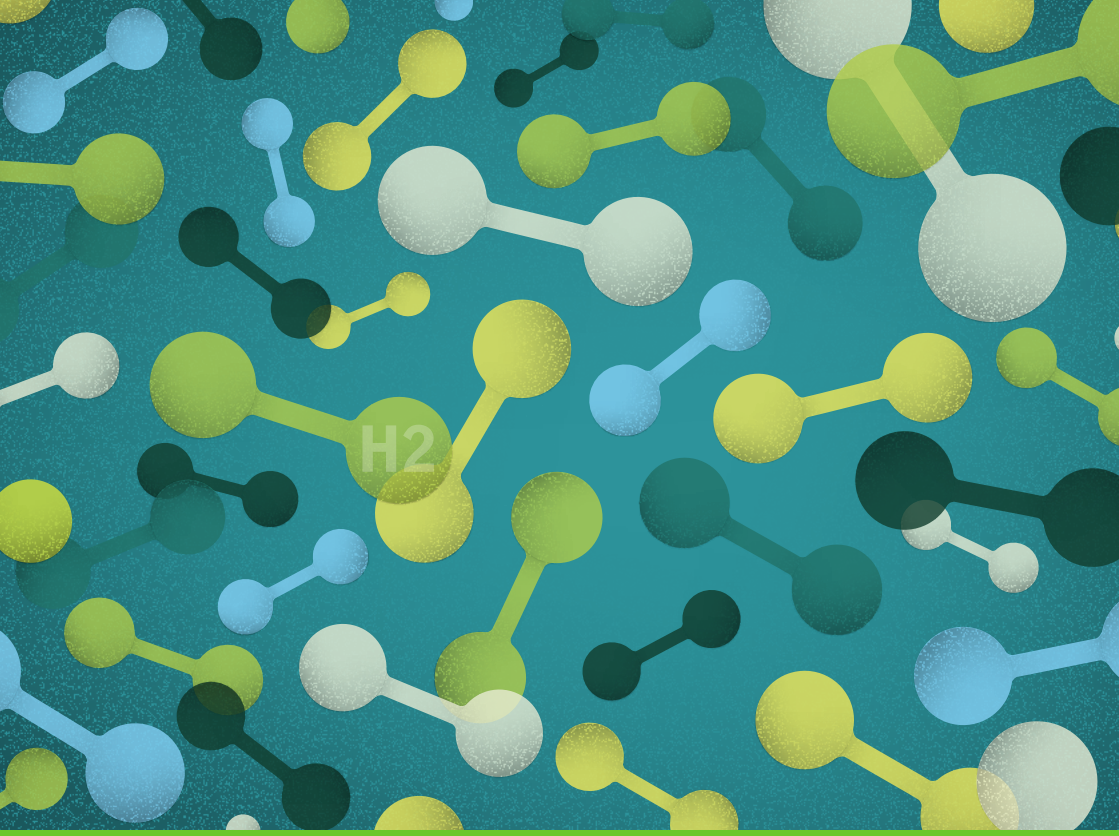


Energie für die klimaneutrale Zukunft

15 Fakten über Wasserstoff

böll
FAKTEN

HEINRICH BÖLL STIFTUNG

Fakt Seite

Vorwort	4
01 – Was ist Wasserstoff?	6–7
02 – Weshalb reden alle über Wasserstoff?	8–9
03 – Wie umweltschonend ist Wasserstoff?	10–11
04 – Wieso ist blauer Wasserstoff umstritten?	12–13
05 – Was sind Elektrolyseure?	14–15
06 – Welche Rolle spielt Wasserstoff für die klimaneutrale Industrie?	16–17
07 – Welche Rolle spielt Wasserstoff im Stromsystem?	18–19
08 – Kann Wasserstoff die Klimabilanz des Verkehrs verbessern?	20–21
09 – Kann Wasserstoff die Klimabilanz des Heizens verbessern?	22–23
10 – Wie wird Wasserstoff transportiert?	24–25
11 – Wie viel Wasserstoff wird in Deutschland benötigt?	26–27
12 – Was ist mit Blick auf Wasserstoff-Importe zu beachten?	28–29
13 – Welche Chancen bietet die Wasserstoff-Produktion den Export-Ländern?	30–31
14 – Wer gestaltet die Rahmenbedingungen für die Wasserstoffwirtschaft?	32–33
15 – Was sind die Gefahren im Umgang mit Wasserstoff?	34–35
Verweise	36–37
Impressum	38

Vorwort

Die Europäische Union und Deutschland wollen bis 2050 (EU) bzw. 2045 (D) klimaneutral sein. Die Verpflichtung zur Klimaneutralität bedeutet, dass emissionsintensive Anwendungen und Produkte durch emissionsfreie Alternativen ersetzt werden müssen. Eine Alternative ist klimaschonender Wasserstoff. Nur grüner Wasserstoff, also Wasserstoff, der mit Wasser und Ökostrom hergestellt wird, ist auf Dauer nachhaltig. Wasserstoff kommt da zum Zuge, wo es keine direkte elektrische Alternative gibt, etwa in der Stahl- und Chemieindustrie oder bei Flugzeugen.

Für die Industrie in Deutschland ist eine zukunftsfeste Wasserstoffwirtschaft von großer Bedeutung. Einerseits benötigt die Industrie klimaschonende Energieträger und Technologien. Andererseits gibt es hierzulande eine starke Industrie, die klimaschonende Energieträger und Technologien entwickeln und vermarkten kann. Im europäischen Verbund können wettbewerbsfähige, ökologisch und sozial verträgliche Wertschöpfungsketten entstehen. Damit Wasserstoff eine global nachhaltige Unternehmung wird, müssen jetzt verbindliche Regeln und kontrollierbare Standards dafür festgelegt werden. Insbesondere auch für Wasserstoffimporte nach Deutschland und in andere europäische Länder.

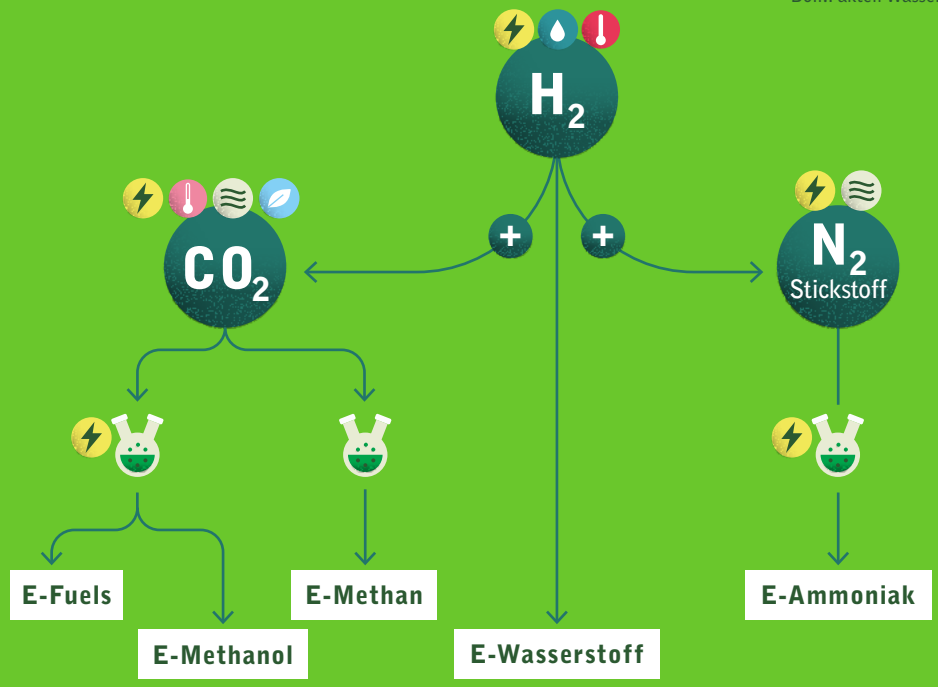
Deutschland und die EU stellen viele Milliarden Euro für Produktionsanlagen, Transportinfrastruktur, Forschung und Entwicklung bereit. Deswegen ist es wichtig zu verstehen, welche Chancen und Herausforderungen in der Wasserstoffwirtschaft liegen und welche politische Gestaltung nachhaltig ist. Wir hoffen, dass dieses Heft zum besseren Verständnis und zu einer konstruktiven Einordnung der Debatte beiträgt.

Dr. Stefanie Groll
Referentin für Ökologie und Nachhaltigkeit, Heinrich-Böll-Stiftung

15 Fakten über Wasserstoff

Wasserstoff ist ein chemisches Element mit vielen Fähigkeiten.

Wasserstoff ist ein chemisches Element mit dem Symbol H (für lat. hydrogenium, «Wassererzeuger») und der Ordnungszahl 1. Es steht am Anfang des Periodensystems und ist das chemische Element mit der geringsten Atommasse. Unter Bedingungen, die normalerweise auf der Erde herrschen, kommt Wasserstoff als molekularer Wasserstoff H_2 vor, als farb- und geruchloses Gas. Es gibt ihn in der Regel nur in Verbindung mit anderen Stoffen. Das heißt, wenn man Wasserstoff haben möchte, muss man ihn aus einem wasserstoffreichen Ausgangsstoff abspalten, z.B. Wasser. Wasserstoff wird als «Multitalent», «Allzweckwerkzeug» und «Plattform» bezeichnet. Diese Metaphern spielen darauf an, dass Wasserstoff als Roh- und Brennstoff, als Energieträger und Energiespeicher, fungieren kann, der sich aus unterschiedlichen Quellen gewinnen lässt. Die in Wasserstoff enthaltene chemische Energie kann in Wärme, Bewegungsenergie und Elektrizität umgewandelt werden. Bisher wird Wasserstoff jedoch vor allem als Rohstoff in der Industrie benutzt. Wasserstoff kann in verschiedene Folgeprodukte weiterverarbeitet werden. Dazu zählen wasserstoffbasierte synthetische Energieträger und Grundchemikalien wie Methanol, Ammoniak, synthetisches Methan und synthetische Kraftstoffe (sog. «E-Fuels»). Dieser Prozess, in dem mit Strom Folgeprodukte hergestellt werden, wird «Power-to-X» (PtX) genannt.[21] Das X steht dabei als Platzhalter für das Folgeprodukt, und das kann zum Beispiel ein Kraftstoff («E-Fuel») oder Ammoniak sein.



Syntheseprozess

E Mit Erneuerbaren Energien hergestellt

Zufuhr von

- Ökostrom
- Nachhaltige Biomasse
- Luft
- Wasser
- Niedertemperaturwärme
- Hochtemperaturwärme

Wie man Synthetische Kraftstoffe und Chemikalien herstellen kann

Das PtX-Verfahren trägt zum Klimaschutz bei, wenn der Strom aus zusätzlichen Ökostromanlagen kommt und das CO_2 aus der Luft oder aus nachhaltiger Biomassenutzung genommen wird.

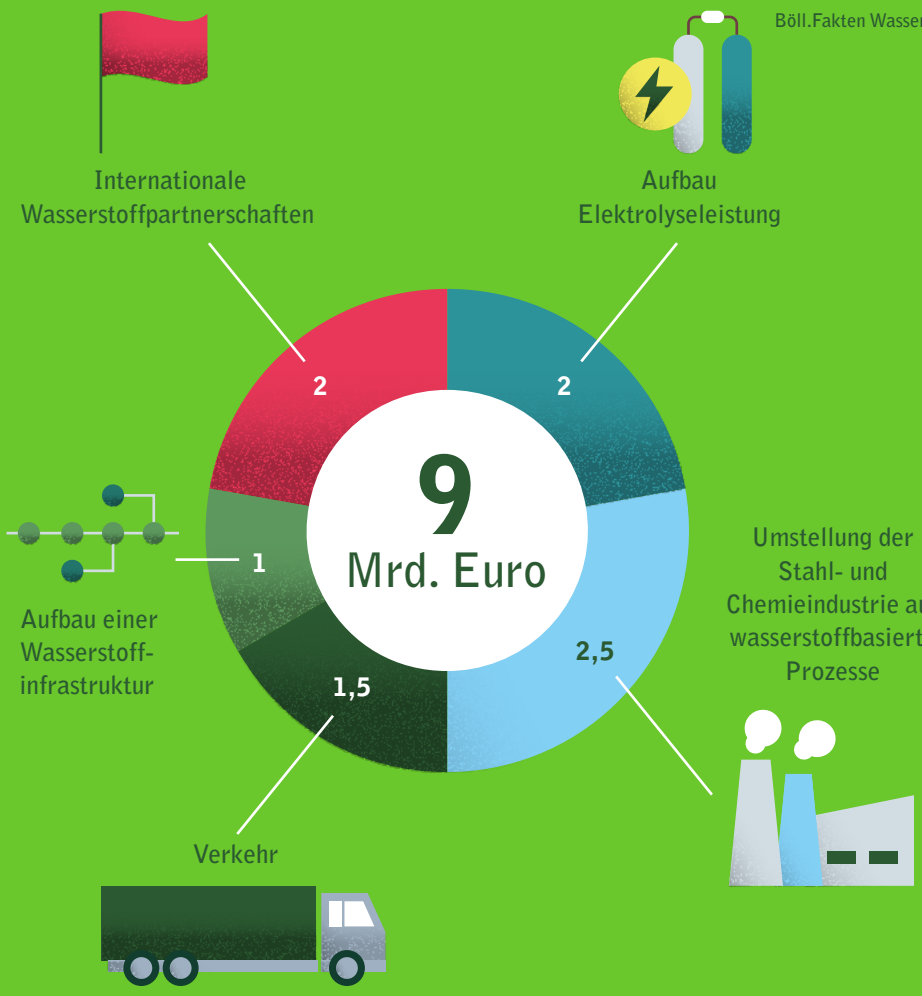
Quelle: Öko-Institut (2019): Power-to-X: Überblick Ausgangsstoffe, Prozesse und PtX-Produkte – Wie aus Strom Brennstoffe und chemische Grundstoffe entstehen, https://bit.ly/3oW4eM7

Immer mehr Staaten wollen klimaneutral werden und wichtige Richtungsentscheidungen treffen.

Klimaneutralität bedeutet, dass ein Gleichgewicht zwischen Treibhausgasemissionen und der Aufnahme von Treibhausgasen aus der Atmosphäre in sogenannten «Treibhausgassenken» (z.B. Wälder und Meere) hergestellt wird. Es bedeutet also nicht, dass es gar keine Treibhausgas-Emissionen mehr gibt. Da das Kompensationspotenzial von natürlichen Senken wie Böden, Moore oder Wälder und künstlichen Versenkungstechnologien wie der CO_2-Abscheidung aus der Luft oder Abgasen und der Verpressung in geologischen Hohlräumen nicht gesichert ist, muss CO_2-Vermeidung absolute Priorität haben.

Dabei kann die Produktion und Verwendung von Wasserstoff helfen. Die notwendigen Infrastrukturen und Geschäftsmodelle für die Wasserstoffwirtschaft werden derzeit konzipiert und entwickelt. Deutschland und die Europäische Union unterstützen das industriepolitisch mit sehr viel Geld, Koordination und einem angepassten energiewirtschaftlichen Ordnungsrahmen. Aber wo es um die Verteilung von staatlichen Milliarden geht, entsteht naturgemäß eine intensive Debatte. So gibt es ein starkes Eigeninteresse der Erdgasindustrie, ihre Rolle auch in der Wasserstoffwirtschaft zu sichern. Die Erdgasindustrie möchte ihr traditionelles Geschäftsmodell mit Erdgas erhalten, was mit dem übergeordneten, gesellschaftlichen Ziel von Klimaneutralität aber nicht vereinbar ist.

Die Bundesregierung möchte die politische Förderung auf grünen Wasserstoff konzentrieren.[72] Was Importe betrifft, kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch blauer (etwa aus den Niederlanden) oder pinker (etwa aus Frankreich) Wasserstoff nach Deutschland kommt. Die EU priorisiert grünen Wasserstoff, befindet jedoch, dass kurz- und mittelfristig auch «kohlenstoffarmer» Wasserstoff gebraucht würde.[73] Diese Position wird mehrheitlich vom Nationalen Wasserstoffrat in Deutschland geteilt – die Umweltverbände im Nationalen Wasserstoffrat haben dazu ein abweichendes Sondervotum abgegeben.[74]



Dahin gehen die ersten Milliarden

Von den neun Milliarden Euro Deutschlands fließen sieben Milliarden Euro in nationale und zwei Milliarden in internationale Projekte

Quelle: Nationaler Wasserstoffrat (2021): Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021-2025, https://bit.ly/3yn0Tqu, S. 11

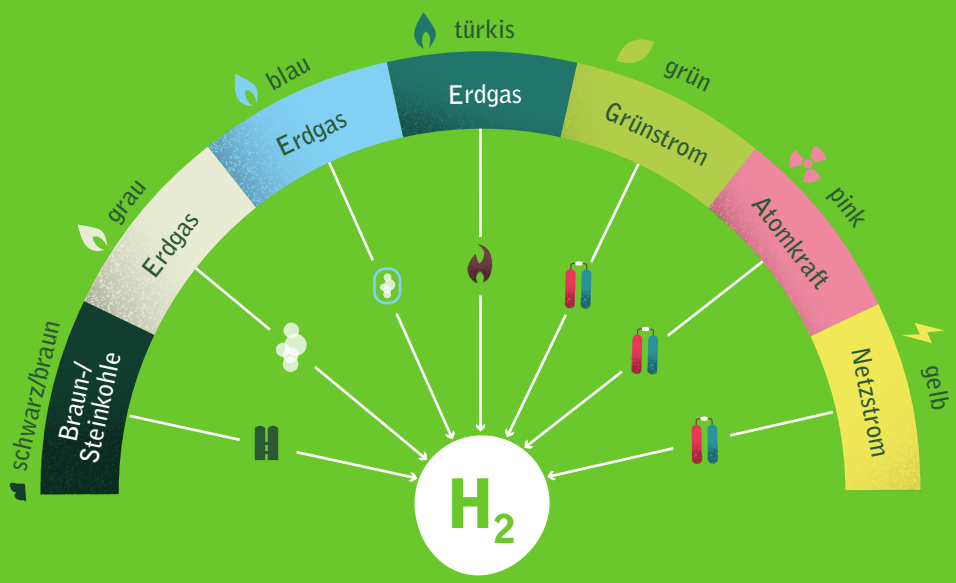
Entscheidend ist, mit welchen Ausgangsstoffen und Verfahren der Wasserstoff hergestellt wird.

Im Jahr 2017 wurden durch die weltweite Wasserstoff-Produktion 830 Millionen Tonnen CO_2 ausgestoßen. Das ist mehr, als Deutschland insgesamt emittierte (797 Millionen Tonnen CO_2).[15] Der heutige Wasserstoff ist fast zu 100 Prozent aus Erdgas hergestellter sog. «grauer Wasserstoff». Bei seiner Produktion wird gasförmiger Kohlenstoff ausgestoßen. Auch blauer und türkiser Wasserstoff basieren auf Erdgas. Bei blauem Wasserstoff werden die CO_2-Emissionen abgeschieden und unter der Erde verpresst. Bei türkisem Wasserstoff könnte der als Nebenprodukte entstehende feste Kohlenstoff als Verbundwerkstoff, Füllstoff oder Baumaterial eingesetzt werden. In Deutschland treiben BASF und Wintershall Dea dieses Verfahren voran. Auch der russische Gazprom-Konzern hat Interesse, türkisen Wasserstoff aus Russland in die EU zu liefern.[16]

Die Farben verweisen also darauf, mit welchen Verfahren und welchen Ausgangsstoffen er hergestellt wurde. Er sagt nichts über den Wasserstoff an sich aus.

Weil das CO_2 beim blauen und türkisen Wasserstoff nicht (sofort) in die Atmosphäre gelangt, sondern «eingelagert» würde (unter der Erde bzw. in einem Feststoff), werden diese Verfahren als klimaneutral bezeichnet. Die Bezeichnung ist umstritten, weil durch die Erdgas-Verwendung Mehremissionen entstehen.

Nur grüner Wasserstoff, der mit Ökostrom im Elektrolyseverfahren hergestellt wird, ist praktisch emissionsfrei. Emissionen fallen nur beim Bau der Produktionsanlagen an. Pinker und gelber Wasserstoff werden auch mittels Strom und Elektrolyse erzeugt. Bei pinkem Wasserstoff wird Atomstrom verwendet, bei gelbem Wasserstoff Leitungsstrom, einem Strommix aus fossilem, Öko- und Atomstrom.



Vergasung

Dampfreformierung

Dampfre. + CCS
(Carbon Capture and Storage,
auf Deutsch: Abscheidung
und Speicherung von CO_2)

Pyrolyse

Elektrolyse

Der Regenbogen des Wasserstoffs

Wasserstoff an sich hat keine Farbe. Die Farben stehen symbolisch für die Ausgangsmaterialien und Herstellungsverfahren.

Quelle: Frontier Economics: (2020): Green, blue hydrogen - Potentials and security of supply, https://bit.ly/3yjRgJ6, S. 5

Blauer Wasserstoff basiert auf Erdgas, bei der Produktion werden Treibhausgase freigesetzt.

Einige Fachleute argumentieren, dass blauer Wasserstoff als Übergangslösung gebraucht werde, bis es genügend grünen Wasserstoff gebe. Es gelte, Investitions-Zeitfenster zu nutzen und in neu gebauten Anlagen Anwendungen mit Wasserstoff zu erproben. Für die Erprobung und Markteinführung sei blauer Wasserstoff eine pragmatische Lösung. Wenn dann genügend grüner Wasserstoff zur Verfügung stehe, könnte von blau auf grün umgestellt werden. Andere Fachleute sind skeptisch und befürchten «Lock-in-Effekte», zu deutsch: «Einsperr-Effekte». Damit ist gemeint, dass der Übergang zu grünem Wasserstoff versperrt wird und stattdessen weiter mit klimaschädlichem Erdgas gewirtschaftet würde.

Blauer Wasserstoff basiert wie grauer Wasserstoff auf Erdgas. Selbst wenn das CO_2 nach der Wasserstoff-Herstellung zum Großteil abgeschieden und unterirdisch verpresst würde, blieben die klimaschädlichen Emissionen, die bei der Förderung und dem Transport des Erdgases entstehen (sog. «Vorketten-Emissionen») Das Problem ist das Methan, der Hauptbestandteil von Erdgas. Gelangt Methan in die Atmosphäre, wirkt es dort über einhundert Jahre 28-mal klimaschädlicher als CO_2, über 20 Jahre wirkt es sogar 84-mal stärker als CO_2.[7]

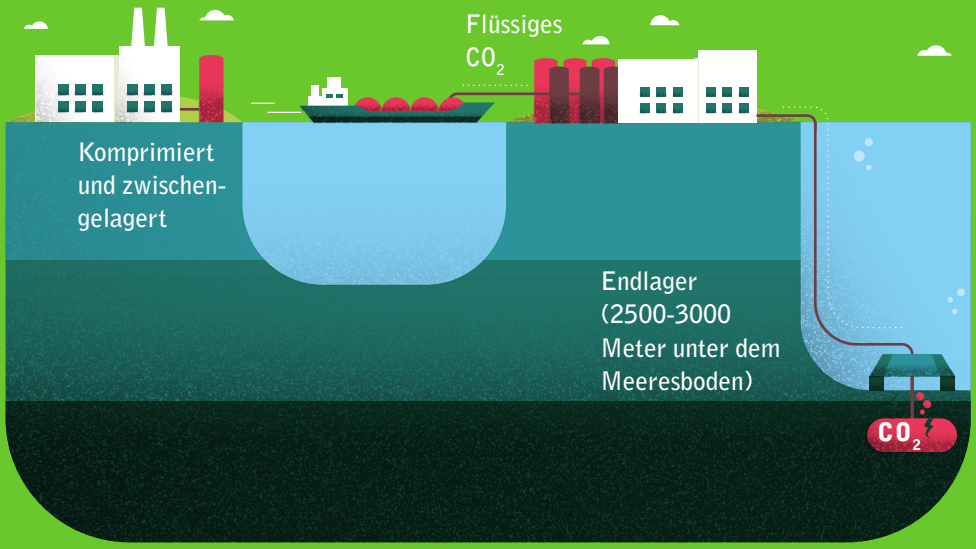
Die vermeintliche Endlagerung von CO_2 im Boden ist bisher wenig erprobt und in Deutschland faktisch verboten. In anderen Ländern ist es erlaubt und wird häufig dafür genutzt, um Erdgas oder Erdöl zu fördern. Das CO_2 wird in fast erschöpfte Erdgas- bzw. Erdöl-Lagerstätten injiziert, um die letzten Reste rauszuholen. Diese Praxis läuft dem Versprechen und dem Ziel von Klimaneutralität zuwider.

CO_2-Sequestrierung
Sequestrierung aus industriellen Anlagen

Transport
Komprimiertes CO_2 wird in Schiffen transportiert

Endlager
CO_2 kommt an und wird zwischengelagert

Über Offshore-Pipelines exportiert



Riskantes Endlager

Der norwegische Erdgas- und Ölkonzern Equinor (früher Statoil) möchte in großem Stil blauen Wasserstoff erzeugen und das CO_2 anschließend im Meer verpressen. Umweltschutzorganisationen bewerten dieses Vorhaben als ökologisch riskant.

Quelle: Equinor (2021) Nothern Lights CCS, https://bit.ly/3yf79Ax

Elektrolyseure sind Anlagen, in denen Wasserstoff durch die Aufspaltung von Wasser mit Strom erzeugt werden kann.

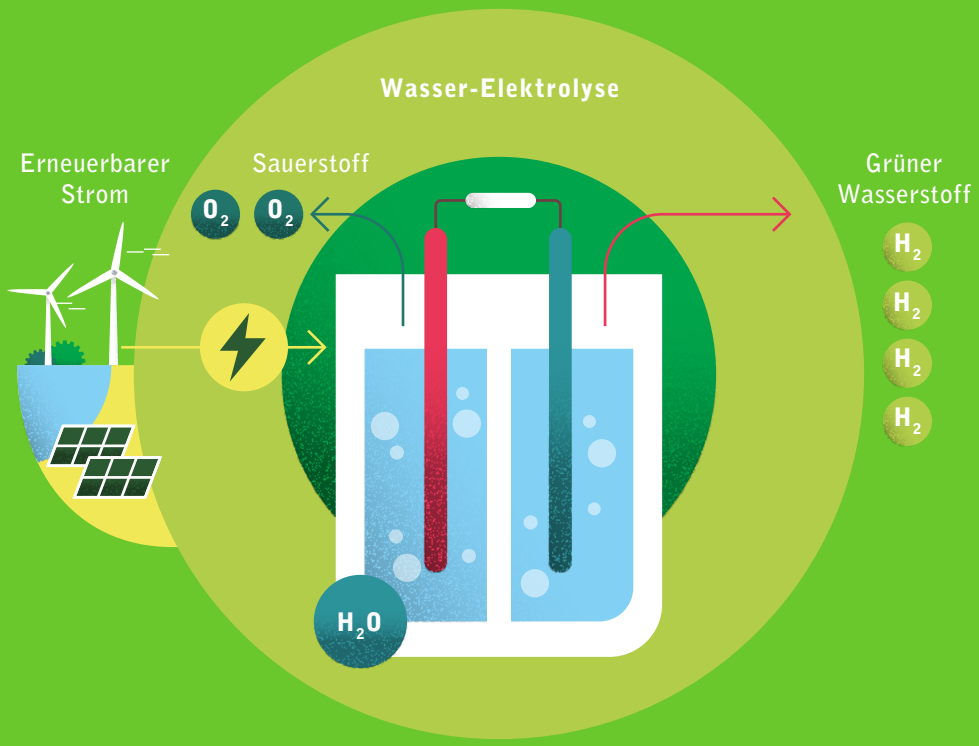
Wasserstoff kommt auf der Erde nur sehr selten in Reinform vor, meistens ist er an andere Stoffe gebunden. Zum Beispiel an Wasser: H_2O, ist eine chemische Verbindung aus den Elementen Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H). Wenn man Wasserstoff haben möchte, muss man die Wasserstoff-Moleküle vom Sauerstoff abspalten. Das technische Verfahren dazu heißt Elektrolyse. Unter Hinzunahme von Strom wird das Wasser dann in die Elemente Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt.

Es gibt verschiedene Arten von Elektrolyseuren. Sie unterscheiden sich nach Aufbau und Verfahren. Dies hat Auswirkungen auf ihren Effizienzgrad, auf die Herstellungskosten für Wasserstoff und darauf, wie gut sie im Zusammenspiel mit Erneuerbaren Energien funktionieren. Die Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (engl. Proton-Exchange-Membran-Elektrolyse, kurz PEM-Elektrolyse) ist am besten für die fluktuierende Einspeisung mit Erneuerbaren Energien geeignet.[78]

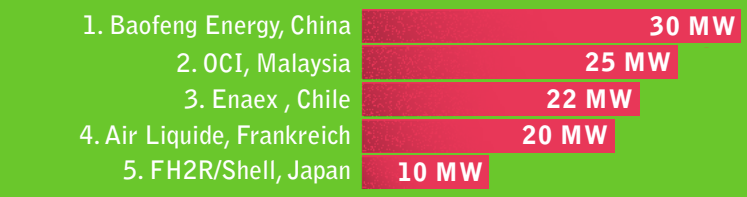
Das Elektrolyseure-Geschäft befindet sich im Aufbau. Die Bundesregierung co-finanziert den Aufbau von Elektrolyseuren in Deutschland und Ländern und Regionen, aus denen grüner Wasserstoff importiert werden soll.

Die Bundesregierung plant, bis 2030 eine Elektrolyseure-Kapazität von 5 Gigawatt (GW) in Deutschland aufzubauen, bis 2040 sollen es 10 GW sein. Die Europäische Union und auch Deutschland investieren viele Milliarden in die Erforschung der Elektrolyse bis zur Marktreife. Für den traditionell starken deutschen Anlagen- und Maschinenbau tun sich hier große Chancen auf. In einem Chemie-Park im rheinländischen Wesseling wurde im Juli 2021 die bis dato größte europäische PEM-Elektrolyse-Anlage in Betrieb genommen. Sie hat eine Kapazität von 10 Megawatt (MW), das sind 0,01 GW.[79] Am Chemiestandort Leuna soll bis 2022 eine PEM-Anlage mit 24 MW in Betrieb gehen.[710]

Die größten PEM-Elektrolyseure der Welt



Die Größen der PEM-Anlagen



Aus elektrischer Energie wird chemische Energie

Mittels Elektrolyse werden aus Strom Sauerstoff (O_2) und Wasserstoff (H_2) gewonnen

Quelle: Stadtwerke Esslingen (2020): Energieversorgung der Zukunft, Beitrag vom 07.04.2020, https://bit.ly/3zLQFBm

Wasserstoff ist eine wichtige Technologie, um die Industrie bis 2040 weitestgehend klimaneutral zu machen.

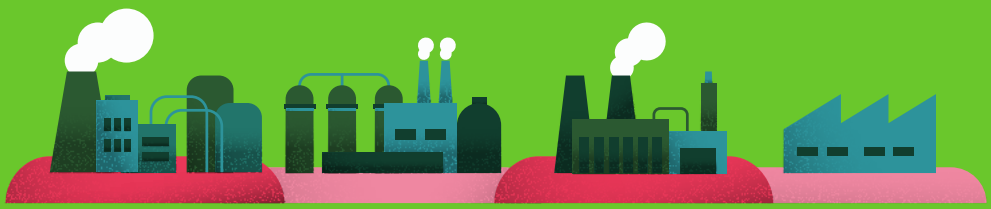
Grüner Wasserstoff kann als Energieträger und Rohstoff fossile Energieträger und davon abgeleitete Produkte ersetzen. Er kommt da zum Zuge, wo es keine anderen Klimaschutzoptionen gibt, Priorität haben die chemische Industrie und die Stahlherstellung. Auf chemische Erzeugnisse und Stahl können moderne Industriegesellschaften nicht verzichten. Das Problem ist, dass bei der Produktion viele Treibhausgasemissionen anfallen. Zwei Beispiele zeigen, wo und wie grüner Wasserstoff eine Lösung bietet:

Ammoniak ist ein wichtiger Grundstoff für die chemische Industrie. Bisher wird er vor allem auf Basis von Erdgas, Kohle und Öl produziert. Laut Verband der Chemischen Industrie, ist die Ammoniaksynthese das CO_2-intensivste petrochemische Verfahren weltweit.[11] Mit grünem Wasserstoff könnte nun grünes Ammoniak hergestellt werden, was den CO_2-Fußabdruck der chemischen Industrie stark verkleinern würde.[12]

Stahl wird im Hochofen oder in einer Direktreduktionsanlage erzeugt. Bei der Hochofen-Route kann grüner Wasserstoff die sog. Einblaskohle ersetzen und die Emissionen mindern. Bei der Direktreduktionsroute kann grüner Wasserstoff anstatt Erdgas verwendet werden, als Nebenprodukt entsteht Wasser statt CO_2.

Die Bundesregierung unterstützt solche Technologiewechsel und will die industriepolitische Förderung noch intensivieren. Geplant sind unter anderem sog. Klima- bzw. Differenzverträge (Carbon Contracts for Difference) zwischen emissionsintensiven Industrieunternehmen und dem Staat. Mit Differenzverträgen wird vereinbart, dass der Staat den Industrieunternehmen für die Umstellung auf treibhausgassparende Produktion einen Ausgleich zahlt. So werden die Mehrkosten für grünen Wasserstoff und den Austausch von Produktionsanlagen kompensiert, und die Industrieunternehmen bleiben wettbewerbsfähig.

Hauptanwendung



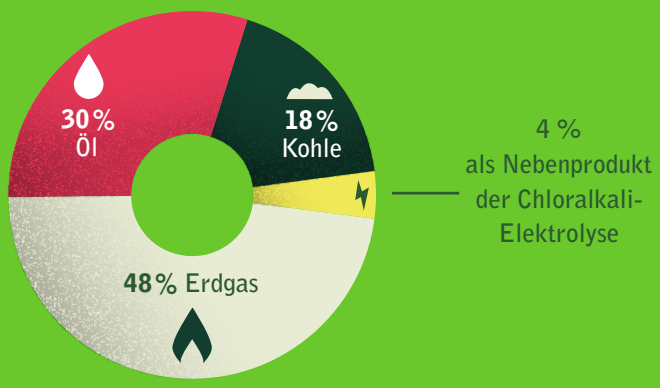
Chemische Industrie
Ammoniak (Düngemittel)
Polymere (Kunststoffe)
Harze

Raffinerien
Hydrocracking
Entschwefeln

Stahlproduktion
Tempern/Härten
Schutzgas
Formiergas

Industrie allgemein
Halbleiter
Lebensmittelproduktion
Hydrierung von Fetten
Glasproduktion
Generatorkühlung

Wasserstoffquellen



Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff

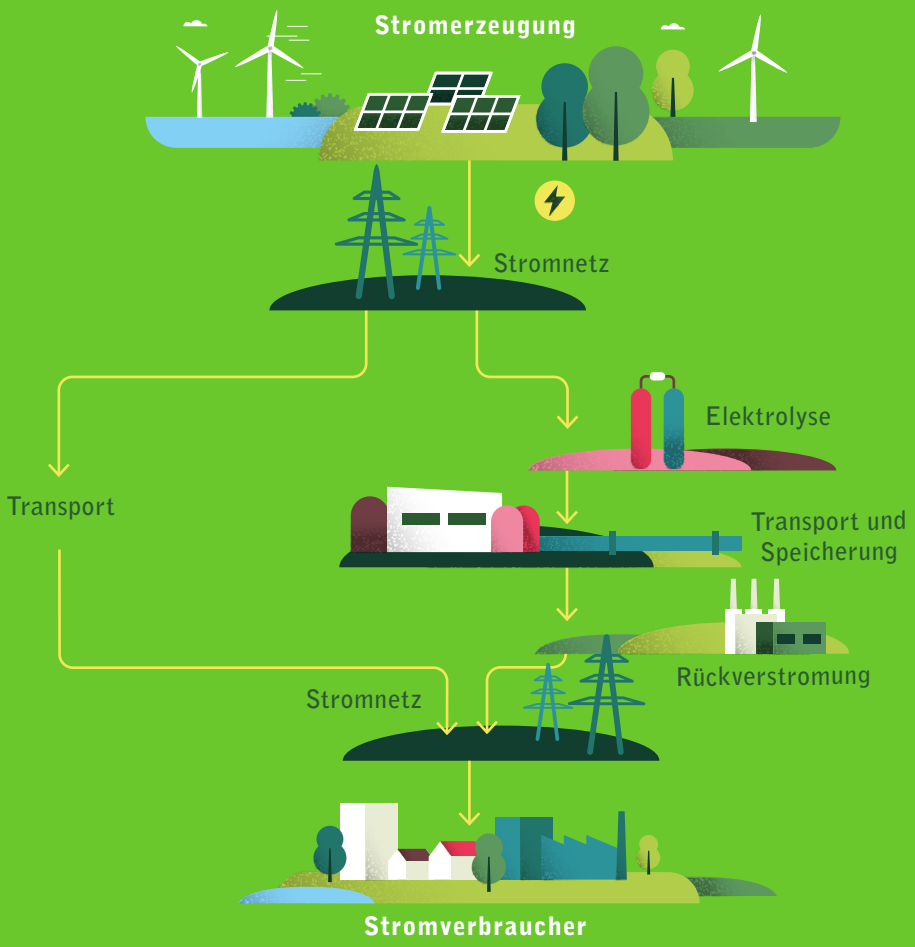
Rund 99 Prozent der weltweit gut 600 Milliarden Kubikmeter Wasserstoff werden in der Industrie eingesetzt. Nur gut 1 Prozent wird direkt energetisch genutzt, als Treibstoff für Raketen. Bisher ist fast aller Wasserstoff grau.

Quellen: Raul Miranda, Emanuele Taibi, Thomas Winkel (2018): Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition, https://bit.ly/3kvKewh, S. 14. Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (2015): Wasserstoff, der neue Energieträger, https://bit.ly/3DjyeGu, S. 8

Langfristig ist Wasserstoff eine Option, um Energie längere Zeit zu speichern.

Aktuell spielt Wasserstoff für die Stromversorgung keine nennenswerte Rolle. Die Nutzung von Wasserstoff wird erst notwendig, wenn es im Stromsystem einen sehr hohen Anteil von Erneuerbaren Energien gibt. Dann könnte Wasserstoff als Energiespeicher fungieren und rückverstromt werden. Aufgrund seiner Speicherfähigkeit wird Wasserstoff oft als «Partner der Erneuerbaren» bezeichnet.

Die Stromversorgung muss in den nächsten 10 bis 15 Jahren komplett dekarbonisiert werden. «Dekarbonisiert» bedeutet, dass kein Strom mehr aus Kohle, fossilem Gas oder Erdöl erzeugt wird. Windkraft und Photovoltaik sind die wichtigsten Säulen dieses kohlenstofffreien Energiesystems. Die Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie schwankt aber Unternehmen und private Haushalte können ihren Strombedarf (Stromnachfrage) in kleinem Umfang an ein schwankendes Stromangebot anpassen. Zum Beispiel können Kühlanlagen für ein paar Stunden mit halber Kraft fahren. Die Stromnachfrage an die schwankende Einspeisung anzupassen – sie zu flexibilisieren – ist ein wichtiges Projekt der Energiewirtschaft und der Energiepolitik. Für die Versorgungssicherheit werden aber, neben der Flexibilisierung der Nachfrage, Stromspeicher notwendig sein. Dafür bieten sich Batterien, Pumpspeicherkraftwerke oder eben Wasserstoff an. Wasserstoff wäre ein tauglicher Energieträger und kann rückverstromt werden, wenn alle anderen Speicher- und Flexibilitätsoptionen ausgeschöpft sind. Fachleute gehen davon, dass Wasserstoff im Wesentlichen nur in längeren Schwachwindphasen im Winter rückverstromt werden würde.[13]



Aus Ökostrom wird Ökogas und wieder Ökostrom

Bei der Umwandlung geht immer Energie verloren. Deswegen sollte der Ökostrom, wo es möglich ist, direkt genutzt werden – «Electrification first» ist das Motto.

Quelle: Natalie Ebersbach, Bernd Emonts, Peter Markewitz et al. (2018): Auslegung und Bewertung von Wasserstoffrückverstromungspfaden in nationalen Energiesystemen räumlich-zeitlich aufgelöster Energiesystemoptimierung, https://bit.ly/3t1ILBL, S. 2

Im LKW-, Schiffs- und Flugverkehr können Wasserstoff und wasserstoffbasierte Kraftstoffe zur Dekarbonisierung beitragen.

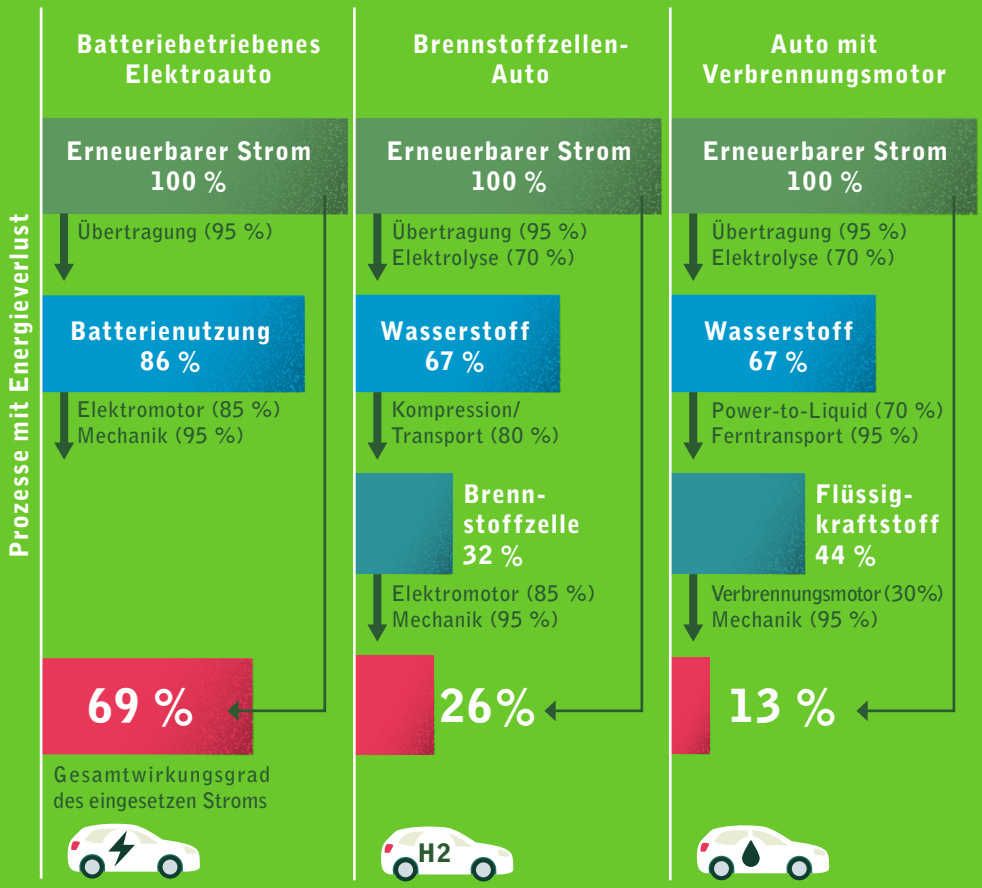
Die meisten Fachleute gehen davon aus, dass Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe («E-Fuels») bis 2030 keine nennenswerte Rolle im Verkehrsbereich spielen. Auch danach sind Brennstoffzellen-Antriebe oder PtX-Kraftstoffe nur in einigen Bereichen sinnvoll.

E-Fuels werden derzeit nur im Labormaßstab produziert, die Produktion ist sehr energieaufwendig. Für die Herstellung von E-Fuels wird zunächst eine Elektrolyse durchgeführt, also Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Durch die Zugabe von CO_2 entsteht aus Wasserstoff Methan. Durch weitere chemische Prozesse werden die gewünschten Kraftstoffe gewonnen. Sie sind chemisch identisch mit dem herkömmlichen Benzin, Diesel oder Kerosin

Da Ökostrom perspektivisch knapp bleibt, sollten E-Fuels nur da eingesetzt werden, wo ein batterieelektrischer Antrieb nicht möglich ist.[14] Das gilt etwa für den Flugverkehr oder für die maritime Schifffahrt. Für die Schifffahrt wird auch an Ammoniak-Antrieben geforscht. Das Ammoniak wird aus Luft, Wasser und Ökostrom erzeugt, in dem Antriebssystem der Wasserstoff herausgetrennt und in einer Brennstoffzelle verbrannt.

In Deutschland gibt es aktuell gut 48 Millionen PKWs, nur rund 800 davon sind Brennstoffzellen-Autos.[15] Wegen der hohen Gesamtkosten des Betriebs und der schlechten Energieeffizienz sind Wasserstoff-Autos keine günstige Option, um die Emissionen im Straßenverkehr zu mindern.

Das Thema Brennstoffzelle ist aber bei LKW-Herstellern und Logistikunternehmen im Aufwind, jedenfalls wenn es um den Fernverkehr geht. So hat sich etwa Daimler mit Volvo zusammengetan, um schwere Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge für den Fernverkehr zu bauen.[16] Im nahen Lieferverkehr und für mittlere Distanzen sind wiederum Batterie-Trucks die günstigere Lösung.



Hinweis: Einzelwirkungsgrade in Klammern. Durch Multiplikation der Einzelwirkungsgrade ergeben sich die kumulierten Gesamtwirkungsgrade in den Kästen

Batteriebetrieb ist am effizientesten

Der Gesamtwirkungsgrad des eingesetzten Stroms ist im Brennstoffzellen-Auto und bei Flüssigkraftstoffen geringer.

Quelle: Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe, https://bit.ly/3DmvDvu, S. 12

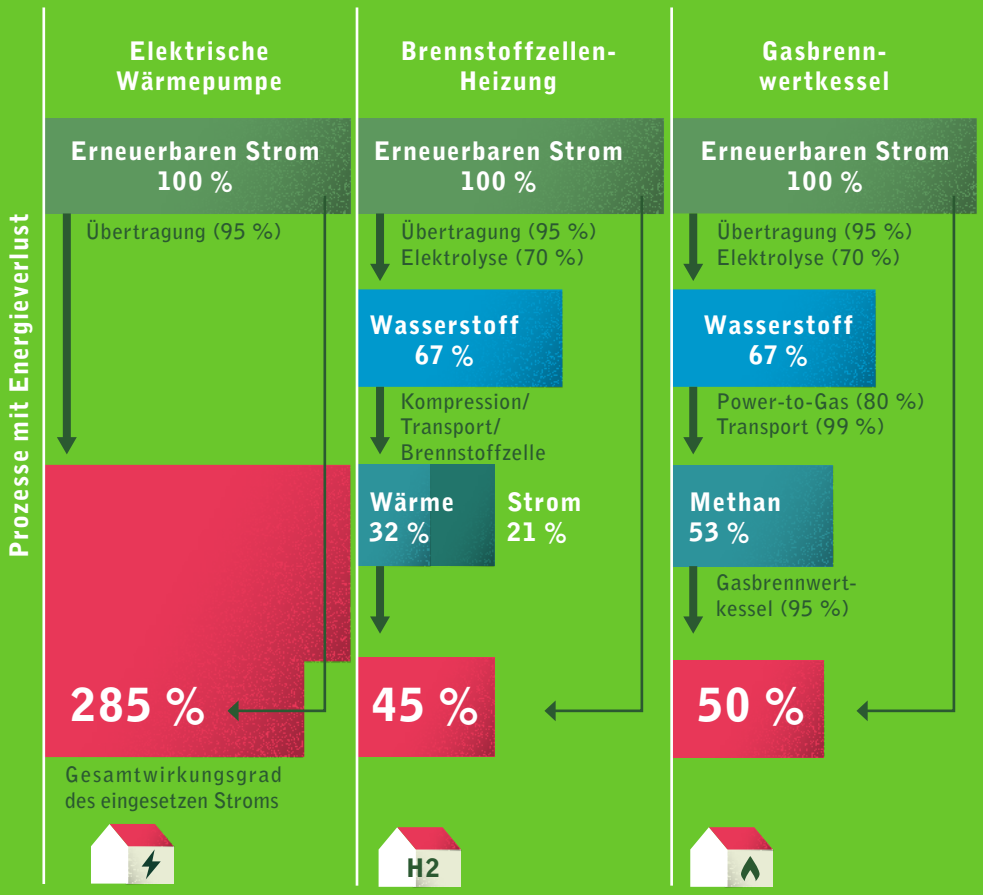
Für das Heizen ist Wasserstoff aus sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Gründen nur sehr begrenzt sinnvoll.

In der Wärmeversorgung dominieren Erdgas und -öl. Knapp die Hälfte aller Wohnungen wird mit Erdgas beheizt, knapp ein Viertel mit Erdöl. Elektrische Kessel und Wärmepumpen, Biomasse oder Kohle kommen deutlich seltener vor. Im gewerblichen Gebäudebereich sieht es ähnlich aus.[17] Wie beim Verkehr sollten auch im Gebäudesektor zunächst andere emissionsmindernde Strategien und effizientere Technologien eingesetzt werden, bevor Wasserstoff oder wasserstoffbasierte Heizstoffe zum Zuge kommen.

Die effizienteren und günstigeren Optionen sind: den Wärmebedarf, etwa durch Dämmung, senken und erneuerbaren Strom und Abwärme direkt nutzen. Eine Wärmepumpe nutzt den Strom etwa fünfmal effizienter als ein Gaskessel, der mit Wasserstoff betrieben wird.[18]

Hersteller wie Bosch, Viessmann oder Vaillant entwickeln und vermarkten Heizkessel, die «H_2-ready» sind. Diese Heizkessel funktionieren mit herkömmlichem Erdgas oder einer Wasserstoff-Beimischung von bis zu 20 Prozent. Falls es dann eines Tages ein flächendeckendes, reines Wasserstoffnetz gebe, so die Hersteller, könnten die H_2-ready-Heizkessel durch einen Brennertausch auf 100 Prozent H_2-Betrieb umgerüstet werden.[19]

Bis dato ist ungewiss, ob es jemals genug grünen Wasserstoff zu akzeptablen Preisen geben wird, der in umgewidmeten Erdgasleitungen transportiert und dann verheizt werden kann. Die Knappheit wird perspektivisch ein Preistreiber bleiben. Unsicher ist auch, ob es überhaupt ein entsprechendes Verteilernetz bis an einzelne Häuser geben wird. Die Heizkosten für eine Wasserstoff-Heizung würden mindestens doppelt so hoch sein wie mit einer Wärmepumpe. Somit ist Wasserstoff keine Option für eine sozialverträgliche Dekarbonisierung der Wärmeversorgung.[20]



Hinweis: Einzelwirkungsgrade in Klammern. Durch Multiplikation der Einzelwirkungsgrade ergeben sich die kumulierten Gesamtwirkungsgrade in den Kästen. Für die Wärmepumpe wird eine Jahresarbeitszahl von drei angenommen.

Wärmepumpe ist am effizientesten

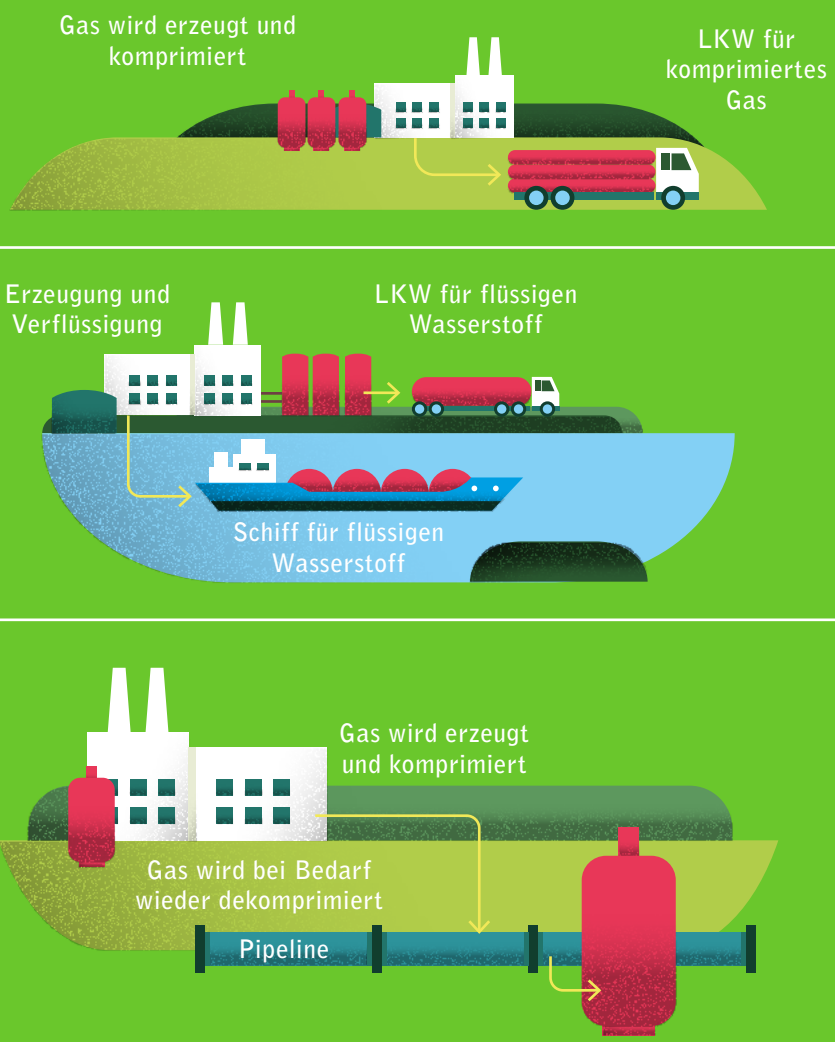
Der Gesamtwirkungsgrad des eingesetzen Stroms ist bei Brennstoffzellen-Heizung und im Gasbrennwert-Kessel geringer.

Quelle: Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe, https://bit.ly/3DmvDvu, S. 13

Wasserstoff kann je nach Distanz und Menge über Pipelines oder mit Schiffen und Tanklastwagen transportiert werden.

Der meiste Wasserstoff, der heute hergestellt wird, wird direkt am Produktionsstandort verbraucht – zum Beispiel auf dem Werksgelände eines Chemie-Unternehmens. Nur fünf Prozent des weltweit erzeugten Wasserstoffs wird bisher transportiert.[21] Es gibt daher keine ausgewachsene Wasserstoffinfrastruktur. Nun planen viele Länder und Regionen, Wasserstoff zu nutzen, um klimaneutral zu werden. Es wird Länder geben, die mehr Wasserstoff produzieren können, als sie selbst verbrauchen, und Länder, die mehr brauchen, als sie selbst erzeugen. Für diese globale Wasserstoffwirtschaft werden Transportsysteme benötigt. Für kürzere und mittlere Distanzen und hohe Mengen bieten sich Pipelines an. Die Gasnetz-Betreiber plädieren dafür, die bestehenden Erdgas-Pipelines zu nutzen. Zunächst soll Wasserstoff dem Erdgas beigemischt werden, danach könnte eine Umwidmung in ein reines Wasserstoffnetz stattfinden. Viele Expertinnen und Experten sind der Meinung, dass es eine kostspielige Verschwendung des hochwertigen Wasserstoffs darstellt, wenn man ihn ins Erdgasnetz mischt. Gasnetzbetreiber sagen, eine Beimischung von 10 bis 20 Prozent und insbesondere auf Verteilnetzebene sei ein Beitrag zur Dekarbornisierung, an erster Stelle für den Wärmesektor.[22]

Und wie ist es mit der Umwidmung von Erdgas- in reine Wasserstoff-Pipelines? Dies lohnt sich erst, wenn Wasserstoff in sehr hohen Mengen hindurch geführt würde. Für weit entfernte Exportländer kommen Pipelines aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht infrage. Stattdessen wird der Transport mit Schiffen auf der Langstrecke und mit Tanklastwagen für die Verteilung vonstattengehen. Der Wasserstoff muss dafür aber zunächst verflüssigt oder in bestimmten Trägermaterialien gespeichert werden.[23] Effizienter kann es sein, sofort ein gewünschtes Endprodukt, etwa synthetische Kraftstoffe oder Ammoniak, zu importieren, weil das leichter zu transportieren ist.



Wege des Wasserstoffs

Ideen und Möglichkeiten gibt es viele. In Forschungsverbünden wird nach den besten Lösungen je nach Anwendungsfall gesucht.

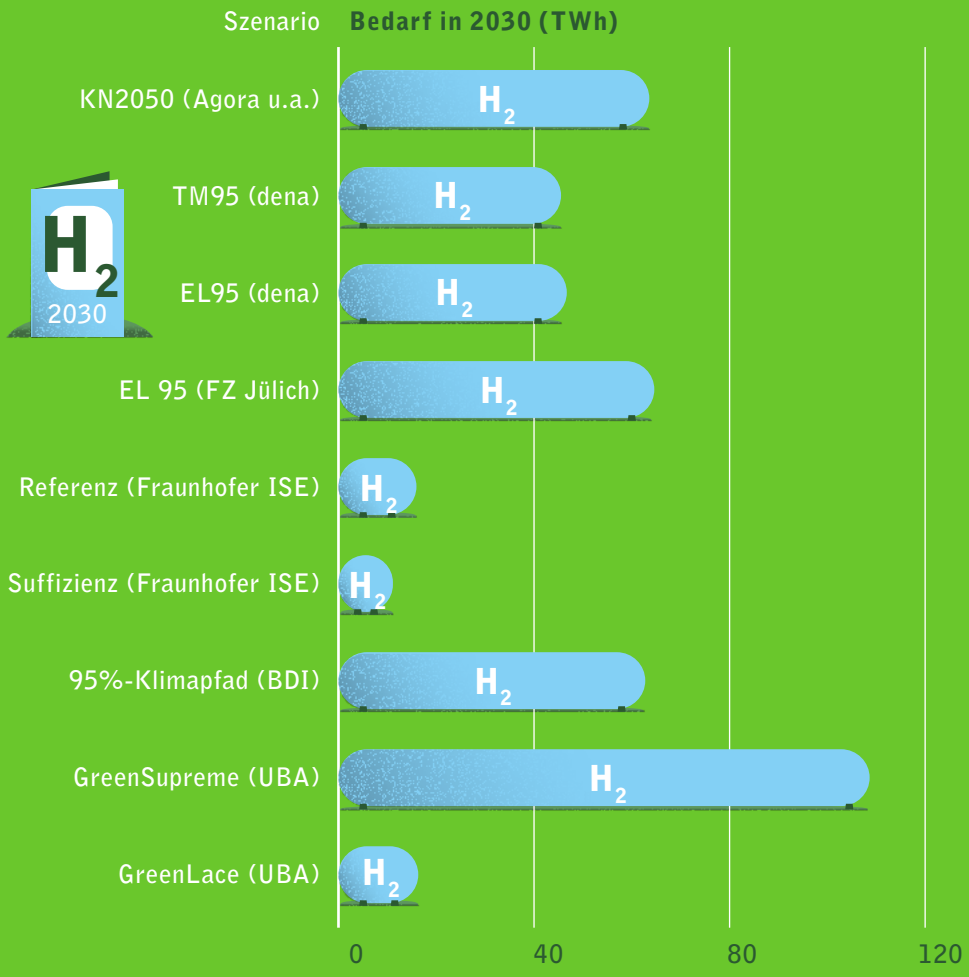
Quelle: Hydroville (2020): How is Hydrogen Transported?, https://bit.ly/3gzf85J

Der zukünftige Bedarf an Wasserstoff wird höchst unterschiedlich eingeschätzt.

Es ist Aufgabe der Politik, die Wasserstoffwirtschaft in nachhaltige Bahnen zu lenken. Für die politische Gestaltung ist es wichtig zu wissen, wie sich die Energieversorgung insgesamt entwickeln wird. Die Wissenschaft hilft, einen möglichen Weg in die Zukunft (einen sog. Transformationspfad) und einen möglichen zukünftigen Zustand zu beschreiben. Diese Konstruktionen heißen Szenarien. Es ist wichtig zu betonen, dass Szenarien die Zukunft nicht vorhersagen können, sondern Möglichkeiten aufzeigen. Wie viel Wasserstoff in den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten in Deutschland benötigt wird, welche «Farbe» er hat, wie und wo er produziert wird, hängt von den heutigen Entscheidungen ab. Die Politik gestaltet dies in hohem Maße mit – etwa über industrie- und forschungspolitische Instrumente und Rahmenbedingungen.

Der nationale Verbrauch von Wasserstoff wird mit 55[124] bis 60[125] Terawattstunden (TWh) angegeben. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen stellt neun Szenarien gegenüber, die Aussagen zu den nachgefragten Mengen an nicht-konventionell hergestelltem Wasserstoff (inkl. PtX-Folgeprodukte) im Jahr 2030 machen.[126] Die Bandbreite der erwarteten Mengen ist hoch. Das liegt daran, dass eben unterschiedliche Annahmen darüber getroffen werden, wie viel fossile Energieträger noch genutzt werden, wie sich Energieeffizienz und Energiesparsamkeit entwickeln oder wie teuer es sein wird, Wasserstoff und PtX-Folgeprodukte zu importieren.

Weitgehender Konsens besteht darüber, dass (grüner) Wasserstoff vor allem in der Industrie eingesetzt werden sollte, um dort Emissionen zu vermeiden, und dass ein Großteil des Wasserstoffs importiert wird.



Bedarfsschätzungen für Wasserstoff

Nachgefragte Mengen an Wasserstoff (inkl. PtX-Folgeprodukten) im Jahr 2030 in verschiedenen Szenarien (ohne konventionell hergestellten Wasserstoff).

Quelle: Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021): Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse, Stellungnahme 23.06.2021, https://bit.ly/3xulEkI, S. 11

Zielkonflikte und negative Auswirkungen für Mensch und Natur in den exportierenden Regionen müssen verhindert werden.

Der Bedarf an grünem Wasserstoff ist größer als die Menge, die in Deutschland selbst erzeugt werden kann. Gut zwei Drittel müssten ab 2030 importiert werden. In Ländern mit viel Fläche, Sonne und Wind herrschen geografisch und physikalisch gesehen gute Bedingungen für die Produktion von grünem Wasserstoff. Da der Transport über weite Strecken sehr teuer ist, wird sich der Import zunächst wahrscheinlich auf europäische Regionen, den Mittelmeerraum und den Nahen Osten beschränken.[27] Im Gespräch sind etwa die Nordsee, die Ukraine, Spanien, Portugal und Marokko.

Insgesamt entsteht durch den internationalen Wasserstoff-Handel großer außen-, sicherheits- undentwicklungspolitischer Handlungsbedarf.[28] Bisher gibt es keine international verbindlichen Umwelt- und Menschenrechts-Kriterien für Wasserstoff und seine Folgeprodukte. Bei Wasserstoff bietet sich die Chance, Umwelt- und Menschenrechts-Kriterien zu verankern – was für fossile Energieträger übrigens nie getan wurde.

Damit der Wasserstoff wirklich nachhaltig erzeugt wird, müssen zusätzliche neue Produktionsanlagen für Ökostrom gebaut werden. Um dieses «Zusätzlichkeitskriterium» wird derzeit hart gerungen – etwa bei der Umsetzung der europäischen Erneuerbaren-Richtlinie (RED II) in nationales Recht. Aber auch für Exportländer muss gelten, dass zusätzliche neue Produktionsanlagen für Ökostrom gebaut werden.

Good Governance und Transparenz
Einhaltung der Menschenrechte und Standards zur Korruptionsbekämpfung sollen Voraussetzungen für jedes Engagement Deutschlands und Europas im Bereich Wasserstoff sein.

Teilhabe
Lokale, zivilgesellschaftliche Akteure sowie Betroffene vor Ort sollten an Planung, Durchführung und Monitoring von Projekten beteiligt werden – wenn möglich auch finanziell.

Staatsschulden
Die Neuverschuldung der Exportländer zur Finanzierung von Großprojekten (insb. EE-Kapazitäten) darf eine gewisse Höhe nicht übersteigen.

Systemischer Ansatz
Der Aufbau der Wasserstoffproduktion muss in die Umsetzung der jeweils nationalen bzw. regionalen Energiewende eingebunden werden.

Bestehender Strommix
Die Treibhausgas-Intensität des Strommixes sollte eine ausschließende Variable sein. Die großskalige Wasserstofferzeugung kann erst beginnen, wenn der Strommix des betreffenden Landes wiederholt eine THG-Intensität unterhalb von 50-200 Gramm CO_2/KWh erreicht.

Lokale Wertschöpfung
Die Schaffung von Arbeitsplätzen und der Ausbau lokaler Wertschöpfungspotenziale in Produktionsländern sollten gezielt gefördert werden.

Kriterien für Importe

Neben diesen allgemeinen Kriterien für Importe sollte auf Projektebene eine Prüfung zur sozialökologischen Nachhaltigkeit stattfinden.

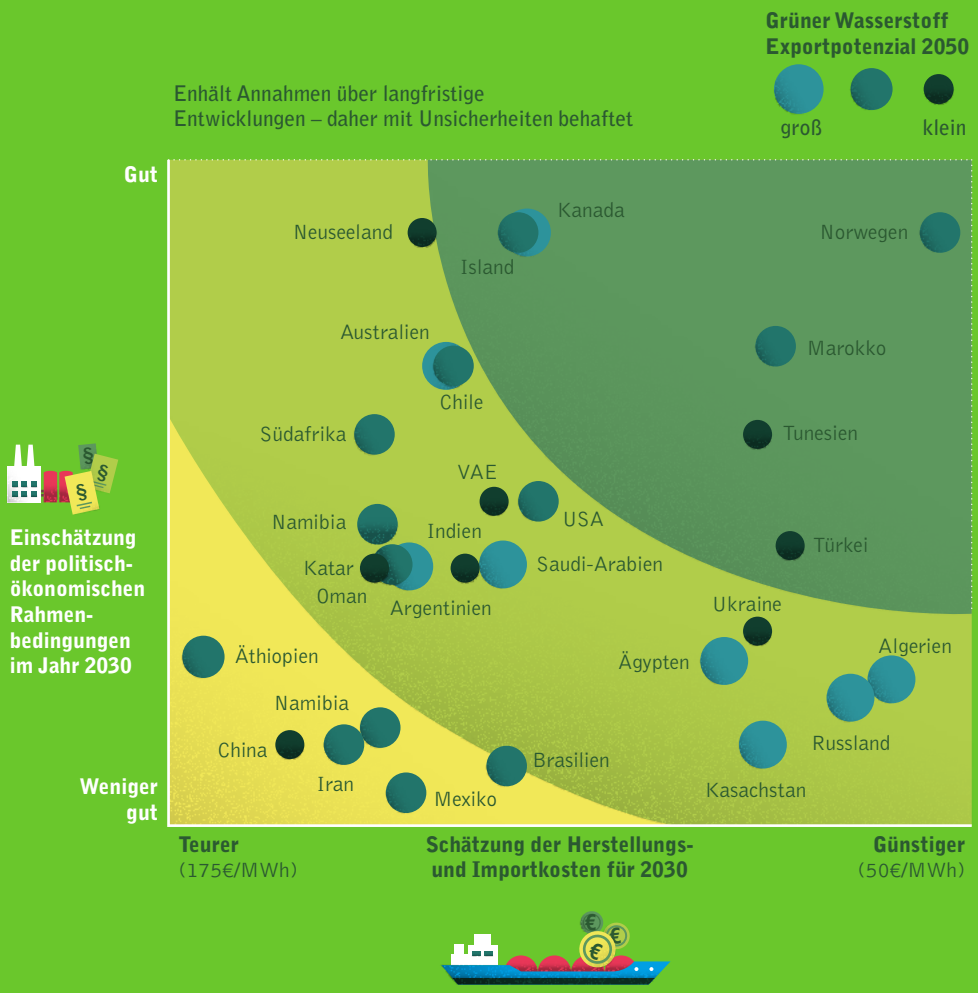
Quelle: Klima-Allianz (ohne Datum): Wasserstoff-Positionspapier der deutschen Zivilgesellschaft, S.11, https://bit.ly/3zmnXqH

Es gibt Entwicklungschancen, aber auch Herausforderungen für die eigene Entwicklung.

Für viele Industriebereiche sind Energiekosten ein entscheidender Faktor bei der Standortwahl. Somit könnten auch die Kosten für grünen Wasserstoff – als wichtiger Energieträger und Rohstoff – zum Standortfaktor werden. Daraus ergeben sich Entwicklungschancen: Energieintensive Industrieunternehmen könnten zum Beispiel nach Marokko, Ukraine oder Chile ziehen. Für diese Länder böte sich die Chance, nicht nur den Wasserstoff zu produzieren, sondern große Teile der Wertschöpfungskette ins Land zu bekommen, etwa die Ammoniakproduktion.[729] Die steigende Nachfrage nach grünem Wasserstoff könnte dazu führen, dass in den Ländern mehr Wind- und Solaranlagen gebaut werden. Wenn diese Anlagen auch die Energiewende vor Ort vorantreiben, also die Abhängigkeit von Kohle, Gas und Öl verringern, wäre dies gut.

Wenn die Anlagen aber nur für den Export produzieren, wäre der Energiewende vor Ort nicht geholfen. Eine solche Entwicklung muss für stark öl- bzw. kohleabhängige Staaten befürchtet werden.

Umweltverbände und Menschenrechtsorganisationen weisen seit längerem auf Ressourcen- und Landnutzungskonflikte hin. In der Kritik steht etwa das geplante Giga-Wasserkraftwerk INGA 3 in der Demokratischen Republik Kongo (DRK). Mit dem Strom aus dem Wasserkraftwerk soll auch grüner Wasserstoff für Europa erzeugt werden. Befürwortende sagen[730], dass nur Überschussstrom, der vor Ort nicht gebraucht würde, für den Wasserstoff-Export benutzt würde. Umwelt- und Menschenrechtsverbände sind skeptisch: Einerseits fehle es in der DRK für diese Vision an entsprechenden Strominfrastrukturen und verlässlichen politischen Rahmenbedingungen. Andererseits würde INGA3 erhebliche soziale und ökologische Schäden verursachen: So etwa Zwangsumsiedlungen von 37.000 landwirtschaftlichen Haushalten, Verfestigung von Energiearmut und Verringerung der Fließgeschwindigkeit des Kongos, was zu einer Gefährdung der Biodiversität und Artenvielfalt führe. Arbeitsplätze hingegen würden kaum geschaffen.[731]



Potenzielle Herkunftsländer für grünen Wasserstoff

Die Analyse, die dieser Abbildung zugrunde liegt, beschränkt sich auf Länder außerhalb der EU.

Quelle: adelphi consult, dena, GIZ, Navigant (2020): Grüner Wasserstoff: Internationale Kooperationspotenziale für Deutschland. Kurzanalyse zu ausgewählten Aspekten potenzieller Nicht-EU-Partnerländer, https://bit.ly/3DmC3e4, S. 5

Die Europäische Kommission, zahlreiche Staaten und Regionen haben Wasserstoffstrategien vorgelegt.

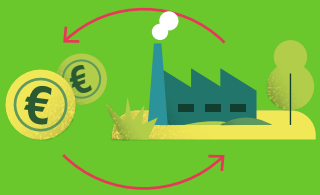
Im Jahr 2020 haben die Europäische Kommission und die Bundesregierung jeweils eine Wasserstoffstrategie veröffentlicht, zudem haben mehrere Bundesländer eigene entwickelt oder arbeiten daran.[32] Auch zahlreiche Industrieverbände, Umweltorganisationen und Wissenschaftseinrichtungen erarbeiten sog. «Roadmaps» und Vorschläge. Der Nationale Wasserstoffrat (NWS) berät die Bundesregierung bei der Umsetzung und Weiterentwicklung der Wasserstoffstrategie. Auf europäischer Ebene soll die European Clean Hydrogen Alliance Investitionsprojekte für «erneuerbaren und kohlenstoffarmen Wasserstoff» identifizieren, «um einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen zu leisten».[33]

Inwiefern eine sozialökologische und wettbewerbsfähige Wasserstoffwirtschaft entsteht, ist in hohem Maße von den politischen Rahmenbedingungen abhängig. Welcher Wasserstoff wie politisch gefördert wird, ist wichtig für die Investitionsentscheidungen der Industrieunternehmen, die den Wasserstoff verwenden. Nationale Fördermechanismen und industriepolitische Instrumente müssen zu europäischen Vorgaben passen, etwa wenn es um Beihilfen geht. Möglich sind aber auch Verbote von bestimmten klimaschädlichen Technologien, damit sich klimaschonende Innovationen und Technologien schnell durchsetzen. Europa kann zudem seine globale Marktmacht nutzen und strenge sozialökologische Kriterien für Wasserstoff(importe) vorschreiben.

Dreh- und Angelpunkt für ein dekarbonisiertes Energiesystem bleibt, dass die Erneuerbaren Energien ausgebaut werden. Für grünen Wasserstoff müssen zusätzliche Kapazitäten, also zusätzlich zu dem Bedarf durch direkten Stromeinsatz bei Elektromobilität, Wärmepumpen etc., eingeplant werden. All das entlastet Politik, Wirtschaft und Gesellschaft nicht von der Kernaufgabe, Energie möglichst effizient einzusetzen und wo möglich einzusparen.

Energiepolitik
Ausbau Erneuerbarer Energien

- Elektrifizierung mit Ökostrom
- Produktion von grünem Wasserstoff vorantreiben



Industriepolitik
Klimaschutzverträge

- durch Ausgleichszahlungen einen Anreiz zur Umstellung auf klimaschonende Produktion geben

Industriepolitik
Grenzausgleich

- internationale Wettbewerbsfähigkeit von klimaschonender Industrie sichern, indem CO_2-intensive Importe versteuert werden

Innovationspolitik
Förderung

- Leuchtturmprojekte unterstützen
- Marktreife fördern

Ordnungsrecht
Standards, Quoten

- grüne Leitmärkte schaffen
- Investitionen sofort rentabel machen

Rahmenbedingungen für klimaschonende Industrie
Ein Mix aus Anreizen, Förderung und regulatorischen Vorgaben schafft Klimaschutz und Wettbewerbsfähigkeit.

Quelle: eigene Darstellung

Das Gas ist hoch explosiv.

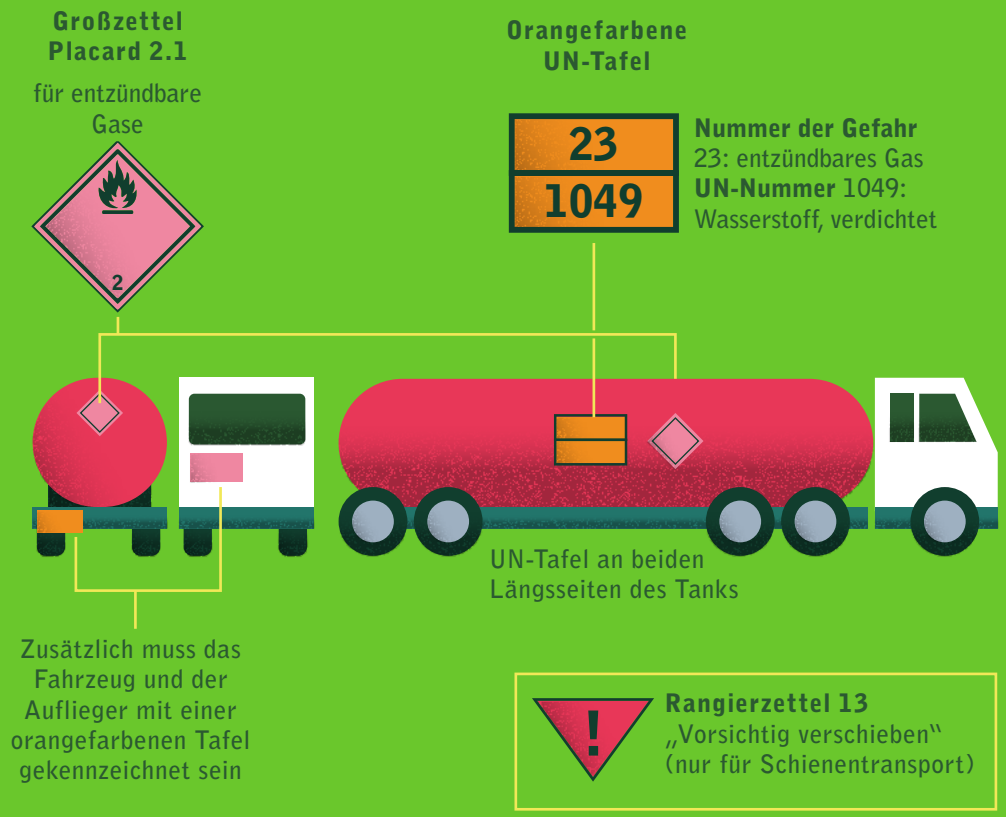
Die Hauptgefahr beim Umgang mit Wasserstoff ist, dass er explodieren kann, wenn er mit Luft in Verbindung kommt und eine Zündquelle, also zum Beispiel ein Feuer, in der Nähe ist. Viele Menschen kennen diese Reaktion als Knallgasprobe aus dem Chemieunterricht. Bei der Knallgasprobe wird Wasserstoff im Reagenzglas erzeugt, dann an die Luft gelassen und mit einem Feuerzeug «abgefackelt». Wenn es keine Zündquelle gibt, explodiert der gasförmige Wasserstoff nicht, sondern verflüchtigt sich schnell in der Luft.

Neben Explosionen stellen Materialversprödung sowie Produktions- und Lieferunterbrechungen Risiken beim Wasserstoffgebrauch dar. Das ist ein Grund, weshalb Unternehmen nicht einfach existierende Erdgas-Pipelines zum Wasserstoff-Transport umwidmen.

Im Juni 2019 gab es eine Explosion an einer Wasserstofftankstelle in Norwegen. Nach Angaben des Herstellers Nel war das Gas an einem separat gelagerten Hochdrucktank und nicht an der Zapfsäule ausgetreten. Wie sich das Gas entzünden konnte, wurde nicht abschließend geklärt, bzw. die Berichterstattung brach Ende Juni 2019 ab.[34]

Im Jahre 1937 brannte bei Lakehurst, im US-amerikanischen Bundesstaat New Jersey, der Zeppelin Hindenburg ab. Bei der Explosion kamen 35 Menschen ums Leben. Einige meinen, dass dies zu einem «Hindenburg-Syndrom», zu einer objektiv nicht begründbaren skeptischen Haltung gegenüber Wasserstoff als Energieträger geführt hat.

Zu guter Letzt: Eine Wasserstoffbombe hat nichts mit Wasserstoff als Energieträger zu tun und wie er aktuell politisch diskutiert wird. Eine Wasserstoffbombe ist eine Kernwaffe, H_2-Isotope werden für die Kernfusion genutzt. Der Wasserstoff, wie er hier beschrieben wurde, wird helfen, die Industrie, den Straßengüterverkehr, die Schifffahrt und das Fliegen klimaschonender zu machen. Dieser Wasserstoff wird Teil unserer Zukunft sein.



Kennzeichnung für einen Wasserstofftransport

Gefahrguttransporte unterliegen einer Kennzeichnungspflicht.

Quelle: LandesEnergieAgentur Hessen GmbH (LEA) (2020): Potenzialbeschreibung Wasserstofftransport über das Schienennetz, https://bit.ly/3gBfZmb, S. 19

[1] Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021): Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse, Stellungnahme vom 23.06.2021, S.7, https://bit.ly/3xulEkI

[2] Siehe dazu: Bundesregierung (2021): Antwort auf Kleine Anfrage von Mitgliedern der Bundestagsfraktion von Bündnis 90/Die Grünen, Bundestagsdrucksache Nr. 19-27537 vom 12.03.2021: «Klimaaußenpolitik der Bundesregierung», S. 32, https://bit.ly/2UNH0v1

[3] Europäische Kommission (2020): A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe, Faktenblatt vom 08.07.2020, S. 2, https://bit.ly/3ksLVdz

[4] Nationaler Wasserstoffrat (2021): Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021-2025, https://bit.ly/3yn0Tqu

[5] WoodMacKenzie (2019): The Future of Green Hydro, 25.09.2019, https://bit.ly/3Dl6v8j

[6] Hanno Böck (2021): «Türkiser» Wasserstoff mit kritischer Klima-Bilanz, Beitrag vom 26.05.2021, https://bit.ly/3jiUJ6F

[7] Deutsche Umwelthilfe (2015): Methan: Auswirkungen auf Klima und Gesundheit, S. 2, https://bit.ly/38g03S4

[8] Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021): Wasserstoff im Klimaschutz, a.a.0., S. 18, https://bit.ly/3xulEkI

[9] Erneuerbare Energien (2021): Europas größter PEM-Elektrolyseur in Betrieb, Beitrag vom 04.07.2021, https://bit.ly/38ehLFc

[10] Handelsblatt (2021): Linde baut in Leuna den weltweit größten Wasserstoff-Elektrolyseur, Beitrag vom 13.01.2021, https://bit.ly/3hpz8I0

[11] Verband der chemischen Industrie (2019): Pressestatement von Kurt Wagemann vom 19.10.2019, https://bit.ly/38cnwU9

[12] Öko-Institut (2020): Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe, S.7, https://bit.ly/3DmqIuL

[13] Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021): Wasserstoff im Klimaschutz, a.a.0., S. 66

[14] Stefanie Groll und Christine Wörlen (2019): Strom im Tank, in: Heinrich-Böll-Stiftung & Verkehrsclub Deutschland (2019): Mobilitätsatlas, S. 18-19, hier S. 18, https://bit.ly/30cvwUb

[15] Kraftfahrt-Bundesamt (2021): Bestandsüberblick am 1. Januar 2021, https://bit.ly/30poTy3

[16] Automobil-Produktion (2020): Die Zukunft der Brennstoffzelle im LKW, https://bit.ly/38d2Aw6, 11.06.2020

[17] Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021): Wasserstoff im Klimaschutz, a.a.0., S. 61

[18] Heinrich-Böll-Stiftung (2021): Besser wohnen mit Klimaschutz, Fakten zur Wärmewende, S. 18, https://bit.ly/3yuDzHH

[19] Bosch (2020): Der Energiewende einen Schritt näher, Pressemitteilung vom 05.11.2020, https://bit.ly/3gBbJ6b

[20] Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021): Wasserstoff im Klimaschutz, a.a.0., S. 64

[21] Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021), Wasserstoff im Klimaschutz, a.a.O., S. 36

[22] Bundesnetzagentur (2020): Regulierung von Wasserstoffnetzen. Ergebnisse der Marktkonsultation. Zusammenfassung der Stellungnahmen, S.9. Stand: November 2020, https://bit.ly/3f1ZL4Y

[23] Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021): Wasserstoff im Klimaschutz, a.a.O., S. 38ff.

[24] Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021): Wasserstoff im Klimaschutz, a.a.O., S. 7

[25] Öko-Institut (2021): Die Wasserstoffstrategie 2.0 für Deutschland. Untersuchung für die Stiftung Klimaneutralität, S. 24, https://bit.ly/3DjNlQn

[26] Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021): Wasserstoff im Klimaschutz, a.a.O., S. 8ff.

[27] Felix Matthes (2021): Wasserstoff und wasserstoffbasierte Energieträger bzw. Rohstoffe in der Transformation zur Klimaneutralität, Stellungnahme zur Anhörung des Ausschusses für Wirtschaft und Energie des 19. Deutschen Bundestages am 26.10.2020, S. 11, https://bit.ly/3zjz9Ve

[28] Ebd.

[29] Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021): Wasserstoff im Klimaschutz, a.a.O., S. 50

[30] Günter Nooke (Persönlicher Afrikabeauftragter der Bundeskanzlerin) (2020): Grüner Wasserstoff aus der Demokratischen Republik Kongo, https://bit.ly/3ymwPvf; Deutsche Welle (2020): Inga-III: Kongolesischer Wasserstoff für Deutschland?, Beitrag vom 18.12.2020, https://bit.ly/3jqQqsv

[31] Brot für die Welt und Ökumenisches Netz Zentralafrika (2021): Zwangsumsiedlungen und Umweltzerstörung, Megastaudamm INGA 3 in der DR Kongo ist keine Lösung für die deutsche Energiewende, S. 5, https://bit.ly/2XUoyC9

[32] Sachverständigenrat für Umweltfragen (2021): Wasserstoff im Klimaschutz, a.a.O., S. 7

[33] European Clean Hydrogen Alliance (ohne Jahresangabe): https://bit.ly/2U0n7UG

[34] Nel (2019): Status and Q&A regarding the Kjørbo incident, https://bit.ly/3kp3QBX

Alle Links zuletzt aufgerufen am 15. Juli 2021.

Impressum

Herausgeberin: Heinrich-Böll-Stiftung e.V.
Schumannstraße 8, 10117 Berlin
info@boell.de, www.boell.de, 030/285 34-0

Autorin: Stefanie Groll (Heinrich-Böll-Stiftung)
Konzeption und Leitung: Stefanie Groll (Heinrich-Böll-Stiftung)
Mit freundlicher Unterstützung von: Alexander Franke (Geschäftsstelle des Sachverständigenrats für Umweltfragen), Cora Herwartz (E3G), Felix Heilmann, Peter Kasten (Öko-Institut), Simon Gabriel Müller (Klima-Allianz), Oliver Powalla (Bund für Naturschutz), Stephan Stoll (Heinrich-Böll-Stiftung), Mira Wenzel. Die Verantwortung für die Inhalte trägt die Autorin.

Layout: Grafikladen Berlin
Illustrationen: Pia Bublies
Druck: Kern GmbH, Bexbach

ISBN 978-3-86928-237-4

V.i.S.d.P.: Annette Maennel, Heinrich-Böll-Stiftung 2021
Dieses Werk steht unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 4.0

Bestell- und Download-Adresse: Heinrich-Böll-Stiftung e.V.,
Schumannstraße 8, 10117 Berlin, buchversand@boell.de, www.boell.de/publikationen

HEINRICH BÖLL STIFTUNG

www.boell.de