

Wasserstoff in der Energiewende

unverzichtbar, aber keine Universallösung



Autoren:

Clausen, Jens; Huber, Michael; Linow, Sven; Gerhards, Christoph; Ehrhardt, Helge; Seifert, Thomas

Inhaltsverzeichnis

01: Einleitung.....	3
02: Kernaussagen	4
03: Es gibt Bedarf für Wasserstoff in vielen Sektoren	6
04: Das Angebot an Wasserstoff ist begrenzt	8
05: Kosten des Wasserstoffs und Effizienz der Anwendungen	10
06: Die Klimawirkung der Wasserstoffwirtschaft	12
07: Prioritäten für Wasserstoff sind notwendig	13
Quellen	14
Impressum	16

01: Einleitung

Grundsätzlich lässt sich Wasserstoff (H_2) wie Erdgas in Pipelines oder Tankschiffen transportieren und in Tanks oder Kavernen speichern. Das suggeriert, dass grüner, also elektrolytisch mit regenerativem Strom CO_2 -frei erzeugter Wasserstoff alle Aufgaben übernehmen könnte, für die wir heute fossile Rohstoffe wie Erdöl und - vor allem - Erdgas einsetzen. Doch das trügt, denn für viele Zwecke ist der Einsatz von grünem Wasserstoff energetisch ineffizient und viel zu teuer. Letztlich werden wir grünen Wasserstoff nur da verwenden können, wo Erdgas und Erdöl nicht durch direkten Stromeinsatz ersetzt werden können oder wo Wasserstoff als Grundstoff dient, wie z. B. in der Chemischen Industrie - oder bei der CO_2 -freien Stahlherstellung.

Die Wasserstoff-Farblehre - Begriffsklärung:

Mit erneuerbarem Strom hergestellter Wasserstoff wird als **grüner** Wasserstoff bezeichnet. Aus Erdgas hergestellter Wasserstoff heißt **grauer** Wasserstoff. Wird dieser unter Nutzung der Carbon Capture and Storage (CCS)-Technologie produziert, handelt es sich um blauen Wasserstoff. Die Farbbezeichnung **türkis** trägt Wasserstoff aus Methanpyrolyse. Wird Atomenergie als Energiequelle der Elektrolyse benutzt, entsteht Wasserstoff mit der Charakterisierung **pink** oder **rosa**.

Vielfach wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff in den bisherigen Gasleitungen transportiert und anstelle von Erdgas verheizt oder - über Tankstellen verteilt - Benzin und Diesel ersetzen kann. So bietet sich scheinbar die Möglichkeit, die vorhandene Infrastruktur weiter nutzen zu können. Wasserstoff wird in dieser Logik zum Energieträger einer Gesellschaft, die an alten Technologien festhalten will, um genauso weiter machen zu können, wie wir es bisher gewohnt sind. Dabei wäre Wasserstoff als Ersatz in vielen heutigen fossilen Anwendungen einfach nur eine recht ineffiziente und kostspielige Lösung. Zudem ist eine Grundannahme dabei falsch: die technische Infrastruktur kann nicht einfach übernommen werden, sondern muss kostspielig umgebaut oder ertüchtigt werden.

So wird in einigen Studien der Erdgasnetzbetreiber ein klarer Zweckoptimismus deutlich: Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches DVGW, der unter seinen Mitgliedern über 2.000 Versorgungsunternehmen versammelt, geht nicht von einer Knappheit an Wasserstoff aus. In einer vom DVGW herausgegebenen Studie wird errechnet, dass dem hohen Bedarf eine genauso hohe Verfügbarkeit von mehr oder weniger klimafreundlichem Wasserstoff gegenübersteht (Gatzen & Reger, 2022). Dem unterliegt die nicht belegte Annahme einer Importquote von 90 %, also in der Höhe der heutigen Öl- und Gasimporte. Diese optimistischen Annahmen zur Verfügbarkeit vor allem von Importen bilden dabei den Kern des Arguments, dass Wasserstoff sogar für die Wärmeversorgung zur Verfügung stünde: „Entgegen der häufigen Annahme muss Wasserstoff keine Mangelware bleiben. Bereits ab dem Jahr 2030 kann der Bedarf an Wasserstoff mehr als gedeckt werden. Die Menge übertrifft um ein Vielfaches alle gängigen Nachfrageprognosen“ (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 2022, S. 5). Diese beeindruckend optimistische Vermutung lässt sich weder technisch noch wissenschaftlich bestätigen. Mehr noch: Es wird nicht belegt, woher Wasserstoff in großen Mengen schnell kommen kann.

Ist also Wasserstoff der neue Universalenergieträger für Gasheizungen, Heizkraftwerke, Autos, Stahlwerke und die chemische Industrie? Oder entsteht hier die gefährliche Illusion, wir könnten in vielen Bereichen alles so lassen, wie es ist? Auf den folgenden Seiten stellen wir Zahlen und Fakten zu Wasserstoff vor. Welches sind die Chancen und Risiken, was kann Wasserstoff wirklich, was kann er nicht?

02: Kernaussagen

Wasserstoff wird immer wieder als neue Universalenergie bezeichnet. Gleichzeitig ist klar, dass größere Mengen an grünem Wasserstoff gegenwärtig nicht verfügbar sind. Und auch in Zukunft wird Wasserstoff nicht zu Preisen zur Verfügung stehen, die mit direkt eingesetztem Wind- und Solarstrom konkurrieren können. Was also hat es mit Wasserstoff als Energieträger der Zukunft auf sich?

- Wasserstoff wird benötigt, um Ammoniak und Methanol als Grundstoffe für die chemische Industrie herzustellen. In der Eisen- und Stahlherstellung erfolgt gerade die Umstellung auf Wasserstoff als Reduktionsmittel - er soll die Kohle ersetzen. Für die langfristige Speicherung von Energie wird Wasserstoff von einer breiten Mehrheit der Wissenschaft als notwendiger Energieträger eingestuft.
- Der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger ist auch in zahlreichen weiteren Anwendungen scheinbar sehr reizvoll. So könnte man grünen Wasserstoff oder seine Folgeprodukte in Gasheizungen oder Verbrennungsmotoren verbrennen und so alte und ineffiziente Technologien auch in der Zukunft nutzen.
- Aber der Einsatz von Wasserstoff ist nicht unbedenklich oder folgenlos für die Erdatmosphäre: Die indirekte Treibhausgaswirkung von H_2 schätzt Derwent (2018) ca. 4 mal und Warwick et al. (2022) sogar 11 mal so schädlich ein wie Kohlendioxid. Auch Wasserstoff ist also ein klimaschädliches Gas, das zum Treibhauseffekt beiträgt und das sparsam verwendet und in geschlossenen Kreisläufen geführt werden muss. Und gerade das ist beim kleinsten aller vorkommenden Moleküle nicht einfach.
- Die Verwendung von Wasserstoff ist nur sinnvoll, wenn er mit erneuerbarem Strom hergestellt wird (grüner Wasserstoff). Dies ist zukünftig auch die billigste Produktionsmethode. Aus Erdgas hergestellter Wasserstoff (grauer bzw. blauer Wasserstoff) und Wasserstoff aus Methanpyrolyse (türkis) ist wegen der Nutzung von Erdgas sowie der Vorkettenemissionen von Methan nicht klimaneutral und Atomenergie als Energiequelle der Elektrolyse birgt zu hohe Risiken und Langzeitfolgen, um damit umweltfreundlich Wasserstoff (pink bzw. rosa) herzustellen.
- Die Produktion von Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser mit Strom ist ein altbewährtes Verfahren, das prinzipiell auch für grünen Wasserstoff eingesetzt werden kann. Aber aus Kostengründen (H_2 aus Erdgas war billiger) gibt es bislang national und international nur wenige Elektrolyseanlagen. Hierzulande scheitert die Erzeugung von größeren Mengen grünen Wasserstoffs am zu langsamen Ausbau von Wind- und Solarstrom. Es wird deshalb zumindest Jahre dauern, bis merkliche Mengen an Wasserstoff importiert werden können. Lieferungen aus Katar und Kanada werden erst in einigen Jahren aufgenommen werden. Bis größere Mengen importiert werden können, werden mindestens 10 Jahre vergehen. Und was bezüglich des erhofften Wasserstoffimports oft verschwiegen wird ist, dass der Transport so aufwändig ist, dass importierter Wasserstoff ein Vielfaches von heutigem Erdgas oder Erdöl kosten wird. Dabei ist es egal, ob der Wasserstoff komprimiert, verflüssigt oder chemisch gebunden transportiert wird.

- Wasserstoff steht im Wettbewerb mit anderen Energieträgern. Sowohl beim Antrieb von Fahrzeugen als auch bei der Wärmeerzeugung konkurriert Wasserstoff mit dem Einsatz von Elektrizität, deren Einsatz aus physikalischen Gründen um ein Vielfaches effizienter ist. Setzen wir auf Elektrizität, dann brauchen wir z.B. für die Wärmeversorgung etwa um den Faktor fünf weniger Windkraftwerke und Photovoltaik, als wenn wir auf Wasserstoff setzen - so groß sind die Verluste der Erzeugung und Verbrennung von Wasserstoff gegenüber elektrischen Lösungen wie Wärmepumpen oder Elektroautos. Der Import von Wasserstoff z.B. für Heizungszwecke wäre für die Masse der Bevölkerung unbezahlbar.

Der Einsatz von Wasserstoff muss daher durch die Politik dorthin gelenkt werden, wo sein Einsatz notwendig und effizient ist und volkswirtschaftlich hohen Nutzen stiftet.

03: Es gibt Bedarf für Wasserstoff in vielen Sektoren

Theoretisch ist Wasserstoff ein Alleskönner. Als brennbarer Energieträger könnte er in Wasserstoffthermen Wohnungen heizen und warmes Wasser bereitstellen, er kann in Verbrennungsmotoren verbrannt werden und alle Arten von Fahrzeugen antreiben, er kann sowohl in BHKWs, Brennstoffzellen als auch in Gasturbinen Strom erzeugen. Außerdem können verschiedene industrielle Prozesse mit Wasserstoff statt mit fossilen Stoffen betrieben werden. So lassen sich Ammoniak- und Düngemittelherstellung, Reduktionprozesse von Eisen zur Stahlherstellung, aber auch Zementherstellung oder Glasschmelzen in absehbarer Zeit umstellen. Wasserstoff kann zudem gut als Rohstoff für die chemische Industrie eingesetzt werden. Darüber hinaus wird grüner Wasserstoff in einer treibhausgasfreien Wirtschaft als langfristiger Speicher für Energie unverzichtbar sein. Ausgehend von Wasserstoff lassen sich Grund- und Brennstoffe, wie Ethan, Methan, Methanol oder synthetisches Benzin herstellen (Fasihi, Bogdanov & Breyer, 2016). Damit könnten viele Anwendung auch ohne den Einsatz fossiler Stoffe so bleiben, wie sie sind, wenn wir ausreichend schnell genug Wasserstoff hätten.

Faktisch ist für die Anwendung von Wasserstoff maßgeblich, ob Wasserstoff die verfahrenstechnisch und energetisch effizienteste und damit günstigste Variante ist. Denn unabhängig von theoretischen und technischen Möglichkeiten, Wasserstoff einzusetzen, muss verantwortliche Politik auf die Umsetzungsgeschwindigkeit und die Kosten der Bereitstellung ausreichender Mengen von Wasserstoff achten.

In einigen Sektoren zeichnet sich die Notwendigkeit der Verwendung von Wasserstoff bereits ab. Dies betrifft z. B. die Eisen- und Stahlproduktion sowie die chemische Grundstoffindustrie und die Funktion von Wasserstoff als Energiespeicher. Raffinerien benötigen heute Wasserstoff für einige Prozesse, wie z.B. zum Cracken von Erdöl bei der Herstellung von fossilen Kraftstoffen. Dieser Teil des heutigen Wasserstoffbedarfs wird zukünftig entfallen.

In anderen Anwendungen konkurriert der Wasserstoff mit anderen guten Lösungen:

- In **Fahrzeugen**, wie z.B. PKWs ist der Elektroantrieb die effizienteste und praktischste Lösung. Der Antrieb mit Wasserstoff wurde daher von den Herstellern für die Zukunft faktisch bereits aufgegeben (Clausen, 2022). Bei Lieferfahrzeugen, Stadtbussen sowie bei Eisenbahnen stellt sich die Situation ähnlich dar. Selbst bei Langstrecken-LKW weist das Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung darauf hin, dass, falls 2027 die ersten Wasserstoff-LKWs verfügbar sind, bereits die batterieelektrischen LKW der zweiten Generation auf den Straßen sein werden (Plötz, 2022). Das Zeitfenster für die erfolgreiche Markteinführung von Brennstoffzellen-LKW wäre damit faktisch geschlossen und es gäbe für Wasserstoff-LKW nur noch eine kleine Nische, nämlich den Transport schwerer Lasten in sehr entlegene Gebiete (Plötz, 2022).

Vergleichbar ist die Situation bei Nahverkehrszügen. Durch fortschreitende Batterietechnik wäre der Einsatz von Wasserstoffzügen nur bei sehr langen Strecken ohne Nachlademöglichkeit als Brückenlösung solange sinnvoll, bis die Strecken elektrifiziert oder Batteriezüge mit hoher Reichweite verfügbar sind (VDE (Hrsg.) 2019, Soller, 2020). Hintergrund der Priorisierung der Elektromobilität durch Wissenschaft, Hersteller und Politik ist der erheblich höhere Wirkungsgrad von Elektrizität in der Energiekette. Von einer Kilowattstunde grünem Strom bringt ein Elektroauto ca. 0,7 kWh auf die Straße, ein Wasserstoffauto nur etwa 0,26 kWh (Perner, Unteutsch & Lövenich, 2018, S. 12); bei synthetischem Diesel aus Wasserstoff wird der Wirkungsgrad sogar noch geringer.

- Ähnlich sieht es bei der **Erzeugung von Heizwärme und Warmwasser** aus. Zahlreiche Studien wissenschaftlicher Institute charakterisieren den Einsatz von Wasserstoff zum Heizen im Vergleich zur elektrischen Wärmepumpe als teuer und ineffizient (für einen Überblick siehe Clausen 2022). Aus einer

Kilowattstunde grünem Strom werden lediglich etwa 0,7 kWh Heizenergie in Form von Wasserstoff hergestellt, während eine Wärmepumpe daraus ca. 3 kWh Wärme oder mehr erzeugt.

- Die Bereitstellung **industrieller Prozesswärme** wird in vielen Studien als Einsatzgebiet von Wasserstoff gesehen. Als - problematische - Alternative schlägt die BDI-Studie zu Klimapfaden (The Boston Consulting Group & Prognos, 2018) den Einsatz riesiger Mengen Biomasse vor, bei der allerdings heute schon unklar ist, wo sie herkommen soll (Clausen et al., 2022; Umweltbundesamt, 2019). Eine Studie des Potsdam Instituts für Klimafolgenforschung (Madeddu et al., 2020) setzt auch hier auf eine fast vollständige Elektrifizierung. Sehr viele Industrieprozesse sind schon heute elektrisch möglich, und viele noch fossil betriebene Verfahren sind gut auf resistive oder induktive Stromheizung umstellbar.

Auch hier ist die Verwendung von Elektrizität im Vergleich zum Einsatz von Wasserstoff oft der technisch einfachere und energetisch günstigere Pfad, da die hohen Verluste bei der Herstellung von Wasserstoff entfallen. Noch offen ist allerdings, ob es gelingt, nahezu alle Prozesse zu elektrifizieren (Guidehouse, FfE, Universität Stuttgart & BBG und Partner, 2022). Bei einigen wenigen Prozessen, in denen Wasserstoff als chemischer Reaktionspartner benötigt wird (Stahl, Chemische Industrie) stellt sich Wasserstoff derzeit als die voraussichtlich effektivere Lösung dar.

- In der **Schifffahrt** stellt sich das Problem der Speicherung großer Energiemengen für lange Non-Stop-Fahrten. Hier könnte verflüssigter Wasserstoff die effizienteste Lösung sein. Künstliche Treibstoffe (Power-to-Liquid), die auf Basis von grünem Wasserstoff hergestellt werden, sind in der Regel weniger effizient, da zur Erzeugung einer bzw. mehrere Umwandlungsprozesse nötig sind. Hier wird z. B. Ammoniak diskutiert, da es sehr viel einfacher gespeichert werden kann als Wasserstoff. Die Vorteile flüssiger Treibstoffe in der Hochseeschifffahrt sind so erheblich, dass andere Antriebssysteme nur schwer

vorstellbar sind. Auch werden bereits mit Ammoniak versorgte Brennstoffzellen in Schiffen erprobt (Fraunhofer IMM, 2021), was allerdings im Vergleich zum flüssigen Wasserstoff energetisch weniger effizient ist. Aber auch die Kraft des Windes kann mit Segelantrieben zusätzlich genutzt werden.

- Einen Sonderfall stellt der „Traum vom klimaneutralen Fliegen“ (Bottler, 2021) dar, den uns die **Luftfahrtbranche** unter Verweis auf Sustainable Aviation Fuel (SAF) aus Wasserstoff verspricht. Auf der Langstrecke ist heute kaum eine machbare Alternative zu fossilem Kerosin als synthetisches Flugbenzin, ggf. auch biobasiert, bekannt. Aber auch die Verwendung von synthetischem Flugbenzin führt nur zu kleinen Klimaschutzeffekten von etwa 33 % des Treibhausgaseffekts (vgl. Kapitel 4). Es wird daher kaum ein Weg daran vorbeiführen, den Flugverkehr radikal einzuschränken, zu elektrifizieren oder lange Zeit auf neue Erfindungen zu warten.

Studien, die versuchen, den gesamten Wasserstoffbedarf in Deutschland für die nahe Zukunft bis 2050 abzuschätzen, liefern ein breites Spektrum von Ergebnissen. Dies umfasst nach Lechtenböhrer et al. (2019, S. 12) mit dem Zieljahr 2050 mindestens ein Spektrum von ca. 170 TWh/a bis zu 660 TWh/a. Peterssen et al. (2022) schätzen die benötigte Menge an Wasserstoff sogar auf 1.000 TWh/a. Eine Menge von 1.000 TWh ist ungefähr eineinhalbmal soviel Energie, wie in ganz Deutschland zum Heizen von Wohnungen eingesetzt wird.

Viele Branchen haben Wasserstoffbedarfe angemeldet, ohne dass klar ist, wo dieser Wasserstoff herkommen kann. Die Möglichkeit der Wasserstoffnutzung wird immer wieder mit so genannter Technologieoffenheit begründet, und endet bei der Forderung, Wasserstoff so billig anzubieten, dass er auch in energetisch ineffizienten Technologien preiswert eingesetzt werden kann. In anderen Anwendungsgebieten dagegen wird die Notwendigkeit von Wasserstoff kaum bestritten. Aber wieviel Wasserstoff wird es eigentlich geben? Zu welchen Kosten? Und was bedeutet dies für den Einsatz von Wasserstoff in der Wärmewende?

04: Das Angebot an Wasserstoff ist begrenzt

In der „Nationalen Wasserstoffstrategie“ hat sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt, in Deutschland bis zum Jahr 2030 Wasserstoffelektrolyseure mit einer Leistung von 5 Gigawatt (GW) zu installieren (BMW, 2020). Unter der Annahme von 4.000 Volllaststunden und einem optimistisch hohen Wirkungsgrad der Elektrolyseanlagen von 70 % führt dies zu einer nationalen Wasserstoffproduktion von etwa 14 TWh/a Wasserstoff. Hierfür würden etwa 20 TWh/a grüner Strom benötigt.

Bis 2035 sieht die Strategie die Verdoppelung dieser Kapazität vor, lässt aber offen, dies auch erst 2040 zu realisieren. Längerfristig sieht das World Energy Council den H₂-Output der deutschen Produktion bis 2050 auf 106 bis 183 TWh/a steigen (World Energy Council Europe, 2021, S. 14), was am unteren Rand vom angemeldeten Bedarf liegt.

Eine ganze Anzahl weiterer Studien schätzen ähnliche Größenordnungen (Dambeck et al., 2021; Fraunhofer IEG, Fraunhofer ISE, & Fraunhofer ISI, 2021; Fraunhofer ISE, 2020; Öko-Institut e.V., 2021; Robinus, Markewitz, Lopion, Kullmann & Heuser, 2020). Eine durch das Ökoinstitut (2021, S. 68) erstellte Metastudie erwartet für die Wasserstoffproduktion in Deutschland die in Tabelle 1 dargestellte Entwicklung (s. Folgeseite).

Zum Vergleich: Die gegenwärtige Stromerzeugung in Deutschland schwankt je nach Tageszeit meistens zwischen 60 GWel und 80 GWel (Energy-Charts, 2022). Zur Erzeugung dieser Menge Wasserstoff müsste die regenerative Stromerzeugungsleistung in Deutschland also - zusätzlich zum Bedarf für Elektromobilität, Wärmepumpen und Hochtemperaturwärme in der Industrie - sehr deutlich erhöht werden.

Darüber hinaus ist es wahrscheinlich, dass es auch ein zunehmendes Angebot von Wasserstoff und daraus

hergestellten Folgeprodukten wie Ammoniak, Methanol oder Methan auf dem Weltmarkt geben wird. Aber wann und wieviel Wasserstoff importiert werden kann, ist von einer Reihe von Faktoren abhängig (in Anlehnung an Öko-Institut e.V., 2021, S. 69ff):

- die mehr oder weniger risikoreichen Investitionsbedingungen in den verschiedenen Ländern;
- die Bereitschaft, entsprechend in den Ausbau von Infrastrukturen zu investieren;
- die dann zur Verfügung stehende Produktionskapazität im Anlagenbau für Wind, PV und Elektrolyse;
- die Schaffung der Infrastrukturen für den Import;
- die notwendigen Nachhaltigkeitsstandards für grünen Wasserstoff;
- mögliche Entwicklungen (politischer) Wasserstoffstrategien der Exporteure;
- den zu erwartenden zeitlichen Hochlauf von Wasserstoff-Produktionsanlagen in Exportländern, wie auch
- die Entwicklung des kurzfristig (bis 2030) verfügbaren Exportpotenzials in EU-Nachbarländern.

Die mögliche Importmenge schätzt das Ökoinstitut (2021, S. 82) in der Zeit bis 2030 auf weniger als eine TWh/a aus Pilotprojekten. In der Zeit bis 2035 könnten die importierten Mengen zwar auf 20 bis 30 TWh/a ansteigen, aber auch dieses ist mit hohen Unsicherheiten verbunden. Nach 2035 sieht die Studie die Möglichkeit, dass primär aus dem Europäischen Wirtschaftsraum zzgl. UK der Import von zunächst 30 - 40 TWh/a möglich würde und darüber hinaus geringe und im Zeitverlauf

zunehmende Mengen aus außereuropäischen Ländern importiert werden können. Würde sich diese Menge danach bis 2050 noch einmal vervierfachen, dann könnten 2050 bis zu 150 TWh/a Wasserstoff importiert werden.

Die sich aus diesen Überlegungen ergebende Summe ist letztlich enttäuschend. Im Jahr 2030 wären aus heimischer Produktion und Importen bestenfalls 20 TWh/a Wasserstoff verfügbar, also noch nicht einmal

genug, um die heute fossil aus Erdgas produzierten Bedarfe für die Düngemittelproduktion und Raffinerien zu decken. 2035 könnten es 75 TWh/a bis 85 TWh/a werden und bei weiter steigendem Import vielleicht 150 TWh in 2040 und 300 bis 400 TWh in 2050. Gemessen an den absehbar hohen Bedarfen aus vielen Branchen steht also deutlich zu wenig Wasserstoff zur Verfügung. Und die verfügbaren Mengen an Wasserstoff werden voraussichtlich auch langfristig deutlich teurer sein als z.B. die Nutzung von Strom.

Tabelle 1: Wasserstoffproduktion in Deutschland bis 2050

	Leistung in GW_{el}	Produktionsmenge in TW/a
2030	5	15
2040	25	75
2050	50	150

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Ökoinstitut (2021, S. 68) unter der Annahme von ca. 3.000 Volllaststunden in der Elektrolyse (Öko-Institut e.V., 2021, S. 69; Robinius et al., 2020, S. 37)

05: Kosten des Wasserstoffs und Effizienz der Anwendungen

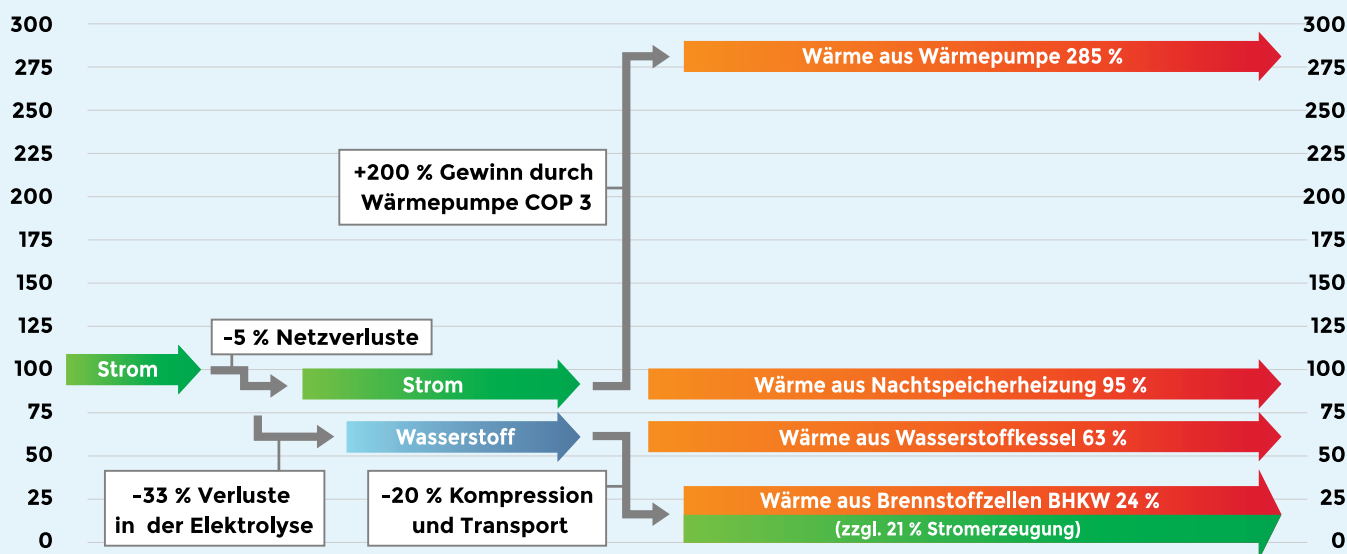
Die Frage des Preises von grünem Wasserstoff ist untrennbar mit dem Strompreis verbunden, denn grüner Wasserstoff wird durch Elektrolyse aus Wasser unter Einsatz von Strom gewonnen. Hinzu kommen die Kosten für die Errichtung der Elektrolyseanlagen und der sonstigen Infrastrukturen wie Leitungen, Pipelines usw. Da die Herstellung einer Kilowattstunde Wasserstoff etwa 1,4 Kilowattstunden Strom erfordert, dürfte Wasserstoff hierzulande langfristig um etwa 50 % teurer sein als Strom. In anderen Ländern, in denen grüner Strom preiswerter hergestellt werden kann, können die Preise niedriger liegen. Doch dazu kommen beim Import dann noch die Transportkosten und die für den Transport nötigen Umwandlungskosten.

Für die Abschätzung der Kosten der Wasserstoffnutzung ist es zusätzlich wichtig zu wissen, mit welchen Technologien Wasserstoff konkurriert

und welche Effizienz der Energieumwandlung die jeweils konkurrierenden Technologien von der Quelle des regenerativen Stroms bis zum Verbrauch haben. Abbildung 1 macht dies beispielhaft an der Wärmeversorgung deutlich. Während die Wärmeversorgung mit direktelektrischen Technologien, wie beispielhaft der Nachtspeicherheizung, ca. 95 % und mit einer Wärmepumpe sogar knapp das Dreifache des primär erzeugten Stroms als Wärme bereitstellen kann, geht auf dem Weg über Wasserstoff schon in der Elektrolyse und dem Transport ca. ein Drittel verloren. Die Verbrennung des Wasserstoffs kann dann nur maximal 63 % des primär erzeugten Stroms als Wärme zur Verfügung stellen.

Die Vorstellung, dass Wasserstoff zukünftig dennoch ein preiswerter Energieträger sein wird, beruht daher auf der Annahme, dass die Kosten für Produktion

Abbildung 1: Grobe Abschätzung der Verluste und Gewinne bei der Umwandlung von Strom in Raumwärme



Quelle: Clausen (2022) unter Nutzung von Daten von Perner, Unteutsch und Lövenich (2018, S. 12)

und Transport deutlich sinken werden und das zukünftige Niveau von Steuern und Abgaben für Wasserstoff deutlich günstiger sein wird als für erneuerbaren Strom. Warum aber sollte es so kommen? Der Basispreis von Strom wie auch von Wasserstoff sind gleichermaßen die Kosten des grünen Stroms. Diese liegen heute in Deutschland etwas über 5 Cent/kWh bei PV und etwas über 6 Cent/kWh für Onshore-Windenergie (Bundesnetzagentur, 2022). Bei einem fairen Steuer- und Abgabesystem, welches effiziente Technologien wie den Elektroantrieb (versus Brennstoffzelle) bei Fahrzeugen oder die Wärmepumpe (versus Wasserstoff-Heizkessel) nicht benachteiligt, wird eine in Deutschland produzierte Kilowattstunde Wasserstoff also allein aufgrund des Wirkungsgrads der Elektrolyse und Transportverluste um mindestens 50 % teurer sein als Strom.

Günstiger werden könnte die Erzeugung von Wasserstoff allerdings in Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung oder mit vielen guten Windenergiestandorten. Aber für den Import kommen dann noch die Kosten der Verflüssigung, ggf. der Umwandlung in Ammoniak oder Methanol, bei geringer Wasserverfügbarkeit die Meerwasserentsalzung sowie die Kosten des Transports hinzu. Welche Kosten hier wirklich entstehen, lässt sich noch nicht genau berechnen. Sicher ist jedoch bereits jetzt, dass für industrielle Wasserstoffanwendungen die Verlagerung der Produktion aus Deutschland in die Wasserstoff-Exportländer und dort die direkte Nutzung von EE-Strom und EE-Wasserstoff in vielen Fällen günstiger sein wird als ein Import von Wasserstoff.

Zu welchen Preisen importierter Wasserstoff oder seine Folgeprodukte dann tatsächlich angeboten werden, ist gegenwärtig noch weitgehend offen. Sie werden

voraussichtlich deutlich über den heutigen Preisen für fossile Energieträger liegen. Zu den Preisen von einer Kilowattstunde Wasserstoff kann mit Blick auf die Zukunft keine konkrete Zahl genannt werden, da die Preisentwicklung in Energiemärkten sowohl von den Oligopolen der Anbieter als auch in hohem Maße von der politischen Gestaltung von Steuern und Abgaben abhängig ist.

Eine Begünstigung bei den Steuern und Abgaben auf Wasserstoff wäre im Falle von energieintensiven Industrien wie z. B. der Stahlbranche zu rechtfertigen, für die es derzeit zum Wasserstoff keine technisch darstellbare klimaverträgliche Alternative gibt. Als Beispiel für die heutigen Preise lassen sich die Wasserstofftankstellen betrachten. Hier existiert ein Marktpreis. Dieser liegt gegenwärtig bei einem Wasserstoffpreis von 9,5 €/kg (etwa 29 Cent/kWh, Clever Tanken, 2022). Bei diesem Preis fährt man mit einem der beiden gegenwärtig verfügbaren Wasserstoffauto, dem Toyota Mirai, bei einem Verbrauch von 1,06 kg/100 km (Spritmonitor, 2022) vergleichsweise günstig zu Kosten von ca. 10 €/100 km, was knapp doppelt so hoch ist wie die Stromkosten eines durchschnittlichen Tesla 3 Elektro mit privater Wallbox, der ca. 15 kWh/100 km verbraucht, bei einem Preis für die Kilowattstunde von 33 Cent. Allerdings beruhen diese günstigen Wasserstoffpreise noch auf der Herstellung aus billigem fossilem Erdgas.

Insgesamt ist zu erwarten, dass bei einer fairen Gestaltung des Systems der Steuern und Abgaben, welche effiziente Technologien nicht benachteiligt, die Anwendung von Wasserstoff zu deutlich höheren Energiekosten führen muss, als wir sie bisher gewohnt sind.

06: Die Klimawirkung der Wasserstoffwirtschaft

Wasserstoff ist ein reaktionsfreudiges Gas, kommt aber in Reinform in der Atmosphäre kaum vor. Da Wasserstoff in der Atmosphäre mit Hydroxylradikalen (OH) reagiert, die sonst mit stark klimaschädlichen Gasen wie Methan oder Ozon reagieren und diese abbauen würden, liegt eine relativ starke indirekte Treibhauswirkung von Wasserstoffemissionen vor. Diese indirekte Treibhausgaswirkung von Wasserstoff schätzt Derwent (2018) auf 4,3 kg und Warwick et al. (2022) auf 11 kg Kohlendioxid pro 1 kg Wasserstoffemissionen über einen Zeithorizont von 100 Jahren (dies ist das Global Warming Potential, GWP). Der erwärmende Einfluss von Wasserstoffemissionen auf das Klima ist somit durchaus erheblich.

Gegenwärtig steigt der Methangehalt in der Atmosphäre stark an. Einer der hierzu führenden Mechanismen ist vermutlich der langsamere Abbau von Methan aufgrund eines Mangels des Hydroxyl-Radikals $\cdot\text{OH}$ (Cheng & Redfern, 2022). Dieses Radikal ist ein sehr wichtiger Baustein der Chemie in der Atmosphäre: viele Schadstoffe werden über eine Reaktion mit $\cdot\text{OH}$ abgebaut, z.B. Methan. Wasserstoff reagiert auch mit $\cdot\text{OH}$ und baut es damit ab, so dass sich der $\cdot\text{OH}$ -Gehalt durch Wasserstoffemissionen deutlich verringern kann. Eine umfangreiche Wasserstoffwirtschaft könnte also, ähnlich wie die heutige Erdgaswirtschaft mit Methan, durch vermeidbare und unvermeidbare Diffusion und Leckagen, die sich gerade bei dem kleinsten aller Moleküle nicht vermeiden lassen, ein Problem für das Klima darstellen.

Würde man elementaren Wasserstoff als Flugzeugtreibstoff einsetzen und in großer Höhe verbrennen, bekämen wir es mit einem Anstieg der Wasserdampfkonzentration in der Stratosphäre zu tun, da dann bei der Verbrennung von H_2 Wasserdampf freigesetzt wird (Vogel, Feck & Grooß, 2011). Auch Wasser in der Stratosphäre trägt aber zum Treibhauseffekt bei.

Und durch den Übergang von fossilem Kerosin zu so genanntem Sustainable Aviation Fuel (SAF, der auf der Basis von grünem Strom und Wasserstoff hergestellt sein soll) können die gravierenden Auswirkungen des Flugverkehrs auf den Treibhauseffekt ebenfalls nur wenig reduziert werden, da der indirekte Effekt bei Kerosinverbrennung durch Flugzeuge in der Stratosphäre den direkten CO_2 -Effekt weit übersteigt. Lee et al. (2021) zeigen, dass die Klimawirkung der Verbrennung von Kerosin in großer Höhe etwa 3-mal so hoch ist wie die Klimawirkung des CO_2 -Anteils der Kerosinverbrennung. Und viele Interkontinentalflüge finden in der Stratosphäre statt, besonders, wenn Polrouten geflogen werden, denn über den Polen liegt die Untergrenze der Stratosphäre schon in ca. 8 km Höhe, also unterhalb der Reiseflughöhe.

Wenn wir fossiles Kerosin durch Sustainable Aviation Fuel (SAF) ersetzen, wird Fliegen also nicht klimaneutral, denn der CO_2 -unabhängige Anteil der Treibhausgaswirkungen bleibt erhalten. Der von Lee et al. (2021) genannte Faktor führt zu der Erkenntnis, dass eine vollständige Produktion des Kerosins auf Basis regenerativer Energien einen Flug um ca. 33 % weniger klimaschädlich machen würde. Die anderen 67 % ließen sich nur erschließen, wenn das Flugzeug nicht in große Höhen aufsteigen würde. Die niedrigere Flughöhe würde allerdings zu erhöhtem Brennstoffverbrauch führen. Die marginale Reduzierung des Treibhauseffekts wird also durch das teure SAF von den Kunden bezahlt. Die Lufthansa operiert hier mit dem Begriff Lufthansa „ CO_2 -neutral“ (Lufthansa, 2019), im Prinzip ein Umwelt-Ablasshandel.

07: Prioritäten für Wasserstoffnutzung sind notwendig

Aktuell wird die künftige Nutzung von Wasserstoff viel schneller organisiert als die Herstellung. Damit birgt der schnelle Einstieg in eine vielfältige und intensive Nutzung von Wasserstoff die Gefahr in sich, einen ziemlich direkten Weg zu ebnen in Versorgungsunsicherheit, Verteilungskampf, Kannibalismus zwischen Nutzungen und hohen Preisen. Ein Effekt wäre, dass klimaschädliche fossile Brennstoffe länger als notwendig benötigt würden.

Eine weitere Gefahr besteht, dass Entscheidungsträger und breite Öffentlichkeit durch Mangel an Informationen oder aufgrund von Wunschdenken davon ausgehen, dass mit Wasserstoff als Energieträger Vieles zu gewohnten Kosten beim Alten bleiben könne, wie z.B. Autofahren mit künstlichem Benzin und die Gasheizung mit Wasserstoff im (aufwendig umgerüsteten) Gasnetz. Das könnte dazu führen, dass wir eine teure und ineffiziente Technologie einführen, bloß weil sie einfach und gewohnt erscheint. So würden wir uns auf ein teureres Energiesystem festlegen, statt direkt auf ein preiswerteres und flexibleres, weitgehend elektrifiziertes System umzustellen (Zachmann et al., 2022).

Da die Herstellung und der Transport von Wasserstoff mit hohen energetischen Verlusten von mindestens einem Drittel des als Primärenergie eingesetzten grünen Stroms verbunden ist, benötigen wir für eine „Wasserstoffwelt“ erhebliche zusätzliche Mengen an grünem Strom, also viel mehr Windkraftwerke,

Photovoltaikanlagen und anderes. Aber schon heute ist nicht klar, wo diese Anlagen alle platziert werden sollen und wer sie mit welchem Material bauen soll. Selbst wenn der Wirkungsgrad der Elektrolyse sich noch um einige Prozentpunkte steigern ließe, bliebe Wasserstoff überall dort, wo es elektrische Alternativen gibt, eine ineffiziente und teure Lösung.

Ein Beispiel: Würden wir in Europa die industrielle Prozesswärme nicht unter Verwendung von 900 TWh/a Strom elektrifizieren (Madeddu et al., 2020), sondern stattdessen Wasserstoff herstellen und zur Wärmeversorgung verbrennen, so würden für dessen Produktion ca. 1.350 TWh/a grüner Strom erforderlich sein. Das sind gegenüber dem Weg einer radikalen Elektrifizierung ca. 450 TWh/a mehr und entspricht energetisch ungefähr dem heutigen Stromverbrauch von Großbritannien. Diesen zusätzlichen Energieverbrauch in Kauf zu nehmen, nur um überbrachte Verfahrens- und Verhaltensweisen beizubehalten, ist ökonomisch wie energetisch nicht sinnvoll.

Die Politik darf daher nicht unkritisch Wasserstoff-Technologien fördern. Sie muss klar analysieren, in welchen Anwendungsfeldern Wasserstoff eine gute Lösung ist und in welchen es bessere, effizientere und langfristig kostengünstigere Technologien gibt. Mit dem klaren Fokus der Förderung von Elektromobilität und Wärmepumpen zeigt die Bundespolitik, dass sie dabei ist, diese wichtige Erkenntnis umzusetzen.

Quellen

- BMWi. (2020). Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Zugriff am 13.6.2020. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=14
- Bottler, S. (2021, April 27). Der Traum vom klimaneutralen Fliegen. Deutsche Verkehrs Zeitung.
- Bundesnetzagentur. (2022). Monitoringbericht 2021. Bonn. Zugriff am 3.5.2022. Verfügbar unter: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Monitoringberichte/start.html>
- Cheng, C.-H. & Redfern, S. A. T. (2022). Impact of interannual and multidecadal trends on methane-climate feedbacks and sensitivity. *Nature Communications*, 13(1), 3592. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31345-w>
- Clausen, J. (2022). Das Wasserstoffdilemma: Verfügbarkeit, Bedarfe und Mythen. Berlin: Borderstep Institut. Zugriff am 27.6.2022. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2022/06/AP2-Wasserstoff-Potenziale-Bedarfe_27-6-2022.pdf
- Clever Tanken. (2022, Januar 21). Wasserstoff-Preis. Clever Tanken. Zugriff am 21.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.clever-tanken.de/>
- Dambeck, H., Ess, F., Falkenberg, H., Kemmler, A., Kirchner, A., Kreidelmeyer, S. et al. (2021). Klimaneutrales Deutschland 2050- In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals. Berlin: Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie. Zugriff am 16.7.2021. Verfügbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf
- Derwent, R. G. (2018). Hydrogen for Heating: Atmospheric impacts. A literature review. London. Zugriff am 2.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.gov.uk/government/publications/atmospheric-impacts-of-hydrogen-literature-review>
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2022). Hintergrundpapier vom 11. März 2022 zum für einen Umstieg auf eine resiliente Energieversorgung mit erneuerbaren Gasen. Bonn. Zugriff am 26.3.2022. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/der-dvgw/aktuelles/meldungen/meldung-vom-15032022-hintergrundinformationen-gasversorgung>
- Energy-Charts. (2022). Gesamte Nettostromerzeugung in Deutschland 2021. Energetisch korrigierte Werte. Energy-Charts. Zugriff am 25.7.2022. Verfügbar unter: https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=de&c=DE&stacking=stacked_absolute_area&year=2021&interval=year&source=total
- Fasihi, M., Bogdanov, D. & Breyer, C. (2016). Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. *Energy Procedia*, 99, 243–268. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.115>
- Fraunhofer IEG, Fraunhofer ISE, & Fraunhofer ISI. (2021). Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Karlsruhe - Freiburg - Cottbus.
- Fraunhofer IMM. (2021). Fraunhofer mit Ammoniak-Brennstoffzelle für Schiffe. Solarserver. Zugriff am 31.8.2022. Verfügbar unter: <https://www.solarserver.de/2021/03/02/fraunhofer-mit-ammoniak-brennstoffzelle-fuer-schiffe/>
- Fraunhofer ISE. (2020). Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem . Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Freiburg. Zugriff am 16.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>
- Gatzen, C. & Reger, M. (2022). Verfügbarkeit und Kostenvergleich von Wasserstoff – Merit Order für klimafreundliche Gase in 2030 und 2045. Bonn: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. Zugriff am 26.7.2022. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g202116-1-dvgw-verfuegbarkeit-kostenvergleich-h2.pdf>
- Guidehouse, FfE, Universität Stuttgart & BBG und Partner. (2022). Energiewende in der Industrie. Berlin. Zugriff am 25.8.2022. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiewende-in-der-industrie.html>
- Lechtenböhrer, S., Samadi, Sa., Leipprand, A. & Schneider, C. (2019). Grüner Wasserstoff, das dritte Standbein der Energiewende? *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 69(10), 10–13.
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q. et al. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- Lufthansa. (2019). Sustainable Aviation Fuel - Video. Lufthansagroup. Zugriff am 13.5.2022. Verfügbar unter: <https://www.lufthansagroup.com/de/themen/sustainable-aviation-fuel.html>
- Madeddu, S., Ueckerdt, F., Pehl, M., Peterseim, J., Lord, M., Kumar, K. A. et al. (2020). The CO reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat). *Environmental Research Letters*, 15(12), 124004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbd02>
- Öko-Institut e.V. (2021). Die Wasserstoffstrategie 2.0 für Deutschland. Berlin. Zugriff am 29.5.2021. Verfügbar unter: <https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/05/Oeko-Institut-2021-Die-Wasserstoffstrategie-2.0-fuer-Deutschland.pdf>
- Perner, J., Unteutsch, M. & Lövenich, A. (2018). Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Köln. Zugriff am 10.1.2020. Verfügbar unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynKost-Studie_WEB.pdf
- Peterssen, F., Schlemminger, M., Lohr, C., Niepelt, R., Bensmann, A., Hanke-Rauschenbach, R. et al. (2022). Hydrogen supply scenarios for a climate neutral energy system in Germany. *International Journal of Hydrogen Energy*, S0360319922007108. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.098>
- Plötz, P. (2022). Hydrogen technology is unlikely to play a major role in sustainable road transport. *Nature Electronics*, 5(1), 8–10. <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00706-6>

- Robinius, M., Markewitz, P., Lopion, P., Kullmann, F. & Heuser, P.-M. (2020). Wege für die Energiewende. kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. Jülich.
- Soller, G. (2020, Dezember 8). Bombardier Talent 3: Warum der Akku die Brennstoffzelle auch auf der Schiene schlagen könnte. Vision Mobility. Zugriff am 29.1.2022. Verfügbar unter: <https://vision-mobility.de/news/bombardier-talent-3-warum-der-akku-die-brennstoffzelle-auch-auf-der-schiene-schlagen-koennte-73723.html>
- Spritmonitor. (2022, Januar 21). Spritmonitor Toyota Mirai. Spritmonitor. Zugriff am 21.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.spritmonitor.de/de/uebersicht/49-Toyota/1565-Mirai.html?powerunit=2>
- The Boston Consulting Group & Prognos. (2018). Klimapfade für Deutschland. Berlin. Zugriff am 24.1.2018. Verfügbar unter: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>
- VDE (Hrsg.). (2019). Alternativen zu Dieselelektrotriebzügen im SPNV: Einschätzung der systemischen Potenziale. Frankfurt am Main.
- Vogel, B., Feck, T. & Grooß, J.-U. (2011). Impact of stratospheric water vapor enhancements caused by CH₄ and H₂O increase on polar ozone loss. *Journal of Geophysical Research*, 116(D5), D05301. <https://doi.org/10.1029/2010JD014234>
- Warwick, N., Griffiths, P., Keeble, J., Archibald, A., Pyle, J. & Shine, K. (2022). Atmospheric implications of increased Hydrogen use. Cambridge & Reading. Zugriff am 20.7.2022. Verfügbar unter: www.gov.uk/government/publications/atmospheric-implications-of-increased-hydrogen-use
- World Energy Council Europe. (2021). Decarbonised hydrogen imports into the European Union: challenges and opportunities. Berlin. Zugriff am 13.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.weltenergie.at/de/publikationen/studien/hydrogen-imports-into-the-eu/>
- Zachmann, G., Holz, F., Kemfert, C., McWilliam, B., Meissner, F., Roth, A. et al. (2022). Decarbonisation of the energy system. Brüssel. Zugriff am 19.1.2022. Verfügbar unter: <https://www.bruegel.org/2022/01/decarbonisation-of-the-energy-system/>

Impressum

Die Policy Paper-Reihe zur Wärmewende stellt knapp und evidenzbasiert relevante Fakten mit Bedeutung für die Wärmewende dar. Sie richtet sich an politische Entscheider:innen auf kommunalpolitischer Ebene, aber auch an Akteure aus Wirtschaft, Journalismus und Zivilgesellschaft und die am jeweiligen Thema interessierten Öffentlichkeit.

Dieser Text wurde von Mitgliedern der „Scientists for Future“ verfasst und durch Kollegen und Kolleginnen hinsichtlich der wissenschaftlichen Qualität (insbesondere der Belegbarkeit von Argumenten) ausführlich geprüft.

Dieses Projekt wurde unter dem Förderkennzeichen: 372223V284 gefördert durch das Umweltbundesamt und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Die Mittelbereitstellung erfolgt auf Beschluss des Deutschen Bundestages.



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

An der Erstellung dieses Textes waren beteiligt: Clausen, Jens; Huber, Michael; Linow, Sven; Gerhards, Christoph; Ehrhardt, Helge; Seifert, Thomas

Scientists for Future (S4F) ist ein überparteilicher und überinstitutioneller Zusammenschluss von Wissenschaftler:innen, die sich für eine nachhaltige Zukunft engagieren. Scientists for Future bringt als Graswurzelbewegung den aktuellen Stand der Wissenschaft in wissenschaftlich fundierter und verständlicher Form aktiv in die gesellschaftliche Debatte um Nachhaltigkeit und Zukunftssicherung ein.

Zitiervorschlag:

Clausen, Jens; Huber, Michael; Linow, Sven; Gerhards, Christoph; Ehrhardt, Helge; Seifert, Thomas (2022). Wasserstoff in der Energiewende – unverzichtbar, aber keine Universallösung. Policy Paper der Scientist for Future. Berlin.

Mehr Informationen unter: www.de.scientists4future.org

Kontakt: kontakt@scientists4future.org

