

Wasserstoff zur Wärmeversorgung – Chancen und Limitierungen

eine Standortbestimmung

Dr. Volker Kienzlen, KEA-BW

Sebastian Herkel, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Prof. Dr. Martin Pehnt, ifeu Heidelberg

Dr. Matthias Reuter, rea bw

Maike Schmidt, Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg ZSW

Kurzzusammenfassung

Die künftige Rolle von Wasserstoff im Energiesystem ist Gegenstand intensiver Diskussionen. Während auf der einen Seite Wasserstoff als universeller Energieträger für das gesamte Anwendungsspektrum von der chemischen Industrie über den gesamten Verkehrssektor bis zur Niedertemperaturwärme beworben wird, werden andererseits Limitierungen des Einsatzes betont. Die Autoren legen dar, warum Wasserstoff zur Niedertemperaturwärmeversorgung allenfalls eine untergeordnete Rolle spielen wird: Wasserstoff bleibt in absehbarer Zeit knapp, teuer und sollte den Anwendungen vorbehalten bleiben, die ohne chemische Energieträger nicht oder nur sehr schwer zu dekarbonisieren sind. Für die Niedertemperaturwärmeversorgung stehen mehrere wirtschaftliche Optionen wie die Wärmepumpe oder die Versorgung über Wärmenetze zur Verfügung, die in den Kommunen prioritär entwickelt werden sollten.

Ziel des Papiers

Die hier zusammengetragenen Fakten zu Wasserstoff sollen kommunalen Entscheidungsträgern und Mitarbeitenden, aber auch Mitarbeitenden von Energieagenturen und interessierten Gemeinderäten komprimiertes Hintergrundwissen liefern und eine Einordnung der Möglichkeiten und Grenzen der Wasserstoffnutzung bieten.

Wasserstoff als Energieträger ist schon lange im Fokus

Schon seit vielen Jahren wird aus erneuerbaren Energien produzierter Wasserstoff als interessante, klimaneutrale Alternative zu fossilen Energieträgern diskutiert. Bockris und Justi¹ entwerfen schon früh die Vision einer solaren Wasserstoffwirtschaft und setzen dabei vorrangig auf solarthermische Kraftwerke, da preisgünstiger Strom aus Photovoltaik (PV) und Windkraft bei Erscheinen des Buches 1980 noch nicht in Sicht waren. Als wichtige Motivation für eine Wasserstoffwirtschaft wurde bereits vor über 40 Jahren auf die CO₂-Emissionsproblematik mit Blick auf das Klima verwiesen.

Mitte der 1980er Jahre wurden unter anderem am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart, aber auch in Japan sowohl Wasserstoffherzeugung als auch die Rückverstromung mit Hilfe von Brennstoffzellen und die Wasserstoffspeicherung intensiv beforscht. Die Vision des Projektes HySolar war eine direkte Kopplung von PV-Stromerzeugung mit Wasserelektrolyseanlagen – im Labormaßstab auf dem Campus Vaihingen und im industriellen Maßstab in Saudi-Arabien. Eine umfassende Zusammenfassung des Stands der Technik wurde 1986 von Winter und Nitsch² veröffentlicht. In der Folge wurde 1988 das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg gegründet. Gerade in Baden-Württemberg hat die Erforschung der Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff also eine lange Tradition.

Wasserstoff ist zur Dekarbonisierung unverzichtbar

Die sich verschärfende Klimakrise und die daraus resultierende Notwendigkeit klimaneutral zu wirtschaften, erfordert eine kritische Einordnung des universell nutzbaren Energieträgers Wasserstoff.

Ohne den Einsatz von CO₂-frei produziertem Wasserstoff ist weder ein treibhausgasneutrales Energiesystem noch ein treibhausgasneutrales Wirtschaftssystem oder der erforderliche vollständige Verzicht auf fossile Energieträger bzw. Rohstoffe möglich. Wasserstoff kann im großen Maßstab dort erzeugt werden, wo ausreichend erneuerbarer Strom und Wasser zur Verfügung stehen. Möglichst geringe Transportentfernungen zu den Abnahmeregionen halten dabei den Transportaufwand in Grenzen.

Eine zumindest teilweise regionale Erzeugung des Wasserstoffs erscheint daher als eine Option, gerade auch um das Potenzial der Elektrolyseure zur Bereitstellung von Regelenergie und als Flexibilitätsoption im Stromsystem optimal einsetzen zu können. Hierzu ist ein weiterer, erheblicher Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien über die reinen Erfordernisse der Dekarbonisierung der Stromerzeugung hinaus erforderlich. Deutschland und insbesondere Baden-Württemberg werden aber auch zukünftig Energieimportländer bleiben und mittel- und langfristig den überwiegenden Teil des Wasserstoffbedarfs importieren.

Eigenschaften von Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas und Sicherheit

Der Umgang mit Wasserstoff als Grundstoff in der chemischen Industrie wird seit vielen Jahren beherrscht. Herstellung, Speicherung, Transport und Nutzung von Wasserstoff sind Routine. Das schon ab Mitte des 19. Jahrhunderts lokal in Kokereien erzeugte Stadtgas hatte einen Wasserstoffanteil von rund 50 %. Die Handhabung von Wasserstoff ist also im Grundsatz beherrschbar. Dennoch sind verschiedene Eigenschaften von Wasserstoff insbesondere im Vergleich zum weit verbreiteten Erdgas (Methan) zu beachten.

¹ J.O. Bockris, E.W. Justi Wasserstoff die Energie für alle Zeiten Udo Pfriemer Verlag (1980)

² C.J. Winter, J. Nitsch Wasserstoff als Energieträger Springer Verlag 1986

Wasserstoff hat eine deutlich geringere Dichte als Erdgas³. Trotz eines höheren Heizwertes ist damit der Energieinhalt pro Volumeneinheit um den Faktor drei geringer als der von Erdgas. Bei einer Umstellung von Methan auf Wasserstoff muss also das dreifache Volumen bewegt und gespeichert werden. Für eine Übergangsphase wird die Beimischung von Wasserstoff ins Erdgasnetz diskutiert⁴. Erprobt ist bislang eine Beimischung von 30 Volumenprozent Wasserstoff⁵. Hierbei beträgt aber der Energieanteil des Wasserstoffs lediglich 10 %.

Zu bedenken ist auch, dass Wasserstoff beispielsweise durch Kunststoffe wie Polyethylen diffundieren kann⁶. Dies ist bei der Auswahl von Dichtungsmaterialien zu beachten, um Leckageverluste zu vermeiden. In der Praxis erweist sich die Leckagerate von Wasserstoff und Methan wohl als vergleichbar⁷. Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) sieht das bestehende Gasleitungsnetz grundsätzlich als geeignet für den Transport von H₂ an⁸.

Zu den unerwünschten Eigenschaften von Wasserstoff zählt die Wasserstoffversprödung, also die Änderung der Zähigkeit von Metallen, die durch das Eindringen und die Einlagerung von Wasserstoff in ein Metallgitter verursacht wird. Die Folge ist eine Materialermüdung, die zu Rissbildung und in der Folge zu Leckagen führen kann. Auch dies ist ein sehr wichtiger Aspekt und bei der Auswahl von Rohrleitungsmaterialien, Armaturen etc. zu beachten.

Der Siedepunkt von Wasserstoff liegt bei -252 °C, die Dichte flüssigen Wasserstoffs bei 70,9 kg/m³. Zur Verflüssigung und Lagerung von flüssigem Wasserstoff ist ein hoher Energieeinsatz erforderlich: Für die Verflüssigung sind pro kg Wasserstoff 10 bis 13 kWh aufzuwenden⁹. Relativ zum Energieinhalt von 33 kWh/kg beträgt also der Aufwand für die Verflüssigung etwa ein Drittel.

Wasserstoff selbst hat keine Treibhausgaswirkung. Freier Wasserstoff in der Atmosphäre löst jedoch indirekte Effekte aus, die die Konzentration von Methan, Ozon und Wasserdampf in den oberen Atmosphärenschichten so beeinflussen, dass der Treibhauseffekt verstärkt wird. Das indirekte Treibhausgaspotenzial (GWP) wird für Wasserstoff auf das 6- bis 16-fache von CO₂ geschätzt - über einen Zeitraum von 100 Jahren (GWP100).¹⁰

Farbenlehre

Nur Wasserstoff, der weitestgehend CO₂-frei erzeugt wird, stellt einen Beitrag zur Lösung der Klimakrise dar. Einen schnellen Überblick soll die nachfolgende „Farbcharakterisierung“ verschiedener Produktionsverfahren bieten, die vor allem in Deutschland genutzt wird. International wird zwischen Zero Carbon und Low Carbon-Verfahren unterschieden. Bei Bedarf finden sich in der

³ Quelle 2, Seite 81

⁴ <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/sicherheit-h2-beimischung-dvgw.pdf>

⁵ <https://www.netze-bw.de/unsernetz/netzinnovationen/wasserstoff-in-sel>

⁶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoff> abgerufen am 4.4.2024

⁷ Cooper, Jasmin; Dubey, Luke; Bakkaloglu, Semra; Hawken, Paul (2022): Hydrogen emissions from the hydrogen value chain emissions profile and impact to global warming. In: The Science of the total environment (830), S. 154624.

⁸ <https://www.dvgw.de/der-dvgw/aktuelles/presse/presseinformationen/dvgw-presseinformation-vom-28032023-forschungsbericht-staehle-h2ready> abgerufen am 4.4.2024

⁹ Quelle 2, S. 253

¹⁰ https://www.euractiv.de/section/energie-und-umwelt/news/wissenschaftler-besorgt-ueber-klimaschaedliche-wasserstofflecks/?utm_source=Euractiv&utm_campaign=008c571dfe-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_medium=email&utm_term=0_24f4b280c0-b98850ebf6-%5BLIST_EMAIL_ID%5D

Literatur ausführliche Erläuterungen verschiedener Autoren zu den Herstellungsverfahren von Wasserstoff.^{11 12}

Grüner Wasserstoff steht im Fokus aller Überlegungen. Für dessen Herstellung wird mit Hilfe von Strom aus Erneuerbaren Energien in einem Elektrolyseur Wasser (H₂O) in Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) aufgespalten. Am weitesten verbreitet und industriell erprobt sind alkalische Verfahren. Bei der Elektrolyse entsteht Abwärme, die im Rahmen der Wärmeplanung als Wärmequelle untersucht werden sollte, sofern Elektrolyseanlagen in Deutschland errichtet werden. Einerseits sollte der Elektrolyseur möglichst in der Nähe potenzieller Wärmesenken errichtet werden, andererseits kann wegen Restriktionen im Stromnetz ein Aufbau von Elektrolyseuren in der Nähe von erneuerbaren Erzeugungsanlagen wie Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen oder auch Umspannwerken sinnvoll sein.

Grauer Wasserstoff wird aus fossilen Energieträgern – Erdgas, Mineralöl oder Kohle - gewonnen. In Deutschland dominiert dabei Erdgas, das per Dampfreformierung in Wasserstoff und CO₂ gespalten wird. Das CO₂ entweicht in der Regel in die Atmosphäre. Dies ist die bislang weit überwiegend am Markt verfügbare Form von Wasserstoff.

Blauer Wasserstoff wird mit demselben Verfahren erzeugt wie grauer Wasserstoff, stammt also ebenfalls aus fossilen Energieträgern. Das dabei freiwerdende Kohlendioxid wird mit Abscheideraten von 80 bis 85 % abgetrennt und in unterirdische Lagerstätten im tiefen Untergrund dauerhaft gespeichert (Carbon Capture and Storage, CCS). Blauer Wasserstoff wird daher als kohlenstoffarm (Low Carbon) bewertet und ist nicht kohlenstofffrei¹³. Blauer Wasserstoff ist eine mögliche Brückentechnologie bis ausreichend grüner Wasserstoff am Markt verfügbar ist. Gleichzeitig besteht aber das Risiko von Lock-In Effekten: jetzt geschaffene Produktionskapazitäten und neu erschlossene Gasfelder für blauen Wasserstoff wollen langfristig genutzt werden.

Gelber oder roter Wasserstoff wird wie grüner Wasserstoff mittels Elektrolyse durch Wasserspaltung hergestellt, nutzt dazu aber Strom aus Kernkraftwerken. Die Kernenergie Diskussion soll hier nicht geführt werden, die Kernkraftwerke in Deutschland sind abgeschaltet. Relevant ist diese Option jedoch beispielsweise in Frankreich.

Transport von Wasserstoff

Für den Transport von Wasserstoff bieten sich abhängig von Mengen und Entfernungen verschiedene Optionen. Eine Studie der Akademie der Technikwissenschaften (acatech)¹⁴ kommt zur Einschätzung, dass für Transportentfernungen unter 4.000 km der Pipeline-Transport einerseits die (energie-) effizienteste und kostengünstigste Option darstellt, und andererseits relativ schnell realisiert werden könnte, sofern bestehende Erdgas-Pipelines umgerüstet werden können.

Wasserstoff kann auch in Form von Ammoniak (NH₃) über längere Strecken transportiert und gelagert werden. Die chemische Industrie hat viel Erfahrung mit der Handhabung von Ammoniak, das als Grundstoff der Düngemittelindustrie genutzt wird. Die Technik ist vorhanden und erprobt.

¹¹ <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-farben.html> abgerufen am 4.4.2024

¹² https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2021/01/IKEM_Kurzstudie_Wasserstoff_Farbenlehre.pdf abgerufen am 4.4.2024

¹³ siehe u.a. Quelle 11

¹⁴ F. Staiss et. al., Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030 <https://www.acatech.de/publikation/wasserstoff/> abgerufen am 4.4.2024

Technisch ist es auch möglich, Wasserstoff in Form von Methan (CH_4) zu transportieren und zu speichern, zumal die Erdgas-Infrastruktur unverändert genutzt werden könnte. Dieser Energieträger wird auch als synthetisches Methan (SNG) oder Power-to-Gas-Produkt (PtG) diskutiert. Er wird jedoch aktuell als nicht praxisrelevant eingeschätzt, da der Herstellungsaufwand von synthetischem Methan zu hoch ist und zudem nachhaltige CO_2 -Quellen (wie CO_2 aus Direct Air Capture oder biogenes CO_2) für die Synthese nicht in ausreichenden Mengen zur Verfügung stehen.

Daneben werden flüssige, organische Wasserstoffträger (LOHC) für Transport und Speicherung diskutiert. Gegen eine schnelle Umsetzung spricht neben dem Energieaufwand für das Be- und Entladen des Speichermediums, der bei rund einem Drittel des Energieinhalts¹⁵ liegt, vor allem der logistische Aufwand für den Rücktransport des unbeladenen Trägermediums.

Für den Transport kommt noch Methanol in Frage. Hier drängt sich dann eine direkte Nutzung als Basischemikalie ohne Rückgewinnung des Wasserstoffs auf. Für die Wasserstoffversorgung Baden-Württembergs dürfte dies keine Relevanz besitzen.

Grundsätzlich kann Wasserstoff aus allen Regionen der Welt nach Deutschland bzw. Baden-Württemberg transportiert werden. Kurzfristig prädestiniert erscheinen aber der Mittelmeerraum und die skandinavischen Länder, da hier der Import per Pipeline umsetzbar wäre. Importe aus Australien, Patagonien oder Subsahara Afrika weisen deutlich längere Transportwege auf, benötigen eine Infrastruktur für den Schifftransport, die Anlandung am Hafen und den Weitertransport des Wasserstoffs nach Baden-Württemberg und daher voraussichtlich deutlich längere Realisierungszeiten. Hier nicht diskutiert werden Fragen der Finanzierung und der politischen Stabilität der Erzeugerregionen. Um nicht erneut in Abhängigkeiten wie beim Erdgasimport aus Russland zu geraten, ist eine frühzeitige Diversifizierung der Bezugsquellen zu empfehlen. Die oben zitierte acatech-Studie gibt je nach Technologie und Entfernung eine Bandbreite von 1 bis 8 ct Transportkosten je kWh H_2 an.

Speicherung von Wasserstoff

Speicherung und Transport von Wasserstoff sind gemeinsam zu betrachten. Die Speicherung wird bevorzugt in der Form erfolgen, in der er auch transportiert wird. Im Grunde ist Wasserstoff ein langfristig verlustfrei speicherbarer Energieträger.

Für die Langzeitspeicherung großer Gasmengen können Salzkavernen genutzt werden, die heute schon zur Speicherung von Erdgas zum Einsatz kommen. Die speicherbare Energiemenge ist bei gleichem Speichervolumen gegenüber Erdgas aber um den Faktor 3 geringer. Kavernenspeicher liegen aufgrund der Geologie alle im Norden Deutschlands.

In Mengen von wenigen Kilogramm bis zu wenigen Tonnen wird Wasserstoff in Druckflaschen bei 200 bis 700 bar gespeichert. Ein LKW mit Rohrbündeln bei 250 bar transportiert etwa 500 kg H_2 – etwa 1/20 der Energiemenge im Vergleich zu Diesel¹⁶. Bei 700 bar verdreifacht sich einerseits die Transportkapazität, andererseits steigt der Energieaufwand für die Verdichtung entsprechend¹⁷.

¹⁵ <https://www.uni-augsburg.de/de/forschung/einrichtungen/institute/amu/wasserstoff-forschung-h2-unia/h2lab/h2-sp/stoffliche-speicherung/lohc/> abgerufen am 22.8.2024

¹⁶ https://redaktion.hessen-agentur.de/publication/2021/3643_LEA_Wasserstoff_Infrastruktur-Broschure_online_260623.pdf abgerufen am 22.08.2024

¹⁷ <https://wasserstoffwirtschaft.sh/de/wasserstoff-speicher-und-transport> abgerufen am 22.8.2024

In verflüssigter Form lässt sich Wasserstoff sowohl transportieren als auch speichern. 25 bis 35 % des Energieinhalts sind in Form von zusätzlicher elektrischer Energie für die Verflüssigung bei -253 °C aufzuwenden. Die nie vollständig zu vermeidende Abdampftrate von Flüssig-Wasserstofftanks ist umso relevanter, je kleiner der Speicher ist und je länger der Wasserstoff gespeichert werden soll.

Metallhydride, die in den 1990er Jahren in Versuchsfahrzeugen als Wasserstoffspeicher eingesetzt wurden, spielen, auch wegen des Ressourcenbedarfs, aus heutiger Sicht nur für Nischenanwendungen eine Rolle.

Einsatzbereiche von Wasserstoff

Gebäudewärme

Häufig wird die Verwendung von Wasserstoff zur Wärmeerzeugung in Gebäuden diskutiert. Dazu kann ein H_2 -Heizkessel, der ähnlich einem Erdgaskessel Wasserstoff direkt verbrennt, genutzt werden. Der Heizgerätehersteller Bosch sagt dazu: „Das Verfahren der Wasserstoffverbrennung ist gegenüber der Erdgasverbrennung deutlich komplexer, neben der technischen Machbarkeit geht es auch um erhöhte Sicherheitsanforderungen.“¹⁸

Ein Vergleich der Gesamtwirkungsgrade der Verwendungspfade zeigt, dass die Wasserstoffnutzung in Wohngebäuden z.B. der Nutzung von Wärmepumpen weit unterlegen ist. So erreicht die Nutzung von Wasserstoff in H_2 -Kesseln einen Gesamt-Wirkungsgrad von etwa 60 %, d.h. nur 60 % einer zur Wasserstofferzeugung eingesetzten kWh Strom kommt als Wärme in den Gebäuden an. Gleichzeitig erreichen Wärmepumpen je nach Wärmequelle eine Jahresarbeitszahl von typischerweise 2,5 bis 4, d.h. eine eingesetzte kWh Strom erzeugt bis zu 4 kWh Wärme (siehe Abbildung 1). Dies korreliert unmittelbar mit der erforderlichen Kapazität erneuerbarer Stromerzeugung: die Wärmeversorgung über Wasserstoff erfordert 4 bis 6 mal mehr Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen als die Beheizung mit Wärmepumpen.

¹⁸ <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/bosch-liefert-wasserstoff-heizkessel-221184.html>
abgerufen am 30.5.2025

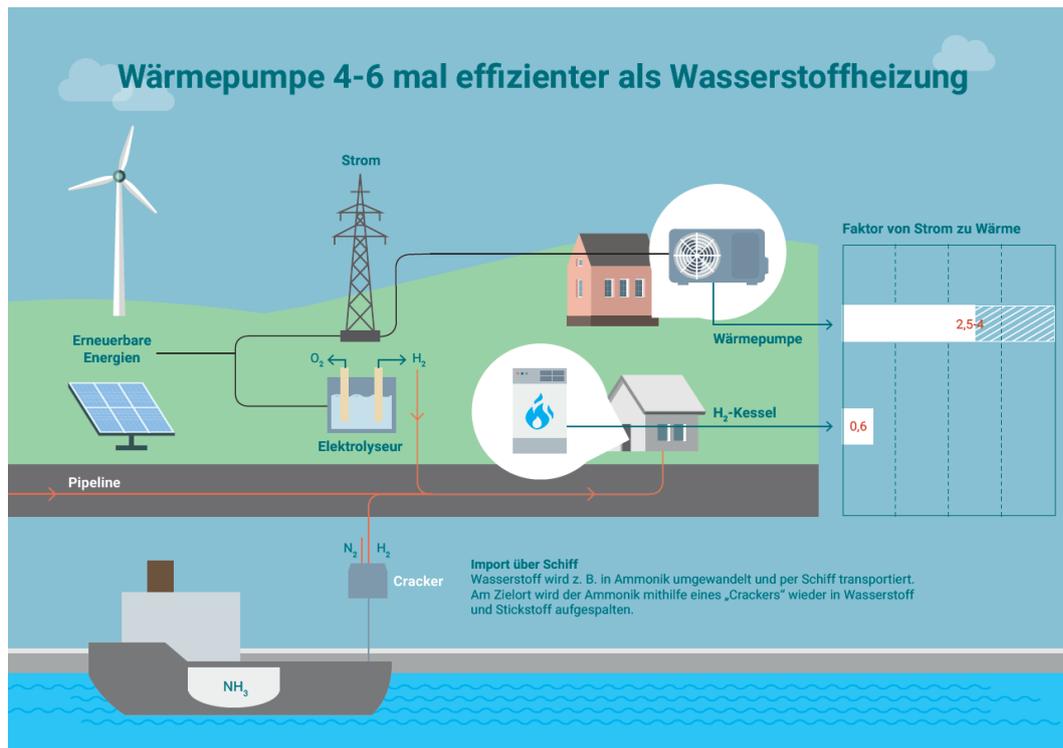


Abbildung 1 Vergleich der Wirkungsgrade Wasserstoffnutzung und Wärmepumpen zur Wärmeerzeugung in Gebäuden (eigene Darstellung, basierend auf einer Idee von Fraunhofer ISE 2022)

In Großbritannien war geplant, im Rahmen eines Großversuches die Einführung von Wasserstoffheizungen zu testen. In Redcar scheiterte das Projekt an Widerständen der Bevölkerung, die einerseits Sicherheitsbedenken äußerten und andererseits langfristig Sorgen vor überhöhten Preisen hatten¹⁹. Die Nationale Infrastrukturkommission hat die britische Regierung aufgefordert, die Pläne für Wasserstoffheizungen aufzugeben und empfiehlt stattdessen den Einsatz von Wärmepumpen. Sie schlägt im Gegenzug vor, den Anschluss an ein Gasnetz ab 2025 zu verbieten.²⁰

Wasserstoff im Gebäudeenergiegesetz (GEG)

Das GEG sieht den Einsatz von grünem und blauem Wasserstoff (bzw. Wasserstoffderivaten) als eine Möglichkeit zur Erfüllung des 65 %-Erneuerbare-Energien-Anteils vor. Um diese jedoch mit Wasserstoff erfüllen zu können, müssen einige regulatorische Hürden genommen werden²¹. Auch ohne eine Betrachtung von Kosten, Verfügbarkeit und Bedarfskonkurrenzen dürfte diese Erfüllungsmöglichkeit des GEG in Wärmeerzeugung in Gebäuden daher nur vergleichsweise selten zum Zuge kommen.

Wasserstoffnutzung in Kraft-Wärme-Kopplung

¹⁹ <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/teuer-und-ineffizient-grossbritannien-stoppt-projekte-fuer-heizen-mit-wasserstoff-19390883.html> abgerufen am 10.4.2024

²⁰ <https://www.tga-fachplaner.de/meldungen/heizungswende-grossbritannien-sagt-gross-ver-such-mit-wasserstoff-heizung-ab>

²¹ Freitag, Sina, Kisker, C. Regulatorische Rahmenbedingungen für den Einsatz von Wasserstoff im Wärmesektor. 2023.

Die zentrale Wärmeversorgung von Haushalten durch Wärmenetze ist eine wirtschaftliche Alternative in dichten Gebäudebeständen, in denen sich einerseits eine dezentrale Versorgung mit einzelnen Wärmepumpen schwierig gestaltet und andererseits geeignete Wärmequellen erschlossen werden können. Hier kann Wasserstoff für die Wärmebereitstellung als Ergänzung zu anderen erneuerbaren Wärmequellen eine gewisse Rolle spielen: Wasserstoff wird hier - perspektivisch in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) - genutzt werden. Diese Option hängt von der möglichen Anbindung an Wasserstoff- alternativ auch Biogasnetze ab. Ein flexibler Betrieb von KWK-Anlagen ist zur Sicherung der Stromversorgung wichtig. Klein-KWK zur Objektversorgung werden also nur dort eine Zukunft haben, wo Wasserstoffnetze für andere Kunden vorgehalten werden oder alternativ lokale Netzeinseln für biogene Gase begründbar sind.

Industrielle Prozesswärme

Für die Dekarbonisierung der meisten industriellen Prozesswärmebedarfe ist (klimaneutraler) Wasserstoff eine der Möglichkeiten zur Substituierung fossiler Energieträger. Als Alternativen zu Wasserstoff stehen z.B. Power-To-Heat-Technologien und Biomasse zu Verfügung. Dabei wird erwartet, dass für Niedrig- und Mitteltemperaturprozesse (100 °C bis 400 °C) Wärme auf Strombasis den Bedarf an fossilen Energieträgern ersetzt²². So lassen sich Wärmebedarfe mit Temperaturen bis 200°C technisch durch Wärmepumpen decken²³. Auf diesen Temperaturniveaus kann auch Tiefengeothermie (ggf. in Kombination mit Großwärmepumpen) eine relevante Rolle zur Deckung der Prozesswärmebedarfe im Oberrheingrabens spielen.

Auch bei hohen Temperaturniveaus (ab 400 °C bis 1.000 °C) können elektrische Hochtemperatur-erzeuger oder auch Biomasse klimaneutrale Alternativen zu grünem Wasserstoff darstellen. Allerdings gibt es zahlreiche industrielle Fertigungsprozesse, die auf eine Flamme angewiesen sind und daher weiterhin Brennstoffe benötigen, die sehr hohen Flammtemperatur ermöglichen und für die es keine Alternative zu grünem Wasserstoff gibt²⁴.

²² Madeddu, S. et al. The CO₂ reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply. Environ. Res. Lett. 15 124004. 2020.

²³ Agora Energiewende, Fraunhofer IEG. Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland. Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie. 2023.

²⁴ e-Mobil BW. Analyse der aktuellen Situation des H₂-Bedarfs und –Erzeugungspotenzials in Baden-Württemberg. 2022.

Erreichbare Temperaturen aus erneuerbaren Wärmequellen (nach DLR 2016)

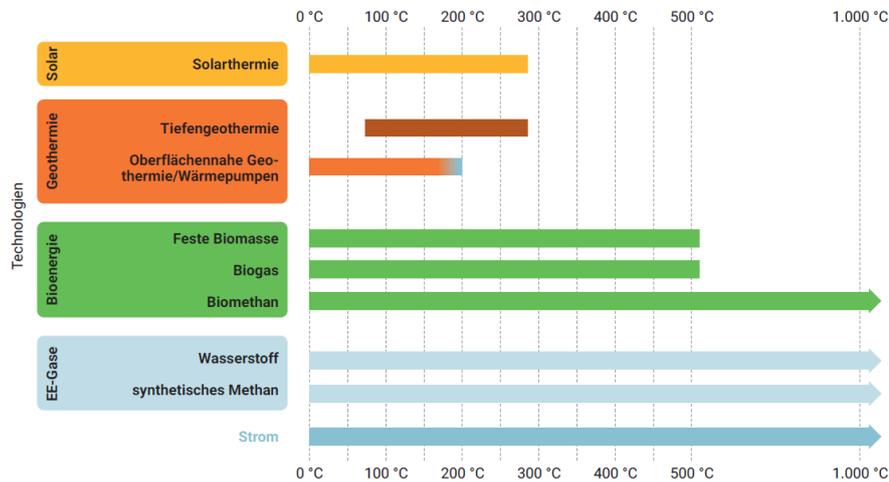


Abbildung 2 Mit verschiedenen erneuerbaren Technologien erreichbare Temperaturniveaus
(angepasste Darstellung nach Agora Energiewende, Fraunhofer IEG (2023))

Bedarf an und Verfügbarkeit von Wasserstoff

Laut IKEM²⁵ werden heute bereits 55 TWh Wasserstoff pro Jahr verbraucht, wovon 93 % grauer Wasserstoff ist, der Rest ist ein Nebenprodukt der Chlor-Alkali-Elektrolyse.

In der oben zitierten Analyse²⁶ wird 2030 in Deutschland ein Wasserstoffbedarf von 45 bis 100 TWh erwartet, bis 2045 von 400 bis 700 TWh.

Zur Einordnung und Visualisierung der Dimensionen dieses Wasserstoffbedarfs werden für eine Jahresmenge von 50 TWh exemplarisch Transport- und Erzeugungsdimensionen abgeschätzt: Eine Pipeline mit ca. 1 m Durchmesser kann die benötigte Menge transportieren, 85 TWh erneuerbarer Strom sind erforderlich. Dies erfordert ca. 35 GW kombinierter Wind- und PV-Erzeugungskapazität (bei durchschnittlich angenommenen 2500 Vollbenutzungsstunden). Dies sind überschlägig 200 km² PV-Fläche und 3.000 Windenergieanlagen der 5 MW-Klasse. Bei dem für 2045 avisierten Bedarf sind die Zahlen mit dem Faktor 10 zu multiplizieren. Hierbei wird nur der Wasserstoffbedarf Deutschlands betrachtet, nicht der weiterer Industrieländer.

Laut einer Studie von PricewaterhouseCoopers (PwC) erfolgt der Ausbau der Wasserstofferzeugungskapazitäten bislang deutlich langsamer als angestrebt²⁷: Für die Erreichung dieser Ziele müssen EU-weit bis 2030 Elektrolyseur-Kapazitäten von etwa 120 GW aufgebaut werden, bislang sind aber lediglich Projekte mit insgesamt 3 GW Leistung finanziert oder im Bau. Dies wird in einem weiteren Gutachten „H2 reality check“ des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln (EWI) aus Köln bestätigt. Die Autoren weisen zudem darauf hin, dass die europäische Wasserstoffnachfrage aufgrund neuer und kosteneffizienter Elektrizitätstechnologien im Transport-,

²⁵ siehe Quelle 11

²⁶ siehe Quelle 13

²⁷ <https://www.strategyand.pwc.com/de/de/presse/sauberer-wasserstoff.html> abgerufen am 22.4.2024

Gebäude- und selbst in energieintensiven Industriesektoren geringer ausfallen könnte als ursprünglich angenommen.²⁸

In einer Auswertung der bis zum Juni 2024 in Baden-Württemberg erstellten 126 Wärmepläne hat das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) untersucht, wie die Kommunen bzw. deren Gutachter den Bedarf an Wasserstoff für die Wärmebereitstellung im dezentralen Einsatz (z. B. in Gas-Brennwertkesseln oder Brennstoffzellen) oder für Wärmeerzeuger in Wärmenetzen einschätzen.²⁹ Wasserstoff für die dezentrale Nutzung summiert sich im Zieljahr 2040 auf rund 2 TWh/a und deckt im Mittel etwa 5 % der Wärmebereitstellung ab, vor allem in Gewerbebetrieben bzw. Industrie und nur vereinzelt im Gebäudesektor.

Kosten

Durch die technisch bedingt Umwandlungseffizienz von Strom zu Wasserstoff sind die Herstellungskosten für Wasserstoff im Vergleich zu anderen Energieträgern wie Strom höher. Auch mittel- bis langfristig werden in Deutschland Produktionskosten von über 100 €/MWh erwartet. An Standorten mit sehr günstigen Erzeugungsbedingungen für erneuerbaren Strom beispielsweise in den Maghreb-Staaten werden geringere Erzeugungskosten erwartet. Hier sind dann allerdings die Transportkosten zu berücksichtigen.

In den meisten aktuellen Studien werden nur die Herstellungskosten des Wasserstoffs ausgewiesen. Angaben zu Kosten für Transport und Vertrieb, ebenso wie Gewinnmargen und Steuern fehlen, so dass die Endkundenpreise deutlich darüber liegen dürften. Für regional in Deutschland erzeugten Wasserstoff wird im Jahr 2030 mit Wasserstoffbereitstellungskosten inkl. Transport von etwa 150 bis 173 €/MWh und im Jahr 2050 mit etwa 118 bis 141 €/MWh gerechnet³⁰. In einer weiteren Metaanalyse aus dem Jahr 2023 werden Bereitstellungskosten zwischen 45 und 205 €/MWh angegeben³¹. Eine aktuelle Studie ermittelte bei einer Vor-Ort-Produktion von Wasserstoff in Baden-Württemberg für das Jahr 2032 Bereitstellungskosten in Höhe von 130 bis 148 €/MWh und 96 bis 181 €/MWh für die Bereitstellung per Pipelineimport³². Diese Studien spiegeln die noch sehr hohen Bandbreiten und damit Unsicherheit bei der Abschätzung der Kosten wider. Diese Kosten enthalten auch keine Markteffekte durch den globalen Handel des Wasserstoffs.

Offen ist die Frage, wie sich die Netzentgelte für Erdgasnetze entwickeln: Mit sinkender Zahl der Anschlussnehmer verteilen sich die Netzkosten auf weniger Kunden, was zwingend zu höheren Kostenbelastungen für jeden verbleibenden Erdgaskunden führen wird.

²⁸ https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2025/04/Bro_H2-Reality-Check_final.pdf abgerufen am 4.4.25

²⁹ https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Publikationen/Energie/Waermegipfel/2024-10-21_Waermegipfel_Auswertung_Waermeplaene_ifeu.pdf

³⁰ Wachsmuth, J. et al. Roadmap Gas für die Energiewende – Nachhaltiger Klimabeitrag des Gassektors. 2019

³¹ https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8344/file/8344_Wasserstoffkosten.pdf

³² Holst, M.; Ranzmeyer, O.; Eißler, T.; Thelen, C., Ruckteschler, T.; Edenhofer, L.; Fluri, V.; Kost, C.: „Analyse verschiedener Versorgungsoptionen Baden-Württembergs mit Wasserstoff und Wasserstoffderivaten“ 2025, Fraunhofer ISE, <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/BW-wasserstoff-versorgungsoptionen.html>

Auch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) sowie das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) stellen fest, dass der Wasserstoffeinsatz im Bereich der Gebäudewärme in den meisten Fällen keine kosteneffiziente Erfüllungsoption darstellt.

Aktuell wurde für Schleswig-Holstein untersucht, welche Rolle Wasserstoff in den vorliegenden Wärmeplanungen spielt. Fachhochschule Westküste und Europa-Universität Flensburg sehen den großflächigen Ersatz von Erdgas in keiner untersuchten Kommune als möglich an und regen im Gegenteil die Prüfung einer stufenweisen Stilllegung von Gasnetzen an.³³

Bei einem Vergleich der Heizkosten kommt das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme zum Schluss, dass die Wasserstoff-Variante für alle Gebäudetypen zu den höchsten Heizkosten mit gleichzeitig den höchsten Unsicherheiten bezüglich nochmals höherer Werte führt³⁴.

Schlussfolgerungen für die künftige Beheizung von Gebäuden

Wasserstoff dürfte absehbar für die Erzeugung von Heizwärme und Niedertemperaturprozesswärme keine signifikante Rolle spielen. Das heutige Erdgasnetz wird nur dort auf Wasserstoff umgestellt werden, wo dies zur Versorgung von Industriekunden erforderlich wird. Eventuell können einzelne, angrenzende Gebäude mit Wasserstoff beheizt werden.

Das bedeutet, dass weder für die Heizung im Wohngebäudebereich noch in öffentlichen Liegenschaften das Warten auf eine Wasserstoffversorgung eine realistische Zukunftsoption darstellt. Das Risiko besteht, dass die vage Option Wasserstoff die naheliegendere Alternative eines Wärmenetzes oder die Umstellung auf eine Wärmepumpe verhindert und über lange Zeit weiter fossiles Erdgas genutzt wird und der Auf- und Ausbau entsprechender Infrastrukturen weiter hinausgezögert wird.

Gebäude können mit Hilfe von Wärmepumpen und Wärmenetzen deutlich wirtschaftlicher beheizt werden, als dies mit Wasserstoff zu erwarten ist. Der naheliegende Einbau von H₂-ready-Heizungsanlagen birgt umgekehrt das hohe Risiko, langfristig hohe Heizkosten tragen zu müssen. Zudem impliziert der Begriff H₂-ready nicht, dass ein Betrieb mit reinem Wasserstoff möglich ist. Teilweise definieren die Anbieter, dass eine Beimischung von 30 Volumenprozent Wasserstoff zulässig ist.³⁵ Da damit nur 10 % der Energie aus Wasserstoff gedeckt werden, ist eine derartige Anlage kein wirkungsvoller Beitrag zur Dekarbonisierung. Erforderlich ist bei einer vollständigen Umstellung von Gasnetzen auf Wasserstoff zudem eine synchrone Überprüfung aller kundenseitigen Gasinstallationen sowie eine Anpassung aller am Netz hängenden Wärmeerzeuger und sonstigen Gasverbraucher auf die veränderten Eigenschaften des Brennstoffs Wasserstoff.

Die verfügbaren Wasserstoffmengen werden aller Voraussicht nach perspektivisch nicht zum Weiterbetrieb aller bestehender Gasnetze ausreichen. Gleichzeitig zeichnet sich ab, dass der Preis für Wasserstoff auch langfristig mindestens doppelt so hoch bleiben wird wie der Erdgaspreis. Wasserstoff wird also nicht wettbewerbsfähig zu Wärme aus Wärmepumpe oder Wärmenetz.

³³

https://www.eksh.org/fileadmin/redakteure/downloads/publikationen/2025_Blohm_et_al_Wasserstoff_in_der_kommunalen_W%C3%A4rmeplanung.pdf abgerufen am 30.5.2025

³⁴ <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/4fed1908-30e3-4047-bfbf-d1da14382ba1/content> abgerufen am 30.4.2025

³⁵ <https://www.bosch-homecomfort.com/de/de/wohngebaeude/foerderung-und-klima/klimaschutz-mit-bosch/mit-wasserstoff-heizen/> abgerufen am 17.4.2025

Kommunen sollten daher nach Abschluss der Wärmeplanung Umsetzungsstrategien für Wärmenetzeignungsgebiete entwickeln und gleichzeitig Bürger in den übrigen Quartieren bei Effizienzmaßnahmen und dem Einbau von Wärmepumpen unterstützen.