

B E T

Energie. Weiter denken

IMPULSPAPIER – BEAUFTRAGT VON IHK NRW

Wasserstoff – Chancen für die Wirtschaft in NRW

H₂



Foto: Dirk Hartung

INHALT

1 Zusammenfassung

Seite 3

2 Wasserstoff – wesentlicher Energieträger für die Vollendung der Energiewende

Seite 5

3 Wertschöpfung in der Wasserstoffwirtschaft

Seite 10

4 Tätigkeitsfelder und Anwendungsfälle für Unternehmen in NRW

Seite 15

5 Handlungsfelder zur Unterstützung des Markthochlaufs

Seite 28

Endnoten

Seite 30

Autor*innen:

Dr. Olaf Unruh
Sebastian Seier
Lukas Wammes
Felix Wendholt
Leonie Söll

ZUSAMMENFASSUNG

Soll die Erderwärmung bis Mitte des Jahrhunderts auf unter 1,5 °C begrenzt werden, wie es im Klimaschutzabkommen von Paris vereinbart wurde, dürfen bis 2050 weltweit nahezu keine Treibhausgase mehr in die Atmosphäre entlassen werden. Ein großer Teil der Emissionen wird durch den Einsatz erneuerbarer Energien und Energieeffizienzmaßnahmen reduziert werden können. In einigen Bereichen wie Hochtemperaturprozessen in der Industrie oder dem Schwerlast- und Fernverkehr stoßen die erneuerbaren Energien jedoch an technische Grenzen. Klimafreundlicher Wasserstoff (H₂) kann diese Lücke füllen und die Energiewende vollenden. Im Auftrag von IHK NRW – den Industrie- und Handelskammern in Nordrhein-Westfalen e. v. – hat B E T die Potenziale und Handlungsanforderungen untersucht, um Wasserstoff als Energieträger der Zukunft für die NRW-Wirtschaft nutzbar machen zu können.

Grüner, blauer und türkiser Wasserstoff können die Dekarbonisierung vorantreiben

Während heute Wasserstoff hauptsächlich auf Basis fossiler Energieträger wie Erdgas und Erdöl hergestellt wird (grauer H₂), sind für die Dekarbonisierung der Wirtschaft emissionsarme bzw. -freie Erzeugungsverfahren entscheidend. Vor allem die Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse mit erneuerbarem Strom (grüner H₂) gilt in politischen Willensbekundungen wie der Nationalen Wasserstoffstrategie oder der Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen (Wasserstoff-Roadmap NRW) als Hoffnungsträger. Daneben ermöglichen auch die Abspaltung und Speicherung bzw. Nutzung von Kohlenstoffdioxid bei der fossilen Wasserstofferzeugung (blau) und die Methanpyrolyse (türkis) emissionsarme und relativ kostengünstige Alternativen.

Massiver Ausbau der erneuerbaren Energien erforderlich

Bis 2030 sollen in Deutschland 5 Gigawatt (GW) und in Nordrhein-Westfalen bis zu 3 GW Elektrolysekapazität zur Erzeugung von grünem Wasserstoff entstehen. Zur Versorgung dieser Elektrolyseure mit Strom ist in ganz Deutschland das Äquivalent der Jahresproduktion von 3.000 Onshore-Windkraftanlagen à 3 Megawatt (MW) erforderlich. Dies unterstreicht die Herausforderungen, vor denen Politik und Wirtschaft stehen, um die Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie und der Wasserstoff-Roadmap NRW umzusetzen.

Weltweite Marktchancen für Unternehmen aus NRW

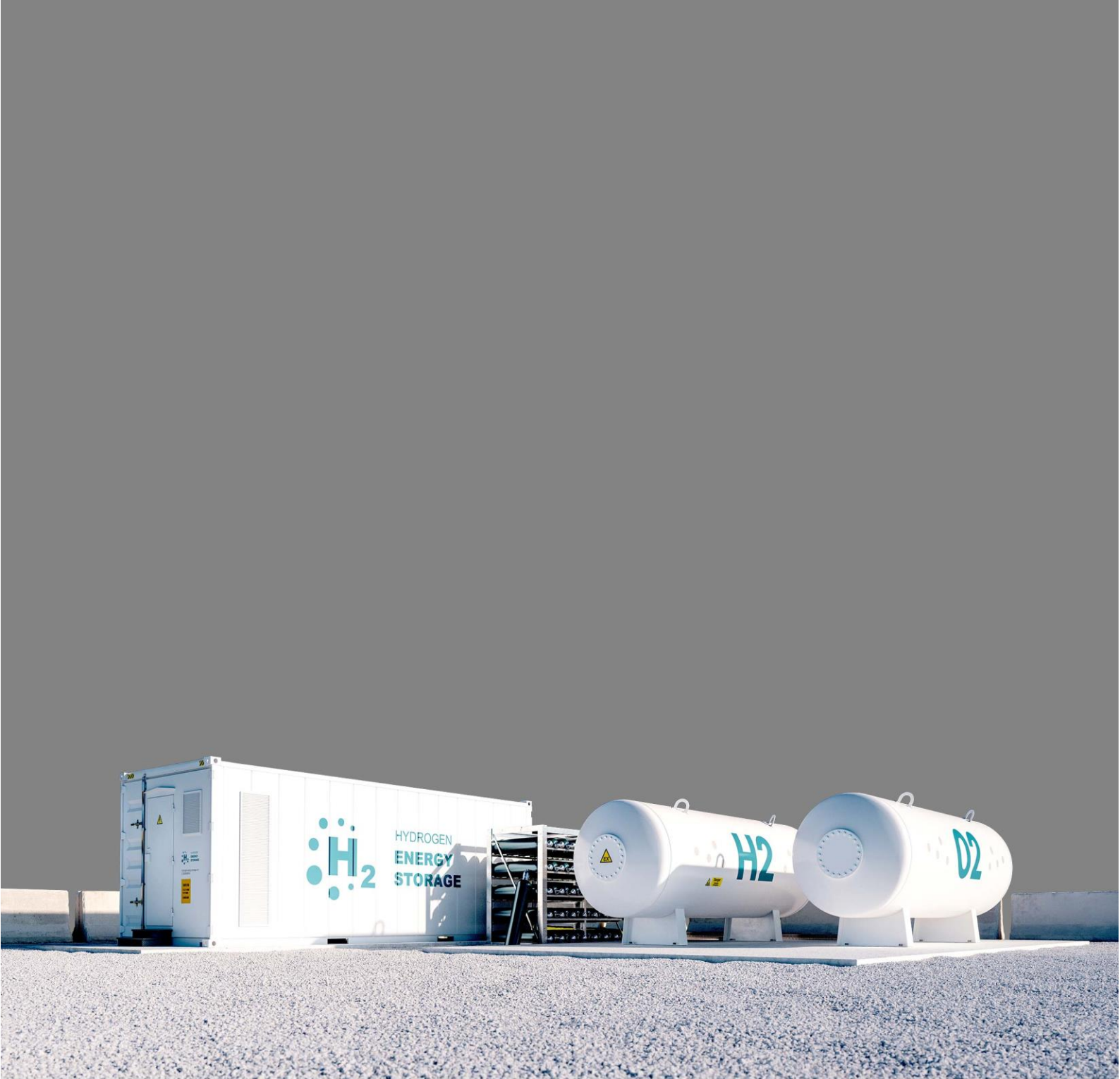
Für die Nutzung von Wasserstoff muss nicht nur die Infrastruktur für die Erzeugung, sondern auch für Transport, Speicherung und Handel des grünen Gases aufgebaut werden. Die international in Entstehung begriffene Wasserstoffwirtschaft bietet Unternehmen aus Deutschland und Nordrhein-Westfalen (NRW) große Chancen für Innovation, Strukturwandel und Wachstum. Bis zu 9 Billionen Euro müssen weltweit bis 2050 in den Auf- und Ausbau der H₂-Infrastruktur investiert werden. In NRW sind es über 80 Milliarden Euro. Um dieses Potenzial zu nutzen, sollten Unternehmen zeitnah in einem starken Heimatmarkt die Gelegenheit bekommen, Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten und funktionierende Geschäftsmodelle aufzubauen. So können der Wissensvorsprung heimischer Unternehmen gewahrt und Exportpotenziale genutzt werden.

Weitere Unterstützung für den Markthochlauf notwendig

Mit seinen zahlreichen potenziellen Abnehmern von grünem Wasserstoff, innovativen Unternehmen und der vorhandenen Gasinfrastruktur verfügt NRW über optimale Rahmenbedingungen für den bevorstehenden Markthochlauf. Um diese Ausgangsbedingungen nutzen zu können und den Einsatz von Wasserstoff in der breiten Wirtschaft frühzeitig zu ermöglichen, sollte eine Reihe von Maßnahmen ergriffen werden:

- › **Markthochlauf am Ziel der Klimaneutralität ausrichten und passende Wettbewerbsbedingungen schaffen**
- › **Ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien vorantreiben**
- › **Technologieoffenheit gewährleisten**
- › **Politische Debatte zur Nutzung von blauem Wasserstoff als Übergangstechnologie anregen**
- › **Internationale Partnerschaften und Märkte aufbauen**
- › **Transparente Förderprogramme für Wasserstoff einrichten**
- › **Zeitnah eine verbindliche Definition von grünem Wasserstoff festlegen**
- › **Genehmigungsverfahren vereinfachen**
- › **Regulierung von Wasserstoffnetzen zügig auf den Weg bringen**
- › **Informationsaustausch stärken**

Die vorgeschlagenen Maßnahmen werden in Kapitel 5 (ab Seite 28) genauer beschrieben.



WASSERSTOFF – WESENTLICHER ENERGIETRÄGER FÜR DIE VOLLENDUNG DER ENERGIEWENDE

Die Energiewende ist in den letzten 20 Jahren zum Markenzeichen der deutschen Energiepolitik geworden. Der deutsche Begriff „Energiewende“ wird selbst im Ausland verwendet, um die Transformation des Energiesystems von konventionellen zu erneuerbaren Energieträgern zu bezeichnen. Insbesondere Photovoltaik- und Windenergie wurden in Deutschland in den letzten beiden Jahrzehnten stark ausgebaut. Um die Klimaschutzziele zu erreichen, muss die installierte Leistung in den kommenden Dekaden nochmals mehr als verdoppelt werden (Abbildung 1).¹

Die Energiewende bringt neue Herausforderungen mit sich

Mit dem Voranschreiten der Energiewende ergeben sich neue Herausforderungen. So sind die dominanten Technologien, die Photovoltaik (PV) und die Windenergie, volatil, d. h., ihre Erzeugungsleistung ist wetterabhängig. Um die Stromnetze nicht zu überlasten und stets ein ausgeglichenes Verhältnis von Angebot und Nachfrage an elektrischer Energie sicherstellen zu können, sind Flexibilität von Last und Erzeugung sowie Energiespeicher erforderlich.

Nicht alle Anwendungsfälle lassen sich problemlos auf erneuerbare Energien (EE) umstellen. Beispielsweise reichen die durch erneuerbare Wärmequellen wie Solarthermie oder Biomasse erreichbaren Temperaturniveaus nicht aus, um damit Hochtemperaturprozesse in der Industrie dekarbonisieren zu können. Ein weiteres Beispiel ist der Flug-, Schiffs- und Schwerlastverkehr. Während die Neuzulassungen elektrischer Pkw rapide steigen, wird eine EE-basierte Elektrifizierung den Anforderungen in den drei genannten Transportsektoren nicht gerecht. Insbesondere hinsichtlich der Reichweite und des Masseverhältnisses zwischen Batteriespeicher und Fahrzeug stößt die Elektrifizierung hier an ihre Grenzen. Alternative klimafreundliche Energieträger sind zwingend erforderlich.

Wasserstoff als zentraler Baustein für eine erfolgreiche Energiewende

Im Klimaschutzgesetz aus dem Dezember 2019 ist verbindlich festgeschrieben, dass die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 im Vergleich zu 1990 um mindestens 55 %² vermindert werden sollen. Langfristig verfolgt die Bundesregierung das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2050.

Dazu bedarf es eines weiterhin steigenden Anteils erneuerbarer Energien und einer zunehmenden Umstellung der Verkehrs- und Wärmesektoren auf strombasierte Technologien. Eine reine Elektrifizierung in allen Anwendungsbereichen ist jedoch volkswirtschaftlich nicht sinnvoll und technisch schwer umsetzbar.

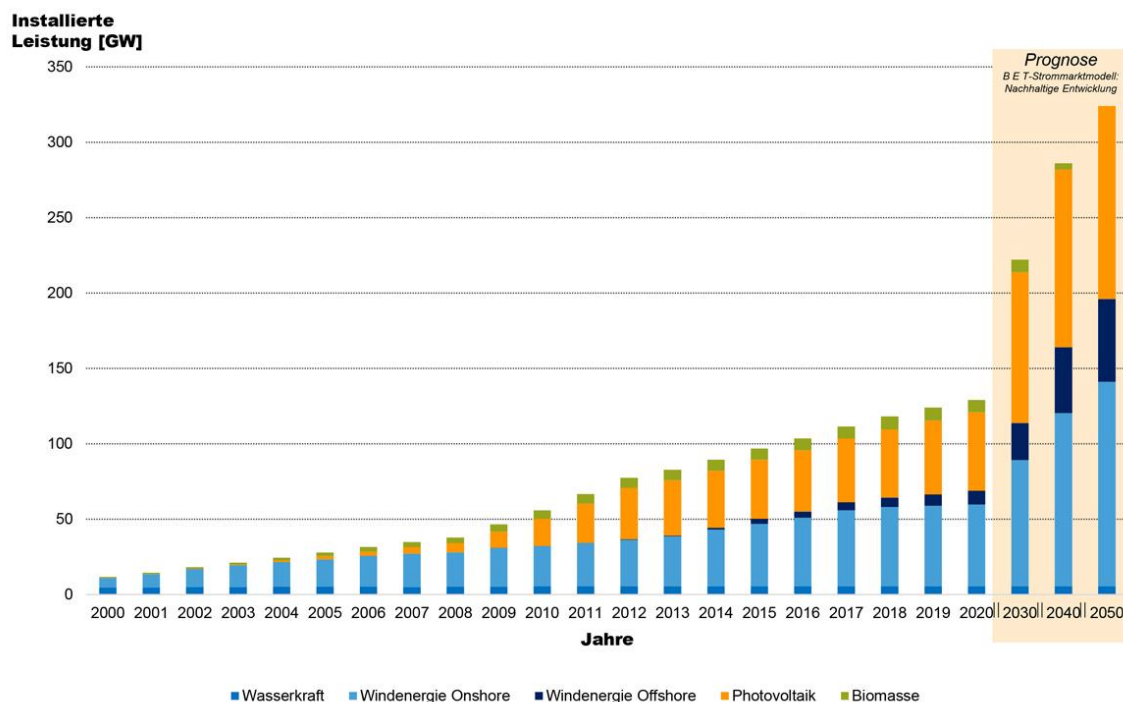


Abbildung 1: Entwicklung der installierten Leistung zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland

Wasserstoff kann zum fehlenden Puzzleteil der Energiewende werden. Aufgrund seiner chemischen Eigenschaften eignet sich Wasserstoff, um die durch den Wegfall von fossilen Energieträgern entstehenden Lücken zu schließen und ein weiteres Standbein für eine klimaneutrale Zukunft zu bilden.

Im Vergleich zu Strom lässt sich Wasserstoff auch über Wochen und Monate hinweg mit nur geringen Verlusten speichern und ermöglicht einen saisonalen Ausgleich der wetterbedingten Schwankungen von erneuerbaren Energien. Nicht (effizient) elektrifizierbare Anwendungen lassen sich mithilfe von Wasserstoff dekarbonisieren.

Schon heute kommt in vielen Bereichen Wasserstoff zum Einsatz

Bereits heute spielt Wasserstoff für verschiedene Anwendungen eine wichtige Rolle. In der 2020 erschienenen nationalen Wasserstoffstrategie wird der jährliche H₂-Verbrauch auf aktuell ca. 55 Terrawattstunden (TWh) beziffert. Historisch betrachtet sind die chemische Industrie sowie die Herstellung von Kraft- und Schmierstoffen die Hauptverbraucher von Wasserstoff. Schätzungen gehen davon aus, dass ca. 50 % des jährlichen Verbrauchs auf die Ammoniak- und Methanolherstellung in der Chemieindustrie zurückgehen, 44 % auf Raffinerieprozesse entfallen und die restliche Menge von sonstigen industriellen Abnehmern wie der Glas-, Stahl- und Lebensmittelindustrie verwendet wird.³ Bisher übersteigt dabei die stoffliche Nutzung von Wasserstoff mit über 90 % die energetische deutlich.⁴

Neben der Industrie wird Wasserstoff auch im Verkehrsbereich bereits verwendet. Insgesamt waren Anfang 2021 in Deutschland 90 öffentliche Wasserstofftankstellen in Betrieb, wobei 21 dieser Tankstellen in NRW zu finden sind. Die Wasserstoffnachfrage an den in Deutschland vorhandenen Tankstellen betrug im Jahr 2020 etwa 120 Tonnen (0,004 TWh).⁵ Bis 2023 will das Joint Venture H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG bundesweit mindestens 400 Wasserstofftankstellen aufbauen.⁶

Darüber hinaus existieren in Deutschland und NRW erste kommunale Projekte, die die Vision vom klimaneutralen Wasserstoff Wirklichkeit werden lassen wollen (Abbildung 2).⁷

Prognosen zum zukünftigen Hochlauf von Wasserstoff

Um neben den bereits bestehenden Anwendungsfeldern zukünftig weitere Segmente mit Wasserstoff versorgen zu können, sind deutlich größere Mengen an Wasserstoff notwendig.

Abbildung 3⁸ (siehe nächste Seite) zeigt eine Prognose des Hochlaufs bis 2050 und unterscheidet dabei zwischen nationaler Erzeugung und H₂-Importen. Es zeigt sich, dass aufgrund des noch erforderlichen Entwicklungsbedarfs und hoher Kosten mindestens bis 2030 mit einem moderaten Hochlauf der Wasserstoffmenge zu rechnen ist.

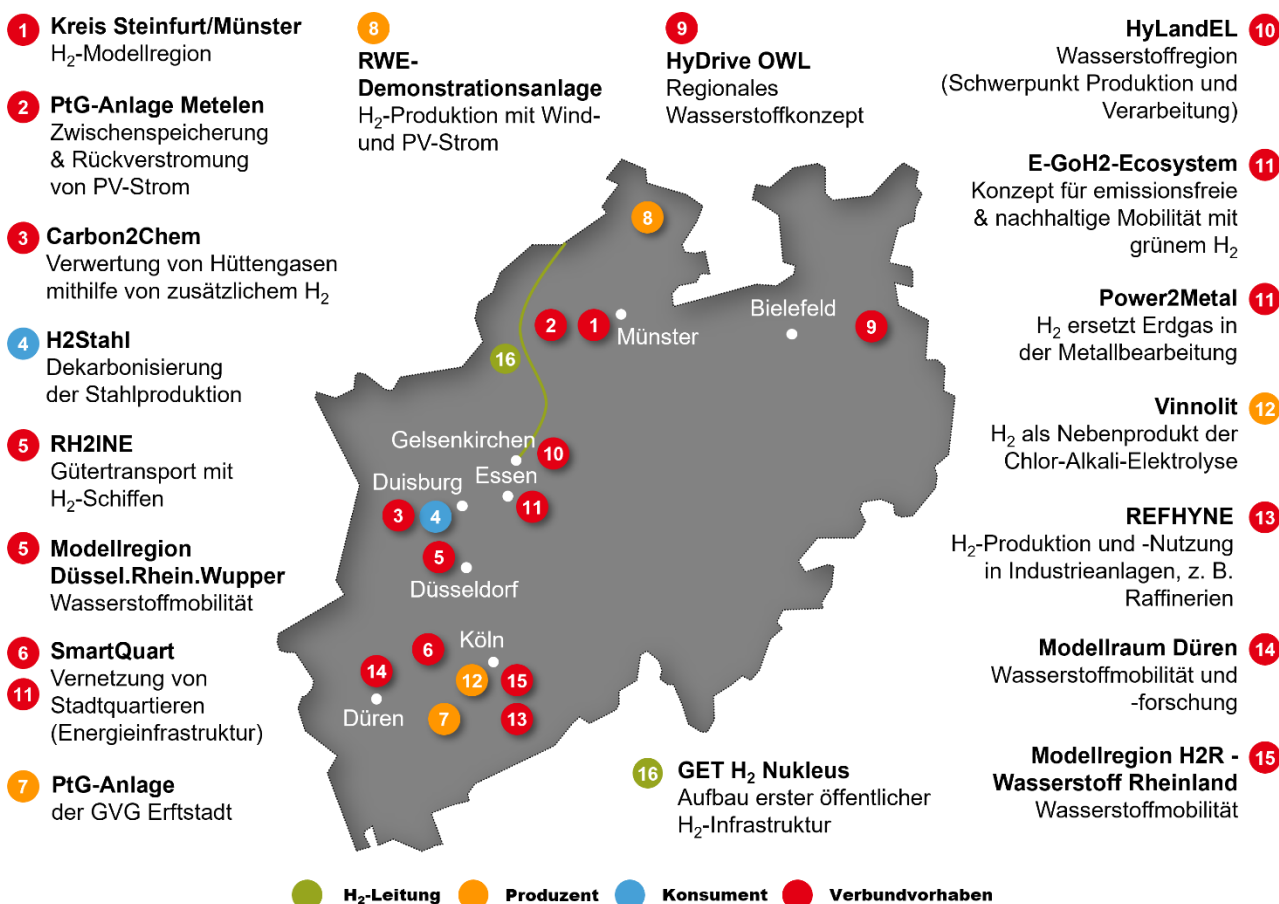


Abbildung 2: Auswahl aktueller Wasserstoffprojekte in NRW

Zwischen den Jahren 2040 und 2050 kommt es zu einer enormen Steigerung des Verbrauchs und damit der Importe. Auffällig ist hierbei, dass Szenarien, in denen lediglich eine 80-prozentige Reduktion der Treibhausgasemissionen erreicht wird, mit signifikant weniger Wasserstoff auskommen als Szenarien mit 95-prozentigem Reduktionsziel. Zudem wird deutlich, dass Deutschland wie im Bereich fossiler Energieträger auch zukünftig eine H₂-Importnation sein wird. Dennoch muss zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele auch das heimische Produktionspotenzial maximal ausgeschöpft werden. Neben wirtschaftlichen und regulatorischen Kriterien ist hier die Akzeptanz der Bevölkerung für den benötigten, weiteren Ausbau von EE-Anlagen ein wichtiger Erfolgsfaktor.

Ein politisches Instrument zur Umsetzung der klimapolitischen Ziele und ein Treiber für den Einsatz grünen Wasserstoffs ist der CO₂-Preis. Die Kosten für fossile Energieträger wie Kohle, Öl oder Erdgas werden dadurch in den nächsten Jahren im Vergleich zu klimafreundlichen Energieformen steigen. Ende 2020 lag der Preis für eine Tonne Kohlenstoffdioxid innerhalb des Europäischen Emissionshandelssystems bei über 30 Euro. Dieser gilt vor allem für weite Teile der Energiewirtschaft und energieintensive Industriebranchen. Der neue eingeführte deutsche CO₂-Preis auf fossile Brennstoffe betrifft den bisher nicht im europäischen Emissionshandel eingeschlossenen CO₂-Ausstoß, beispielsweise in den Sektoren Gebäude und Verkehr.

Der CO₂-Preis ist für 2021 mit 25 Euro pro Tonne vorgegeben und soll schrittweise steigen. Um eine Lenkungswirkung zu entfalten, müsste für eine 95%ige Reduktion der Treibhausgasemissionen der CO₂-Preis bis 2050 auf über 140 Euro steigen.⁹

Politische Rückendeckung für den Hochlauf des Wasserstoffs

In der Politik ist der Handlungsbedarf zur Unterstützung des Hochlaufs der Wasserstoffwirtschaft erkannt und im Jahr 2020 eine Reihe von Strategien veröffentlicht worden.

Die deutsche Bundesregierung hat am 10. Juni 2020 ihre Wasserstoffstrategie vorgestellt. Darin beziffert die Regierung den im Jahr 2030 existierenden stofflichen und energetischen H₂-Bedarf auf insgesamt 90 bis 110 TWh. In den nächsten zehn Jahren sollen in Deutschland 5 GW Elektrolysekapazität aufgebaut werden. Allein zur Versorgung dieser Elektrolyseure sind ca. 18 TWh EE-Strom erforderlich, was etwa der Jahresproduktion von 3.000 Windenergieanlagen an Land entspricht. Dies unterstreicht die Herausforderungen, vor denen Politik und Wirtschaft stehen, um die Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie umzusetzen.

Zur Finanzierung des Markthochlaufs stellt die Bundesregierung 7 Milliarden Euro zur Verfügung. Darüber hinaus sind 2 Milliarden Euro für den Aufbau internationaler Wasserstoffpartnerschaften vorgesehen.

Die Bundesregierung hat mit der in der Novelle des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) 2021 festgelegten Befreiung der Produktion von grünem Wasserstoff von der EEG-Umlage bereits eine wichtige Grundlage für die Erzeugung von Wasserstoff geschaffen.¹⁰

Auch andere europäische Länder verabschiedeten Wasserstoffprogramme mit hohen Investitionsbeträgen. Dazu gehören zum Beispiel Spanien (8,9 Milliarden Euro), Frankreich (7,2 Milliarden Euro), Italien (4,0 Milliarden Euro), Österreich (2,0 Milliarden Euro) und Portugal (1 Milliarde Euro).¹¹

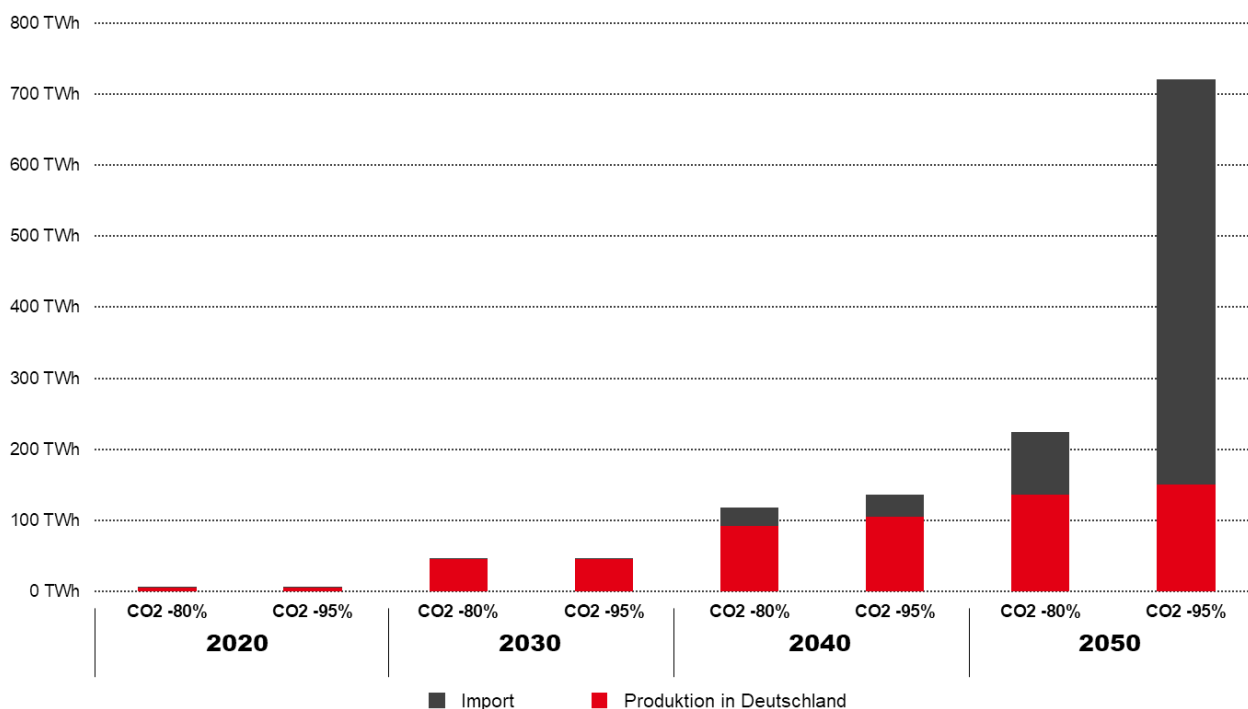


Abbildung 3: Import und Eigenproduktion von Wasserstoff (nur für energetische Nutzung)

Die Europäische Union hat das Potenzial von Wasserstoff ebenfalls erkannt und am 8. Juli 2020 eine europäische Wasserstoffstrategie verabschiedet. Dabei sind die Ziele der Strategie in mehrere Schritte aufgeteilt. In den Jahren 2020 bis 2024 sollen Elektrolyseure mit einer Gesamtleistung von mindestens 6 GW errichtet und bis 2030 auf 40 GW erweitert werden. Von 2030 bis 2050 sollen die Technologien für erneuerbaren Wasserstoff ausgereift sein und in großem Maßstab in allen Sektoren, in denen die Dekarbonisierung mit EE allein schwierig ist, eingesetzt werden. Man geht von einer resultierenden Gesamtinvestition in der erneuerbaren Wasserstoffwirtschaft von bis zu 470 Milliarden Euro bis 2050 aus.¹²

Auch mehrere Bundesländer haben Wasserstoffstrategien verabschiedet, darunter die Wasserstoff-Roadmap NRW, die die Landesregierung Anfang November 2020 veröffentlichte. Darin werden Ziele für die Jahre 2025 und 2030 definiert. Der Schwerpunkt liegt auf den Sektoren Industrie, Mobilität und Energieinfrastruktur:

- › **Die Stahlindustrie liegt in NRW besonders im Fokus. Bis zum Jahr 2025 soll die erste großtechnische Direktreduktionsanlage zur Erzeugung von Stahl auf Basis von Wasserstoff entstehen.**
- › **Bis 2025 sollen mindestens 400 und bis 2030 11.000 Brennstoffzellen-Lkw in NRW unterwegs sein.**
- › **Die Elektrolysekapazität will die Landesregierung bis zum Jahr 2030 auf 1 bis 3 GW steigern.**
- › **Insgesamt ergibt sich für NRW gemäß der Roadmap über alle Sektoren ein Wasserstoffbedarf von 104 TWh im Jahr 2050.¹³**

In den folgenden Kapiteln werden die Wertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft beschrieben, Tätigkeitsfelder für Unternehmen in NRW sowie Anwendungsfälle für Wasserstoff vorgestellt und notwendige Maßnahmen zur weiteren Unterstützung des Markthochlaufs abgeleitet.



WERTSCHÖPFUNG IN DER WASSERSTOFF-WIRTSCHAFT

Der englische Physiker und Chemiker Henry Cavendish entdeckte Wasserstoff im Jahr 1766 bei Experimenten mit Metallen und Säuren. Im Folgenden wurde das Element in der Ballonfahrt, in Fahrzeugen sowie Flugzeugen eingesetzt. Stadtgas, das aus 51 % Wasserstoff bestand, wurde ab Mitte des 19. Jahrhunderts u. a. zur Beleuchtung und zur Wassererwärmung genutzt. Im Laufe des 20. Jahrhunderts ersetzte Erdgas das zumeist aus Kohle hergestellte Stadtgas.

Die weitere Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland ist von der Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffnutzung abhängig. Die Wirtschaftlichkeit von grünem Wasserstoff hängt einerseits von Faktoren wie der Entwicklung der H₂-Elektrolyseur- und Transporttechnologien sowie dem Ausbau erneuerbarer Energien und dem Strompreis ab. Andererseits spielen die Preise konkurrierender fossiler Brennstoffe inklusive des CO₂-Preises eine Rolle.

Der politisch forcierte Markthochlauf von (grünem) Wasserstoff soll die Kostendegression der Technologien vorantreiben. Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zukünftiger Geschäftsmodelle müssen die einzelnen Wertschöpfungsstufen berücksichtigt werden (Abbildung 4).

Erzeugung und Aufbereitung

NRW weist aufgrund der bestehenden (Chemie-)Industrie bereits heute einen hohen Wasserstoffverbrauch zur stofflichen Nutzung auf. Bisher wird der Bedarf der Industrie in NRW vor allem lokal durch Wasserstoff aus Erdgas gedeckt. Deutschlandweit sind Rohöl und Erdgas bisher die wichtigsten Quellen zur Erzeugung von Wasserstoff (Abbildung 5). Dabei ist der hohe Anteil von Rohöl auf die Raffinerieindustrie zurückzuführen, die den erzeugten Wasserstoff innerhalb des Raffinerieprozesses vollständig stofflich weiterverwendet.¹⁴

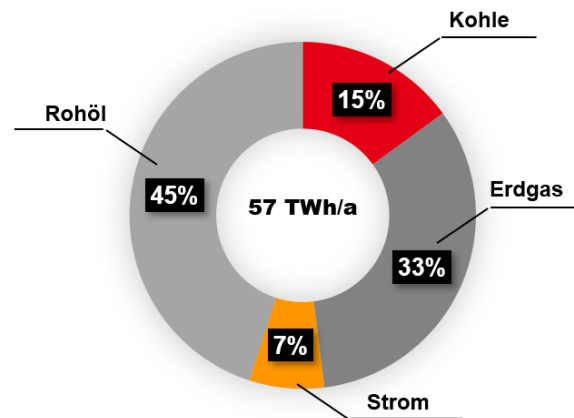


Abbildung 5: Anteile der Energieträger zur Wasserstofferzeugung in Deutschland (stoffliche und energetische Nutzung)¹⁵

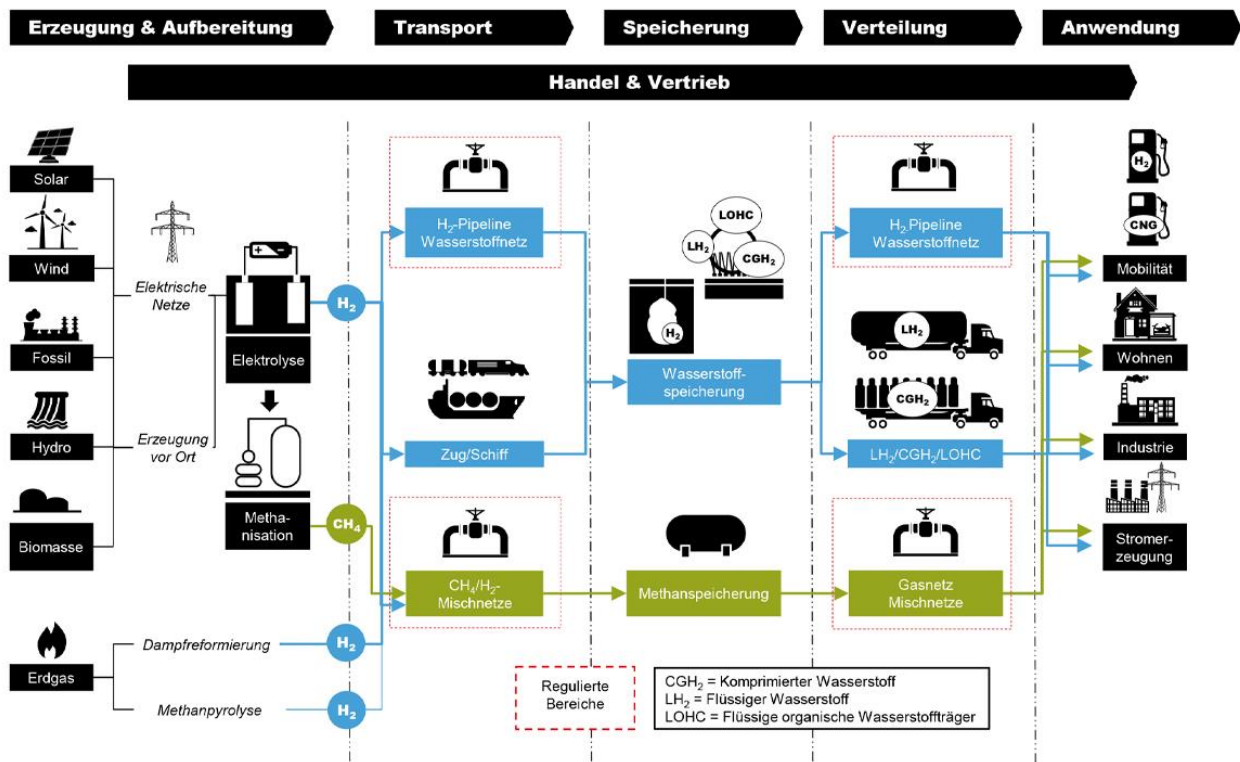


Abbildung 4: Wertschöpfungskette der Wasserwirtschaft

Für die Erzeugung von Wasserstoff können verschiedene Technologien und Verfahren zur Anwendung kommen, die jeweils farblich codiert sind (Abbildung 6).¹⁶

Grauer Wasserstoff wird zumeist unter Hitze aus Erdgas (Dampfreformierung) oder Kohle (Vergasung) gewonnen. Bei der Herstellung entweicht das im Erdgas und in der Kohle enthaltene CO₂ in die Atmosphäre.

Eine höhere Klimafreundlichkeit des gleichen Verfahrens kann durch Abscheidung und Speicherung (CCS, Carbon Capture and Storage) oder Nutzung (CCU, Carbon Capture and Utilization) des Treibhausgases erreicht werden. Dem so hergestellten Wasserstoff wird die Farbe "blau" zugeordnet. Problematisch ist dabei, dass eine dauerhafte Speicherung des CO₂ sichergestellt werden muss. Die Speicherung von Kohlenstoffdioxid ist in Deutschland derzeit de facto durch das Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid ausgeschlossen, sodass bis zu einer Änderung dieses Gesetzes blauer Wasserstoff in Deutschland lediglich als Importgut in Frage kommt.

Bei der Herstellung von türkischem Wasserstoff entsteht statt gasförmigem CO₂ fester Kohlenstoff, da das Methan aus dem Erdgas thermisch gespalten wird. Der feste Kohlenstoff kann entweder ohne die Gefahr von Leckagen gelagert oder als Rohstoff in der Industrie verwendet werden.

Für grünen Wasserstoff werden reines Wasser und Strom aus erneuerbaren Energien genutzt. Neben dem Wasserstoff entsteht Sauerstoff, der entweder in die Atmosphäre entlassen oder anderweitig genutzt werden kann (z. B. für Verbrennungs-, Oxidations- und Heizprozesse in der Industrie). Zukünftig könnte die Wasserstoffherzeugung auch ein Geschäftsmodell für EEG-Anlagen werden, die nach 20 Jahren aus der EEG-Förderung ausscheiden. Dies betrifft in NRW bis einschließlich 2025 Wind- und PV-Anlagen mit einer Leistung von über 2.000 MW.¹⁷ Damit könnten jährlich knapp 3 TWh Wasserstoff erzeugt werden. Im Jahr 2050 rechnet die

Landesregierung mit einer Wasserstoffproduktion von 18 TWh.¹⁸

Momentan ist die Elektrolyse mit grünem Strom noch die teuerste Art der H₂-Produktion. Bei steigenden CO₂-Preisen, weiter sinkenden Kosten für grünen Strom und der zu erwartenden Kostendegression bei Elektrolyseuren ist jedoch davon auszugehen, dass 2050 grüner Wasserstoff etwa genauso teuer oder günstiger als grauer und blauer Wasserstoff sein wird.¹⁹ Zukünftige Kosten für türkisen Wasserstoff sind noch ungewiss, da sich diese Technologie noch in der Entwicklungsphase befindet. Forscher gehen davon aus, dass türkiser Wasserstoff halb so teuer werden könnte wie grüner Wasserstoff.²⁰

Neben den oben genannten existieren weitere Erzeugungsarten: Die Chloralkali-Elektrolyse wird in der Chemieindustrie zur Herstellung von Chlor aus einer Salzlösung verwendet. Als Nebenprodukte entstehen Natron- oder Kalilauge sowie Wasserstoff. Eine noch in der Entwicklung befindliche Technologie ist die Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse.²¹

Transport und Verteilung

Bei der Erzeugung von grünem Wasserstoff sind der Ort der Stromerzeugung und der Ort des Wasserstoffverbrauchs oft nicht derselbe. In Deutschland liegen EE-Kapazitäten eher im windreichen Norden, während Deutschlands Industrie- und Bevölkerungsschwerpunkte tendenziell im Westen und Süden zu verorten sind. Der Wasserstoff kann entweder am Ort der Stromerzeugung produziert und dann zu den Verbrauchern befördert werden oder der Strom wird über vorhandene Leitungen zu den Abnehmern transportiert der Wasserstoff vor Ort erzeugt.

Die wirtschaftlichste Transportvariante für Wasserstoff hängt von Faktoren wie der Transportstrecke, -menge und der Verwendungsform am Verbrauchsort ab. Im Vergleich zum Stromtransport ist der Energietransport in Gaspipelines kosteneffizienter und die transportierbaren



Abbildung 6: Wasserstoff-Farbpalette

Energiemengen sind höher. Auch wirkt das Pipelinenetz für das darin vorhandene Gas als Speicher. Im Gegensatz zum Stromnetz sind Erzeugung und Verbrauch für das Gasnetz daher weniger zeitkritisch.

Soll der Wasserstoff transportiert und verteilt werden, muss dies aufgrund seiner geringen Dichte komprimiert gasförmig, auf -253 °C gekühlt flüssig oder in Trägermaterialien gebunden erfolgen. Bei letzterer Option sind flüssige und feste Wasserstoffträger möglich. Als feste Wasserstoffträger werden Metallhydridspeicher u. a. in U-Booten eingesetzt. Als flüssiges Trägermaterial fungieren z. B. Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) wie Dibenzyltoluol, die sich in einer chemischen Reaktion mit Wasserstoff verbinden. Vor der Nutzung des Wasserstoffs muss dieser wieder aus dem Trägermaterial herausgetrennt werden (Dehydrierung, z. B. durch Erhitzen). Eine (energetisch) unaufwändige Dehydrierung ist neben anderen Eigenschaften entscheidend für die Nutzung eines Stoffes als Trägermaterial. Für den komprimiert gasförmigen oder gekühlt flüssigen Transport müssen die Kosten und der Energiebedarf der Erzeugung und Aufrechterhaltung der Zustände bis zur Weiterverwendung berücksichtigt werden.

Der Transport des erzeugten Wasserstoffs kann sowohl durch Pipelines als auch mithilfe von Lkw, Zügen und Schiffen erfolgen. Während der Transport durch Lkw bereits erprobt und hauptsächlich für geringe Transportmengen und kurze Distanzen geeignet ist, wurden mit Zug- und Schiffstransporten bisher wenige Erfahrungen gesammelt. Für den Zugtransport ist die Nutzung der für den Lkw-Transport verwendeten Behälter denkbar, wenn auch bisher nicht zugelassen.²² Das erste Tankerschiff für Flüssigwasserstoff namens "Suiso Frontier" wird durch die Firma Kawasaki Heavy Industries Ltd. gebaut und befindet sich aktuell in der Fertigstellung. Japan plant, damit Wasserstoff aus Australien zu importieren. 2021 soll die Strecke das erste Mal mit Wasserstoff beladen zurückgelegt werden.²³

Für den Transport von großen Mengen über längere Strecken an Land erscheint aus heutiger Sicht die Nutzung von Rohrleitungen als wirtschaftlichste Variante. Möglich ist sowohl ein Neubau von Wasserstoffpipelines als auch eine Umwidmung vorhandener Erdgasinfrastruktur, die bereits in einzelnen Projekten erprobt wird. Schätzungen gehen davon aus, dass die Umwidmung vorhandener Erdgasleitungen etwa 10 bis 25 % der Neubaukosten für Wasserstoffpipelines verursachen würden. Nötig ist beispielsweise eine Untersuchung der Leitungen auf Risse und ein Austausch von Teilen der Ventile. PE-Leitungen, deren wachsender Anteil im Verteilernetz bereits dominiert²⁴, können ohne Einschränkungen für Wasserstoff genutzt werden. Auch wird davon ausgegangen, dass eine Umnutzung von Stahlleitungen grundsätzlich möglich ist. Allerdings müssen Vorkehrungen getroffen werden, wie der Einsatz eines geringeren Druckes, zusätzlicher Innenbeschichtung oder moderner Wartungstechnik zur Risserkennung.²⁵ Des Weiteren ist eine Zumischung von Wasserstoff in das Erdgasnetz möglich. Allerdings würden voraussichtlich an unterschiedlichen Stellen im Gasnetz verschieden große

Mengen Erdgas und Wasserstoff eingespeist, wodurch die Wasserstoffkonzentration bzw. das Mischungsverhältnis ortsabhängig variiert. Hierdurch ergeben sich Herausforderungen durch die daraus bedingte Schwankung der Zusammensetzung und des Brennwertes des Gases, was sich auf die Energieausbeute und die Messung der erbrachten Leistung auswirkt.

Zudem ist die Zumischung in ihrer Höhe heute sowohl technisch als auch regulatorisch begrenzt. So sind viele Erdgasturbinen nur für Wasserstoffanteile von ein bis fünf Prozent geeignet. Das Regelwerk des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW) erlaubt bisher höchstens zehn Volumenprozent Wasserstoff im Gasnetz.²⁶ Vor der Nutzung des Gases kann außerdem je nach Anwendung eine Entmischung notwendig werden, um die benötigte Reinheit von Erdgas oder Wasserstoff zu garantieren. Eine Wasserstoffkonzentration über zwei Volumenprozent kann z. B. zu einer Versprödung der Stahltanks von Erdgasfahrzeugen führen.²⁷

Zur Deckung des deutschen Wasserstoffbedarfs werden in Zukunft Importe notwendig. Grund ist das nicht ausreichende Platzangebot für erneuerbare Energien in Deutschland. Innerhalb Europas kommen Staaten als Lieferländer in Frage, die aufgrund hoher Wind- oder Solarenergieleistung grünen Strom oder Wasserstoff an Deutschland liefern könnten. Unterschiedliche Untersuchungen nennen Irland, Norwegen, das Vereinigte Königreich, Island, Spanien, Italien, Frankreich und Griechenland als mögliche Exporteure.²⁸ Darüber hinaus strebt die Bundesregierung Importe aus außereuropäischen Ländern an. Beispielsweise könnten sonnenreiche nordafrikanische Länder wie Marokko Wasserstoff aus Solarenergie herstellen, der dann per Pipeline oder Schiff nach Deutschland transportiert wird.

Auch heutige Erdgasproduzenten wie Norwegen und Russland könnten zur blauen und türkisen Wasserstoffproduktion beitragen. Für NRW interessant sind bezüglich zukünftiger Importe die bereits vorhandenen Transportleitungen für Erdgas zu den Niederlanden, die im März 2020 eine ambitionierte Wasserstoffstrategie beschlossen haben. Mit dem Ende der Erdgasförderung in den Niederlanden könnten vorhandene Leitungen umgewidmet werden.

In NRW selbst ist bereits heute ein industriell betriebenes, reines Wasserstoffnetz vorhanden. Dieses verbindet Wasserstoffproduktionsstätten mit Industriekunden mit einer Länge von 240 km zwischen Castrop-Rauxel und Leverkusen.²⁹ Die 16 Fernleitungsnetzbetreiber Deutschlands stellten 2020 zudem das sogenannte H₂-Startnetz für 2030 vor, ein Wasserstoffnetz mit einer Länge von 1.200 km, wovon 1.100 km durch Umwidmung von Erdgasleitungen gedeckt werden sollen. Auf NRW entfallen 240 km, davon sollen 190 km durch Umwidmung von Erdgaspipelines verwirklicht werden.³⁰

Speicherung

Die Speicherung von Wasserstoff kann erforderlich werden, wenn Erzeugung bzw. Anlieferung und Verbrauch zeitlich auseinanderfallen. Zur Nutzung des Wasserstoffs als Speichermedium für EE-Strom ist eine (saisonale) Speicherung des erzeugten Wasserstoffs bis zur Rückverstromung notwendig. Für die Speicherung von Wasserstoff können die auch zum Transport genutzten Behältertechnologien verwendet werden, d. h. Druck- und Flüssiggasspeicherbehälter bzw. eine Speicherung mithilfe von Trägermaterialien. Für die gasförmige Lagerung großer Wasserstoffmengen sind voraussichtlich unterirdische Kavernenspeicher geeignet, die heute zur Erdgasspeicherung genutzt werden. Dabei sind in NRW 39 TWh von 270 TWh deutschen Erdgasspeicherkapazitäten (Poren- und Kavernenspeicher) vorhanden. Der allergrößte Teil der 39 TWh in NRW befindet sich im Kavernenspeicher im Raum Gronau/Epe.³¹

Wasserstoff hat eine sehr geringe Moleküldichte, wodurch es durch viele Materialien hindurchdiffundiert. Zudem kann Wasserstoff Metalle verspröden, indem es sich in deren Gitterstruktur einlagert. Dies muss bei der Auswahl geeigneter Materialien für Speicher berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist die volumetrische Energiedichte verhältnismäßig gering. Bei mobilen Speichern besteht die Gefahr, den Vorteil der hohen gewichtsspezifischen Energiedichte des Wasserstoffs durch das Gewicht des Speichers zu verspielen.

Die Kompression des Wasserstoffs kostet etwa 10 % des Energiegehalts des Wasserstoffs, die Verflüssigung unter Kühlung 30 %, was die Wirtschaftlichkeit beeinflusst.³² Erwärmt sich der verflüssigte Wasserstoff im Speicherbehälter und verdampft, muss Wasserstoff abgelassen werden, um den Druck konstant zu halten, was zu Speicherverlusten führt. Der Einsatz von Trägermaterialien soll diesen Nachteilen begegnen. Problematisch sind bei vielen Trägermaterialien heute der Energieaufwand bei der Dehydrierung und das hohe Gewicht der Stoffe selbst im Vergleich zur darin speicherbaren Wasserstoffmenge. Bisher werden daher vor allem Kompression und Verflüssigung kommerziell eingesetzt.

Anwendung

Bei der Anwendung von Wasserstoff kann zwischen energetischer und nicht-energetischer bzw. stofflicher Nutzung unterschieden werden. Für die energetische Nutzung in NRW schätzt das Forschungszentrum Jülich im Rahmen einer Begleitstudie zur Wasserstoff-Roadmap NRW einen Bedarf von 104 TWh im Jahr 2050. Davon entfallen 42 TWh auf den Industriesektor, 33 TWh auf den Verkehr und 26 TWh auf Rückverstromung. Der Verband der Chemischen Industrie geht für Deutschland von einem stofflichen Verbrauch von 227 TWh pro Jahr im Jahr 2050 aus, wovon etwa 30 % NRW zugerechnet werden. Damit ergibt sich für NRW im Jahr 2050 insgesamt ein prognostizierter Verbrauch von 172 TWh.

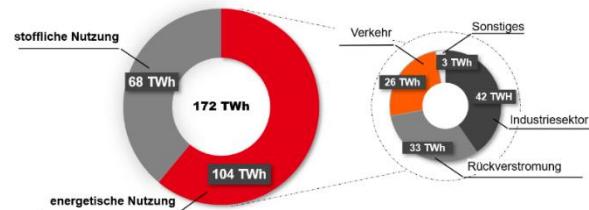


Abbildung 7: Wasserstoffverbrauch 2050 in NRW³³

Wasserstoff wird bereits heute in der Industrie eingesetzt. Heute liegt der Gesamtwasserstoffverbrauch in Deutschland je nach Quelle bei 55 bzw. 57 TWh pro Jahr, der vor allem durch die Grundstoff- und Petrochemie entsteht. 30 % davon entfallen auf NRW. Der heute eingesetzte graue Wasserstoff kann zukünftig durch grünen Wasserstoff ersetzt werden. Bis 2050 könnte grüner Wasserstoff abhängig von Elektrolyseur- und CO₂-Preisen günstiger werden als grauer Wasserstoff.³⁴

Weitere Potenziale für den Einsatz von Wasserstoff sind in der Stahl- und Zementindustrie sowie der Glas- und Kunststoffherstellung vorhanden. Das Gas kann in diesen Bereichen sowohl stofflich als auch energetisch zur Erzeugung von Prozesswärme genutzt werden. Lange Investitionszyklen führen bereits vor dem Zeitpunkt der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von grünem Wasserstoff zu Handlungsbedarf, um eine Dekarbonisierung der Industrie bis 2050 erreichen zu können. Dabei könnte zunächst auch (importierter) blauer oder türkiser Wasserstoff genutzt werden. Später würde auf grünen Wasserstoff umgestellt oder zumindest durch diesen ergänzt werden, sobald dieser in ausreichenden Mengen vorhanden ist und dessen Kosten gesunken sind. Durch einen frühen Einsatz von Wasserstofftechnologien ergeben sich für deutsche Unternehmen zudem Know-how-Vorteile und Exportpotenziale für Wasserstofftechnologien.

Eine Nutzung von Wasserstoff im Verkehrssektor ist vor allem für den Lastenverkehr und schwere Nutzfahrzeuge wahrscheinlich. Im Pkw-Bereich erscheint aus heutiger Sicht der flächendeckende Einsatz von Wasserstoff aufgrund des im Vergleich zu Batteriefahrzeugen geringen Wirkungsgrads von etwa 25 % (von elektrischer Energie zum Antrieb des Fahrzeugs)³⁵ volkswirtschaftlich ineffizient. 2020 waren nur drei der 21 Wasserstofftankstellen in NRW auch für die Betankung von Lkw ausgelegt.³⁶

Handel

Bisher wird Wasserstoff vor allem lokal produziert und verbraucht. Daher ist ein Wasserstoffhandel heute nur räumlich begrenzt vorhanden. So dient die Rhein-Ruhr-Pipeline der Versorgung der angeschlossenen Unternehmen in der Region. In der Nationalen Wasserstoffstrategie wird ein Fokus auf Handelsbeziehungen mit geeigneten Partnerländern gelegt. Ein System zur Festlegung von international einheitlichen Standards und Zertifizierung von grünem und klimafreundlichem Wasserstoff wird auf europäischer Ebene im Rahmen des Projektes CertifHy entwickelt.



TÄTIGKEITSFELDER UND ANWENDUNGS- FÄLLE FÜR UNTERNEH- MEN IN NRW

Wasserstoff lässt sich technisch in zahlreichen Anwendungsfällen in der Industrie, dem Verkehrssektor, dem Gebäudebereich und der Energiewirtschaft einsetzen. Aufgrund der in der ersten Phase des Markthochlaufs noch vergleichsweise hohen Kosten grünen Wasserstoffs und der beschränkten Verfügbarkeit wird das Gas jedoch auch als der „Champagner unter den Energieträgern“³⁷ bezeichnet, mit dem v. a. Anwendungen dekarbonisiert werden sollten, für die andere EE-Lösungen technisch nicht geeignet sind.

Insbesondere im Verkehr und in der Industrie ist laut verschiedenen Studien mit einem hohen Einsatz von Wasserstoff in Deutschland zu rechnen (Abbildung 8).³⁸ Neben dem heimischen Markt bieten zukünftig auch internationale Kunden signifikante Absatzchancen für Unternehmen aus NRW. Bis 2050 könnte die weltweite Wasserstoffnachfrage pro Jahr bei förderlichen politischen Rahmenbedingungen auf 27.500 TWh Wasserstoff und damit knapp um den Faktor 13 steigen. Dies würde bis 2050 weltweit Investitionen in Höhe von über 9 Billionen Euro und in NRW

von über 80 Milliarden Euro in Wasserstoffinfrastruktur erfordern.³⁹

Um dieses Potenzial für einheimische Unternehmen nutzbar zu machen, ist jedoch ein ambitionierter Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in NRW erforderlich, um Unternehmen die Entwicklung und Erprobung innovativer Technologien und Dienstleistungen zu ermöglichen und einen technologischen Vorsprung im internationalen Wettbewerb zu erlangen.

Zur Verdeutlichung des bestehenden Potenzials für Unternehmen aus NRW wurden drei Tätigkeitsfelder und sieben Anwendungsfälle in der Wasserstoffwirtschaft ausgewählt und beleuchtet. Während die Tätigkeitsfelder Chancen für Hersteller und Zulieferer von Materialien und Komponenten entlang der Wertschöpfungskette adressieren, beschreiben die Anwendungsfälle Möglichkeiten der Wasserstoffnutzung in den Sektoren Industrie, Verkehr, Gebäude und Energieerzeugung.

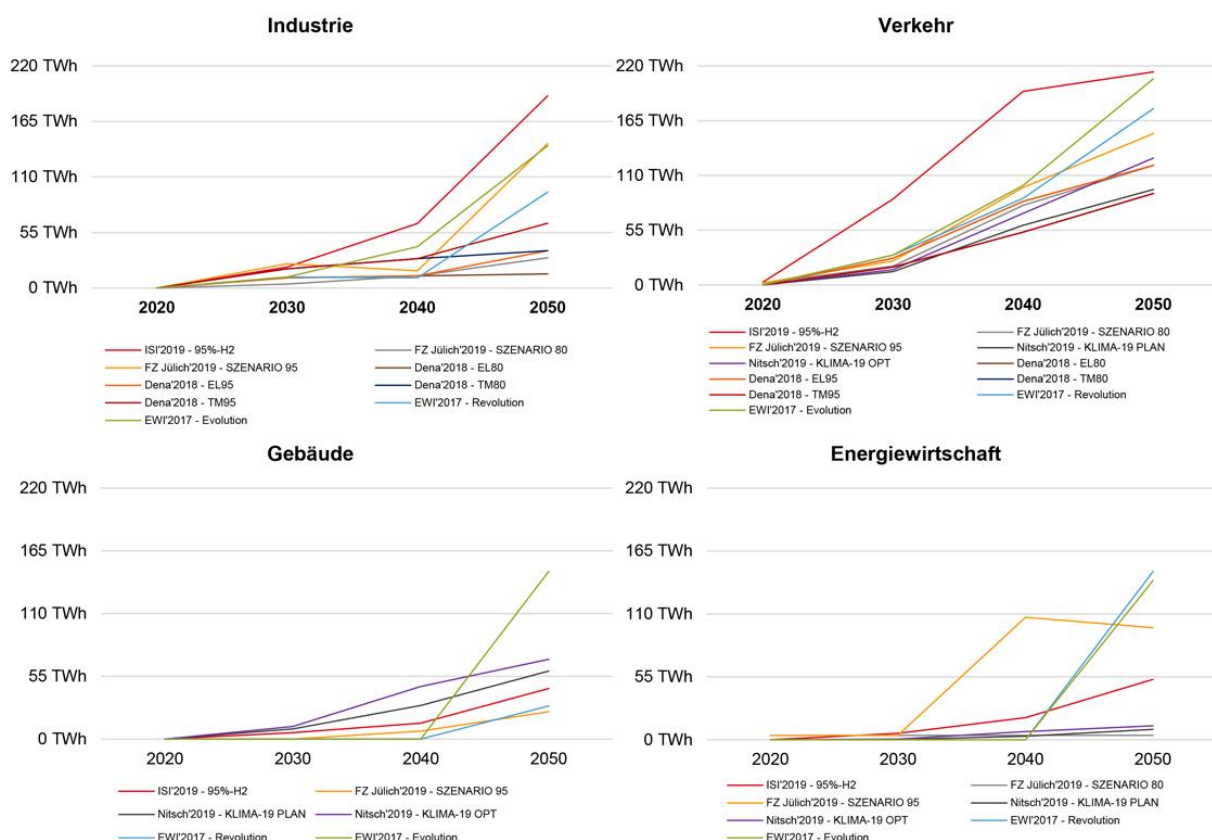


Abbildung 8: Szenarien des Wasserstoffbedarfs in Deutschland nach Sektoren

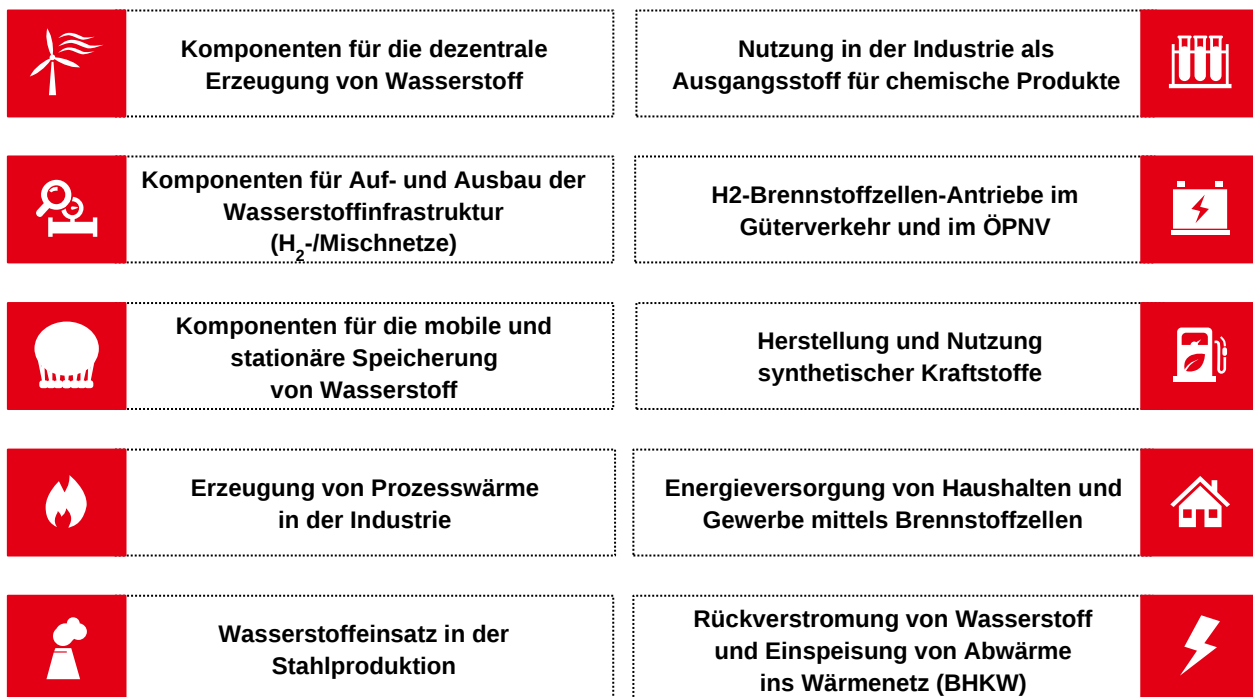


Abbildung 9: Ausgewählte Tätigkeitsfelder und Anwendungsfälle im Bereich der Wasserstoff-Wertschöpfungskette

Auf den folgenden Seiten sind

- › **die technische Aufgabenstellung,**
- › **Erfahrungen in NRW,**
- › **Potenziale in NRW und**
- › **die regulatorischen Rahmenbedingungen**

für die Tätigkeitsfelder und Anwendungsfälle in Form von Steckbriefen dargestellt.

Über die verschiedenen Anwendungsfelder hinweg ergeben sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette Potenziale für bestehende und zukünftige Hersteller von Komponenten für den Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur. In verschiedenen Anwendungsgebieten benötigte Komponenten sind beispielsweise Turbinen zur Stromerzeugung, Brenner u. a. zur Wärmeerzeugung, diverse Materialien und Komponenten zum Bau von Brennstoffzellen und Wasserstoffsensoren, u. a. für Mobilitätsanwendungen.

STECKBRIEF 01:

Komponenten für die

dezentrale Erzeugung

von Wasserstoff

Mithilfe der Elektrolyse kann (grüner) Wasserstoff zentral in großen Anlagen und verbrauchernah, also dezentral, erzeugt werden. Bei der Wasserelektrolyse wird Wasser unter Einsatz von Strom in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt.⁴⁰ Notwendige Voraussetzungen zur erfolgreichen Elektrolyse sind ein ausreichend dimensionierter Elektrolyseur sowie Strom aus erneuerbaren Energien und Wasser.

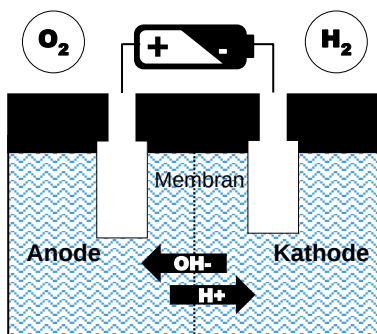


Abbildung 10: Exemplarische PEM-Elektrolysezelle

Technische Aufgabenstellung

- › Bei der Elektrolyse wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Dies geschieht in einer Elektrolysezelle, die aus einem Gehäuse mit zwei angeschlossenen Gasabscheidern, zwei Elektroden (Anode und Kathode) sowie einer dazwischen eingebrachten gasdichten, aber wasserdurchlässigen Membran (Diaphragma) (z. B. aus Asbest/Polytetrafluorethylen-Teflon) besteht.
- › In dem Gehäuse befindet sich ein Elektrolyt (z. B. Kalilauge). Bei Anlegen einer äußeren Gleichspannung zwischen Kathode und Anode (bestehend aus z. B. Platin/Nickel) fließt ein elektrischer Strom, der an der Kathode für die Wasserstoff- und an der Anode für die Sauerstoffentwicklung sorgt.⁴⁰
- › Es wird hauptsächlich zwischen drei Verfahren der Elektrolyse unterschieden: Die klassische alkalische Elektrolyse nutzt als Elektrolyt üblicherweise eine alkalische Flüssigkeit. Die Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) Elektrolyse beruht auf dem Ladungstransport von Protonen, wofür der Elektrolyt aus einer ionenleitfähigen Polymermembran besteht. In der Hochtemperatur-Elektrolyse wird der Transport von Oxidionen genutzt, wobei für den Elektrolyten Yttrium-stabilisiertes Zirkoniumoxid (YSZ) verwendet wird.⁴¹

Erfahrungen in NRW

- › Im Kreis Steinfurt wird daran gearbeitet, bis zum Jahr 2025 an mehreren Standorten ca. 65 GWh Wasserstoff pro Jahr produzieren zu können. Diese Menge soll bis zum Jahr 2030 auf ca. 192 GWh pro Jahr gesteigert werden. Der so produzierte Wasserstoff soll regional im Verkehrssektor verbraucht werden und so die CO₂-Emissionen senken.⁴² Der Strom zum Betrieb der Elektrolyseure in diesem Projekt soll aus Post-EEG-Anlagen stammen.

Potenzial in NRW

- › Ein in der deutschen Wasserstoffstrategie verankertes Ziel lautet, bis zum Jahr 2030 eine Elektrolysekapazität von 5 GW zu errichten. In der Wasserstoff-Roadmap NRW wird diesbezüglich ein Zielkorridor von 1 bis 3 GW definiert.⁴³
- › In Deutschland würde dies zu einer Wasserstoffproduktion von 14 TWh und in NRW von 2,8 bis 8,4 TWh pro Jahr führen.⁴⁴
- › Besonderes Potenzial bietet sich neben Herstellern von Elektrolyseuren auch für Hersteller von effizienten und robusten Membranen, Entwickler von Sensorik zur Integration in Elektrolysezellen sowie Anbieter kostengünstiger Plasmaspritzverfahren zur Elektrodenbeschichtung.⁴⁵

Regulatorische Rahmenbedingungen

- › Auf der Basis des Regierungsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2016 – 2026 stellt das ressortübergreifende Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) ca. 1,4 Milliarden Euro bereit. Zudem wird die anwendungsorientierte Grundlagenforschung zu grünem Wasserstoff im Rahmen des Energie- und Klimafonds von 2020 bis 2023 mit 310 Millionen Euro weiter ausgebaut und es ist beabsichtigt, die anwendungsnahe Energieforschung zu Wasserstofftechnologien mit 200 Millionen Euro von 2020 bis 2023 zu stärken.
- › In der Vorlage des EEG 2021 wurde aufgenommen, dass die Erzeugung von grünem Wasserstoff künftig von der EEG-Umlage befreit werden soll. Darüber hinaus werden für die Herstellung von grünem Wasserstoff künftig die KWK-Umlage und die Offshore-Umlage herabgesetzt.⁴⁶

STECKBRIEF 02:

Komponenten für Auf- und Ausbau der Wasserstoff- infrastruktur (H2-/Mischnetze)

Wasserstoff muss vom Erzeuger zum Verbraucher transportiert werden. Dies gilt sowohl für die heimische Erzeugung als auch für den Import. Für den Transport großer Mengen bieten sich Rohrleitungsnetze an. Dabei kann der Wasserstoff entweder in bestehende Erdgasnetze beigemischt werden oder es können dedizierte Wasserstoffnetze aufgebaut werden. Wasserstoffleitungen können unter Versprödung und Korrosion leiden, wenn beispielsweise der Stahl nicht rein genug ist oder zu hohe Härte aufweist.⁴⁷

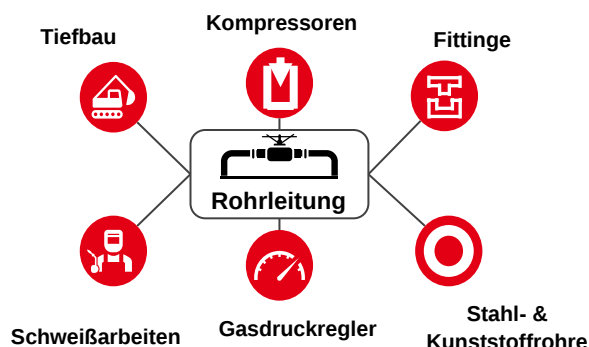


Abbildung 11: Komponenten des Ausbaus der Infrastruktur

Technische Aufgabenstellung

- › Der Betrieb von Gasnetzen erfordert in bestimmten Abständen sogenannte Verdichter, die den Druck aufrechterhalten. Dies wird erforderlich, da Reibungsverluste existieren, die über die langen Distanzen die Bewegung des Gases hemmen.
- › Durch Abweichungen in der Energiedichte und der Durchflussrate von Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas kann die maximale Energiekapazität einer Wasserstoff-Pipeline einen Wert von bis zu 80 % der Energiekapazität erreichen, die sie beim Transport von Erdgas hat.⁴⁸
- › Im Vergleich zu reinen Erdgasleitungen werden eine höhere Reinheit der Stahlrohre, weniger harte Schweißnähte, Legierungen mit höherer Zähigkeit und eine angemessene Flexibilität für Ausdehnung bei Dichtungen und Achsversetzungen notwendig.⁴⁹

Erfahrungen in NRW

- › Im Projekt „GET H2 Nukleus“ um den Kraftwerksstandort der RWE AG in Lingen werden bestehende Erdgasleitungen der Unternehmen Evonik Industries AG, Nowega GmbH und OGE Open Grid Europe GmbH auf den Transport von 100 % Wasserstoff umgestellt. Darüber hinaus errichtet die Evonik Industries AG teilweise auch neue Wasserstoffleitungen.⁵⁰
- › Der Transport des Wasserstoffs erfolgt über diese Infrastruktur mit einer Länge von 130 km zu Chemieparks und Raffinerien in Lingen, Marl und Gelsenkirchen. Die Inbetriebnahme wird 2023 erfolgen.

Potenzial in NRW

- › Laut Wasserstoff Roadmap NRW sollen bis zum Jahr 2030 in Deutschland 1.300 km Wasserstoffleitungen durch Umrüstung und Neubau errichtet werden. Davon sollen 240 km Leitungen in NRW liegen. Von den 240 km können rund 190 km durch die Umwidmung von Erdgasleitungen erreicht werden.
- › Besonderes Potenzial bietet sich für Hersteller von Stahlrohrleitungen höherer Güte und innovativer Schweißtechniken sowie Tiefbau-Unternehmen. Produzenten von geeigneten Gasdruckregelanlagen und Leitungskomponenten wie z. B. Fittings könnten ebenfalls profitieren. Andere Möglichkeiten ergeben sich bei der Verwendung von Kunststoffrohren.⁵¹

Regulatorische Rahmenbedingungen

- › Seit dem 10. Februar 2021 liegt der Gesetzentwurf der Bundesregierung zur zukünftigen Regulierung von reinen Wasserstoffnetzen vor. Darin werden Wasserstoffnetze als allgemeines Versorgungsnetz eine gesondert definierte Kategorie in § 3 EnWG. Eine Beimischung von Wasserstoff in Erdgasnetze wird nach aktuellem Stand von der Bundesregierung nicht angestrebt.
- › Für eine Übergangsphase lässt eine Opt-in-Option den derzeit nicht regulierten Wasserstoffnetzbetreibern die Wahl, ob sie weiterhin unregulierter oder regulierter Netzbetreiber sein wollen. Wenn sie dies tun, müssen die Wasserstoffnetze buchhalterisch von den Erdgasnetzen getrennt werden.
- › Wasserstoffnetze sollen von den Netznutzern finanziert werden. Eine Querfinanzierung der Wasserstoffnetze mit allgemeinen Tarifen für Erdgas und Wasserstoff soll nicht möglich sein.⁵²
- › Laut technischen Vorgaben des DVGW ist in bestehenden Erdgasnetzen eine Beimischung von knapp zehn Volumenprozent Wasserstoff zulässig. Eine Ausweitung dieser Vorgabe wird aktuell geprüft.⁵³

STECKBRIEF 03:

Komponenten für die mobile und stationäre Speicherung von Wasserstoff

H₂ kann als Speicher- und Transportmedium für Energie dienen. Dabei existieren grundsätzlich drei verschiedene Wege, Wasserstoff zu speichern: die Druckspeicherung, die Speicherung von flüssigem Wasserstoff und die Absorptionsspeicherung. Zudem wird zwischen mobiler und stationärer Speicherung unterschieden, die unterschiedliche Anforderungen an die Speichertechnologie mit sich bringen.

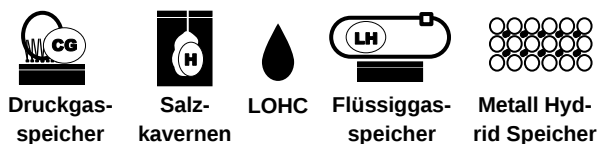


Abbildung 12: Optionen zur H₂-Speicherung

Technische Aufgabenstellung

- › Gasförmiger Wasserstoff lässt sich bei einem Druck von 200 bar (Lkw-Trailer) bis 700 bar (Pkw-Tank) speichern.⁵⁴
- › Eine Alternative stellt die Verflüssigung von Wasserstoff dar. In diesem Zustand besitzt LH₂ eine wesentlich höhere Dichte (71 kg/m³), muss aber bei -253 °C gespeichert werden.⁵⁵
- › Metallhydride absorbieren gasförmigen Wasserstoff und können so als Speicher eingesetzt werden. Beim Kontakt des Wasserstoffs mit dem Metallhydrid zerfallen die H₂-Moleküle in atomaren Wasserstoff und dringen in das Material ein. Durch Druckerniedrigung und leichte Wärmezufuhr kann der Wasserstoff wieder ausgetrieben werden. Dabei ist das langsame Ein- und Ausspeichern der Hauptnachteil dieser Speicherart, während die Möglichkeit, unter Normaldruck zu arbeiten, der größte Vorteil ist.
- › Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) speichern den Wasserstoff in einem flüssigen Trägermedium. Ein Thermal-Öl bindet Wasserstoff chemisch durch eine katalytische Reaktion. Durch Erhitzen des Trägermediums auf 250 bis 320 °C kann der Wasserstoff wieder freigegeben werden.⁵⁶
- › Die Kosten der Speicherarten unterscheiden sich noch deutlich und liegen zwischen 0,18 Euro/kg für die Speicherung in Containern und 4,15 Euro/kg bei der Speicherung mittels LOHC.⁵⁷

Erfahrungen in NRW

- › Der Aufbau der Wasserstofftankstelleninfrastruktur in NRW führt zu einem steigenden Bedarf an mobilen und stationären Speichersystemen. Druckgastanks werden sowohl neben Gebäuden als auch auf Lkw-Trailern montiert. Flüssiggasspeicher werden teilweise stationär an Tankstellen eingesetzt. Anfang 2021 existierten in NRW 21 Wasserstofftankstellen.⁵⁸
- › Die NPROXX Jülich GmbH entwickelt und produziert in Jülich Carbonfaser-Druckbehälter zur Speicherung von H₂.⁵⁹

Potenzial in NRW

- › Salzkavernen wie z. B. in Epe oder Xanten in NRW, die heute zur Speicherung von Erdgas, Erdöl und Helium genutzt werden, könnten zukünftig für die (saisonale) Speicherung von Wasserstoff verwendet werden. In NRW sind Kavernenspeicher mit einem Gesamt-Arbeitsgasvolumen von ca. 3,8 Milliarden Nm³ in Betrieb.⁶⁰
- › Die Nähe von NRW zu den Niederlanden, wo aktuell große H₂-Produktionsstätten geplant sind, eröffnet weitere Möglichkeiten. Shell plant, mit weiteren Partnern vor der Küste Nordhollands Offshore-Windstrom mit einer Leistung von 3 bis 4 GW zu erzeugen und mittels Elektrolyse in grünen Wasserstoff umzuwandeln.⁶¹ Die in NRW vorhandenen Speichermöglichkeiten können zur Sicherstellung einer H₂-Verteilung in Deutschland genutzt werden.
- › Besonderes Potenzial bietet sich neben Herstellern von Speicherlösungen (z. B. Druckgastanks) auch Entwicklern von Betankungslösungen, die die hohen Anforderungen an den Druck umsetzen können. Dabei sind Kompressoren zum Verdichten und Lösungen zum Herunterkühlen des Wasserstoffs von elementarer Bedeutung.

Regulatorische Rahmenbedingungen

- › Die stabile Auslegung der Drucktanks ist Voraussetzung für die kompakte Speicherung von Wasserstoff unter hohem Druck. Sie müssen das Zweifache des zugelassenen Betriebsdrucks aushalten können.⁶²
- › Wasserstoff selbst ist nicht explosionsfähig und kann nur in Mischungsverhältnissen ab 4 % H₂ in Luft gezündet werden. Detonationen treten in freier Luft praktisch nicht auf, müssen aber in geschlossenen Räumen durch geeignete Sicherheitsmaßnahmen verhindert werden.

STECKBRIEF 04:

Erzeugung von Prozesswärme in der Industrie

Die Bereitstellung von Prozesswärme begründet einen großen Teil des industriellen Energiebedarfs und hat somit große Relevanz für eine Dekarbonisierung der Industrie (z. B. bei der Herstellung von Glas, Zement, Fliesen oder Erzeugnissen der Chemieindustrie). Wasserstoff bietet sich als Energieträger an, um den CO₂-Ausstoß der Wärmeerzeugung zu verringern, welche aktuell hauptsächlich auf Basis von fossilen Brennstoffen erzeugt wird.

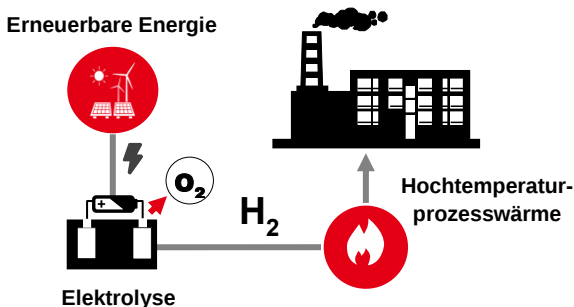


Abbildung 13: Verbrennung von grünem Wasserstoff ersetzt die aus fossilen Energieträgern erzeugte Prozesswärme.

Technische Funktionsweise

- › Generell können unterschiedliche Anforderungen an die Bereitstellung von Wärme in industriellen Prozessen bezüglich des geforderten Temperaturniveaus, der Notwendigkeit eines Verbrennungsprozesses oder anderer prozessbedingter Besonderheiten vorliegen. Als Temperaturniveaus können z. B. Nieder- (bis 100°C), Mittel- (bis 500°C) und Hochtemperaturbereiche (über 500°C) abgegrenzt werden.⁶³
- › Während im Niedertemperaturbereich zahlreiche EE-Technologien (z. B. Solarthermie, Geothermie, Wärmepumpen) dem Wasserstoff kostengünstig Konkurrenz machen, ist die Verwendung besonders in höheren Temperaturbereichen sinnvoll. Dort sind vor allem Biomethan oder eine vollständige Elektrisierung mögliche nicht-fossile Konkurrenztechnologien. So kann Wasserstoff beispielsweise Erdgas in existierenden Produktionsprozessen ersetzen.⁶⁴

Erfahrungen in NRW

- › Das Projekt „Hyglass“ untersucht die Eignung einer reinen Wasserstoffnutzung oder -zumischung zur Deckung des hohen Prozesswärmebedarfs der Glasherstellung, um Erdgas zu ersetzen. Das Projekt wird vom Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI) und dem Bundesverband Glasindustrie durchgeführt und über IN4climate.NRW gefördert.⁶⁵

Potenzial in NRW

- › Die Prozesswärme machte 2019 deutschlandweit über zwei Drittel des Endenergieverbrauchs der Industrie aus.⁶⁶ Ein Großteil wird unter Verwendung von Kohle und Erdgas erzeugt. Mit über 200 TWh wurde in Deutschland 2015 ca. die Hälfte der Prozesswärme aus Erdgas bereitgestellt. Dabei sind rund 75 % der gesamten Prozesswärme für energieintensivere Temperaturniveaus über 500°C erforderlich.⁶⁷
- › In der Wasserstoff-Roadmap NRW werden für das Jahr 2030 erste Anlagen mit Wasserstoffnutzung in der Glasproduktion, Fliesen- und Ziegelindustrie und ein Drehofen in der Gießereitechnik sowie die Entwicklung und Prüfung von Verfahren zum Einsatz von Wasserstoff in der Zementindustrie zum Ziel gesetzt.
- › Industrien mit großem Bedarf an Prozesswärme über 500 °C sind hier besonders relevant. Dies betrifft z. B. die Zement-, Stahl- und Mineralölprodukte sowie u. a. die Nichteisenmetallproduktion und Gießereien, Grundstoff- und sonstige Chemie, Glas- und Keramikherstellung sowie die Verarbeitung von Steinen und Erden.⁶⁸

Regulatorische Rahmenbedingungen

- › Die Förderrichtlinie „Dekarbonisierung in der Industrie“ soll helfen, prozessbedingte Emissionen zu reduzieren. Bis 2024 sollen über das Bundesumweltministerium energieintensive Branchen wie Stahl, Zement, Kalk, Chemie und Nichteisenmetalle mit 2 Milliarden Euro unterstützt werden.
- › Wasserstoffanwendungen in der Industrie werden zudem durch die „Technologieoffensive Wasserstoff“ des BMWi gefördert.⁶⁹

STECKBRIEF 05:

Wasserstoffnutzung in der Stahlindustrie

Der größte CO₂-Verursacher im Industriesektor ist die energieintensive Stahl- und Eisenbranche. Die traditionelle Stahlproduktion setzt auf Hochöfen, die mit Kohle betrieben werden und erhebliche Mengen CO₂ ausstoßen. Wasserstoff kann dazu beitragen, die Prozesse in der Stahlproduktion zu dekarbonisieren. Dazu zählen neben der Roheisenproduktion auch das Glühen, das Härten und das Sintern von Stahl sowie die Gasabschreckung.



Abbildung 14: Dekarbonisierung der Stahlherstellung⁷⁰

Technische Funktionsweise

- › Die Produktion von Stahl beginnt mit der Produktion von Roheisen. Dieses wird in Hochöfen unter Einsatz von Koks und Einblaskohle aus Eisenerz hergestellt. Diese beiden Stoffe werden als Reduktionsmittel und Energiequelle verwendet, um das Eisenerz zu Roheisen zu reduzieren. Das bei der Verbrennung entstehende Kohlenstoffmonoxid entzieht dem Eisenerz den Sauerstoff und oxidiert zu Kohlenstoffdioxid.
- › Anstelle von Einblaskohle kann in Hochöfen (grüner) Wasserstoff als Reduktionsmittel verwendet werden. Dieser reagiert mit dem Sauerstoff im Eisenerz – statt CO₂ entsteht Wasserdampf. Ein kompletter Verzicht auf Koks und Kohle ist in Direktreduktionsanlagen möglich. Diese können vollständig mit Wasserstoff betrieben werden. In den Anlagen entsteht kein flüssiges Roheisen, sondern ein fester Eisenschwamm, der anschließend zu Rohstahl veredelt wird.

Erfahrungen in NRW

- › In Duisburg führt die thyssenkrupp Steel Europe AG ein Pilotprojekt zur Reduktion der CO₂-Emissionen in der Stahlproduktion durch.⁷¹ Bis 2022 wird eine der Direktreduktionsanlagen so umgerüstet, dass ein Teil des als Reduktionsmittel eingesetzten Kohlenstaubs durch Wasserstoff ersetzt wird. Dies ermöglicht CO₂-Einsparungen von bis zu 20 % je Tonne Roheisen.
- › 2024 soll die erste vollständig mit Wasserstoff und grünem Strom betriebene Direktreduktionsanlage in Betrieb gehen. 2050 will die Thyssenkrupp AG eine vollständig klimaneutrale Stahlproduktion erreichen.
- › Das Projekt wird namentlich in der Wasserstoff-Roadmap NRW erwähnt und vom Bundesland NRW finanziell gefördert.

Potenzial in NRW

- › Im Jahr 2019 wurden in NRW 13,4 Millionen Tonnen Stahlblech im Wert von 11,5 Milliarden Euro hergestellt (ca. 40 % der deutschen Stahlerzeugung und 1,6 % des BIP in NRW).^{72 73}
- › In der Wasserstoff-Roadmap NRW wird die Stahlindustrie als Zielbranche für den Einsatz von Wasserstoff zur Reduktion von CO₂-Emissionen genannt.
- › Die deutsche Stahlindustrie emittiert ca. 67 Millionen t CO₂-Äquivalent pro Jahr. Diese Summe soll bis 2030 gegenüber 1990 um 49 bis 51 % reduziert werden.⁷⁴ Heruntergebrochen auf NRW entspräche dies einer notwendigen CO₂-Einsparung von ca. 13,4 Millionen t CO₂-Äquivalent.

Regulatorische Rahmenbedingungen

- › Über die Initiative „IN4climate.NRW“ fördert das Land NRW das oben beschriebene Projekt der thyssenkrupp Steel Europe AG mit 1,6 Millionen Euro in der ersten Projektphase.⁷⁵
- › Die Wasserstoff-Roadmap fordert zeitnah Anreizprogramme (wie z. B. Carbon Contracts for Difference (CCfD)), die die Skalierung und Weiterentwicklung der Wasserstoffnutzung ermöglichen. Die Bundesregierung plant hierfür ein „Pilotprogramm Klimaschutzverträge nach dem Prinzip Carbon Contracts for Difference“ mit einem Volumen von 550 Millionen Euro.⁷⁶
- › Seit Ende 2020 stehen zudem knapp 450 Millionen Euro im „Förderprogramm Dekarbonisierung der Industrie“ u. a. für Investitionen in Wasserstofftechnologien zur Verfügung.⁷⁷
- › Wasserstoffanwendungen in der Industrie werden zudem durch die „Technologieoffensive Wasserstoff“ des BMWi gefördert.⁷⁸

STECKBRIEF 06:

Nutzung in der Industrie als Ausgangsstoff für chemische Produkte

Für chemische Produkte wird bereits aktuell Wasserstoff als Ausgangsstoff eingesetzt und hauptsächlich aus Erdgas gewonnen. Grüner Wasserstoff kann die Treibhausgasemissionen der Herstellung chemischer Grundstoffe wie Olefine, Aromaten, Methanol oder Ammoniak reduzieren, die wiederum bspw. für die Produktion von Kunststoffen, Klebstoffen und Düngemitteln genutzt werden.

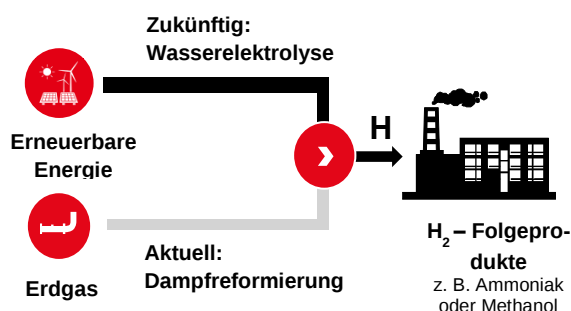


Abbildung 15: Grüner Wasserstoff ersetzt herkömmliche Verfahren der Wasserstofferzeugung in auf Wasserstoff basierenden Produkten

Technische Funktionsweise

- › Als Ersatz für die aktuell überwiegende Dampfreformierung von Erdgas zur Herstellung von Wasserstoff stehen u. a. Wasserelektrolyse oder zukünftig Methanpyrolyse als emissionsarme Verfahren bereit.
- › Eine Herausforderung besteht darin, erneuerbar erzeugten Wasserstoff in bestehende Prozessketten der chemischen Industrie zu integrieren und bspw. aus der Erdgasreformierung genutztes CO₂ zu ersetzen. Einen hohen stofflichen Bedarf an Wasserstoff haben beispielsweise Ammoniak oder Methanol.
- › Grundlage weiterer Produkte in der chemischen Industrie sind Olefine und Aromaten, welche heutzutage in Crackern gewonnen werden, denen Naphtha aus Erdöldestillation zugeführt wird. Dieses könnte durch synthetisches Naphtha oder Prozesse wie Methanol-to-Olefin (MTO) bzw. Methanol-to-Aromatics (MTA)-Technologien ersetzt werden, welche klimafreundlichen Wasserstoff als Ausgangsstoff verwenden.⁷⁹

Erfahrungen in NRW

- › Das von der Landesregierung geförderte „Spitzencluster Industrielle Innovationen (SPIN)“ unterstützt das Projekt „P2X Herne“ bei der Entwicklung eines Power2X-Reaktors. Auf dem Heizkraftwerksge-lände in Herne soll aus Abgas und Wasser u. a. wasserstoffhaltiges Synthesegas für chemische Grundstoffe erzeugt werden.⁸⁰
- › Das Projekt „GET H2 Nukleus“ verbindet Lingen als zukünftigen Erzeugungsort von grünem Wasserstoff über 130 km bestehende Gasleitungen mit industriellen Abnehmern der chemischen Industrie in NRW. Diese sollen ab 2023 öffentlich zugänglich und langfristig Teil eines deutschlandweiten Netzes werden.⁸¹
- › Im Rahmen des vom „Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCHJU)“ geförderten Projektes „REFHYNE“ soll in der Raffinerie in Wesseling ab 2020 ein 10-MW-Elektrolyseur 1.300 t grünen Wasserstoff pro Jahr für Raffinerieprozesse wie der Entschwefelung von Kraftstoffen bereitstellen.⁸²

Potenzial in NRW

- › Laut Wasserstoff-Roadmap NRW sollen bis 2025 erste Anlagen zur klimaneutralen Ammoniak- und Methanolsynthese sowie eine Test- und Pilotanlage zur pyrolytischen Herstellung von Wasserstoff in Betrieb genommen werden. Dabei wird ein Mehrbedarf von 68 TWh Wasserstoff in NRW für eine klimaneutrale chemische Industrie 2050 genannt (deutschlandweit heute 57 TWh).
- › In NRW ist die chemische Industrie mit über 95.000 Beschäftigten und knapp 45 Milliarden Euro Umsatz (ca. 6 % des BIP in NRW)⁸³ einer der größten Industriezweige. Circa 80 % sind kleine und mittlere Unternehmen. Der Umsatzanteil der Grundstoffchemie beträgt etwa 70 %.⁸⁴

Regulatorische Rahmenbedingungen

- › In der Nationalen Wasserstoffstrategie wurde ein Pilotprogramm für Carbon Contracts for Difference für die Förderung des Betriebs von Elektrolyseuren angekündigt. Die Umsetzung läuft über das Bundesumweltministerium und das Bundeswirtschaftsministerium.
- › Seit Ende 2020 stehen zudem knapp 450 Millionen Euro im „Förderprogramm Dekarbonisierung der Industrie“ u. a. für Investitionen in Wasserstofftechnologien zur Verfügung.⁸⁵
- › Wasserstoffanwendungen in der Industrie werden außerdem durch die „Technologieoffensive Wasserstoff“ des BMWi gefördert.⁸⁶

STECKBRIEF 07:

H₂-Brennstoffzellen-Antriebe im Güterverkehr und ÖPNV

Im Verkehrssektor kann eine Minderung der Treibhausgasemissionen durch die Abkehr von fossilen Brennstoffen erreicht werden. Dabei lässt sich Wasserstoff im öffentlichen Personennahverkehr und im Güterverkehr als Energieträger für Brennstoffzellen verwenden, um elektrische Antriebsenergie bereitzustellen. Vielversprechende Einsatzgebiete sind bspw. Busse, Lkw, Züge, Binnenschiffe, Entsorgungsfahrzeuge oder Gabelstapler.

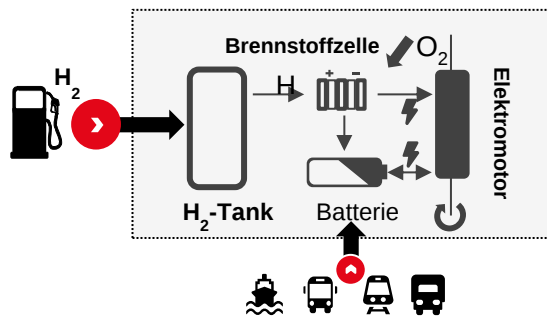


Abbildung 16: Beispielhafte Prinzipskizze eines Antriebsstrangs mit Brennstoffzelle, welcher in unterschiedlichen Fahrzeugen zum Einsatz kommen könnte.

Technische Funktionsweise

- Die mobile Brennstoffzelle als elektrochemischer Energiewandler macht die chemische Energie aus dem im Speicher mitgeführten Wasserstoff nutzbar. Aus der Reaktion mit Sauerstoff aus der Umgebung kann elektrische Energie für den Antrieb erzeugt werden, wobei Wasser emittiert wird.
- Neben dem Brennstoffzellensystem werden ein Elektromotor, ein Wasserstofftank und eine Batterie zur Rekuperation von Bremsenergie, als Leistungspuffer oder Reichweitenreserve benötigt.

Erfahrungen in NRW

- Während mit Wasserstoff betriebene Busse, Lkw, Stapler und Personenzüge im Einsatz sind und am Beginn der Serienproduktion stehen, befinden sich weitere Anwendungen wie Binnenschiffe oder Entsorgungsfahrzeuge in der Entwicklung bzw. im Test.
- Mit Wasserstoff betriebene Busse werden bspw. seit 2011 von der Regionalverkehr Köln GmbH (RVK) eingesetzt. Bis Ende des Jahres 2021 sollen 52 geförderte Brennstoffzellen-Hybridbusse mit ca. 350 km Reichweite und mit dem Diesel vergleichbaren Betriebsablauf über vier Tankstellen versorgt werden.⁸⁷
- Im Projekt „H2-Share“ werden Brennstoffzellen-Lkw getestet und durch das Interreg-Programm Nordwesteuropa gefördert.⁸⁸ In NRW wurde dies in Düsseldorf Ende 2020 durch ein Fahrzeug zur Innenstadtbelieferung mit mobiler Tankstelle und 10 t Nutzlast getestet.⁸⁹

Potenzial in NRW

- Bei Fahrzeugen mit hohen Leistungs- und Reichweitenanforderungen sowie hohen jährlichen Laufleistungen kommt der hohen Energiedichte und der kurzen Betankungszeit von Wasserstoff eine größere Bedeutung zu. Brennstoffzellenfahrzeuge bieten sich dort gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen an und können Flottenemissionen im Güterverkehr und ÖPNV senken. Auch Wasserstoff in Verbrennungsmotoren ist technisch möglich, wird allerdings nicht intensiv verfolgt.⁹⁰
- Die Wasserstoff-Roadmap NRW gibt bis 2025 mehr als 400 Brennstoffzellen-Lkw mit mindestens 20 Lkw-Tankstellen und 60 Pkw-Tankstellen sowie 500 Wasserstoffbusse für den ÖPNV als Zielmarke aus. Erste Binnenschiffe sollen ebenfalls ihren Betrieb aufnehmen.⁹¹
- Für 2030 wird in der Roadmap ein jährlicher Wasserstoffbedarf von etwa 200.000 t (ca. 6,7 TWh) angegeben, welcher sich in abnehmender Reihenfolge auf schweren Lkw-Verkehr, ÖPNV-Busse, Pkw und leichte Nutzfahrzeuge, Fahrzeuge der Abfallwirtschaft, die Binnenschifffahrt sowie Personenzüge und weitere Anwendungen aufteilen soll.⁹²

Regulatorische Rahmenbedingungen

- Die Förderung der Nationalen Wasserstoffstrategie für den Verkehr wird über das BMVI umgesetzt. Mobile Brennstoffzellenanwendungen sind Teil der Marktaktivierung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie II (NIP II).
- In der Wasserstoff-Roadmap NRW werden dazu Förderrahmen gefordert, welche Einkaufsgemeinschaften für Fahrzeuge ermöglichen. Auf Landesebene ist eine Förderung von Brennstoffzellenfahrzeugen über die Richtlinie „Emissionsarme Mobilität“ und die Anschaffung von Brennstoffzellenbussen über das ÖPNV-Gesetz möglich.

STECKBRIEF 08:

Herstellung und Nutzung synthetischer Kraftstoffe

Synthetische Kraftstoffe können aus erneuerbaren Energien hergestellt werden. Wasserstoff und Kohlenstoff, bspw. aus Kohlenstoffdioxid, reagieren und bilden Kohlenwasserstoffe, die dann als künstliche gasförmige oder flüssige Kraftstoffe genutzt werden können. Diese synthetischen Kraftstoffe haben eine höhere Energiedichte als reiner H_2 , sind gut speicher- und transportierbar. Sie können helfen, die Luft- und Schifffahrt zu dekarbonisieren.

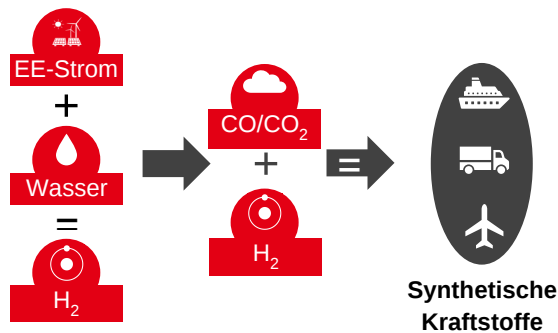


Abbildung 17: Prozess zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe

Technische Aufgabenstellung

- › (Grüner) Wasserstoff wird als Grundlage für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe verwendet. Kohlenstoffdioxid kann aus Industrieprozessen, Biogasanlagen oder mit speziellen Filtern direkt aus der Luft gewonnen werden (CCU, Carbon Capture and Usage).
- › CO_2 ist inert und muss für die anschließenden Syntheseschritte in Kohlenstoffmonoxid umgewandelt werden. Das Resultat ist ein Synthesegas aus H_2 und CO (stöchiometrisches Verhältnis von 2:1).⁹³
- › Auf Basis dieses Synthesegases werden gasförmige und flüssige Kraftstoffe erzeugt (z. B. mittels Fischer-Tropsch-Synthese). Dabei wird das Synthesegas mithilfe eines Katalysators in langkettige Kohlenwasserstoffe umgewandelt. Aus diesen Kohlenwasserstoffen können in weiteren Produktionsschritten klimafreundliche Kraftstoffe hergestellt werden.⁹⁴

Erfahrungen in NRW

- › Bis zum Jahr 2025 soll laut Wasserstoff-Roadmap NRW eine Power-to-Liquid-Demonstrationsanlage zur Herstellung synthetischer Kraft- und Rohstoffe mit einer Kapazität von mehreren 100 Tonnen pro Tag in NRW errichtet werden.
- › In Niederaußem errichtete die Mitsubishi Hitachi Power Systems Europe GmbH an einem Braunkohlekraftwerk der RWE AG eine Power-to-Fuel-Anlage. Die Inbetriebnahme ist im Jahr 2019 erfolgt.⁹⁵

Potenzial in NRW

- › Laut Wasserstoff-Roadmap des Landes NRW werden im Jahr 2050 ca. 129 TWh Power-to-Liquid-Kraftstoffe nach NRW importiert und ca. 10 TWh im Bundesland selbst produziert.
- › Chancen ergeben sich besonders für die Petrochemie. Durch die Umstellung der Produktion könnte das voraussichtlich zurückgehende Geschäft mit konventionellen Kraftstoffen kompensiert werden.
- › Vor allem für den Schwerlastverkehr, die Luftfahrt und die Schifffahrt besitzen synthetische Kraftstoffe ein großes Innovationspotenzial, da diese auf Kraftstoffe mit hoher Energiedichte angewiesen sind.⁹⁶ Zudem wäre eine Weiternutzung bestehender Infrastruktur möglich.

Regulatorische Rahmenbedingungen

- › Derzeit prüft die Bundesregierung verschiedene Instrumente, um den Markthochlauf von synthetischen Kraft-, Treib- und Grundstoffen auf der Basis erneuerbarer Energien zu unterstützen. Diese Instrumente umfassen neben Quoten für den Einsatz von PtX-Produkten auch die direkte Förderung ihrer Produktion sowie entsprechende Regulierung auf europäischer Ebene.⁹⁷
- › Die Nutzung von Wasserstoff zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe wird durch die „Technologieoffensive Wasserstoff“ des BMWi gefördert.⁹⁸
- › Die neue Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (RED II) verlangt bis 2030 einen EE-Anteil im Verkehrssektor von 14 %. Die Vorgaben werden aktuell in deutsches Recht überführt. Dabei wird eine Quote von bis zu 22 % im Jahr 2030 diskutiert.⁹⁹
- › Die Nachhaltigkeitskriterien für Wasserstoff als Kraftstoff sind noch nicht festgesetzt. Die Kriterien für die Herkunftsnachweise für EE- H_2 , die im EU-Projekt CertifHy entwickelt werden, könnten als Grundlage für notwendige EE- H_2 -Nachhaltigkeitskriterien herangezogen werden.¹⁰⁰

STECKBRIEF 09:

Energieversorgung von Haushalten und Gewerbe mittels Brennstoffzellen

Haushalte und Gewerbe nutzen heute durch das Netz bereitgestellten Strom und fossile Brennstoffe, um ihren Energiebedarf zu decken. 28 % der deutschen CO₂-Emissionen werden der Energieversorgung von Haushalten und Gewerbe zugerechnet.¹⁰¹ Lokal installierte Brennstoffzellen sind ein effizientes und potenziell emissionsfreies Mittel zur kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung.

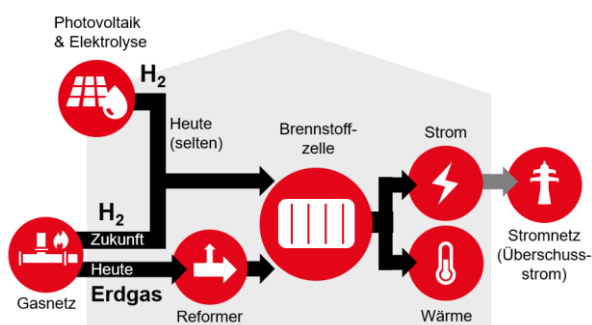


Abbildung 18: Funktionszusammenhang der Brennstoffzelle im Use Case – heute und zukünftig

Technische Funktionsweise

- › Die lokal installierte Brennstoffzelle wandelt in einer chemischen Reaktion („kalte Verbrennung“) Wasserstoff mithilfe von Sauerstoff aus der Luft in Strom, Wärme und Wasser um. Es wird zwischen Nieder- und Hochtemperaturbrennstoffzellen unterschieden, wobei PEMFC (engl. Proton Exchange Fuel Cell, Niedertemperatur) und SOFC (engl. Solid Oxide Fuel Cell, Hochtemperatur) heute im Gebäudeenergiesektor am weitesten verbreitet sind.
- › Eine Vielzahl heute verfügbarer Anlagen arbeitet mit Erdgas, das ein der Brennstoffzelle direkt vorgeschalteter Reformer lokal in wasserstoffreiches Gas umwandelt. Das durch die Reformierung entstehende CO₂ entweicht in die Atmosphäre. Langfristig ist eine externe Versorgung mit Wasserstoff denkbar.
- › Bei der Verwendung von Wasserstoff erreicht die Brennstoffzelle heute einen elektrischen Wirkungsgrad von bis zu etwa 60 % und bei Nutzung der Wärme im Heiz- und Warmwasserkreislauf einen Gesamtwirkungsgrad von etwa 90 %. Berücksichtigt man eine vorgeschaltete Reformierung von Erdgas, sinkt der elektrische Systemwirkungsgrad bei PEMFC auf etwa 40 %, während der elektrische Systemwirkungsgrad von SOFC bei Erdgasbetrieb bei etwa 55 % liegt.¹⁰²
- › Möglich ist eine lokale Erzeugung von Wasserstoff mithilfe von Solarenergie vom eigenen Dach und einem Elektrolyseur. Der Wasserstoff kann komprimiert in Gasflaschen gespeichert werden.

Erfahrungen in NRW

- › Brennstoffzellen als Mikro-KWK (Kraft-Wärme-Kopplung) mit Erdgasanschluss werden bereits heute kommerziell als Heizungsanlage mit Stromerzeugung von mehreren Anbietern vermarktet. Reine Wasserstoffanlagen, z. B. das System Picea der Firma HPS, sind in ersten Haushalten installiert.
- › Im Rahmen von sechs KWK-Modellkommunen in NRW werden auch Brennstoffzellen-KWK eingesetzt, bspw. in Schulen und Turnhallen in Iserlohn¹⁰³ oder in einem Mehrfamilienhaus in Krefeld-Opium.¹⁰⁴
- › In einem Demonstrationsprojekt der STAWAG (Stadtwerke Aachen AG) und der WINGAS GmbH erzeugt eine Brennstoffzelle im Aachener Institut für Industrieraerodynamik Warmwasser, Strom und Wärme.¹⁰⁵

Potenzial in NRW

- › Bis 2030 will die Bundesregierung den CO₂-Ausstoß des Gebäudesektors von 118 Millionen Tonnen 2019 (NRW: 26,3 Millionen Tonnen¹⁰⁶) auf 70 Millionen Tonnen senken.¹⁰⁷
- › Laut BMWi sind Heizgeräte in Deutschland durchschnittlich 17,6 Jahre alt, wobei ein Drittel älter als 20 Jahre ist. Daher möchte NRW die Sanierungsrate von Heizungen auf 2 % verdoppeln.¹⁰⁸
- › Die Anwendung von Brennstoffzellen in Haushalten und Gewerbe ist insbesondere dort sinnvoll, wo ein Fernwärmenetzanschluss nicht (wirtschaftlich) möglich ist.

Regulatorische Rahmenbedingungen

- › Die Anforderungen an die Nutzung erneuerbarer Energien im Gebäudeenergiegesetz können durch Deckung von 40 % der Wärme- und Kälteenergie mithilfe einer Brennstoffzellenheizung befriedigt werden. Wasserstoff an sich wird – im Gegensatz zu Biomasse – bisher keine spezifische Stellung eingeräumt.¹⁰⁹
- › Es bestehen zahlreiche Fördermöglichkeiten für die Installation von Brennstoffzellen zur Strom- und Wärmeversorgung von Gebäuden, z. B.
 - KfW-433-Programm „Energieeffizient Bauen und Sanieren – Zuschuss Brennstoffzelle“
 - Mini-KWK-Zuschuss des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)
 - Stromvergütung nach dem KWK-Gesetz (KWK-G)

STECKBRIEF 10: **Rückverstromung von Was-** **serstoff und Einspeisung** **von Abwärme ins Wärmenetz**

Zum Ausgleich der Schwankungen regenerativer Energien werden (saisonale) Energiespeicher benötigt. Wasserstoff kann bei hohem Angebot erneuerbaren Stroms erzeugt, gespeichert und in H₂-BHKW oder per Brennstoffzelle gezielt rückverstromt werden, um bedarfsge- recht elektrische Energie und als Nebenprodukt Wärme bereitzustellen.

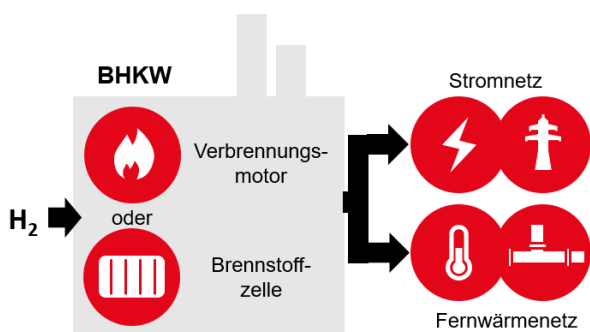


Abbildung 19: Funktionsweise der Rückverstromung

Technische Funktionsweise

- › In Zeiten geringer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien kann die Versorgungslücke in Zukunft durch Wasserstoff gefüllt werden. Der Wasserstoff kann hierzu entweder während Perioden mit hohem EE-Dargebot heimisch erzeugt und gespeichert oder importiert werden.
- › Der Wasserstoff wird bei Bedarf in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) in elektrische Energie umgewandelt („Rückverstromung“). Die dabei anfallende Wärme kann in ein Wärmenetz eingespeist werden.
- › Als Antrieb sind sowohl Verbrennungsmotoren (konventionelle Verbrennung) als auch Brennstoffzellen (kalte Verbrennung) möglich. In konventionellen BHKW ist eine Beimischung des Wasserstoffs zum Erdgas i. d. R. bis zu einem Anteil von ca. 20 % ohne weiteren Aufwand möglich. Darüber hinaus werden Umrüstungsmaßnahmen erforderlich.
- › Der elektrische Wirkungsgrad aktueller Wasserstoff-BHKW erreicht etwa 40 % (Verbrennungsmotor) bzw. 60 % (Brennstoffzelle). Durch die Nutzung der Abwärme steigt der Gesamtwirkungsgrad auf 80 bis 90 % bzw. 90 bis 100 %.¹¹⁰

Erfahrungen in NRW

- › BHKW, die reinen Wasserstoff nutzen, sind in NRW bisher nicht bekannt. Erste Pilotprojekte werden z. B. in Hamburg (HanseWerk AG) und im bayerischen Haßfurt (Stadtwerk Haßfurt GmbH) durchgeführt. Hersteller der in Haßfurt verwendeten Anlage ist die 2G Energy AG aus Heek in NRW. Das BHKW hat eine elektrische Leistung von 170 Kilowatt und eine thermische Leistung von 183 Kilowatt.¹¹¹

Potenzial in NRW

- › Die Energiewirtschaft war 2018 in NRW für 49,8 %¹¹² der Emissionen verantwortlich und soll durch den Ausbau erneuerbarer Energien dekarbonisiert werden. Die Wasserstoff-Roadmap NRW geht für das Jahr 2050 von einer Wasserstoffnachfrage für Rückverstromung von 26 TWh aus.¹¹³
- › Während die (zukünftigen) Erzeugungsschwerpunkte regenerativer Energien eher im windreichen Norden Deutschlands zu verorten sind, liegen die größten Verbraucher u. a. in NRW. Hier besteht die Möglichkeit, entweder Wasserstoff oder grünen Strom zur Wasserstoffproduktion nach NRW zu importieren.
- › Die Wirtschaftlichkeit der H₂-Rückverstromung wird maßgeblich von den Kosten und Wirkungsgraden der Erzeugung, ggf. der Speicherung und des Transports und der Verstromung von Wasserstoff bestimmt. Der Ausbau erneuerbarer Energien wird die Zahl an Stunden mit Null- oder Negativpreisen deutlich erhöhen, wodurch die flexible Wasserstoff-erzeugung von günstigen Strompreisen profitieren können wird.
- › Das Forschungszentrum Jülich prognostiziert für 2030 in NRW Investitionschancen in Höhe von 14,5 Millionen Euro für Rückverstromung. Für 2050 liegt dieser Wert bei 7.700 Millionen Euro.¹¹⁴

Regulatorische Rahmenbedingungen

- › Spezifische Förderprogramme für H₂-BHKW existieren momentan noch nicht. Anlagenbetreiber können jedoch allgemeine Förderprogramme für KWK-Anlagen (z. B. gem. KWK-Gesetz, Effizienz kredit der NRW.Bank) oder EE-Anlagen (Marktprämie, Einspeisevergütung) in Anspruch nehmen.
- › Im EEG fällt regenerativ erzeugter Wasserstoff zur Rückverstromung unter den Begriff „Speichergas“. Strom, der zur Herstellung von grünem Wasserstoff zur Rückverstromung genutzt wird, ist von der EEG-Umlage, Netzentgelten und Stromsteuer befreit, um eine Doppelbelastung zu verhindern.



HANDLUNGSFELDER ZUR UNTERSTÜTZUNG DES MARKTHOCH- LAUFS

Mit seinen zahlreichen potenziellen Abnehmern von klimafreundlichem Wasserstoff, innovativen Unternehmen und der vorhandenen Gasinfrastruktur verfügt Nordrhein-Westfalen über optimale Rahmenbedingungen für den bevorstehenden Markthochlauf. Um diese Ausgangsbedingungen nutzen zu können, sollte durch die jeweils zuständigen politischen Ebenen eine Reihe von Maßnahmen ergriffen werden:

Markthochlauf am Ziel der Klimaneutralität ausrichten und passende Wettbewerbsbedingungen schaffen

Bisherige Studien zeigen, dass signifikante Mengen an Wasserstoff v. a. dann benötigt werden, wenn bis 2050 die derzeit politisch diskutierte Klimaneutralität als erstrebenswertes Ziel etabliert wird. Dafür sind ein rascher Ausbau und Hochlauf der Wasserstofftechnologie zwingend erforderlich. Die geplante Änderung des Klimaschutzgesetzes NRW sollte hierzu von konkreten Maßnahmen zur Förderung des EE- und H₂-Hochlaufs sowie zur Schaffung der notwendigen Rahmenbedingungen begleitet werden. Diese sollten auch Unternehmen des industriellen Mittelstandes ermöglichen, an der Wertschöpfung der Wasserstoffwirtschaft teilzuhaben.

Ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien vorantreiben

Der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung sollte dem Ziel der Klimaneutralität entsprechen und dabei den zusätzlichen Bedarf, der durch die inländische Produktion von grünem Wasserstoff entsteht, berücksichtigen. Hierzu müssen die Ausbauziele des EEG 2021 sowie der zugrunde liegende Strommengenpfad (580 TWh Bruttostromverbrauch in Deutschland) deutlich nach oben angepasst werden. Auch in NRW sind ambitionierte Ziele für den Ausbau der erneuerbaren Energien erforderlich. Bis 2050 werden schätzungsweise insgesamt PV- und Windenergieanlagen mit einer Kapazität von 52 GW¹¹⁵ benötigt (2019: 11 GW¹¹⁶).

Technologieoffenheit gewährleisten

Für einen schnellen und kosteneffizienten Markthochlauf in der Anwendung sind grauer, blauer und türkiser Wasserstoff notwendige Übergangslösungen. Auch Wasser-

stoff als Nebenprodukt der chemischen Industrie, der heute bereits kostengünstig verfügbar ist, sollte berücksichtigt werden.

Politische Debatte zur Nutzung von blauem Wasserstoff als Übergangstechnologie anregen

Die große Mehrheit energiewirtschaftlicher Studien geht davon aus, dass zur Erreichung der Klimaschutzziele von Paris die Abspaltung und Speicherung bzw. Nutzung von Kohlenstoffdioxid eine erforderliche Technologie ist. Gleichzeitig ermöglicht sie auch die inländische Produktion von blauem Wasserstoff. Vor diesem Hintergrund sollte ein ergebnisoffener politischer und gesellschaftlicher Diskurs begonnen werden.

Internationale Partnerschaften und Märkte aufbauen

Selbst mit einem ehrgeizigen Ausbau der erneuerbaren Energien wird eine ausreichende Wasserstoffproduktion allein in Deutschland nicht gelingen. Eine sichere und kosteneffiziente Energieversorgung ist in Deutschland und in NRW nur mit ausreichenden Importmengen zu erreichen. Das gilt insbesondere für Wasserstoff. Aus diesem Grund sollten internationale Partnerschaften frühzeitig aufgebaut und intensiviert werden, um den steigenden Wasserstoffbedarf durch dort entstehende Erzeugungskapazitäten bedienen zu können. Zusätzlich wird auch ein europäischer und außer-europäischer Markt für handelbare, klimaneutrale Rohstoffe vonnöten sein.

Transparente Förderprogramme für Wasserstoff einrichten

Entlang der Wertschöpfungskette fallen beachtliche Investitionsbedarfe für den Aufbau von Erzeugungs-, Transport-, Speicher- und Verteilkapazitäten an. Gleichzeitig müssen technische Anlagen auf der Verbraucherseite „Wasserstoff-ready“ gemacht werden. Um die Ziele für den Hochlauf des Wasserstoffs entsprechend den Strategien der Bundesregierung und der Landesregierung NRW zu erreichen, sind Förderprogramme für alle Stufen der Wertschöpfungskette notwendig, die auch für kleine und mittelständische Unternehmen zugänglich sind und besonders in der Phase bis 2030 die nationale Erzeugung im Fokus haben müssen. Angesichts der mehrere Jahrzehnte umspannenden Investitionszyklen bei der Infrastruktur und in vielen Industriebereichen ist eine zeitnahe Förderung von Wasserstofftechnologien essenziell.

Zeitnah eine verbindliche Definition von grünem Wasserstoff festlegen

Für die Beschaffung von grünem Wasserstoff ist es notwendig, vergleichbare Qualitätsanforderungen zu definieren. Auf nationaler Ebene ist dazu die rasche Konkretisierung des novellierten erneuerbaren Energiegesetzes erforderlich. In der Anfang 2021 veröffentlichten EEG-Novelle ist eine vollständige Streichung der EEG-Umlage für Strom zur Erzeugung von grünem Wasserstoff vorgesehen. Allerdings wird diese Regelung erst wirksam, sobald per Verordnung nach § 93 EEG 2021 eine verbindliche Definition davon, was grüner Wasserstoff ist, verabschiedet worden ist. Um eine zügige Befreiung von Projekten von der EEG-Umlage zu ermöglichen, sollte eine zeitnahe Lösung erarbeitet werden. Auf internationaler Ebene sollte eine Vergleichbarkeit von Zertifizierungen, Herkunftsnachweisen etc. gewährleistet sein.

Genehmigungsverfahren vereinfachen

Beim Bau von Wasserstoffinfrastruktur stoßen heutige Vorhaben häufig auf Unsicherheit und (teilweise daraus resultierende) lange Bearbeitungszeiten bei der Genehmigung. Hier ist es wichtig, einen gemeinsamen Rahmen für die Genehmigung von Elektrolyseuren, Netzen, Speichern, Tankstellen etc. zu schaffen bzw. die zuständigen Kommunen durch die transparente Aufbereitung von relevanten Vorschriften und Auslegungsgrundsätzen zu unterstützen.

Regulierung von Wasserstoffnetzen zügig auf den Weg bringen

Für den angestrebten Markthochlauf sollten die derzeitigen Einspeiseregulungen im Energiewirtschaftsgesetz bzw. in der Gasnetzzugangsverordnung für Wasserstoff überprüft und ggf. erweitert werden. Ein am 10. Februar 2021 veröffentlichter Gesetzentwurf zur EnWG-Novelle sieht vor, dass „Wasserstoffnetze“ als eigenständiger Begriff im EnWG definiert werden. Dabei soll eine Opt-In-Regelung gelten, bei der jeder Betreiber von Wasserstoffleitungen selbst entscheiden kann, ob er sich der Regulierung unterwerfen oder unreguliert bleiben möchte. Diese getrennte Betrachtung von Erdgas- und Wasserstoffnetzen erhöht jedoch den Bedarf zur Erarbeitung neuer Regulierung und führt zu Umstellungsaufwand bei den Netzbetreibern. Alternativ sollte geprüft werden, ob nicht über eine Ausweitung des bestehenden und erprobten Regulierungsrahmens für Erdgasnetze auf Wasserstoff eine zügigere und einfachere Lösung erreicht werden kann.

Informationsaustausch stärken

Nordrhein-Westfalen zeichnet sich u. a. durch eine leistungsstarke Forschungslandschaft aus. Die zahlreichen Institute, die bereits zu den verschiedenen Wasserstofftechnologien forschen, sollten im Bereich Forschung und Innovation gestärkt werden, um weitere Forschungsfelder zu erschließen. Darüber hinaus sollten Querschnittsbereiche in der Energie- und Umweltwirtschaft enger verzahnt werden. Eine wichtige Grundlage für die Steuerung des Markthochlaufs ist zudem eine verlässliche Zahlenbasis hinsichtlich des energetisch und stofflich genutzten Wasserstoffs in Deutschlands. Hier sollten zentrale Kennzahlen wie jährliche Wasserstoffproduktion und -verbrauch systematisch erfasst, in die Energiestatistiken aufgenommen und zeitnah publiziert werden.

ENDNOTEN

- ¹ BMWI auf Basis Arbeitsgruppe Erneuerbare-Energien-Statistik (AGEE-Stat); Stand Februar 2020 und B E T-Energiemarktmodelle
- ² §1 des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG)
- ³ Die verfügbaren Daten zur Aufteilung des bisherigen Verbrauchs auf verschiedene Industriezweige sind veraltet und beruhen häufig auf Schätzungen. Dena (2016): Potenzialatlas Power to Gas, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9144_Studie_Potenzialatlas_Power_to_Gas.pdf [14.01.2021].
- ⁴ Adolf, Jörg et al. (2017): Wasserstoff – Energie der Zukunft?, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6893/file/6893_Arnold.pdf [08.02.2021].
- ⁵ Auskunft von H₂-Mobility.
- ⁶ NOW GmbH: H₂ Mobility – Mission Infrastruktur, <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/h2mobility/> [03.12.2020].
- ⁷ Eigene Darstellung auf Basis von H2Connect: H₂-App, <https://app.h2connect.energy/map> [13.01.2021].
- ⁸ Eigene Darstellung auf Basis von Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf [01.02.2021]. Die Szenarien berücksichtigen nicht die bereits heute verwendeten 55 bzw. 57 TWh Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Industrie.
- ⁹ Der World Energy Outlook geht für Industrieländer im Szenario „Sustainable Development“ bis 2040 von einem Preis von 140 Euro pro Tonne CO₂ aus. IEA (2020): World Energy Outlook.
- ¹⁰ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie, [01.02.2021].
- ¹¹ Menn, Andreas (2020): Wasserstoff: Das Wettrennen um das neue Öl in Grafiken erklärt, <https://www.wiwo.de/technologie/forschung/infografik-wasserstoff-das-wettrennen-um-das-neue-oel-in-grafiken-erklart/26628002.html> [08.02.2021].
- ¹² European Commission (2020): A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe, [01.02.2021].
- ¹³ Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung & Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020): Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen, https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Da-teien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barriere-frei.pdf [01.02.2021].
- ¹⁴ Deutsche Energie-Agentur (2018): Erdölraffinerie, https://www.pwertogas.info/fileadmin/Power_To_Gas/Dokumente/Factsheets/DENA-Factsheet8_Eroelraffinerie.pdf [02.02.2021].
- ¹⁵ Die Angaben zum heutigen Wasserstoffverbrauch sind widersprüchlich. Während die Nationale Wasserstoffstrategie von 55 TWh/a spricht, nennen andere Quellen einen Wert von 57 TWh/a. Grafik auf Basis von: Dena (2016): Potenzialatlas Power to Gas, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9144_Studie_Potenzialatlas_Power_to_Gas.pdf [14.01.2021]. Daten von 2014, Datenlage insgesamt schwierig.
- ¹⁶ Kosten aus: Greenpeace Energy EG (2020): Blauer Wasserstoff Lösung oder Problem der Energiewende?, https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/user_upload/broschuere-wasserstoff.pdf [01.02.2021].
- ¹⁷ Conrads (2020): Post-EEG: aktueller Stand zum Weiterbetrieb von EE-Anlagen nach Auslaufen der gesetzlichen Vergütung, <https://www.energieagentur.nrw/blogs/erneuerbare/beitraege/fachbeitrag-post-eeg-aktueller-stand-zum-weiterbetrieb-von-ee-anlagen-nach-auslaufen-der-gesetzlichen-verguetung/> [01.02.2021].
- ¹⁸ Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung & Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020): Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen, https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Da-teien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barriere-frei.pdf [01.02.2021].
- ¹⁹ Greenpeace Energy EG (2020): Blauer Wasserstoff Lösung oder Problem der Energiewende?, https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/user_upload/broschuere-wasserstoff.pdf [01.02.2021].
- ²⁰ Energate (2020): Agar: "Türkiser Wasserstoff nur halb so teuer wie grüner", <https://www.energate-messenger.de/news/201843/agar-tuerkiser-wasserstoff-nur-halb-so-teuer-wie-gruener-> [01.02.2021].
- ²¹ University of Oxford (2020): Turning plastic waste into hydrogen and high-value carbons, <https://www.ox.ac.uk/news/2020-10-13-turning-plastic-waste-hydrogen-and-high-value-carbons> [01.02.2021] und Energate (2020): Bock: "Aus einer Tonne Abfall lassen sich 140 Kilogramm Wasserstoff gewinnen", <https://www.energate-messenger.de/news/202600/bock-aus-einer-tonne-abfall-lassen-sich-140-kilogramm-wasserstoff-gewinnen-> [01.02.2021].
- ²² Wiedemann (2020): Wasserstofftransport per Schiene unproblematisch, <https://www.energate-messenger.de/news/204548/wasserstofftransport-per-schiene-unproblematisch> [01.02.2021].
- ²³ En-former (2020): Stapellauf für Japans ambitionierte Wasserstoff-Strategie, <https://www.en-former.com/japan-weltweit-erster-tanker-fuer-wasserstoff-als-teil-ambitionierter-strategie/> [01.02.2021]; Kawasaki Heavy Industries (2020): Kawasaki Hydrogen Road, https://global.kawasaki.com/en/corp/sustainability/report/2020/pdf/20_houkokusyo_03.pdf [02.02.2021] und Koller, Peter (2020): Ein Schiff wird kommen..., <https://www.energie-und-management.de/nachrichten/detail/ein-schiff-wird-kommen-140221> [02.02.2021].
- ²⁴ Lange, Ronny et al. (2019): Bestands- und Ereignisdatenerfassung Gas – Ergebnisse aus den Jahren 2011 bis 2017, <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/sicherheit/energie-wasser-praxis-dvgw-bestands-ereignisdatenerfassung-gas.pdf> [22.02.2021].
- ²⁵ Wang et al. (2020): European Hydrogen Backbone, https://gasforclimate2050.eu/sdm_downloads/european-hydrogen-backbone/ [22.02.2021].
- ²⁶ DVGW (2019): Mehr Wasserstoff technisch sicher verankern, <https://www.dvgw.de/der-dvgw/aktuelles/presse/presseinformationen/dvgw-presseinformation-vom-09042019-mehr-wasserstoff-technisch-sicher-verankern/> [01.02.2021].
- ²⁷ DVGW (2013): Management Summary Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz, https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g1_07_10.pdf [01.02.2021].
- ²⁸ FZJ Begleitstudie und EWI.
- ²⁹ AIR LIQUIDE (2021): Wasserstoffanlagen, <https://industrie.airliquide.de/wasserstoffanlagen> [18.03.2021].
- ³⁰ FNB Gas (2020): Fernleitungsnetzbetreiber veröffentlichen H₂-Startnetz 2030, <https://www.fnb-gas.de/fnb-gas/veroeffentlichungen/pressemitteilungen/fernleitungsnetzbetreiber-veroeffentlichen-h2-startnetz-2030/> [01.02.2021].
- ³¹ Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung & Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020): Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen, https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Da-teien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barriere-frei.pdf [01.02.2021].

- ³² Shell Deutschland Oil GmbH (2017): Shell Wasserstoff-Studie: Energie der Zukunft?, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6647/file/6647_Wasserstoff-Studie.pdf [01.02.2021].
- ³³ Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung & Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020): Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen, https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Dateten/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf [01.02.2021] nach Daten des Forschungszentrum Jülich (FZJ) und des Verbandes der Chemischen Industrie (VCI).
- ³⁴ Greenpeace Energy EG (2020): Blauer Wasserstoff Lösung oder Problem der Energiewende?, https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/user_upload/broschuere-wasserstoff.pdf [22.02.2021].
- ³⁵ VDI/VDE (2019): Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge, <https://www.vde.com/re-source/blob/1927182/ebf217d10a1fd89769029fc2cb54d252/elektromobilitaet-studie-data.pdf> [01.02.2021].
- ³⁶ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie, [01.02.2021] und Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung & Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020): Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen, https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Dateten/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf [01.02.2021].
- ³⁷ RNZ (2020): "Wasserstoff ist der Champagner unter den Energieträgern", https://www.rnz.de/politik/hintergrund_artikel_-energie-wende-wasserstoff-ist-der-champagner-unter-den-energietaegern-_arid,520151.html [18.01.2021].
- BIZZ (2020): Wasserstoff – teurer Champagner der Energiewende, <https://bizz-energy.com/wasserstoff-der-teure-champagner-der-energie-wende> [18.01.2020].
- ³⁸ B E T (2020): Metaanalyse Zukunft Gas. – Die Szenarien berücksichtigen nicht die bereits heute verwendeten 55 TWh Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Industrie.
- ³⁹ BNEF (2020): Hydrogen, Economy Outlook, <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf> [18.01.2021] und FZJ (2020): Wissenschaftliche Begleitstudie zur Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen, https://www.in4climate.nrw.de/fileadmin/Veranstaltungen/2020/20201109_Wasserstoff-Roadmap_Duesseldorf/H2-Roadmap-NRW-wissenschaftliche-Begleitung-Vortrag-Detlef-Stolten-2020-11-09.pdf [20.01.2021].
- ⁴⁰ Tjarks, Geert (2017): PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas-Anlagen, <https://publications.rwth-aachen.de/record/689617/files/689617.pdf> [01.02.2021]. Brinner, Andreas und Hug, Wolfgang (2015): Dezentrale Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse, https://www.dlr.de/fk/Portaldata/40/Resources/dokumente/publikationen/H2Herstellung_Brinner_2002.pdf [01.02.2021].
- ⁴¹ Tjarks, Geert (2017): PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas-Anlagen, <https://publications.rwth-aachen.de/record/689617/files/689617.pdf> [01.02.2021]. Brinner, Andreas und Hug, Wolfgang (2015): Dezentrale Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse, https://www.dlr.de/fk/Portaldata/40/Resources/dokumente/publikationen/H2Herstellung_Brinner_2002.pdf [01.02.2021].
- ⁴² Energieland 2050 e.V. (2020): Treibstoff der Zukunft – Grüner Wasserstoff mobilisiert das Energieland2050, https://www.kreis-steinfurt.de/kv_steinfurt/Kreisverwaltung/C3%84mter/Amt%20f%C3%BCr%20Klimaschutz%20und%20Nachhaltigkeit/energieland2050%20e.V./Themen%20und%20Projekte/Masterplan%20Wasserstoff/1%20Feinkonzept%20Kurzfassung%20Kreis%20Steinfurt%20Wasserstoffmobilitaet.pdf [01.02.2021].
- ⁴³ Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung & Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020): Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen, https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Dateten/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf [01.02.2021].
- ⁴⁴ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie,

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20 [01.02.2021].

- ⁴⁵ Marketsteel Media GmbH (2020): Grüner Wasserstoff: Industrialisierung der Elektrolyse, <https://www.marketsteel.de/news-details/gruener-wasserstoff-industrialisierung-der-elektrolyse.html> [01.02.2021].
- ⁴⁶ BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2020): Stellungnahme zum Gesetzentwurf zur Änderung energierechtlicher Vorschriften in Bezug auf die EEG-Umlage und Wasserstoff vom 02.12.2020, https://www.bdew.de/media/documents/STN_%C3%84nderung_energierechtlicher_Vorschriften_in_Bezug_auf_die_EEG-Umlage_und_W_VXG5UsG.pdf [01.02.2021].
- ⁴⁷ Krieg, Dennis (2012): Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff, https://user.fz-juelich.de/record/136392/files/Energie&Umwelt_144.pdf [01.02.2021].
- ⁴⁸ European Hydrogen Backbone (2020): How a dedicated hydrogen infrastructure can be created; <https://guidehouse.com/insights/energy/2020/developing-europes-hydrogen-infrastructure-plan>; [04.02.2021]
- ⁴⁹ Krieg, Dennis (2012): Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff, https://user.fz-juelich.de/record/136392/files/Energie&Umwelt_144.pdf [01.02.2021].
- ⁵⁰ Get H2 Nukleus (2020): Der Startschuss für die Wasserstoffwirtschaft in Deutschland, https://www.get-h2.de/wp-content/uploads/geth2-nukleus_praesentation_200909.pdf [01.02.2021].
- ⁵¹ Krieg, Dennis (2012): Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff, https://user.fz-juelich.de/record/136392/files/Energie&Umwelt_144.pdf [01.02.2021].
- ⁵² Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Gesetz zur Umsetzung unionsrechtlicher Vorgaben und zur Regelung reiner Wasserstoffnetze im Energiewirtschaftsrecht, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Gesetz/gesetzentwurf-enwg-novelle.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [18.03.2021].
- ⁵³ DVGW (2020): H2 vor Ort, <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/h2vorort-wasserstoff-gasverteilnetz-dvgw-broschuere.pdf> [27.01.2021].
- ⁵⁴ Energieagentur NRW: Wasserstoffspeicher, Distribution, Tankstellen, https://www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle/brennstoffzelle-wasserstoff-elektromobilitaet/wasserstoffspeicher_distribution_tankstellen [01.02.2021].
- ⁵⁵ Emcel Ingenieurbüro für Brennstoffzelle, Wasserstofftechnologie und Elektromobilität (2019): Welche Möglichkeiten der Wasserstoffspeicherung gibt es?, <https://emcel.com/de/wasserstoffspeicherung/> [01.02.2021].
- ⁵⁶ TÜV Süd: Speicherung von Wasserstoff, <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff-speicherung-von-wasserstoff> [01.02.2021].
- ⁵⁷ DIHK (2020): Wasserstoff. DIHK-Faktenpapier, <https://www.dihk.de/re-source/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihk-faktenpapier-wasserstoff-data.pdf> [18.01.2021].
- ⁵⁸ H2Connect: H2-App, <https://app.h2connect.energy/map> [01.02.2021].
- ⁵⁹ NPROXX (2019): Wirtschaftsminister Andreas Pinkwart informiert sich in Jülich über die neuesten Entwicklungen in der Wasserstoffspeichertechnologie, <https://www.nproxx.com/de/auf-dem-weg-in-die-emissionsfreie-mobilitaet-der-zukunft/> [08.02.2021].
- ⁶⁰ Energieagentur NRW: Wasserstoffspeicher, Distribution, Tankstellen, <https://www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle/brennstoffzelle->

wasserstoff-elektromobilität/wasserstoffspeicher distribution tankstellen [01.02.2021].

⁶¹ North2: Kickstarting the green hydrogen economy, <https://www.north2.eu/de/> [01.02.2021].

⁶² DWV Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband (2011): Wasserstoff-Sicherheits-Kompodium, https://www.dvw-info.de/wp-content/uploads/2015/06/Wasserstoff_kompodium.pdf [18.03.2021].

⁶³ Frisch et al. (2010): Prozesswärme im Marktanreizprogramm Zwischenbericht zu Perspektivische Weiterentwicklung des Marktanreizprogramms FKZ 03MAP123, https://elib.dlr.de/82173/1/Prozessw%C3%A4rme_im_MAP.pdf [01.02.2021].

⁶⁴ Dena Deutsche Energie-Agentur GmbH (2018): Heutige Einsatzgebiete für Power Fuels Factsheet zur Anwendung von klimafreundlich erzeugten synthetischen Energieträgern, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/181123_dena_PtX-Factsheets.pdf [01.02.2021].

⁶⁵ IN4CLIMATE.NRW (2021): HyGlass, <https://www.in4climate.nrw/best-practice/2020/hyglass/> [18.03.2021].

⁶⁶ BMWi Energiedaten (2020): Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des BMWi, <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html> [02.02.2021].

⁶⁷ Agentur für erneuerbare Energien (2017): Renew's Kompakt 38 - Erneuerbare Energie für die Industrie: Prozesswärme aus Bioenergie sorgt für Unabhängigkeit und Klimaschutz, https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/1301.Renews_Kompakt_Prozesswaerme.pdf [02.02.2021].

⁶⁸ Forschungszentrum Jülich GmbH (2020): Wege für die Energiewende, https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/ Documents/Downloads/transformationStrategies2050_studyfinalreport_2019-10-31.pdf.pdf;jsessionid=7ACE6558072FBC8FFA96F7BFB62E6B92? blob=publicationFile [01.02.2021].

⁶⁹ Projektträger Jülich (2020): Förderauftrag „Technologieoffensive Wasserstoff“, https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/6867/live/lw_bekdoc/f-C3-B6rderauftrag_technologieoffensive_wasserstoff.pdf [25.01.2021].

⁷⁰ Abbildung in Anlehnung an Thyssenkrupp Steel Europe AG (2020): Deployment of hydrogen in steelmaking, Vortrag.

⁷¹ Thyssenkrupp Steel Europe (2019): Wasserstoff statt Kohle. thyssenkrupp Steel startet wegweisendes Projekt für eine klimafreundliche Stahlproduktion am Standort Duisburg, <https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/newsroom/pressemitteilungen/wasserstoff-statt-kohle.html> [01.02.2021].

⁷² Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (2020): 2019 produzierte die NRW-Industrie Stahlbleche im Wert von über 11 Milliarden Euro, <https://www.it.nrw/2019-produzierte-die-nrw-industrie-stahlbleche-im-wert-von-ueber-11-milliarden-euro-101407> [01.02.2021].

⁷³ Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (2020): Bruttoinlandsprodukt (BIP) 2010 – 2019 <https://www.it.nrw/statistik/eckdaten/bruttoinlandsprodukt-bip-2116> [01.02.2021].

⁷⁴ CO₂-Bilanz Stahl: Salzgitter AG, https://www.salzgitter-ag.com/fileadmin/footage/MEDIA/SZAG/corporate_responsibility/umwelt_und_energie/studie_co2_bilanz_stahl.pdf [18.03.2021].

⁷⁵ IN4climate.NRW GmbH (2019): Land fördert im Rahmen von IN4climate.NRW Projekt zur klimafreundlichen Stahlherstellung mit 1,6 Millionen Euro, <https://www.in4climate.nrw/nachrichten/details/land-foerdert-im-rahmen-von-in4climatenrw-projekt-zur-klimafreundlichen-stahlherstellung-mit-16-millionen-euro/> [01.02.2021].

⁷⁶ BMF (2021): Deutscher Aufbau- und Resilienzplan (Entwurf), https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Broschueren_Bestellservice/2021-01-13-deutscher-aufbau-und-resilienzplan.pdf? blob=publicationFile&v=7 [21.01.2021].

⁷⁷ KEI (2020): Förderprogramm „Dekarbonisierung in der Industrie“, <https://www.klimaschutz->

[industrial.de/fileadmin/user_upload/KEI_download_pdf/20200709_Hinweisblatt_Foerderprogramm_Foerderfenster.pdf](https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/user_upload/KEI_download_pdf/20200709_Hinweisblatt_Foerderprogramm_Foerderfenster.pdf) [21.01.2021].

⁷⁸ Projektträger Jülich (2020): Förderauftrag „Technologieoffensive Wasserstoff“, https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/6867/live/lw_bekdoc/f-C3-B6rderauftrag_technologieoffensive_wasserstoff.pdf [25.01.2021].

⁷⁹ Geres et al. (2019): Roadmap Chemie 2050, <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf> [01.02.2021].

⁸⁰ Spitzencluster für industrielle Innovationen: P2X Herne Grünen Strom effizient nutzen, <https://www.spin.ruhr/produkte-ausgrunstrom/> [01.02.2021].

⁸¹ GET H2: GET H2 Nukleus H₂-Infrastruktur Lingen-Gelsenkirchen, <https://www.get-h2.de/projekt-nukleus/> [01.02.2021].

⁸² REFHYNE: Clean Refinery Hydrogen for Europe, <https://refhyne.eu/> [01.02.2021].

⁸³ Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen: Chemische Industrie, <https://www.it.nrw/statistik/wirtschaft-und-umwelt/industrie/chemische-industrie> [01.02.2021].

⁸⁴ Enquetekommission Landtag NRW (2015): Bericht - Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren, https://www.landtag.nrw.de/files/live/sites/landtag/files/WWW/I.A.1/EK/16.WP/EK_II/MMD16-8500_Bericht.pdf [01.02.2021].

⁸⁵ KEI (2020): Förderprogramm „Dekarbonisierung in der Industrie“, https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/user_upload/KEI_download_pdf/20200709_Hinweisblatt_Foerderprogramm_Foerderfenster.pdf [21.01.2021].

⁸⁶ Projektträger Jülich (2020): Förderauftrag „Technologieoffensive Wasserstoff“, https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/6867/live/lw_bekdoc/f-C3-B6rderauftrag_technologieoffensive_wasserstoff.pdf [25.01.2021].

⁸⁷ RVK Regionalverkehr Köln GmbH: Wasserstoff für den ÖPNV, <https://www.rvk.de/projekt-null-emission/die-brennstoffzellen-hybridbusse> [01.02.2021].

⁸⁸ Interreg North-West Europe: H2-Share: Reducing emissions for heavy-duty transport in NWE through hydrogen solutions, <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/h2share-hydrogen-solutions-for-heavy-duty-transport/#tab-1> [01.02.2021].

⁸⁹ ABC Logistik GmbH (2020): Emissionsfreie Innenstadt – Smarte Technologie und Wasserstoff, <https://www.abc-logistik.com/news/emissionsfreie-innenstadt-smarte-technologie-und-wasserstoff/> [01.02.2021].

⁹⁰ Nationale Plattform Mobilität, Arbeitsgruppe 2 (2020): 2. Kurzbericht, https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/06/NPM-AG-2_Einsatzm%C3%B6glichkeiten-unter-realen-Rahmenbedingungen.pdf [01.02.2021].

⁹¹ Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung & Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020): Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen, https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Datien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf [01.02.2021].

⁹² Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung & Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020): Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen, https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Datien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf [01.02.2021].

⁹³ Reinhard Rauch/Hermann Hofbauer: Biokerosene Production from Bio-Chemical and Thermo-Chemical Biomass Conversion and Subsequent Fischer-Tropsch Synthesis; 2018.

⁹⁴ Loewert et al. (2020): Bridging the gap between industry and synchrotron: an operando study at 30 bar over 300 h during Fischer–

Tropsch synthesis, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/re/c9re00493a> [01.02.2021].

⁹⁵ MefCO₂: Project Progress, http://www.mefco2.eu/project_progress.php [01.02.2021].

⁹⁶ Energieagentur NRW: Kraftstoffe und erneuerbare Energien, https://www.energieagentur.nrw/mobilitaet/kraftstoffe_und_erneuerbare_energien [01.02.2021].

⁹⁷ Deutscher Bundestag (2020): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Till Mansmann, Alexander Graf Lambsdorff, Olaf in der Beek, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP E-Fuels und synthetische Kraftstoffe für eine effiziente Klimapolitik 19/16829, <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/168/1916829.pdf> [01.02.2021].

⁹⁸ Projektträger Jülich (2020): Förderaufruf „Technologieoffensive Wasserstoff“, https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/6867/live/lw_bekdoc/f-C3-B6rderaufruf_technologieoffensive_wasserstoff.pdf [25.01.2021].

⁹⁹ Deter, Alfons (2020): Bundesregierung setzt beim Klimaschutz auch auf synthetischen Kraftstoff, <https://www.topagrar.com/energie/news/bundesregierung-setzt-beim-klimaschutz-auch-auf-synthetischen-kraftstoff-12437761.html> [27.01.2021].

¹⁰⁰ ENCON.Europe GmbH (2018): Potentialatlas für Wasserstoff Analyse des Marktpotentials für Wasserstoff, der mit erneuerbaren Strom hergestellt wird, im Raffineriesektor und im zukünftigen Mobilitätssektor, <https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2018/04/Potentialstudie-f%C3%BCr-gr%C3%BCnen-Wasserstoff-in-Raffinerien.pdf> [01.02.2021].

¹⁰¹ Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: Bauen und Wohnen, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimafreundlich-wohnen-1672900> [01.02.2021].

¹⁰² U.S. Department of Energy (2015): Fuel Cells, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/fcto_fuel_cells_fact_sheet.pdf [01.02.2021] und Energieagentur NRW: Brennstoffzellentypen und ihr Entwicklungsstand, <https://www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle/brennstoffzelle-wasserstoff-elektromobilitaet/brennstoffzellentypen> [01.02.2021].

¹⁰³ Energieagentur NRW: KWK macht Schule in Iserloh (2018), http://energieatlas.nrw.de/database/data/datainfpool/Projektblatt_Iserlohn.pdf?ga=2.107988738.108210961.1610352926-605265240.1610352926 [01.02.2021].

¹⁰⁴ SWK Energie GmbH: Mehrfamilienhaus in Krefeld-Oppum, <http://www.kwk-innonet.de/kwk-modellkommune/forschung/erstanlagen/mehrfamilienhaus-in-krefeld-oppum.html> [01.02.2021].

¹⁰⁵ VDI Fachmedien GmbH & Co. KG (2017): Brennstoffzellenpotenzial im Gewerbe nutzen, <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bwk/energieversorgung/brennstoffzellenpotenzial-im-gewerbe-nutzen/> [02.02.2021].

¹⁰⁶ Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Treibhausgas-Emissionsinventar Nordrhein-Westfalen 2018/2019, <https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaschutz/treibhausgas-emissionsinventar> [01.02.2021]

¹⁰⁷ Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2020): Bauen und Wohnen, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimafreundliches-zuhause-1792146> [01.02.2021].

¹⁰⁸ Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung & Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020): Wasserstoff-Roadmap

Nordrhein-Westfalen, https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Datien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf [01.02.2021].

¹⁰⁹ Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG), <https://www.gesetze-im-inter-net.de/geg/GEG.pdf> [01.02.2020].

¹¹⁰ 2G Energy AG: 2G Wasserstoff BHKW, <https://www.2-g.com/de/wasserstoff-bhkw/> [01.02.2021] und Greenhouse Media GmbH (2018): Lohnt sich ein Brennstoffzellen-BHKW?, <https://www.energie-experten.org/heizung/blockheizkraftwerk-bhkw/technik/brennstoffzellen-bhkw> [01.02.2021].

¹¹¹ Haake (2019): Wasserstoff-BHKW vervollständigt Speicherkette, <https://www.energie.de/euroheatpower/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/wasserstoff-bhkw-vervollstaendigt-speicherkette> [01.02.2021] und 2G Energy AG: Städtische Betriebe Haßfurt GmbH, <https://www.2-g.com/de/referenzen/?wdbBedingung%5B2%5D%5B%5D=&wdbBedingung%5B4%5D%5B%5D=Wasserstoff&wdbBedingung%5B6%5D%5B%5D=&blSubmit=Auswahl+anzeigen#reference-filter> [01.02.2021].

¹¹² Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Treibhausgas-Emissionsinventar Nordrhein-Westfalen 2018/2019, <https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaschutz/treibhausgas-emissionsinventar> [01.02.2021].

¹¹³ Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung & Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020): Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen, https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Datien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf [01.02.2021].

¹¹⁴ Stolten et al. (2020): Wissenschaftliche Begleitstudie zur Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen. https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Veranstaltungen/2020/20201109_Wasserstoff-Roadmap_Duesseldorf/H2-Roadmap-NRW-wissenschaftliche-Begleitung-Vortrag-Detlef-Stolten-2020-11-09.pdf [01.02.2021].

¹¹⁵ Wissenschaftliche Begleitstudie H₂-Roadmap NRW.

¹¹⁶ Energieatlas NRW (2021): Erneuerbare Energien im Stromsektor, https://www.energieatlas.nrw.de/energiestatistik/Pages/Content.aspx?topic=3&subtopic=2#Chart3_2_2Anchor [27.01.2021].

Impressum

B E T Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH
Impulspapier beauftragt von IHK NRW

Alfonsstraße 44 | D-52070 Aachen
Telefon: +49 241 47062-0 | Telefax: +49 241 47062-600 |
www.bet-energie.de | info@bet-energie.de

Geschäftsführer:

Dr. Alexander Kox | Dr. Olaf Unruh

Sitz der Gesellschaft: Aachen |
Registergericht: Aachen | Handelsregister: HRB 5731 |
USt-IdNr.: DE161524830