

Update 2024: Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland

1 HINTERGRUND UND EINORDNUNG

Der Nationale Wasserstoffrat hatte mit dem NWR-Grundlagenpapier „Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland“ vom 1. Februar 2023¹ eine erste Bedarfsanalyse veröffentlicht, die für zentrale Sektoren Einschätzungen bezüglich der Wasserstoffbedarfe in Deutschland gegeben hat. Die Wasserstoffbedarfe der Sektoren Stahlerzeugung, chemische Industrie, Mobilität und – mit Einschränkungen – Wärme wurden für das NWR-Grundlagenpapier auf Basis der jeweiligen Branchenstrategie zur Erreichung der Klimaziele ermittelt. Die geopolitischen Verwerfungen infolge des russischen Angriffs auf die Ukraine und die resultierenden Änderungen insbesondere für den Energiesektor wurden damals bereits betrachtet, gleichwohl war dem Rat klar, dass eine tiefergehende Analyse einzelner Sektoren notwendig ist, aber auch Zeit benötigt. Seitdem haben sich die Unsicherheiten und Unwägbarkeiten tendenziell noch verstärkt: Die herausfordernde geopolitische Lage in der europäischen Nachbarschaft ist mit dem Konflikt in Nahost noch verschärft, geoökonomisch haben sich die Konkurrenzen um Wertschöpfung nicht abgeschwächt. Projektfinanzierungen sind durch Inflation und den Kostendruck sowie den nationalen und europäischen Rechts- und Regulierungsrahmen nicht einfacher geworden, was den Aufbau und Hochlauf beim Wasserstoff auf allen Stufen der Wertschöpfungskette und in den unterschiedlichen Sektoren hemmt. Diesen Unsicherheiten zum Trotz ist es dem NWR ein Anliegen, eine möglichst realistische Abschätzung der erwartbaren Bedarfe zu geben in der Erwartung, dass der politische und rechtliche Rahmen in den kommenden Jahren adäquat ausgestaltet wird und der Markthochlauf ein entsprechendes Niveau erreichen kann.

Für das „Update 2024: Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland“ wurden die bisherigen Bedarfe durch die Branchenvertreter auf Basis einer Einschätzung realistischer Projekte und Planungen sowie unter Berücksichtigung relevanter Regulatorik aktualisiert. Des Weiteren wurden Bedarfe aus den Prozessindustrien Nicht-Eisen-Metalle, Steine und Erden, Glas- und Papierherstellung sowie Maschinen- und Anlagenbau mit einbezogen. Darüber hinaus wird eine Einschätzung zu den Bedarfen des Stromsektors abgegeben. Die Bedarfe werden nun für 2030 auf ca. 94–125 TWh taxiert. Der Mindestbedarf von 94 TWh für das Jahr 2030 ist somit um 68 % höher im Vergleich zur Bedarfsprognose von Februar 2023, welche einen Mindestbedarf von 56 TWh ermittelt hat, allerdings inkludiert dieser Bedarf auch einen gewissen Anteil an grauem Wasserstoff (siehe Kap. 2.1 „Chemieindustrie“).

¹ NWR-Grundlagenpapier: „Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland“ vom 1. Februar 2023.

Der Bedarf für das Jahr 2030 entspricht einer Elektrolyseleistung von 39 bis 52 GW², ohne dass damit eine Aussage getroffen werden kann, ob diese im In- oder Ausland installiert werden müsste: Die Frage der Herkunft des klimaneutralen bzw. weitgehend klimaneutralen Wasserstoffs wird auch im vorliegenden Update nicht weiter beleuchtet. Außerdem gehen die hier vorgelegten Mengengerüste für den zukünftigen Bedarf an Wasserstoff und Wasserstoffderivaten von der Annahme aus, dass es mit Blick auf die Resilienz der deutschen Volkswirtschaft sowie etwaige Carbon-Leakage-Effekte nicht zur großskaligen Verlagerung von wasserstoffrelevanten Industrien ins Ausland kommt.

2 BEDARFE IN UNTERSCHIEDLICHEN SEKTOREN

Das zentrale Interesse aller Stakeholder bezüglich einer Einschätzung von Wasserstoffbedarfen liegt nicht mehr nur auf dem Jahr 2030, da bis 2030 ein relevanter Markt für grünen Wasserstoff und -derivate geschaffen werden sollte, der Hochlauf allerdings vor allem in den 2030er-Jahren Fahrt aufnehmen wird. Insofern werden darüber hinaus die Jahre 2035 und 2040 betrachtet, bevor dann der für die vollständige Klimaneutralität notwendige Bedarf im Jahr 2045 angegeben ist.

2.1 PROZESSINDUSTRIEN

Für verschiedene Industriebereiche ist Erdgas nicht nur Energieträger, sondern als Prozessgas notwendiger Bestandteil der Produktion. Eine Elektrifizierung ist in den Prozessindustrien überwiegend unmöglich oder zumindest unwirtschaftlich, eine Umstellung auf Wasserstoff oder Synthetic Natural Gas (SNG) als Prozessgas ist daher meist die einzige Option hin zu einer CO₂-neutralen Produktion.

Stahlindustrie

Für die Stahlindustrie ist klimaneutraler Wasserstoff unverzichtbare Voraussetzung für eine klimaneutrale Produktion. Der Wasserstoff wird zum allergrößten Teil als Reduktionsmittel bei der Eisenerz-Direktreduktion für die Primärstahlerzeugung benötigt und dient auch als Energieträger in verschiedenen Hochtemperaturprozessen in der Sekundärstahlerzeugung und der Stahlweiterverarbeitung. Gerade beim Einsatz in der Direktreduktionsanlage können CO₂-Emissionsreduzierungen mit besonders hohem Effizienzfaktor realisiert werden (28 t CO₂ pro 1 t H₂ durch den Ersatz von Kohle).

Die Stahlindustrie wird bereits ab 2026 mehrere Hunderttausend Tonnen Wasserstoff pro Jahr benötigen, der zum Großteil über Pipelineanschlüsse gedeckt werden muss. Damit verbunden sind erhebliche CO₂-Senkungspotenziale, sofern rechtzeitige Anschlüsse an das Wasserstoffkernnetz erfolgen. Bis klimaneutraler Wasserstoff in ausreichender Menge zu wirtschaftlichen Preisen zur Verfügung steht, können die Anlagen auch flexibel mit Erdgas betrieben und bereits damit 60 % der heutigen CO₂-Emissionen eingespart werden. Blauer Wasserstoff wird in der Hochlaufphase eine wichtige Rolle spielen.

Im Vergleich zur letzten Bedarfsabschätzung des Nationalen Wasserstoffrats³ haben sich die Wasserstoffbedarfe der Stahlindustrie deutlich konkretisiert. Die Investitionsplanungen zur Umstellung auf eine klimaneutrale Produktion sind intensiv vorangetrieben worden und die Stahlindustrie befindet sich mitten in der ersten Transformationsstufe. Bei den IPCEI-Projekten sind inzwischen die Projekte bewilligt bzw. Förderbescheide (weitgehend) übergeben. Die Bedarfsprognose für das Jahr 2030 hat sich noch einmal deutlich erhöht. Für 2030 zeichnet sich ab, dass rund 14–15 Mio. t Roheisenkapazität

² Auf Basis des unteren Heizwertes (H_u) von H₂, bei 60 % Wirkungsgrad und 4.000 Vollaststunden p. a.

³ Siehe NWR-Grundlagenpapier „Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland“ vom 1. Februar 2023.

(dies entspricht in etwa der Hälfte der bestehenden Kapazitäten) durch Direktreduktionsanlagen ersetzt werden. Jedoch unter der Annahme, dass nach den bereits geförderten Projekten die noch ausstehenden Investitionsvorhaben bei den anstehenden Ausschreibungsrunden der Klimaschutzverträge zum Zuge kommen.

Damit ergibt sich für 2030 – sofern die Anlagen zu 100 % mit klimaneutralem Wasserstoff betrieben werden – ein Bedarf zwischen 28 und 29 TWh, wobei kleinere Mengen (etwa 0,4 TWh) in der Weiterverarbeitung zum Einsatz kommen könnten. Damit verbunden ist ein CO₂-Reduktionspotenzial allein durch den Einsatz von klimaneutralem Wasserstoff in der Direktreduktion in Höhe von rund 23 Mio. t.

Nach 2030 wird der Wasserstoffbedarf der Stahlindustrie weiter signifikant ansteigen, da konventionell hergestellter Stahl aufgrund steigender CO₂-Preise, der auslaufenden kostenfreien Zuteilung von Emissionszertifikaten und der dann 2038 endenden Ausgabe der Emissionsberechtigungen im EU-ETS beschleunigt an Wettbewerbsfähigkeit verlieren wird. Bei vollständiger Umstellung aller Primärkapazitäten bis 2035 würden 1,8 Mio. t bzw. 60 TWh Wasserstoff benötigt, um die Direktreduktionsanlagen zu betreiben. Hinzu kommen bis 2030 bzw. bis 2045 noch einmal rund 0,1 (3,3 TWh) bzw. 0,4 Mio. t (13,4 TWh) Bedarf an grünem Wasserstoff in der Weiterverarbeitung und verschiedenen Hochtemperaturprozessen in den Elektrostahlanlagen.

Diese Mengenabschätzungen fußen auf der Annahme einer gleichbleibenden Recyclingquote von Stahl und eines vollständigen Austausches von Kohle in Hochöfen durch Wasserstoff als Reduktionsmittel für Primärstahl. Wird eine verstärkte Nutzung von Stahlschrott in Lichtbogenöfen zur Herstellung von Sekundärstahl angenommen, fällt der Wasserstoffbedarf für Stahl geringer aus. Die Möglichkeiten zur Substitution von Primärstahl durch Stahlschrott werden jedoch durch die weltweit begrenzte Verfügbarkeit von Stahlschrott sowie kundenspezifische Qualitätsanforderungen begrenzt. So ist bis 2045 in Deutschland nicht von Steigerungen des Schrottaufkommens über 10 % auszugehen, was bei gleichbleibender Produktion zu einem Mindestbedarf von 2,0 Mio. t (67 TWh) führen würde.

Abbildung 1: Wasserstoffbedarfe in Chemie-, Stahl- und weiteren Prozessindustrien



Chemieindustrie

In der Chemieindustrie (ohne Raffinerien) geht es einerseits darum, den bestehenden Wasserstoffbedarf von ca. 1,1 Mio. t bzw. 37 TWh (bislang grauer Wasserstoff) durch klimaneutralen Wasserstoff zu ersetzen.⁴ Hierfür bedarf es vor allem bei der Ammoniakproduktion völlig neuer Anlagenkonzepte, in die investiert werden muss. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen ist mit diesen Investitionen wahrscheinlich erst in den 2030er-Jahren zu rechnen. Zudem ist zu beachten, welche Auswirkungen auf eine nationale Ammoniakproduktion der erwartete massive Import von grünem Ammoniak als dem Hauptwasserstoffträger für Transporte hat, was eine Prognose erschwert.

Der künftig erhebliche, **zusätzliche** Wasserstoffbedarf ergibt sich andererseits aus der Notwendigkeit, auch die bislang weitgehend fossile Rohstoffbasis treibhausgasneutral zu gestalten. Neben einem verstärkten Recycling und dem Einsatz von Biomasse wird hier vor allem die Nutzung von CO₂ als Kohlenstofflieferant eine Rolle spielen. Für die Umsetzung von CO₂ zu treibhausgasneutralen Kohlenwasserstoffen als Rohstoff (grünes Naphtha) oder direkt als Basischemikalien (Methanol) wird Wasserstoff als wichtigster Co-Faktor benötigt.

Die Entwicklung zukünftiger Bedarfe hängt dabei maßgeblich davon ab, welche Technologiepfade im Zuge der Transformation der chemisch-pharmazeutischen Industrie verfolgt und welche Wachstumsannahmen unterstellt werden. Die Stakeholderplattform Chemistry4Climate hat in ihrem Abschlussbericht drei Szenarien untersucht⁵: Bei einem maximalen Einsatz strombasierter Technologien liegt der Wasserstoffbedarf 2030 bei 22 TWh, 2040 bereits bei 90 TWh und bis 2045 bei 214 TWh, wobei diese Mengen rein stofflich eingesetzt werden. Bei der Priorisierung wasserstoffbasierter Technologien liegt der Bedarf 2030 bei bereits 45 TWh, 2040 bei 144 TWh und 2045 bei 283 TWh, was gegenüber dem heutigen Verbrauch in etwa einer Verachtfachung entspricht. Bei einem vorrangigen Einsatz von Kreislaufwirtschaftstechnologien und Biomasse liegt der Bedarf 2030 bei 21 TWh, 2040 bei 73 TWh und 2045 bei 148 TWh. Beim zweiten und dritten Szenario werden von den genannten Mengen energetisch voraussichtlich jeweils 9 TWh (2030), 21 TWh (2040) und 42 TWh (2045) genutzt. Da es sich hierbei um Idealszenarien handelt, ist ein tatsächlicher Bedarf innerhalb der genannten Spannweiten wahrscheinlich. Da der wachsende Wasserstoffbedarf in der Chemie neben der heimischen Produktion voraussichtlich auch den zusätzlichen Import von klimaneutralem bzw. weitgehend klimaneutralem Wasserstoff und Wasserstoffderivaten erfordert, ist ein Anteil der hier dargestellten Spannweiten auf Derivate (z. B. Ammoniak, Methanol) zurückzuführen. Die Rahmenbedingungen für den Import sollen in der angekündigten Wasserstoffimportstrategie der Bundesregierung ausgestaltet werden.⁶ Eine quantitative Unterscheidung zwischen Wasserstoff und Derivaten ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht als Abschätzung aus realen Projekten oder Ableitung aus Branchenszenarien möglich. In den Kopernikus-Szenarien P2X⁷ wurde allerdings der Wasserstoffbedarf für Folgeprodukte detailliert aufgeschlüsselt. So ergibt sich in 2045 beispielsweise ein Wasserstoffbedarf für Ammoniak von 17 TWh, für Methanol von 9 TWh, für High Value Chemicals in den Steamcrackern von 114 TWh und zusätzlich der Bedarf des Derivats FT-Crude in Höhe von 115 TWh. Darüber hinaus besteht ein SNG-Bedarf von 12 TWh für nicht elektrifizierbare, industrielle Prozesswärme über 500 °C für u. a. Carbon Black (4 TWh) und Soda (5 TWh). In 2030 ergibt

⁴ Für das Jahr 2030 wird davon ausgegangen, dass der bisher mittels grauem H₂ gedeckter Bedarf der Chemieindustrie nur anteilig durch klimaneutralen oder weitgehend klimaneutralen Wasserstoff gedeckt wird. Damit betreffen die Angaben für 2030 ebenso die Nachfrage nach grauem Wasserstoff. Bis 2045 wird der ausgewiesene Wasserstoffbedarf sukzessive auf ausschließlich klimaneutralen Wasserstoff umgestellt.

⁵ Chemistry4Climate (2023): Abschlussbericht.

⁶ Siehe hierzu auch die NWR-Veröffentlichung „Stellungnahme zur Erarbeitung der Wasserstoff-Importstrategie der Bundesregierung“ vom 19. Januar 2024.

⁷ Kopernikus-Projekt „P2X: Erforschung, Validierung und Implementierung von ‚Power-to-X‘-Konzepten“.

sich ein Wasserstoffbedarf für Ammoniak von 5 TWh, für Methanol von 5 TWh und für High Value Chemicals von 13 TWh sowie ein SNG-Bedarf von 1 TWh für die industrielle Prozesswärme über 500 °C.

Weitere Prozessindustrien

Die grundsätzliche Frage, inwieweit mit welchem Zeithorizont Gas durch CO₂-neutrale Substitute wie Wasserstoff ersetzt werden kann, stellt sich neben Stahl und Chemie auch für eine Reihe von anderen Industriezweigen in Deutschland, etwa für die **Glas- oder Papierherstellung**.

In diesen beiden Industrien kann in energieaufwendigen Prozessen das verwendete Erdgas durch Wasserstoff und in der Papierindustrie durch geringere Temperaturniveaus auch durch Biomasse ersetzt und somit der Anteil an CO₂-Emissionen schrittweise gesenkt werden. Wasserstoff ist von entscheidender Bedeutung für die Dekarbonisierung auch der Glasindustrie, da eine vollständige Elektrifizierung des Glasherstellungsprozesses aus technischen Gründen sehr aufwendig und damit teuer ist. Für das Jahr 2030 erwartet der Bundesverband Glasindustrie e. V. rund 1 TWh Wasserstoffbedarf. Die Papierindustrie rechnet dagegen mit einem Bedarf von rund 5 TWh im Jahr 2030. Im zweiten Schritt des Hochlaufs bis 2035 steigt der Bedarf der Glasindustrie nur langsam auf ungefähr 2 TWh. Die Papierindustrie dagegen rechnet bereits mit einem Bedarf von 17 TWh Wasserstoff, da ihre gasbasierten KWK-Kraftwerke bis dahin weitgehend auf Wasserstoff umgestellt sein sollen. Der Einsatz wasserstofffähiger Gasturbinen ist bereits erprobt. Diese können nicht nur Wärme und Dampf für die eigene Produktion erzeugen, sondern bei niedrigem Angebot an Wind- und PV-Strom auch zur regionalen Netzstabilisierung beitragen. Schon heute nehmen sie dadurch eine Doppelrolle als energieintensiver, aber stromnetzdienlicher Abnehmer und Einspeiser ein. Auch in der Glasindustrie sind mehrere Wasserstoffprojekte durchgeführt worden. Neben Projekten in semiindustriellen Anlagen, wie HyGlass und H₂Glass, ist hier der großtechnische Einsatz in einer Glasschmelzwanne zu nennen.

Auch in der **Industrie der Nicht-Eisen-Metalle** besteht ein stofflicher und energetischer Bedarf an Wasserstoff. Ähnlich wie bei Primärstahl wird Wasserstoff als Reduktionsmittel für klimaneutrales Blei und Zink benötigt. Dafür ergibt sich ein Wasserstoffbedarf von 0,4 bis 0,6 TWh im Jahr 2030, wovon alleine 0,4 TWh für die stoffliche Nutzung vorbehalten sind, und von 4,7 bis 5,3 TWh im Jahr 2045.⁸

Im **Industriezweig Steine und Erden** entsteht ebenfalls ein Wasserstoff- bzw. SNG-Bedarf, der seitens der Branche auf ca. 1 TWh in 2030 und ca. 8 TWh im Jahr 2045 geschätzt wird.⁹ Die großen Brennöfen etwa für die Herstellung von Ziegel, Kalk und Zement laufen Stand heute zwar vielfach noch mit fossilen Brennstoffen. Bereits heute werden aber z. B. in Zementwerken in großem Umfang Sekundärbrennstoffe eingesetzt, die im Vergleich zu herkömmlicher Kohle eine erhebliche Einsparung an CO₂ ermöglichen. Die Industrie bemüht sich, den fossilen Brennstoffeinsatz sukzessive zu senken. Auf dem Weg zur Dekarbonisierung werden – neben dem Einsatz von Wasserstoff – auch z. B. Biomassennutzung, Elektrifizierung sowie weitere Effizienzsteigerungen eine Rolle spielen.¹⁰

Nach Schätzungen des Branchenverbandes VDMA werden in Produktionsprozessen des **Maschinen- und Anlagenbaus** Stand heute etwa 1–2 TWh an Gas für Prozesse wie Wärmebehandlung, Härtung,

⁸ Siehe Fußnote 7

⁹ Siehe dazu folgende Veröffentlichungen: Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie (2021): „Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland“; Bundesverband der deutschen Kalkindustrie (2020): „Roadmap Kalkindustrie 2050“; Verein Deutscher Zementwerke (2020): „Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien“.

¹⁰ Im Kopernikus-Projekt „P2X: Erforschung, Validierung und Implementierung von „Power-to-X“-Konzepten“ wurden die Bedarfe höher eingeschätzt (1,4 TWh in 2030, 12–13 TWh in 2045); allerdings scheinen hier die Reduktionspotenziale durch aktuelle Bemühungen in der Branche nicht berücksichtigt zu sein.

Trocknung o. Ä. verwendet und müssten perspektivisch (d. h. in den 2030er-Jahren) auf Wasserstoff (oder – soweit technisch möglich – Strom) umgestellt werden. Die Gebäudewärme ist dabei nicht inkludiert, auch wenn es gewisse Wechselwirkungen im Einzelfall geben kann, etwa durch Kraft-Wärme-Kopplung.

2.2 VERKEHRS- BZW. TRANSPORTSEKTOR

Klimafreundlich erzeugter Wasserstoff kann auch im Verkehrs- bzw. Transportsektor einen wesentlichen Beitrag zur Zielerreichung darstellen. Neben direkt genutztem erneuerbarem Strom werden schon mittelfristig Wasserstoff und wasserstoffbasierte Kraftstoffe, insbesondere im straßengebundenen Schwerlastverkehr, im Flug- und Schiffs- sowie Schienenverkehr, die wichtigsten Energieträger werden. Immer dort, wo über lange Distanzen viele Personen oder schwere Güter transportiert werden, ist der Einsatz von Wasserstoff oder wasserstoffbasierten Kraftstoffen eine wichtige Lösung. Auch die Sicherheitseinrichtungen Deutschlands benötigen eine robuste Energieversorgung und müssen sich im Rahmen der Transformation frühzeitig damit auseinandersetzen, Gleiches gilt für die Bauindustrie oder die Landwirtschaft. Die Nutzung von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten im Bereich der Mobilität wurde im Folgenden anwendungsbezogen beleuchtet, sowohl für den straßengebundenen Verkehr als auch für übrige Anwendungen.

Individualverkehr inkl. leichter Nutzfahrzeuge

Der Pkw-Verkehr fokussiert sich heute hauptsächlich auf batterieelektrische Antriebsstränge, um seine CO₂-Emissionsreduktionsziele zu erfüllen. Sofern der Ausbau der notwendigen Ladeinfrastruktur einschließlich der zugehörigen Stromnetze gelingt und die notwendigen kritischen Rohstoffe für die Batterien bereitgestellt werden, dürfte ein weitgehender Marktanteil erreicht werden. Einige Hersteller, teilweise mit dem Fokus außerhalb der EU, sind auch dabei, wasserstoffelektrische Fahrzeuge als ein ergänzendes Marktsegment weiterzuentwickeln. Hierbei ist darauf zu verweisen, dass diese Entwicklungen zum großen Teil außerhalb Deutschlands unter anderen politischen und geografischen Rahmenbedingungen erfolgen und von dort wirtschaftlich wettbewerbsfähige Alternativen zum batterieelektrischen Pkw zu erwarten sind. Der erwartete Wasserstoffbedarf für Pkw-Anwendungen ist zumindest für 2030 mit weniger als 1 TWh relativ gering, der für leichte Nutzfahrzeuge allerdings schon größer. Noch in 2023 hatte ein europäischer Hersteller den Verkauf von Brennstoffzellentransportern angekündigt, flankiert von Fördermaßnahmen durch die französische Regierung. Der NWR geht davon aus, dass der Wasserstoffbedarf für leichte Nutzfahrzeuge bis 2030 auf knapp 1 TWh anwachsen wird. Aufgrund seiner Nutzungseigenschaften (hohe Reichweite und höhere Nutzlast) dürfte der Wasserstoffbedarf auf etwa 8 TWh bis 2040 anwachsen. Zu diesem Zeitpunkt sollten die Segmente der leichten Nutzfahrzeuge bei entsprechender Wirtschaftlichkeit weitestgehend dekarbonisiert sein.

Schwerlastverkehr inkl. Bussen

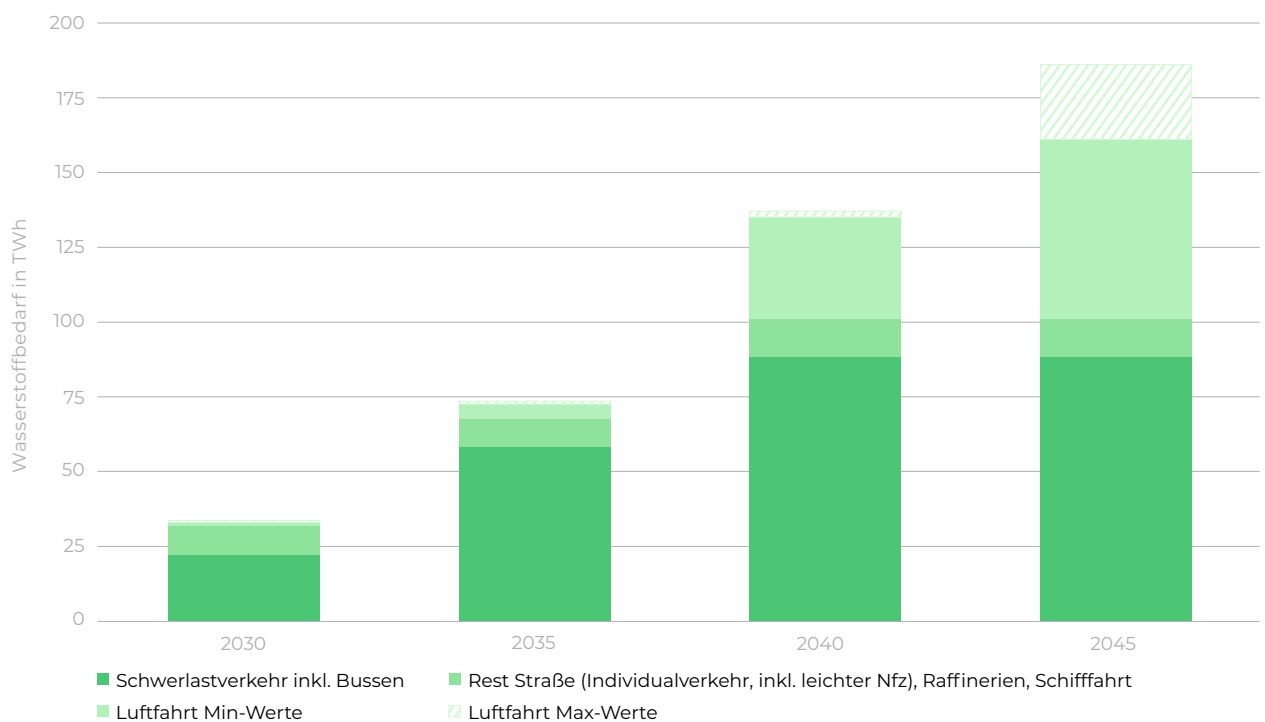
Vermutlich noch im Mai 2024 wird die Europäische Union eine Verschärfung der CO₂-Emissionsreduktionsziele für schwere Nutzfahrzeuge beschließen. Zum ersten Mal werden dabei nicht nur Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht schwerer als 3,5 t in ihrem CO₂-Ausstoß reguliert, sondern zusätzlich auch Stadt- und Reisebusse.

Um die Ziele der EU zu erreichen, haben einige Lkw-Hersteller neben batterieelektrischen Lkw bereits Brennstoffzellenfahrzeuge angekündigt oder schon auf den Markt gebracht. Die im NWR-Grundlagenpapier von 2023¹¹ für 2030 prognostizierte Menge von knapp 0,5 Mio. t H₂ (17 TWh) basierte auf der Annahme, dass ergänzend zum H₂-Einsatz in Raffinerien dann ca. 38.000 Heavy Duty Vehicles (HDV) mit Brennstoffzellen in Deutschland zugelassen sein werden.¹²

Auf der Basis der erhöhten CO₂-Emissionsreduktionsziele erwartet der NWR nun, dass ca. 50.000 Lkw und etwa 5.000 Wasserstoffbusse in 2030 im Einsatz sein werden, sodass ein Wasserstoffbedarf von etwa 22 TWh entstehen wird. Die Zielvorgabe für 2035 für schwere Nutzfahrzeuge, nämlich 65 % der CO₂-Emissionen gegenüber 2019 zu senken, wird den Verbrauch an Wasserstoff weiter steigern. Einerseits nimmt die Fahrzeugpopulation durch die Neuzulassungen zu, andererseits werden neue Segmente durch sinkende Wasserstoffkosten besetzt werden, sodass insgesamt ein Wasserstoffbedarf von ca. 58 TWh für 2035 erwartet wird.

Für 2040 sieht die Regulierung für schwere Nutzfahrzeuge vor, dass 90 % der CO₂-Emissionen gegenüber 2019 zu senken sind. Neben etwa 500.000 Batterie-Lkw und -Bussen sollten dann etwa 300.000 Wasserstoff-Lkw in Deutschland zugelassen und betrieben werden. Der Wasserstoffbedarf dieser Fahrzeuge beläuft sich auf etwa 88 TWh.

Abbildung 2: Entwicklung des Wasserstoffbedarfs im Verkehrssektor (ohne E-Fuels jenseits von Luft- und Schifffahrt)



¹¹ NWR-Grundlagenpapier „Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland“ vom 1. Februar 2023.

¹² Eine vom Bundesverkehrsministerium in Auftrag gegebene Studie aus dem Jahr 2023 ergab, dass bis 2030 etwa 38.000 H₂-Lkw zugelassen sein werden. Für diese HDV kann mit einem jährlichen Verbrauch von ca. 380.000 t H₂ gerechnet werden. Hinzu kommen weitere ca. 100.000 t H₂ für Lkw, die außerhalb Deutschlands zugelassen sind, aber in Deutschland unterwegs sein werden und daher hier betankt werden müssen (NOW (2023): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr).

Raffinerien

Aus methodischen Gründen wird der Wasserstoffeinsatz in den Raffinerien hier dem Mobilitätssektor zugerechnet. Es wird davon ausgegangen, dass der heute dort verwendete, aus Erdgas hergestellte Wasserstoff, auch durch die Vorgaben der RED II getrieben, vergleichsweise schnell durch grünen Wasserstoff ersetzt werden kann. Insgesamt rechnet man heute, dass zur Entschwefelung der Kraftstoffe netto ein Bedarf an Wasserstoff von etwa 5,7 TWh besteht, der zurzeit durch Erdgasreformierung hergestellt wird. Aufgrund des hohen Eigeninteresses der Raffineriebetreiber dürfte dieses Potenzial schnell erschlossen werden, sodass in 2030 bereits ein Verbrauch von etwa 1,7 TWh an grünem H₂ erwartet wird¹³. Unter dem Druck hoher Strafen ist eine zügige Substitution von grauem Wasserstoff durch grünen Wasserstoff zu erwarten, sodass der Verbrauch von grünem Wasserstoff bis 2035 auf etwa 4 TWh steigt. Gegen Ende der kommenden Dekade dürfte sich das Bild dann allerdings drehen: Mit sinkendem Verbrauch an fossilen Kraftstoffen durch den Verkehr müssen Raffinerien auch weniger Kraftstoffe entschwefeln, sodass der NWR erwartet, dass sich der Verbrauch von grünem Wasserstoff bis 2040 auf etwa 2 TWh abschwächen wird.

Luftfahrt

Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsanalysen zeigen, dass Wasserstoff ein maßgeblicher Bestandteil der zukünftigen Technologie der Luftfahrt sein kann. Wesentliche regulatorische Rahmenbedingungen (insbesondere seitens der EU) sind die ReFuel-Aviation-Verordnung und die darin festgelegten Quoten für den Anteil an nachhaltigen Treibstoffen (Sustainable Aviation Fuels, SAF) sowie die Unterquote für strombasierte Kraftstoffe. Darüber hinaus sind auch Zulassungs- und Zertifizierungsaspekte in der Herstellung von nachhaltigen und klimafreundlichen Treibstoffen in der Luftfahrt von Relevanz.

Der erwartbare Bedarf an Wasserstoff unabhängig von der Form der Nutzung (direkte Verbrennung bzw. Nutzung von Wasserstoff in anderen Verfahren, beispielsweise Fischer-Tropsch) liegt im Jahr 2030 bei 1,4 bis 1,6 TWh und im Jahr 2045 bei 60 bis 80 TWh.

Schifffahrt

Für den maritimen Sektor spielen Wasserstoff und seine Derivate eine entscheidende Rolle für die Dekarbonisierung, da eine direkte Elektrifizierung hier bestenfalls in Nischen gelingen wird. Dennoch sind die für Deutschland zu betrachtenden Mengen im Jahr 2030 eher gering einzuschätzen (ca. 21.000 t H₂, entspricht etwa 0,7 TWh). Die von der EU eingeführten Quoten in Höhe von 1 % im Jahr 2031 bzw. 2 % im Jahr 2034 (falls die 1 %-Quote 2031 nicht erreicht werden sollte) führen zu einem Bedarf von etwa 0,8 bzw. 1,5 TWh H₂. Allerdings ist eine Abschätzung aufgrund der komplexen Regulatorik (mit verschiedenen Wechselwirkungen) und des bislang kaum existierenden Marktes schwierig. Die Kopenhagen-Szenarien sehen für 2040 einen Bedarf von 3 TWh und für 2045 von 5 TWh vor.¹⁴

¹³ Stand heute werden in Raffinerien in Deutschland etwa 450.000 t H₂ produziert bzw. genutzt, davon aber nur 170.000 t aus dem extern zugeführten Erdgas zur Entschwefelung. Raffinerieinterne Prozesse werden hier nicht berücksichtigt, da ein Ersatz dieses prozessualen Wasserstoffes nicht zu einer CO₂-Reduktion beitragen würde.

¹⁴ Siehe Fußnote 7

Die Rolle der E-Fuels

Auch im Jahr 2030 werden voraussichtlich noch 75 % aller Bestandsfahrzeuge im Straßenverkehr mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet sein, da der Hochlauf der Elektromobilität seit Ende der Förderung nur schleppend vorangeht. Ein für Luft- und Schifffahrt notwendiger Markthochlauf von weitgehend klimaneutralen, wasserstoffbasierten Kraftstoffen kann hier in der Übergangsphase weitere Treibhausgasreduktionen erwirken. Für alle Anwendungen, die schwer zu elektrifizieren sind, in denen weder Fahrzeuge noch eine Infrastruktur für die direkte Wasserstoffnutzung zur Verfügung stehen oder in denen eine Vermeidung und Verlagerung von Verkehr nicht möglich sind, könnten ebenfalls strombasierte Kraftstoffe genutzt werden, beispielsweise für Fahrzeuge in der Bauindustrie, der Landwirtschaft und den Sicherheitseinrichtungen Deutschlands. Eine vorsichtige Schätzung des NWR geht von knapp 6 TWh im Jahr 2030 aus, die als kohlenstoffhaltige, wasserstoffbasierte Derivate (aus Kostengründen) voraussichtlich aus Ländern außerhalb der EU importiert würden. Ob die jüngsten europäischen Vorgaben (RED III) hier zu einem höheren Bedarf führen könnten, bleibt aus heutiger Sicht unklar; u. a. aus diesem Grund wurde die Einschätzung aus dem NWR-Grundlagenpapier von 2023¹⁵ hier nicht verändert. Auch die Frage, inwiefern der Import von E-Fuels regulatorisch möglich ist, bleibt hier außen vor.

Sonstige Anwendungen

Die Verwendung von fossilem Diesel im Zugverkehr wird zunehmend zurückgedrängt. Wasserstoff und die Brennstoffzelle sind hier wesentliche Alternativen, die absehbar allerdings nur zu überschaubaren Wasserstoffbedarfsmengen führen werden und entsprechend in die europäischen Entwicklungen eingebettet sein müssen, insbesondere vor dem Hintergrund der neuen transeuropäischen Verbünde.

2.3 WÄRMEMARKT

Der Wärmesektor ist für mehr als die Hälfte des deutschen Endenergiebedarfs verantwortlich und ein wichtiges Segment zur Erreichung der Klimaschutzziele. Die vom NWR in Auftrag gegebene Bottom-up-Studie Wärmemarkt¹⁶ hat gezeigt, dass eine „One-size-fits-all“-Lösung nicht existiert. Vielmehr ist ein Bündel von Technologieoptionen für die Dekarbonisierung notwendig. Die wichtigste Rolle spielen Wärmepumpen, -netze, erneuerbare Wärme und Wasserstoff. Wasserstoff ist insbesondere für die Fernwärmeerzeugung und Prozesswärme unabdingbar und bis zu einem Anteil von bis zu 40 % kostenoptimal, unabhängig von der betrachteten Kostenentwicklung. Aber auch im Bereich der dezentralen Raumwärme kann Wasserstoff eine Rolle spielen, insbesondere in den Gebieten, in denen Fernwärme weniger stark ausgeprägt ist. Der Wärmemarkt ist lokal sehr unterschiedlich und eine verlässliche Absatzprognose ist erst dann möglich, wenn in allen Versorgungsgebieten Deutschlands im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung der lokal geeignete Dekarbonisierungspfad identifiziert wurde. Die Analysen haben jedoch gezeigt, dass in allen Versorgungsgebieten die Dekarbonisierungspfade bis 2030 im Wesentlichen gleich sind und der Wasserstoffeinsatz im Wärmemarkt erst danach erfolgt.

Eine erste Hochrechnung auf Basis der für die Bottom-up-Studie analysierten vier Versorgungsgebiete zeigt (je nach Szenario) einen Wasserstoffbedarf für die zentrale und dezentrale Wärmeerzeugung von 5 bis 10 TWh im Jahr 2030 und danach eine rasch ansteigende Nachfrage auf eine Größenordnung von 125 bis 500 TWh im Jahr 2045. Die Themen Prozesswärme und Kraftwärmekopplung (KWK) sind in diesem Abschnitt insoweit berücksichtigt, dass Abnehmer an Verteilnetze angeschlossen sind. Weitere Mengen finden sich nicht hier, sondern im Abschnitt 3.1 Prozessindustrien.

¹⁵ NWR-Grundlagenpapier „Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland“ vom 1. Februar 2023.

¹⁶ NWR-Studie „Bottom-Up Studie zu Pfadoptioen einer effizienten und sozialverträglichen Dekarbonisierung des Wärmesektors“ vom 8. Dezember 2022.

2.4 ENERGIEVERSORGUNG

Der Wasserstoffeinsatz im Energiesektor zur Produktion von elektrischer Energie spielte in den bisherigen Analysen des NWR für das Jahr 2030 nur eine untergeordnete Rolle. Gleichwohl stehen mit dem abgeschlossenen Ausstieg aus der Kernkraft und dem fortschreitenden Kohleausstieg notwendige Investitionen in gesicherte Kraftwerksleistung bis 2030 und darüber hinaus an. Damit diese Kapazitäten auch in einem vollständig klimaneutralen Energiesystem 2045 die Versorgungssicherheit gewährleisten können, hat die Bundesregierung Eckpunkte für die Kraftwerksstrategie vorgelegt. So sollen bis zu viermal 2,5 GW an H₂-ready-Kraftwerkskapazitäten ausgeschrieben werden, welche zwischen 2035 und 2040 komplett auf Wasserstoff umgestellt werden sollen. Des Weiteren werden bis zu 0,5 GW an reinen Wasserstoffkraftwerken gefördert. Zusätzlich sollen Konzepte für einen marktlichen, technologieneutralen Kapazitätsmechanismus erarbeitet werden, die bis spätestens 2028 operativ sein sollen. Mit der letzten Vergabe von Emissionsberechtigungen im Jahr 2038 existiert eine weitere relevante Einflussgröße auf die Geschwindigkeit des Wasserstoffhochlaufs in der Stromerzeugung.

Als flexible und klimafreundliche Anlagen zur Stromerzeugung gewährleisten Wasserstoffkraftwerke samt Speichern auch in Zeiten mit wenig Sonne und Wind eine sichere Versorgung. Hieraus resultieren jedoch geringere Volllaststunden. Abhängig von dem Ausbau der erneuerbaren Energien, der Elektrizitätsnachfrageentwicklung, Speichern und anderen Flexibilitätsoptionen werden installierte Kraftwerkskapazitäten in Höhe von 40 bis 70 GW im Jahr 2045 benötigt. Der NWR erwartet für den betrachteten Zeitraum eine Wasserstoffnachfrage von 30 TWh für das Jahr 2035 und von bis zu 200 TWh für das Jahr 2045. Dabei wird im Jahr 2045 ein Wasserstoffeinsatz in Höhe von 80 bis 100 TWh als systemnotwendig angesehen, um im Winter eine stabile Stromversorgung samt neuer Verbraucher wie z. B. Elektromobile und Wärmepumpen zu gewährleisten und die kritische Infrastruktur funktionsfähig zu halten. Zusätzliche Mengen werden größtenteils durch die Preisentwicklung von klimaneutralem Wasserstoff geprägt sein.

Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Bedarfe aus der Stromerzeugung teilweise mit dem KWK-Segment der zentralen Wärmeerzeugung überlappen.

3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bereits die frühere Bedarfsanalyse „Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland“ aus dem Jahr 2023 hatte die zuvor ermittelten Bedarfe an grünem Wasserstoff in Deutschland dargestellt. Demnach wird Wasserstoff in der Industrie, speziell der Stahl- und Chemieindustrie, sowie in den Sektoren Mobilität, Wärme und Energieversorgung eine signifikante Rolle spielen, um Emissionen von Treibhausgasen einzusparen. Der aktuell abgeschätzte Einsatz von Wasserstoff birgt enormes CO₂-Einsparpotenzial, allein in der Stahlindustrie können in 2045 etwa 50–55 Mio. t/a CO₂ vermieden werden. Wie in der Bedarfsanalyse von 2023¹⁷ dargelegt, ist der „CO₂-Vermeidungshebel“ insbesondere in der Stahlindustrie besonders ausgeprägt mit 25 t vermiedenem CO₂ pro Tonne an eingesetztem grünem Wasserstoff, da hier ein direkter Wechsel von Kohle zu Wasserstoff als Reduktionsmittel durch den Technologiewechsel auf das wasserstoffbasierte Verfahren der DRI-Reduktion möglich ist.¹⁸

¹⁷ Siehe Abbildung 4 im NWR-Grundlagenpapier: „Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland“ vom 1. Februar 2023.

¹⁸ Für die stoffliche Nutzung von Wasserstoff im Direktreduktionsverfahren ergibt sich ein Effizienzfaktor von 28 t CO₂-Emissionsreduktion pro eingesetzter Tonne klimaneutralem Wasserstoff. Unter Berücksichtigung der energetischen Nutzung in Wärmeöfen und Hochtemperaturprozessen in der Weiterverarbeitung ergibt sich für die Stahlindustrie ein Gesamtfaktor von 25 t CO₂-Emissionsreduktion pro eingesetzter Tonne klimaneutralem Wasserstoff.

Die hier vorliegende Darstellung der Wasserstoffbedarfe aller Sektoren in Deutschland für die Jahre 2030, 2035, 2040 und 2045, also dem Jahr, in welchem Deutschland klimaneutral werden will, basiert wie dargelegt auf Angaben der jeweiligen Industriesektoren (siehe Tabelle 1). Diese Angaben wurden plausibilisiert und geben somit einen groben, aber validen Überblick über zu erwartende Mengen, die in Deutschland produziert oder importiert werden müssen. Für das Jahr 2045 ist hiermit naturgemäß eine große Unsicherheit verbunden. Diese rührt auch daher, dass noch nicht absehbar ist, in welchem Umfang Potenziale von Effizienzgewinnen und alternativen Energieträgern/Rohstoffen technisch und wirtschaftlich gehoben werden können, welche die Wasserstoffbedarfe in den einzelnen Sektoren senken würden. Dazu gehören etwa:

- ◆ in der Stahlindustrie z. B. die Ausweitung der Kreislaufwirtschaft auf einen erhöhten Anteil an Elektrostahl,
- ◆ in der Chemieindustrie z. B. die Verlängerung von Produktlebenszeiten, Einschränkung von Einwegplastik etc. mit einem Gesamteinsparpotenzial von 15 bis 24 %, ¹⁹
- ◆ in der Papierindustrie z. B. der Einsatz von nachhaltiger Biomasse für Prozesswärme oder Industriewärmepumpen bei Temperaturen < 200 °C,
- ◆ in der Zementindustrie z. B. die Reduktion des Klinkerfaktors und der Einsatz von nachhaltigen Beton- und Baustoffalternativen, ²⁰
- ◆ im Verkehr z. B. der Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) für alle Kurzstrecken und die Elektrifizierung des Langstreckenverkehrs (LKW, Schiene),
- ◆ in der Energieversorgung z. B. die Hebung von Flexibilisierungspotenzialen im Stromsystem,
- ◆ in der dezentralen Wärmeerzeugung der vermehrte Einsatz von Wärmepumpen, Wärmedämmung und erneuerbaren Wärmenetzen für die Raumwärme, welche aus Sicht der großen Systemszenariostudien in den meisten Fällen effizienter und verfügbarer sind und zu deutlich niedrigeren Wasserstoffbedarfen führen. ²¹

Für das Jahr 2030 stellt die Gesamtmenge von 94 bis 125 TWh gleichwohl eine plausible Bandbreite dar.

¹⁹ Ptx Lab Lausitz (2024): „Rohstoffmix für eine nachhaltige Chemie“ und Meng et al. (2023): „Planet-compatible pathways for transitioning the chemical industry“.

²⁰ UBA (2020): „Dekarbonisierung der Zementindustrie“ und Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI) (2022): „Auf dem Weg zur klimaneutralen Industrie: Zement“.

²¹ Siehe Metastudien von Öko-Institut (2024): „Erdgas Phase-out in Deutschland“ und Rosenow (2024): „A meta-review of 54 studies on hydrogen heating“.

Tabelle 1

	2030			2035	2040	2045
	Mio. t H ₂	TWh ²²	Mio. t CO ₂ - Emissionsreduktion	TWh	TWh	TWh
Prozessindustrien		56–82		130–180	167–250	254–402
Stahlindustrie	0,8–0,9	28–29	23	63	67–73	67–73
Chemieindustrie ²³	0,6–1,3	21–45	0–3	47–95	73–144	148–283
Weitere Prozessindustrien	0,2	7–8	k. A.	20–22	27–33	39–46
Verkehrs-/ Transportsektor		33		73–74	135–137	161–186
Individualverkehr inkl. leichter Nfz	0,04	1,3	0,2	4	8	8
Schwerlastverkehr (schwere Nfz) inkl. Bussen	0,7	22	4	58	88	88
Raffinerien	0,05	1,7	0,6	4	2	0
Luftfahrt	0,04	1,4–1,6	0,3	5–6	34–36	60–85
Schifffahrt	0,02	0,7	0,1	1,5	3	5
E-Fuels ²⁴	0,2	6	1,2	k.A.	k.A.	k.A.
Wärmemarkt²⁵		5–10		k.A.	k.A.	125–500
Energieversorgung		0		30	k.A.	80–200
Summe		94–125		233–284	302–387	620–1288

²² Die Umrechnung basiert auf dem unteren Heizwert für Wasserstoff, demnach entspricht 1 Mio. t H₂ etwa 33,33 TWh.

²³ Für das Jahr 2030 wird davon ausgegangen, dass der bisher mittels grauen H₂ gedeckter Bedarf der Chemieindustrie nur anteilig durch klimaneutralen oder weitgehend klimaneutralen Wasserstoff gedeckt wird. Damit betreffen die Angaben für 2030 ebenso die Nachfrage nach grauem Wasserstoff. Bis 2045 wird der ausgewiesene Wasserstoffbedarf sukzessive auf ausschließlich klimaneutralen Wasserstoff umgestellt.

²⁴ Für Bedarfe jenseits von Luft- und Schifffahrt.

²⁵ Zentrale und dezentrale Erzeugung.



DER NATIONALE WASSERSTOFFRAT

Mit der Verabschiedung der Nationalen Wasserstoffstrategie hat die Bundesregierung am 10. Juni 2020 den Nationalen Wasserstoffrat berufen. Der Rat besteht aus 26 hochrangigen Expertinnen und Experten der Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft, die nicht Teil der öffentlichen Verwaltung sind. Die Mitglieder des Wasserstoffrats verfügen über Expertise in den Bereichen Erzeugung, Forschung und Innovation, Dekarbonisierung von Industrie, Verkehr und Gebäude/Wärme, Infrastruktur, internationale Partnerschaften sowie Klima und Nachhaltigkeit. Der Nationale Wasserstoffrat wird geleitet durch Katherina Reiche, Parlamentarische Staatssekretärin a. D.

Aufgabe des Nationalen Wasserstoffrats ist es, den Staatssekretärsausschuss für Wasserstoff durch Vorschläge und Handlungsempfehlungen bei der Umsetzung und Weiterentwicklung der Wasserstoffstrategie zu beraten und zu unterstützen.

◆ Kontakt: info@leitstelle-nws.de, www.wasserstoffrat.de