutzt werden (siehe Abbildung 1).
- Wo Strom im Überfluss erzeugt und nicht sinnvoll genutzt werden kann, ist seine Umwandlung in Wasserstoff eine Speicheroption (Sektorkopplung⁹).

Anmerkung:

In Deutschland wurden im Jahr 2017 2 Gigawattstunden¹⁰ und in 2018 1,4 Gigawattstunden „grüner“ Wasserstoff ins Gasnetz eingespeist.^v Grundsätzlich lohnte sich in Deutschland die Herstellung von Wasserstoff per Elektrolyse aus grünem Strom bisher nicht, weil die Betriebskosten aufgrund des Strompreises zu hoch sind. Aktuell hat der hohe Preis zur Folge, dass Unternehmen in anderen Ländern Anlagen installieren, obwohl Kunden in Deutschland grünen Wasserstoff nachfragen und sogar bereit sind, mehr dafür zu bezahlen.^{vi}

⁸Die Europäische Kommission geht davon aus, dass die Kosten für erneuerbaren Wasserstoff rasch sinken. Die Kosten für Elektrolyseure hätten sich in den letzten zehn Jahren bereits um 60% verringert und würden sich bis 2030 aufgrund von Skaleneffekten im Vergleich zu heute voraussichtlich halbieren. In Gebieten, in denen Strom aus erneuerbaren Energiequellen billig ist, würden Elektrolyseure im Jahr 2030 voraussichtlich mit fossilem Wasserstoff konkurrieren können (Europäische Kommission: Fragen und Antworten: Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa, 08. Juli 2020).

⁹Sektorkopplung: Wenn man sauberen Strom nutzt, um in anderen Sektoren den Einsatz von fossilen Energien zu reduzieren, spricht man von „Sektorkopplung“ (BMWi).

¹⁰1 GW (Gigawatt) sind eine Milliarde Watt (109 W). Entsprechend gibt es Megawattstunden (1 MWh = 1000 kWh), Gigawattstunden (1 GWh = 1000 MWh = 1 Million kWh) und Terawattstunden (1 TWh = 10⁹ kWh = 1 Mrd).

Blauer Wasserstoff^{vii}

Herstellung:

- Wie grauer wird auch blauer Wasserstoff mit Dampfreformierung aus Erdgas hergestellt.
- Das dabei entstehende CO₂ gelangt nicht in die Atmosphäre.
- Es wird aufgefangen und in geeignete geologische Formationen tief unter der Erde verpresst, zum Beispiel in erschöpfte Offshore-Erdgasfelder.
- Das Verfahren heißt CCS (Carbon Capture and Storage) und ist in Deutschland wegen möglicher CO₂-Austritte umstritten.
- Im Jahr 2012 wurde CCS in Deutschland bis auf kleine Forschungsprojekte verboten (Kohlendioxid-Speicherungsgesetz).^{viii}

Ökobilanz:

- Wenn das CO₂ langfristig im Untergrund bleibt, ist blauer Wasserstoff ähnlich sauber wie grüner.

Kosten:

- In Norwegen, wo man bereits seit einigen Jahrzehnten Erfahrung mit der CO₂-Speicherung in erschöpften Erdgasfeldern sammelt, geht man davon aus, dass blauer Wasserstoff deutlich billiger erzeugt werden kann als grüner.

Sein Beitrag zur Energiewende:

- Für die Zeit des Übergangs von der fossilen zur CO₂-freien Energiewirtschaft wird ihm vereinzelt eine wichtige Rolle zugeschrieben.

Türkiser Wasserstoff^x

Herstellung:

- Türkiser Wasserstoff wird ebenfalls aus Erdgas gewonnen.
- Das chemische Verfahren nennt sich Hochtemperatur-Methanpyrolyse.
- Es entsteht kein klimaschädliches CO₂, sondern fester Kohlenstoff, der in der Chemie- und Elektronikindustrie weiterverwendet werden kann.

Ökobilanz:

- Wenn die zur Herstellung nötigen großen Mengen an Prozesswärme bereits vorhanden sind, ist die Ökobilanz ähnlich gut wie bei grünem oder blauem Wasserstoff.
- Muss die Wärme eigens erzeugt werden, wäre türkiser Wasserstoff so umweltschädlich wie grauer.
- Deshalb wird Erzeugung und Nutzung von türkischem Wasserstoff wohl auf große Industrieanlagen mit einem Überschuss an Prozesswärme beschränkt bleiben.

Kosten:

- Er ist billiger als grüner oder grauer Wasserstoff, wenn die Wärmeproduktion sich sinnvoll in industrielle Prozesse integrieren lässt.

Sein Beitrag zur Energiewende:

- Dürfte gering sein.

Weitere Verfahren zur Wasserstoffherstellung werden allgemein als Bunter Wasserstoff^x bezeichnet.

Gegenüber grauem, grünem, blauem oder türkisem Wasserstoff haben sie keine Vorteile.

Herstellung:

- Bereits bekannte Prozesse werden weiterentwickelt und neue werden aufgetan. Beispielsweise gibt es in der Tiefsee und in sehr alten Gesteinen natürliche Wasserstoffvorkommen, deren Mengen unbekannt und deren Förderung bisher nicht versucht worden ist.

Ökobilanz:

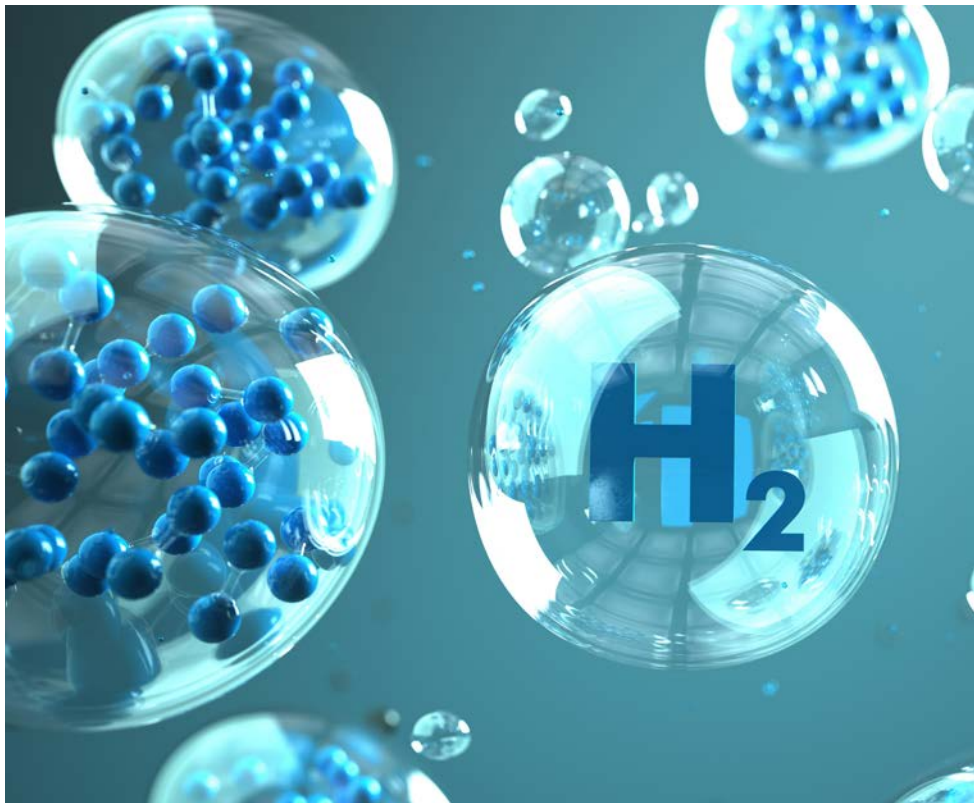
- Forschung und Entwicklung sind nur für Verfahren sinnvoll, die den Wasserstoff mit absehbar geringem oder gar keinem Umweltschaden erzeugen.

Kosten:

- Bisher sehr teuer.

Sein Beitrag zur Energiewende:

- Bisher keiner.



Stand der Technologie und Marktentwicklung

Zur Wasserstoff-Erzeugung durch Elektrolyse sind prinzipiell mehrere Verfahren nutzbar. Die alkalische Wasserelektrolyse mit flüssiger Kalilauge und die saure Membran- oder auch PEM-Elektrolyse (PEM: Proton Exchange Membran) arbeiten bei niedrigen Temperaturen zwischen 50 und 80 °C. Die Hochtemperatur- oder auch Dampfelektrolyse nutzt einen Festoxid-Elektrolyten aus keramischen Materialien und wird bei ca. 800 °C betrieben.^{xi}

Die Elektrolyse-Industrie spielt volkswirtschaftlich international keine Rolle, da in den letzten Jahren der weltweite Absatz (und damit die Produktionskapazität) geringer als 100 Megawatt¹¹ pro Jahr war.

Die Fertigung von Elektrolyseuren wird derzeit im Manufakturbetrieb von wenigen Akteuren betrieben. Es gibt wenige Standardprodukte mit breiter Betriebserfahrung, sondern kleinskalige Produktionsanlagen. Entsprechend hoch sind die Bezugspreise und lang die Lieferzeiten.

Wasserstoff ist ein höchst flüchtiges und leicht entzündliches Gas mit geringer volumetrischer Energiedichte. Zum Transport und zur Lagerung sind entweder extrem tiefe Temperaturen (minus 255 °C) oder extrem hoher Druck (700 bis 1000 bar) erforderlich. Zur Erzeugung dieser besonderen Bedingungen ist viel Energie nötig, was sich negativ auf die Wirkungsgrade auswirkt.



¹¹Ein MW (Megawatt) entspricht 1000 kW (Kilowatt).

Exkurs: Die Wasserstoffstrategie der Bundesregierung

Im Juni 2020 hat die deutsche Bundesregierung die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) beschlossen. Diese beinhaltet einen Aktionsplan für den Aufbau einer deutschen Wasserstoffwirtschaft, die auf grünem Wasserstoff basiert. Ziel ist es, die CO₂-intensive Stahl- und Chemieindustrie sowie Teile des Verkehrssektors zu dekarbonisieren. Dies wiederum ist die Voraussetzung dafür, dass Deutschland bis 2050 klimaneutral werden kann.

Zudem hat die Bundesregierung wirtschaftliche Erwartungen an die Wasserstofftechnologie. Deutschland soll zum führenden globalen Lieferanten der Wasserstoffwirtschaft werden. Wertschöpfung und Beschäftigung sollen die Folge sein. Um das zu erreichen, will die Bundesregierung über zehn Milliarden Euro bereitstellen. Neben der Schaffung eines Heimatmarktes¹² sollen auch Möglichkeiten für den Import größerer Mengen grünen Wasserstoffs geschaffen werden. Denn um den künftigen Wasserstoffbedarf zu decken, wird die Menge des lokal erzeugten Wasserstoffs nicht ausreichen. Der überwiegende Teil wird importiert werden müssen, wofür man erstens innerhalb Europas mit anderen Mitgliedstaaten bisher ungenutzte Offshore-Windenergie-Potenziale nutzen und zweitens im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit Produktionsmöglichkeiten erschließen möchte.^{xii} Nutzen will die Bundesregierung Wasserstoff zuerst in Bereichen, in denen dessen Einsatz möglichst wirtschaftlich ist und „in denen keine größeren Pfadabhängigkeiten geschaffen werden oder in denen keine alternativen Dekarbonisierungsoptionen bestehen.“ Dies trifft aus ihrer Sicht insbesondere auf Teile des Verkehrssektors und der Industrie zu.^{xiii}

Die Umsetzung der NWS soll von zwei Gremien begleitet werden. Von einem Staatssekretärsausschuss für Wasserstoff unter Beteiligung der betroffenen Ressorts und einem Nationalen Wasserstoffrat, der diesen berät. Beide sollen in ihrer Arbeit wiederum durch eine Leitstelle Wasserstoff der Bundesregierung unterstützt werden.

Die Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie in Kürze:

- Grüner Wasserstoff als Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele
- Markthochlauf der Technologie initiieren
- Wertschöpfung in Deutschland etablieren
- Einen politischen Rahmen schaffen, um Industrie und entsprechende Investitionsentscheidungen zu unterstützen
- Volkswirtschaftliche Chancen nutzen, um den Technologiestandort Deutschland langfristig zu sichern
- Koordinierung der internationalen Aktivitäten zur zielgerichteten Einbettung der nationalen Maßnahmen
- Die gesamte Wertschöpfungskette betrachten – von der Erzeugung über die Speicherung und Infrastruktur bis zur Verwendung in Verkehr, Industrie und Wärme
- Konkrete Maßnahmen zur Umsetzung festlegen, um bestehende Aktivitäten (z.B. NIP¹³) in einen übergeordneten Zusammenhang zu stellen und durch weitere Maßnahmen eine umfassende Strategie der Bundesregierung zu definieren.

¹²In Deutschland sollen bis 2030 Erzeugungsanlagen mit einer Leistung von fünf Gigawatt errichtet werden. Das entspricht laut Bundesregierung einer Wasserstoffproduktion von 14 Terrawattstunden – für deren Erzeugung wiederum 20 Terrawattstunden erneuerbaren Stroms benötigt würden. Nach Möglichkeit sollen bis 2035 weitere fünf Gigawatt dazukommen, spätestens aber bis 2040 (Die Nationale Wasserstoffstrategie, BMWi, 10.06.2020).

¹³Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.

Die Brennstoffzelle

Die Brennstoffzellenart mit den weltweit größten Verkaufszahlen ist die Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle.¹⁴ Sie ist die bei stationären und mobilen Anwendungen eindeutig dominierende Technologie.¹⁵ Ihre Vorteile gegenüber anderen Brennstoffzellentypen sind:

- hohe Leistungsdichte, dadurch kompakt in Fahrzeugen zu verbauen,
- gut beherrschbare Betriebstemperatur von 80 °C, die zudem Wärme für die Fahrzeugbeheizung zur Verfügung stellen kann,
- hohe Lastflexibilität, so dass Lastwechsel beim Beschleunigen oder Verlangsamen des Brennstoffzellenfahrzeugs unproblematisch sind,
- hohe Energieeffizienz,
- besondere Eignung für mobile Anwendungen.^{xiv}

Das Prinzip der Brennstoffzelle

Die Brennstoffzellen sind auf sehr reinen Wasserstoff angewiesen. Diesen wandeln sie durch Reaktion mit Luftsauerstoff in Gleichstrom für den Betrieb von Elektromotoren oder anderen Aggregaten um. Dabei entstehen keine lokalen Emissionen.^{xv}

Brennstoffzellen-Pkw (FCEV)

Im FCEV sind eine Brennstoffzelle, eine Batterie und ein Wasserstofftank verbaut. Ersterer erzeugt während der Fahrt den Strom für den Antrieb. Eine kleine Batterie dient als Zwischenspeicher und deckt Lastspitzen (beispielsweise beim Beschleunigen) ab. Sie

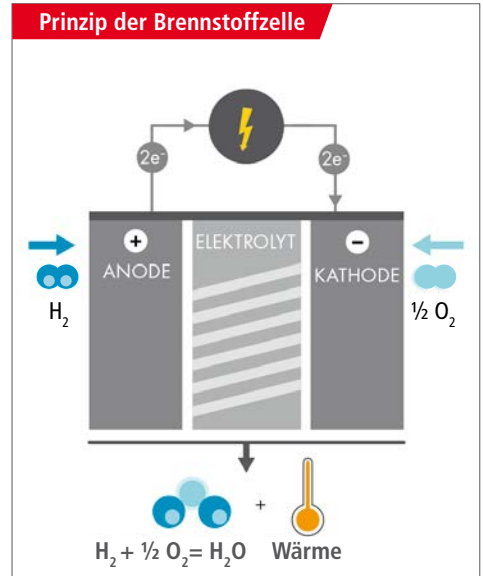


Abbildung 3: Prinzip der Brennstoffzelle

nimmt auch die Rekuperationsenergie¹⁶ auf und speichert diese.

Die Attraktivität von Brennstoffzellen-Fahrzeugen ergibt sich aus der hohen Energiedichte im Vergleich zu Batteriefahrzeugen, sodass auch Langstreckenfahrten und kurze Betankungszeiten möglich sind. Weltweit sind rund 15.000 Brennstoffzellen-Pkws zugelassen (Deutschland: >840^{xvi}).^{xvii} Auf dem Weltmarkt gibt es vier Brennstoffzellen-Pkw-Modelle im freien Verkauf.¹⁷ Die Anschaffungskosten sind deswegen – im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen und zu Verbrennern – hoch.

¹⁴Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC).

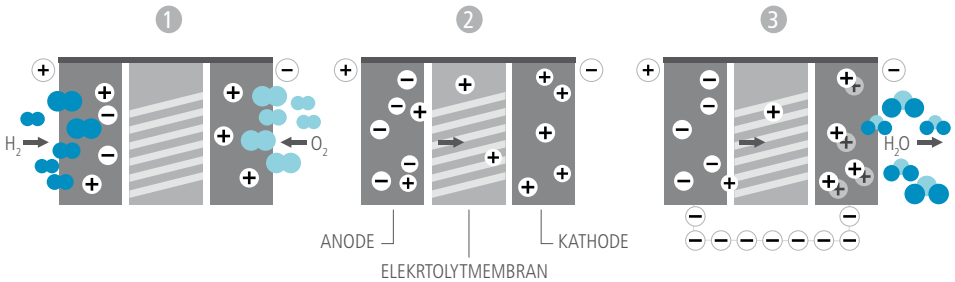
¹⁵Die oxidkeramische Brennstoffzelle (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC) ist in Bezug auf die Absatzzahlen der zweitwichtigste Brennstoffzellentyp. Sie ist v.a. im stationären Bereich bedeutsam.

¹⁶Bewegungsenergie beim Bremsen.

¹⁷Toyota MIRAI, Hyundai NEXO, Honda Clarity, Mercedes-Benz GLC F-CELL. Die Produktion des Letzteren wurde im April 2020 eingestellt. In Deutschland käuflich sind nur zwei Modelle - die o.g. FCEV von Toyota und Hyundai.

Funktionsweise der Brennstoffzelle im Pkw

Das Prinzip der Brennstoffzelle: Die Brennstoffzelle ist ein elektromechanischer Stromerzeuger. Aus Wasserstoff werden Strom, Wärme und Wasser.



- 1 Auf der Anoden-Seite wird Wasserstoff eingeleitet und auf der Kathoden-Seite Umgebungsluft. An der Anode wird der molekulare Wasserstoff (H_2) in Wasserstoffkerne (H^+) und Elektronen aufgespalten.
- 2 Die H^+ wandern durch die Elektrolytmembran, die nur für sie durchlässig ist, auf die Seite des Sauerstoffs. Die Elektronen wandern von der Anode durch einen elektrischen Leiter zur Kathode.
- 3 Dieser Stromfluss treibt den Elektromotor an. Auf der Kathoden-Seite verbinden sich Sauerstoff, Elektronen und H^+ -Ionen zu H_2O , also Wasser.

Abbildung 4: Funktionsweise der Brennstoffzelle im Pkw

Im Laufe des Jahres 2020 werden deutschlandweit 100 öffentliche Wasserstoff-Stationen für Pkw zur Verfügung stehen. Der Wasserstoff wird üblicherweise mit dem Lkw angeliefert, bei 45 bar gelagert und für die Fahrzeuge beim Tanken auf 700 bar hochverdichtet.^{xviii} Diese öffentliche Wasserstoffinfrastruktur für Pkw wird aufgrund ihrer 700 bar-Technologie und der Spezialisierung auf kleine Abgabemengen ungeeignet sein für Busse, Lkw und andere Nutzfahrzeuge.

Weitere technisch mögliche Einsatzbereiche von Brennstoffzellen in der Mobilität

Wasserstoff als Energieträger und Brennstoffzellen als Energiewandler für den mobilen Bereich wurden bereits in zahlreichen Projekten untersucht, bewertet und realisiert. Im Ergebnis wird davon ausgegangen,

dass Wasserstoff-Brennstoffzellenlösungen bis zum Jahr 2050 erhebliche Marktanteile erreichen können. Dies wird mit der leichten Handhabung der Fahrzeuge, der großen Reichweite sowie der Erfüllung der technischen Herausforderungen begründet.^{xix} Anwendungspotenzial – und damit ein Weg, Nachhaltigkeit in der Verkehrs- und Logistikbranche zu verankern – gibt es in den folgenden Bereichen:

Busse

Die Busflotten öffentlicher Behörden und Unternehmen müssen ab 2025 zu 45% und ab 2030 zu 65% mit alternativen Antrieben ausgestattet sein. Das legt die Clean-Vehicle-Richtlinie der EU fest. Das Problem mit der Wasserstofftechnologie in diesem Bereich ist jedoch, dass sie

zum großen Teil noch nicht betriebsbereit sind, unter anderem weil aktuell nur drei Hersteller Wasserstoffbusse im Angebot haben.¹⁸ In Deutschland finden aktuell eine Reihe von Flottentests statt.¹⁹ Im Juni 2020 waren in Deutschland 44 mit Wasserstoff betriebene Busse im Einsatz (zum Vergleich: 458 batterieelektrische Busse).^{xx}

Im Nahverkehr eignen sich Wasserstoffbusse auf längeren Linien, denn sie müssen nur einmal am Tag betankt werden, während auf kürzeren innerstädtischen Linien relativ kleine Batterien ausreichen, die an der Endhaltestelle geladen werden können.^{xxi}

Lkw verschiedener Gewichtsklassen

Im Bereich der Nutzfahrzeuge muss ebenfalls über Alternativen zu den fossilen Antriebsarten nachgedacht werden, denn die Europäische Union verpflichtet die Hersteller, ihren CO₂-Ausstoß in der Flotte bis 2025 um 15% und bis 2030 sogar um 30% zu reduzieren.

Auch der Schwerlastverkehr muss elektrifiziert werden. Hier ist die Brennstoffzelle im Vorteil. Denn je größer ein Fahrzeug ist und je weiter es fährt, desto mehr Sinn macht es, den Strom für den Elektroantrieb durch eine Brennstoffzelle zu produzieren und nicht tonnenschwere Batterien mitzutransportieren. Die Vorteile der Brennstoffzelle - Betriebstemperatur von lediglich 50 °C, große Reichweite, geräuscharm – gelten gerade für den Lastverkehr. Die schweren Lkw sind zurzeit nur ein kleiner Teil des

weltweiten Fahrzeugbestands, aber sie sind für einen unverhältnismäßig großen Teil der Emissionen verantwortlich. Schwere Nutzfahrzeuge produzieren in der EU derzeit rund sechs Prozent der gesamten CO₂-Emissionen und rund 25% des Kohlendioxid-ausstoßes im Straßenverkehr. Hier wären also besonders große Erfolge bei der Verminderung der Emissionen zu erwarten.

Aktuell ist von Seiten der Marktführer²⁰ erst Mitte der 2020er Jahre mit eigenen Brennstoffzellen-Lkws in größeren Stückzahlen zu rechnen.^{xxii} Eine US-Firma kündigt diese bereits für das Jahr 2023 an.^{xxiii}

Aktuell sind die Kosten für Herstellung, Betrieb und Wartung eines schweren Sattelschleppers mit Brennstoffzelle noch deutlich höher als das Verbrenner-Pendant. Es wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff-Trucks im Jahr 2027 erstmals günstiger sein werden als Diesel-Lkws. Grund dafür ist die sich anbahnende Großserienproduktion von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren. Weil parallel auch Strom aus erneuerbaren Quellen wie Photovoltaik immer günstiger wird, sinken die Herstellungskosten für grünen Wasserstoff erheblich.^{xxiv}

Sowohl für Busse als auch Lkw gilt jedoch, dass eine großflächige Infrastruktur verfügbar sein muss. Klimafreundliche Lkw fahren nicht, wenn es keine verfügbare Tankstellen- und Wartungseinrichtungen gibt. Aktuell sind in Deutschland keine Tankstellen, die in größerem Maße Brennstoffzellen-Lkw bedienen könnten, installiert. Da die benö-

¹⁸Hersteller: Solaris, Van Hool, Caetano.

¹⁹Beispielsweise fördert das Thüringer Umweltministerium eine landkreisübergreifende Machbarkeitsstudie zur Umstellung regionaler Busse auf Wasserstoffantrieb. Die Studie untersucht konkret den möglichen Einsatz von 12 bis 15 wasserstoffbetriebenen Bussen in den Landkreisen Weimarer Land, Sömmerda und Sonneberg. Dazu kommt die Stadt Weimar und der Nahverkehrsverband Saale-Orla. Ergebnisse sollen im März 2021 vorliegen (umwelt.thueringen.de).

²⁰Daimler, Volvo.

tigten Wasserstoffmengen an den Lkw-Tankstellen weit über denen von Pkw liegen (eine Sattelzugmaschine hat den 60-fachen Energiebedarf im Vergleich zu einem Pkw) und zumeist mit der 350 bar-Technologie ausgestattet sind, werden hier eigene Konzepte für die Versorgung und den Aufbau von Tankstellen erforderlich sein.^{xxv}

Flurförderzeuge (FFZ)

In der Intralogistik bietet die Brennstoffzellentechnologie – vom Gabelstapler in der Lagerhalle bis zum Gepächtschlepper am Flughafen – eine gute Möglichkeit, den Energieverbrauch sowie den Ausstoß von Schadstoffen und CO₂-Emissionen zu senken und Lärm zu vermeiden. Diese Flurförderzeuge sind in Innenräumen und im Außenbereich einsetzbar, bei Extremtemperaturen, etwa in Kühlräumen. Neben hoher Effizienz und flexiblen Einsatzmöglichkeiten hat sich die Technologie als sehr zuverlässig, robust und wartungsarm erwiesen. Brennstoffzellenbetriebene Flurförderzeuge punkten durch eine konstante Leistungsabgabe. Der Tankvorgang dauert etwa drei Minuten und erfolgt damit nicht länger als eine herkömmliche Befüllung mit Diesel. Die Betankung erfolgt direkt am Einsatzort der FFZ, da die Tanksäulen in Logistik-/Werkhallen aufgestellt werden können.^{xxvi}

Züge

40% der Zugstrecken in Deutschland sind nicht elektrifiziert. Anstelle von Dieselloks können Batterie- und/oder Brennstoffzellenzüge diese Strecken emissionsfrei bedienen. Während die Landesnahverkehrs-gesellschaften von Schleswig-Holstein und Baden-Württemberg aktuell Batteriezüge beschaffen, setzen Niedersachsen und Hessen auf die Brennstoffzelle. Die Hersteller von Batterietriebzügen geben Reichweiten von 40 bis 80 km, teilweise auch über 100 km auf oberleitungsfreien Abschnitten an. Für Brennstoffzellenhybridtriebzüge (Brennstoffzelle und Akkumulator als Leistungspuffer und Rekuperationsspeicher)²¹ werden Reichweiten bis 1.000 km erwartet.^{xxvii}

Flugzeuge und Schiffe

Wegen hoher Anforderungen an die Energiedichte kommen im internationalen Flug- und Seeschiffsverkehr nur erneuerbare Flüssigkraftstoffe als Alternativen zu den fossilen Kraftstoffen infrage. Strombasierte, erneuerbare, synthetische Kraftstoffe dominieren hier die Diskussion. Wasserstoff ist dabei ein zentrales Zwischenprodukt.^{xxviii} Es wird davon ausgegangen, dass die Einführung synthetischer Kraftstoffe insbesondere für Schiffe und Flugzeuge mit dem Markthochlauf der Elektrolyse erfolgen wird.^{xxix 22}

²¹Für Brennstoffzellenhybridtriebzüge haben sich mehrere Notationen im deutschsprachigen und internationalen Bereich etabliert. Synonym werden FCEMU (Fuel Cell Electric Multiple Unit), H₂MU oder H₂MU (Hydrogen Multiple Unit), H₂BZ-Triebzug sowie WBH (Wasserstoff-Brennstoffzellenhybrid oder Wasserstoff-Batteriehybrid) verwendet.

²²Bereits seit einigen Jahren sind Schiffe z. B. der Stena-Line im Einsatz, die mit Methanol betrieben werden, Ammoniak stellt eine Alternative dar (Fraunhofer: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, 10 2019, Seite 28).

Exkurs: Die Wasserstoffstrategie der Europäischen Kommission

Aus Sicht der Europäischen Kommission (EU-KOM) ist Wasserstoff aufgrund der Tatsache, dass seine Nutzung keine CO₂-Emissionen und keine Luftverschmutzung verursacht, ein wichtiger Teil der Lösung zur Verwirklichung des Ziels der Klimaneutralität bis 2050, das mit dem europäischen Grünen Deal gesetzt wurde. Er könne zur Dekarbonisierung von industriellen Verfahren und Wirtschaftszweigen beitragen, in denen eine Verringerung der CO₂-Emissionen dringend erforderlich, aber schwer zu erreichen ist.^{xxx}

Deshalb veröffentlichte die EU-KOM im Juli 2020 ihre aus drei Phasen bestehende europäische Wasserstoffstrategie. Deren Ziel ist es, die Wasserstoffherzeugung zu dekarbonisieren und Wasserstoff auch in Sektoren zu nutzen, in denen er fossile Brennstoffe ersetzen kann. Im Mittelpunkt steht erneuerbarer (grüner) Wasserstoff, weil er über das größte Dekarbonisierungspotenzial verfügt und daher die mit dem Ziel der Klimaneutralität der EU am ehesten zu vereinbarende Option darstellt. In einer Übergangsphase sollen aber auch andere CO₂-arme Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff dazu beitragen, die bestehende Wasserstoffförderung sauberer zu machen, die Emissionen kurzfristig zu verringern und den Markt zu vergrößern.^{xxxi}

Bis zum Jahr 2030 sollen 40 Gigawatt Elektrolyseleistung in Europa entstehen und bis 10 Millionen Tonnen erneuerbarer Wasserstoff erzeugt werden. In dieser Phase soll die Nutzung von Wasserstoff auch in den Verkehrssektor (Lastkraftwagen, Schienen- und Seeverkehr) ausgeweitet worden sein.^{xxxii}

Grundsätzlich hält die Kommission Wasserstoff für alle Fälle, in denen die Elektrifizierung schwierig ist (Busse im ÖPNV und Reisebusse, gewerbliche Flotten, Teile des Schienennetzes, schwere Nutzfahrzeuge, Spezialfahrzeuge, Fahrzeuge für den Straßengüterfernverkehr, Schienen- und Seeverkehr) für eine „vielversprechende Option“.^{xxxiii}

Die Wasserstoff-Strategie soll Investitionen voranbringen und dafür öffentliche und private Gelder mobilisieren. Grüner Wasserstoff soll wettbewerbsfähig gemacht werden, wozu nach den Plänen der EU-KOM die „Europäische Allianz für sauberen Wasserstoff“ beitragen wird. Darin sollen sich Minister der nationalen und regionalen Ebene mit Vertretern aus Industrie und Zivilgesellschaft austauschen, um die Strategie bis Ende 2020 mit konkreten Projekten zu unterfüttern und privates Geld zu mobilisieren.^{xxxiv} Die öffentliche Unterstützung könnte aus mehreren EU-Töpfen kommen.

Fazit

Angesichts der oben aufgezeigten Notwendigkeiten und Verpflichtungen im Bereich des Klimaschutzes und dem langfristigen Ziel, bis zum Jahr 2050 Treibhausgasneutralität erreicht zu haben, wird auch Wasserstoff aus erneuerbaren Energien in Zukunft eine große Rolle spielen.

Aktuell ist zu beobachten, dass sich hier bereits jetzt – wo es im Bereich der wasserstoffbasierten Technologieentwicklung lediglich Forschungs- und Projektaktivitäten gibt – ein Verteilungskonflikt entwickelt. Es ist nach Ansicht des ACE naheliegend, dass der zum Zeitpunkt x verfügbare Wasserstoff aus erneuerbaren Energien in jenen Sektoren vorrangig einzusetzen ist, die keine Alternativen haben, um ihren Beitrag zur Erfüllung der Klimaziele zu leisten.²³

Auch im Bereich der Mobilität wird es einige Anwendungsbereiche für Wasserstoff geben. Nach Ansicht des ACE muss es langfristig das Ziel sein, Alternativen zum Verbrennungsmotor zu finden. Nur so ist das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen. Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge können diese Herausforderung gemeinsam annehmen, weil sie sich je nach Anwendungsgebiet ergänzen. Beide können den Verkehrssektor dekarbonisieren, denn sie sind lokal emissionsfrei. Sie können demnach einen Beitrag zur Erreichung der politischen Zielsetzungen in Bezug auf die Senkung der CO₂-Emissionen leisten, wenn regenerativer Strom zum Einsatz kommt.

Batterieelektrische Fahrzeuge besitzen heute gegenüber Brennstoffzellenfahrzeugen einen mehrjährigen Technik- und Marktwicklungsvorsprung, der sich unter anderem in etablierteren und auch niedrigeren Anschaffungspreisen ausdrückt. Überdies sind reine Elektroantriebe nochmals effizienter als Brennstoffzellenfahrzeuge. Sie nutzen derzeit die eingesetzte Primärenergie mindestens um etwa den Faktor 2 effizienter als Brennstoffzellenfahrzeuge. Ohne Frage handelt es sich bei der batterieelektrischen Mobilität um die technisch entwickeltere und etabliertere Technologie, der in vielen Bereichen der Mobilität der Vorzug zu geben ist.

Dennoch sind die Vorteile der Brennstoffzellentechnologie nicht von der Hand zu weisen. Es gibt definitiv Bereiche in der Mobilität, in denen kurze Betankungszeiten, große Reichweiten, und die weltweit einheitlichen Tanksysteme entscheidend und ausschlaggebend für die Nutzung der Brennstoffzellentechnologie sind – beispielsweise im Schwerlastverkehr und bei Reisebussen. Hier ist es eine Effizienzentscheidung. Zudem gibt es Bereiche, in denen wasserstoffbasierte Mobilität eine Alternative ist, weil diese nur bedingt auf batteriebetriebene Mobilität setzen können und auch zukünftig auf gasförmige oder flüssige Kraftstoffe angewiesen sind. Hierzu gehören die Sektoren Industrie, Luft- und Seeverkehr.

²³So muss die deutsche Industrie ihre Emissionen bis 2030 um rund die Hälfte (im Vergleich zu 1990) mindern. Dieser Umbau muss erfolgen, ohne dass sie dabei Verluste erleidet.

Weil

- nicht absehbar ist, wann grüner Wasserstoff in nennenswerten Mengen zur Verfügung steht und er auch in Zukunft ein kostbares Gut sein wird,
- der Bedarf der eben genannten Sektoren aktuell das Angebot an grünem Wasserstoff um ein Vielfaches übersteigt,
- es im Pkw-Bereich einen mehrjährigen Technik- und Marktentwicklungsvorsprung bei den batterieelektrischen Antrieben gibt,

sollte nach Ansicht des ACE der Pkw zumindest für die nächsten 10 bis 15 Jahre nicht zum Anwendungsbereich von grünem Wasserstoff gehören. Mindestens über diesen Zeitraum wird er in anderen Sektoren mehr gebraucht, um das von allen Sektoren zu erfüllende Klimaziel zu erreichen.

Dahingegen können Brennstoffzellenfahrzeuge im Öffentlichen Personennahverkehr (Busse, Züge), im Straßenschwerlastverkehr (Lkw), bei Nutzfahrzeugen (Baustellenfahrzeuge, Land- und Forstwirtschaftsfahrzeuge) oder in der Logistik (Lieferverkehr, andere Nutzfahrzeuge) die batterieelektrische Mobilität ergänzen – und teilweise ablösen – und so den Ausstoß von Luftschadstoffen sowie CO₂-Emissionen erheblich senken.





© j-mel - stock.adobe.com

Exkurs: Die Energiewende im Verkehr

Der Verkehr der Zukunft kann nur klimaneutral werden, wenn motorisierte Fahrzeuge mithilfe von CO₂-neutralen Energien angetrieben werden. Die in Deutschland vor allem aus Sonnenstrahlung und Windenergie gewonnenen CO₂-freien Energiemengen bleiben jedoch auf absehbare Zeit begrenzt, während die völkerrechtlichen Verpflichtungen zum Klimaschutz die Dekarbonisierung der gesamten Volkswirtschaft verlangen. Um die nur begrenzt zur Verfügung stehenden CO₂-freien Strommengen konkurrieren deshalb bis auf Weiteres sämtliche Sektoren der Volkswirtschaft: die Industrie, die privaten Haushalte und der Verkehr. Keinesfalls dürfen diese Sektoren sich im Wettbewerb um klimaneutrale Energie kannibalisieren. Dann bliebe der Netto-Emissionseffekt null. Folglich können nur zusätzlich erzeugte CO₂-freie Energiemengen einen Beitrag zur Energiewende im Verkehr leisten.

Die Fahrzeuge der Zukunft werden auf Basis von Strom angetrieben, weil

- sich große und wachsende Mengen klimaneutraler Energie nur mit Sonne und Wind in Form von Strom erzeugen lassen,
- sich Strom nicht nur direkt in Antriebsleistung umwandeln lässt, sondern auch in jeden anderen flüssigen oder gasförmigen Energieträger, beispielsweise in Wasserstoff oder strombasierte Kraftstoffe. Handelt es sich um klimaneutral erzeugten Strom, dann sind die aus ihm gewonnenen Energieträger ebenfalls klimaneutral. Allerdings kostet der Umwandlungsprozess selbst Energie. Je öfter elektrischer Strom in andere Energieformen überführt wird, desto mehr Kilowattstunden, die von Solar- und Windkraftanlagen aufwendig erzeugt werden, stehen als Endenergie nicht mehr zur Verfügung. Weil jeder Umwandlungsprozess obendrein mit technischem Aufwand einhergeht, steigen mit jedem Umwandlungsschritt auch die Kosten der Energiebereitstellung. Beides spricht dafür, den Strom direkt zu nutzen.^{xxxv}

Schlussfolgerungen des ACE

1. Nur grüner Wasserstoff kann Teil der Energiewende sein. Auf einem globalen und europäischen Wasserstoffmarkt, wie er sich in den nächsten zehn Jahren entwickeln wird, wird auch CO₂-neutraler „blauer“ oder „türkiser“ Wasserstoff gehandelt werden. Dies darf nur eine Übergangsphase sein.
2. In der Wasserstoffstrategie der Bundesregierung sind keine Förderbedingungen festgelegt. Solange dies nicht erfolgt, besteht die Gefahr, dass die bereit gestellten Mittel nicht abgerufen und in Folge dessen ungenutzt verfallen werden. Stattdessen muss aber, wenn erneuerbar erzeugter Wasserstoff zum klimafreundlichen Umbau verschiedener Sektoren beitragen soll, der Übergang von der Forschungs- und Projektphase hin zu investiven Maßnahmen gelingen. Der Umbau muss jetzt beginnen.
3. Mit der Schaffung einer grünen Wasserstoffinfrastruktur müssen auch Absatzmärkte für grüne Wasserstoffprodukte erschlossen werden. Hierfür wiederum brauchen die entsprechenden Industrien Planungssicherheit und klare Rahmenbedingungen. In diesem Zusammenhang ist ein Verteilungskampf um grünen Wasserstoff schädlich.
4. Damit einher gehen muss der schnellere Ausbau erneuerbarer Energien und eine Effizienzsteigerung in Deutschland. Denn für grünen Wasserstoff wird zusätzlicher grüner Strom gebraucht.
5. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) muss dringend modernisiert und vereinfacht werden. Eine Auseinandersetzung darüber, wo erneuerbare Energien in den nächsten Jahren eingesetzt werden, muss stattfinden (Prioritätensetzung).
6. Es gibt auch im Verkehr einige Anwendungsbereiche für die Brennstoffzelle. Das ist der Fall, wenn die batterieelektrischen Fahrzeuge an ihre energetischen Grenzen stoßen (Nutzfahrzeugsektor, bes. Anwendungen im Bereich der Langstreckenmobilität). Hierfür bedarf es allerdings einer Senkung der Produktionskosten von Brennstoffzellen und des Gesamtsystems. Planbare und geförderte Skalierungseffekte sind genauso erforderlich wie eine Tankstelleninfrastruktur für den öffentlichen Personen- und Güterverkehr.
7. Auch wenn es für ihn in Deutschland vereinzelt Anwendungsbereiche gibt, sollte der Brennstoffzellen-Pkw hier – vorerst – keine größere Rolle spielen. Denn grüner Wasserstoff wird auch in Zukunft ein kostbares Gut sein. Daher sollte sein Einsatz vor allem dort gefördert werden, wo es keine absehbaren Alternativen gibt (Grundstoff- und energieintensive Industrie).
8. Dennoch kann es für die deutsche Automobilindustrie sinnvoll sein, die technologische Entwicklung von Brennstoffzellen-Pkw voranzutreiben. Für sie entwickelt sich auf dem Weltmarkt für diese Technologie durchaus eine bedeutende Export-

chance.²⁴ Gerade auch auf Märkten, wo deutsche Hersteller für ihre batterieelektrischen Pkw keine Abnehmer finden, sollten sie mit wettbewerbsfähigen FCEVs aufwarten können.

9. Im Schiffs- und Flugverkehr, wo Batterie- und Brennstoffzellentechnologie an ihre Grenzen stoßen, sollte an klimaneutralen Technologien geforscht und gearbeitet werden.

²⁴Asien und die USA könnten wichtige Märkte für Brennstoffzellen-Fahrzeuge werden. China und Kalifornien streben jeweils eine Million Brennstoffzellen-Pkw im Bestand bis 2030 an, gefolgt von 0,8 Mio. Fahrzeugen in Japan im Jahr 2030. Auch Südkorea plant 1,8 Mio. Brennstoffzellen-Pkw im Jahr 2030 (Siehe Fraunhofer: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, 10 2019, Seite 28).

Quellen:

- ⁱNOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie: Wasserstoff und Brennstoffzellen: Antworten auf wichtige Fragen, 03 2018, Seite 9
- ⁱⁱH2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, Broschüre Mission: Wasserstoff-Infrastruktur
- ⁱⁱⁱFraunhofer: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, 10 2019, Seite 8
- ^{iv}Dirk Asendorpf, Zeit Online: Grüne Energie war gestern – jetzt wird's bunt, 6. Juli 2020
- ^vDeutscher Bundestag, Antwort der Bundesregierung auf eine Kleine Anfrage der FDP-Bundestagsfraktion: Bedeutung der Wasserstoffstrategie für den Luftverkehr, Drucksache 19/21246, 23.07.2020
- ^{vi}ZOOM Die Expertenarena Zukunft saubere Mobilität: Sektorenkopplung mit erneuerbaren Energien – Was passieren muss
- ^{vii}Dirk Asendorpf, Zeit Online: Grüne Energie war gestern – jetzt wird's bunt, 6. Juli 2020
- ^{viii}Umweltbundesamt, Carbon Capture and Storage, 04 2018
- ^{ix}Dirk Asendorpf, Zeit Online: Grüne Energie war gestern – jetzt wird's bunt, 6. Juli 2020
- ^xDirk Asendorpf, Zeit Online: Grüne Energie war gestern – jetzt wird's bunt, 6. Juli 2020
- ^{xi}Mehr dazu: Fraunhofer: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, 10 2019, Seite 12
- ^{xii}BMW: Die Nationale Wasserstoffstrategie, 10.06.2020
- ^{xiii}BMW: Die Nationale Wasserstoffstrategie, 10.06.2020
- ^{xiv}NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie: Wasserstoff und Brennstoffzellen: Antworten auf wichtige Fragen, 03 2018, Seite 11
- ^{xv}NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie: Wasserstoff und Brennstoffzellen: Antworten auf wichtige Fragen, 03 2018, Seite 11
- ^{xvi}Präsentation von Kurt-Christoph von Knobelsdorff, Sprecher der Geschäftsführung der bundeseigenen NOW GmbH, gehalten im Rahmen der vierten Digitalen Frühstücksdebatte Intelligente Mobilität von eMO und den UVB, 14.08 2020
- ^{xvii}<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>
- ^{xviii}H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co.KG
- ^{xix}VDI/VDE-Studie Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge, 05 2019, Seite 13
- ^{xx}NOW GmbH: Saubere Mobilität in Deutschland - Kennzahlen und Projekte, 06 2020
- ^{xxi}bdew.de
- ^{xxii}handelsblatt.com: Nikola will mit Wasserstoff-Trucks die deutschen Lkw-Riesen ausbremsen, 17.08.2020
- ^{xxiii}bosch.com, Brennstoffzellen-Lkw: Nikola Two
- ^{xxiv}handelsblatt.com: Nikola will mit Wasserstoff-Trucks die deutschen Lkw-Riesen ausbremsen, 17.08.2020
- ^{xxv}Fraunhofer: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, 10 2019, Seite 29
- ^{xxvi}NOW GmbH, Grüne Intralogistik: Wasserstoff im Tank
- ^{xxvii}NOW GmbH, Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr, 2020
- ^{xxviii}Fraunhofer: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, 10 2019, Seite 27
- ^{xxix}Fraunhofer: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, 10 2019, Seite 28
- ^{xxx}Europäische Kommission: Fragen und Antworten: Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa, 08. Juli 2020

^{xxxvi}Europäische Kommission: *Fragen und Antworten: Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa*, 08. Juli 2020

^{xxxvii}Europäische Kommission: *Fragen und Antworten: Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa*, 08. Juli 2020

^{xxxviii}Europäische Kommission: *Fragen und Antworten: Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa*, 08. Juli 2020

^{xxxix}Europäische Kommission: *Factsheet „Europäische Allianz für sauberen Wasserstoff“*, 08. Juli 2020

^{xl}Agora Verkehrswende, These 1 „Die Verkehrswende gelingt mit der Mobilitätswende und der Energiewende im Verkehr.“

Quellen der Abbildungen:

Abbildung 1: Energieeffizienz von Brennstoffzellenfahrzeugen
Transport & Environment: Electrofuels– what role in EU transport decarbonisation?, 2017, Seite 2

Abbildung 2: Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff
Shell Wasserstoff-Studie: Energie der Zukunft?, 2017, Seite 12

Abbildung 3: Prinzip der Brennstoffzelle
Shell Wasserstoff-Studie: Energie der Zukunft?, 2017, Seite 31

Abbildung 4: Funktionsweise der Brennstoffzelle im Pkw
NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie: Wasserstoff und Brennstoffzellen: Antworten auf wichtige Fragen, 03 2018, Seite 11

Impressum

Herausgeber: ACE Auto Club Europa e.V. | Stab Verkehrspolitik | Märkisches Ufer 28 | 10179 Berlin

Redaktion: Julia Collingro | Fon: +49 30 278725-19 | julia.collingro@ace.de

Alle Fotos: ACE Auto Club Europa e.V. bzw. Quellenangabe am Foto.

Gestaltung & Prepress: ACE Auto Club Europa e.V. | Kommunikation und Marketing | Stand: Oktober 2020



UND WEITER GEHT'S

ACE Auto Club Europa e.V.
Schmidener Str. 227
70374 Stuttgart
www.ace.de

ACE Auto Club Europa e.V.
Stab Verkehrspolitik
Märkisches Ufer 28
10179 Berlin
Tel.: 030 278 725-19
E-Mail: verkehrspolitik@ace.de