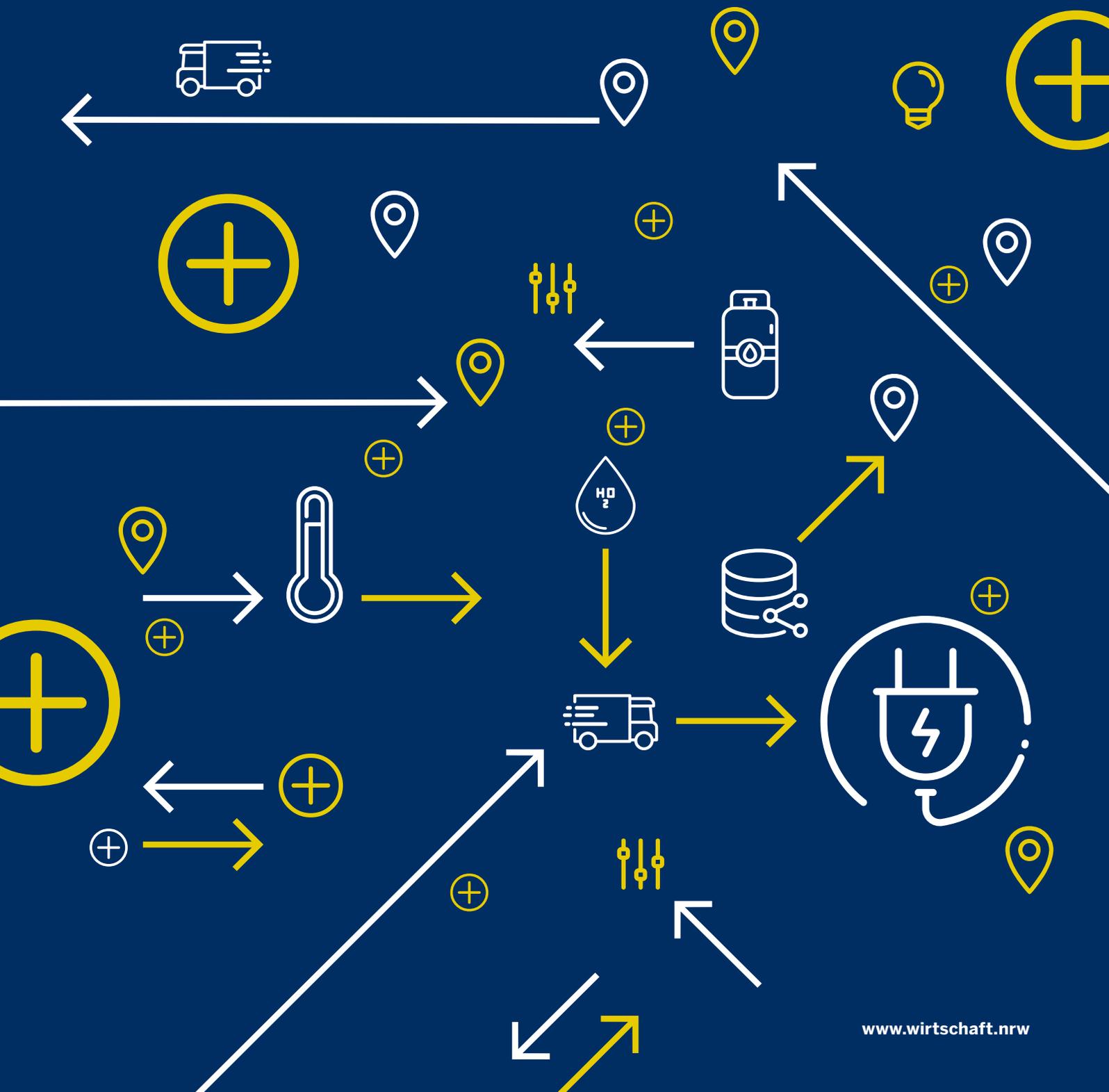




Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen





**„Aufbauend auf schon
gestarteten Wasserstoff-
Pilotvorhaben wollen wir in
den nächsten zehn Jahren
die ersten Großanlagen
in der Industrie in Betrieb
nehmen.**



**Wir wollen Elektrolyseure
im Gigawattmaßstab
aufbauen und auch die
ersten großen Fahrzeug-
flotten auf Wasserstoff
umstellen.“**



Prof. Dr. Andreas Pinkwart

Minister für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie



Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen



Liebe Leserinnen und Leser,

ein kleines Molekül kann nun dabei helfen, die großen Herausforderungen im Klimaschutz zu bewältigen. Wasserstoff hat das Potenzial in allen Sektoren zum Einsatz zu kommen. Industrieprozesse können mithilfe von Wasserstoff klimaneutral werden, Brennstoffzellenfahrzeuge können emissionsfrei unterwegs sein und auch unser Strom- und Wärmebedarf lässt sich mithilfe dieses Moleküls klimafreundlich gestalten.

Wasserstoff bietet riesige Chancen für Nordrhein-Westfalen: Richtig und konsequent eingesetzt, können wir damit in Zukunft ein Viertel unserer heutigen CO₂-Emissionen einsparen. Auch die Wirtschaft kann hiervon profitieren. Technologische Innovationen, Exportpotenziale, neue hochqualifizierte Arbeitsplätze: die Möglichkeiten sind so vielfältig wie Wasserstoff selbst.

Genau deshalb legen wir jetzt richtig los. Aufbauend auf schon gestarteten Wasserstoff-Pilotvorhaben wollen wir in den nächsten zehn Jahren die ersten Großanlagen in der Industrie in Betrieb nehmen. Wir wollen Elektrolyseure im Gigawattmaßstab aufbauen und auch die ersten großen Fahrzeugflotten auf Wasserstoff umstellen.

Uns ist allerdings auch klar, dass der zukünftige Energie- und Rohstoffbedarf so groß sein wird, dass unsere heimischen Potenziale hierfür nicht ausreichen. Wir gehen deshalb den Weg der starken Partnerschaften. Erste Kooperationen haben wir bereits begonnen, weitere werden folgen.

Diese Wasserstoff Roadmap ist unsere Einladung an Sie, mehr über dieses kleine Molekül, in dem so viel Potenzial steckt, zu erfahren. Wir zeigen in der Roadmap, welche Herausforderungen bestehen, wo die großen Chancen liegen und wie der Markthochlauf jetzt gelingen kann. Ich lade Sie ganz herzlich ein, mit uns zusammen diese Herausforderungen anzugehen und die ersten Schritte in eine Wasserstoffwirtschaft zu gehen. Gemeinsam können wir das erreichen, was Jules Verne schon im 19. Jahrhundert beschrieben hat: Wasser wird eines Tages als Brennstoff benutzt werden und auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern. Ich wünsche Ihnen eine spannende und informative Lektüre!

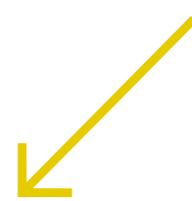
Prof. Dr. Andreas Pinkwart

Minister für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie des Landes
Nordrhein-Westfalen

Inhalt



01 06–13 Executive Summary



02 14–17 Wasserstoff: Eigenschaften, Farben und Technologien



03 18–23 Nordrhein-Westfalen: Industrie- und Wasserstoffland



21–22
3.1 Internationale Kooperationen
und Partnerschaften



23
3.2 Forschungsstandort Nordrhein-
Westfalen: so vielseitig wie
Wasserstoff selbst



04 24–29 Der europäische und nationale Rahmen





05

30–35

Wie Nordrhein-Westfalen die Wasserstoffwirtschaft startet – unsere Forderungen und Maßnahmen



06

36–65

Wasserstoff für eine klimaneutrale Wirtschaft 2050



39–54

6.1 Wo wird wie viel Wasserstoff benötigt?



55–58

6.2 Wo kann der Wasserstoff herkommen?



59–65

6.3 Welche Infrastrukturmaßnahmen sind notwendig?



07

66–70

Brennstoffzelle, Elektrolyse und Co.: Chancen für nachhaltige Wertschöpfung



71 **Ausblick**

72 **Quellenverzeichnis**

74 **Impressum**

01

06–13

Executive Summary



Wasserstoff ist zwar das kleinste Element, aber das entscheidende für das Erreichen unserer Klimaschutzziele. Für einen erfolgreichen Einstieg in eine Wasserstoffwirtschaft braucht es die richtigen Voraussetzungen und klare, ambitionierte Zielmarken. Gelingt der Einstieg, kann Nord-West Europa aufgrund seiner weltweit einzigartigen Voraussetzungen zum Kristallisationspunkt einer globalen Entwicklung werden.



Nordrhein-Westfalen zeigt mit der hier vorliegenden Wasserstoff Roadmap, dass das Erreichen der Pariser Klimaschutzziele und die Stärkung des Wirtschafts- und Industriestandortes Hand in Hand gehen können. Ein Viertel der aktuellen CO₂-Emissionen in Nordrhein-Westfalen kann allein durch Wasserstoff eingespart werden. Zahlreiche Studien belegen, dass in einem volkswirtschaftlich kosteneffizienten und klimaneutralen Energiesystem Wasserstoff eine tragende Rolle spielt. Die Bandbreiten reichen dabei je nach Szenario von 250 bis 800 Terawattstunden (TWh) Wasserstoffbedarf pro Jahr in Deutschland. Wasserstoff ist dabei für viele Prozesse der energieintensiven Industrie zwingend notwendig. Außerdem wird zukünftig in der Mobilität, wie zum Beispiel in Bussen oder Lkw, und im Energiebereich, beispielsweise in Gasturbinen, Wasserstoffbedarf erwartet. Insbesondere für eine im internationalen Wettbewerb stehende energieintensive Industrie bedarf es dabei großer Mengen Wasserstoff, die verlässlich und zu global wettbewerbs-

fähigen Preisen bereitgestellt werden müssen, um den Industrie- und Wirtschaftsstandort Nordrhein-Westfalen zukunftsfähig auszurichten.

Wir wollen aber mit Wasserstoff nicht nur CO₂-Emissionen reduzieren, sondern auch die mit Wasserstoff verbundenen wirtschaftlichen Chancen nutzen, um zukunftsfähige Arbeitsplätze und Wertschöpfung in Nordrhein-Westfalen zu erhalten und auszubauen. Die Chancen ergeben sich aus der Vielfalt der mit Wasserstoff verbundenen Technologien, die entwickelt und produziert werden müssen. Dabei geht es nicht nur um Elektrolyseure und Brennstoffzellen, sondern auch um wasserstoffkompatible Drucktanks, Kompressoren, Gasturbinen, Pipelines, Ventile, Sensoren, usw. Hieraus können sich neue Märkte und Exportchancen für Nordrhein-Westfalen entwickeln. Aber auch die Sicherung der energieintensiven Industrie wird von der Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft abhängen.

Voraussetzungen für die Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft

1. Internationale Märkte für Wasserstoff und Power-to-Liquids

Die Analysen des Forschungszentrums Jülich (FZJ), die für diese Roadmap durchgeführt wurden, zeigen, dass mittel- und langfristig eine sichere und kosteneffiziente Energieversorgung in Deutschland und Nordrhein-Westfalen nur mit erheblichen Importmengen zu erreichen ist. Für Deutschland summiert sich der Bedarf an Wasserstoff und flüssigen Kraft- und Rohstoffen (Power-to-Liquids) bis zum Jahr 2050 auf knapp 900 TWh pro Jahr (Abbildung 1). Etwa 75 Prozent dieser Nachfrage wird dabei voraussichtlich über Importe abgedeckt. Nordrhein-Westfalen hat hier eine noch höhere Importquote von knapp 90 Prozent, wodurch deutlich wird, dass wir unseren Energie- und Rohstoffbedarf für eine klimaneutrale Wirtschaft nicht allein durch die hiesigen erneuerbaren Kapazitäten decken können. Nordrhein-Westfalen ist und bleibt Energieimportland. Der lokale Wasserstoffbedarf Nordrhein-Westfalens beläuft sich nach Berechnungen des FZJ im Jahr 2050 auf insgesamt 104 TWh pro Jahr, wovon etwa 18 TWh hier vor Ort erzeugt

werden (Abbildung 2). Der größte Teil der nordrhein-westfälischen Nachfrage geht mit etwa 42 TWh pro Jahr auf den Industriesektor zurück. Mit 33 bzw. 26 TWh pro Jahr spielen aber auch Verkehr und Rückverstromung eine wichtige Rolle.

Aufgrund dieser Deckungslücke wollen wir in den nächsten Jahren den Aufbau internationaler Partnerschaften gezielt in den Fokus nehmen, um den steigenden Bedarf an Wasserstoff bedienen zu können. Als mögliche Exportländer kommen die europäischen Nordseestaaten, die bisherigen Exportländer fossiler Kraftstoffe oder auch neue Regionen, wie z. B. Nordafrika, in Frage. Übergreifend wird aber auch die Entwicklung eines mindestens europäischen Marktes für international handelbare, klimaneutrale Rohstoffe sehr wichtig werden, um die Bedarfe in Europa decken zu können. Diese Entwicklungsaufgabe des Bundes und der Europäischen Union (EU) wird Nordrhein-Westfalen unterstützen, so wie wir auch heute bereits eine maßgebliche Rolle als Verbraucher und Verteilerdrehzscheibe, zum Beispiel für Erdgas, spielen.

Abbildung 1: Wasserstoff und Power-to-Liquid Versorgung in Deutschland im Jahr 2050 in TWh pro Jahr

Quelle: Begleitstudie FZJ

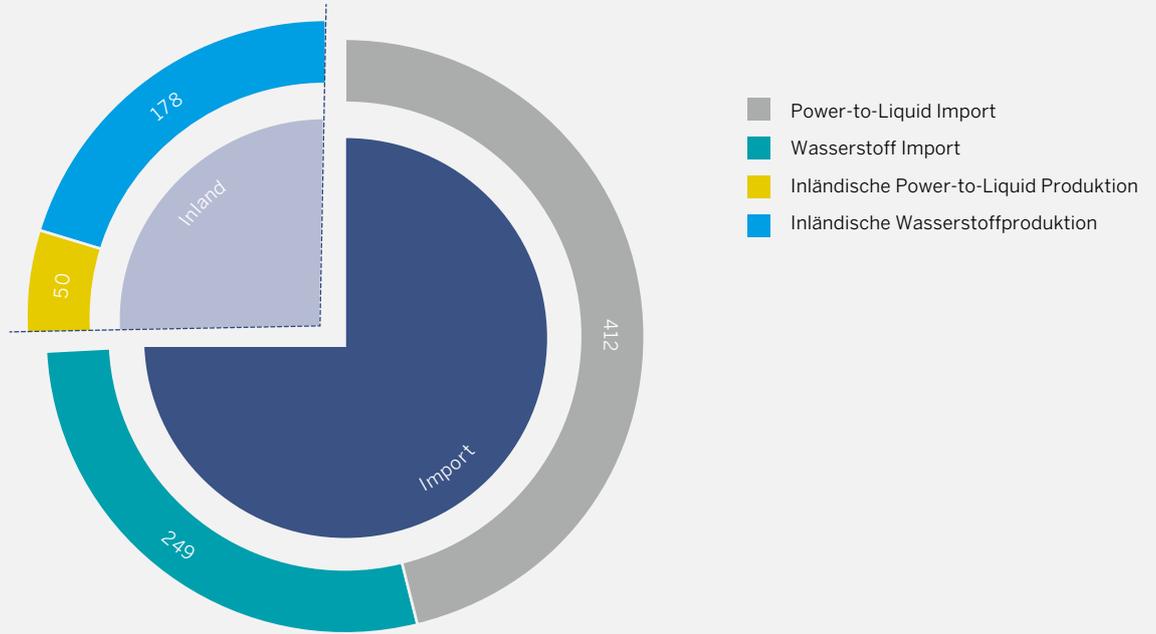
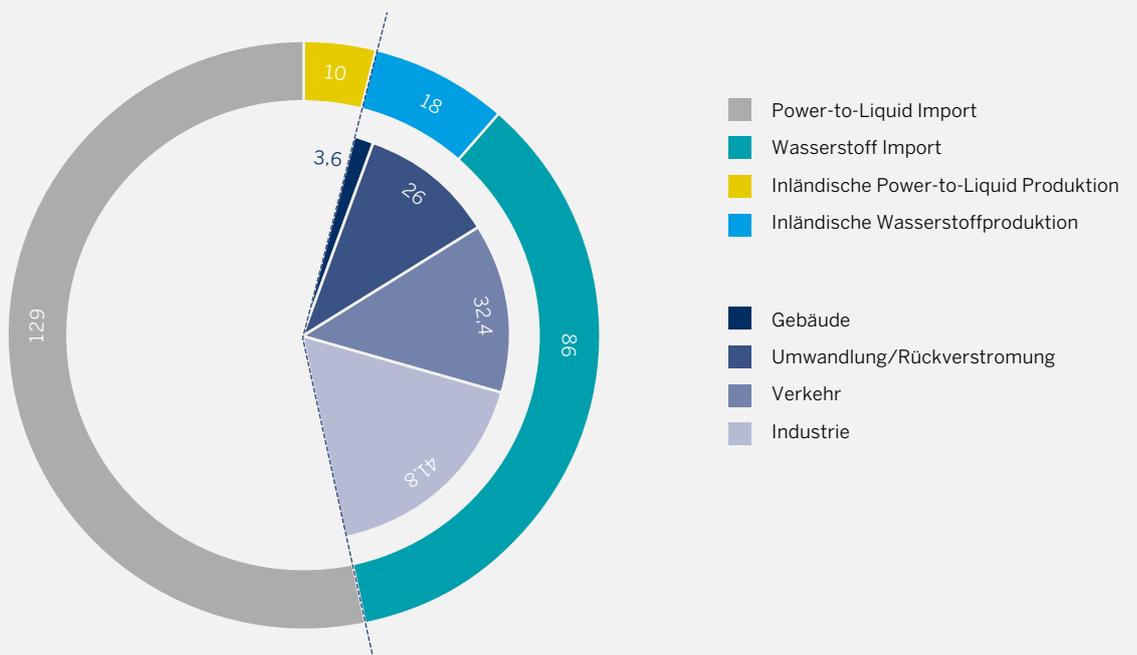


Abbildung 2: Wasserstoff- und Power-to-Liquid Versorgung sowie Einsatz von Wasserstoff nach Sektoren in NRW im Jahr 2050 in TWh pro Jahr

Quelle: Begleitstudie FZJ und eigene Abschätzung



2. Wasserstoffinfrastruktur schnell und kosteneffizient aufbauen

Die Energiewende benötigt neue Infrastrukturen. Von zentraler Bedeutung ist dabei der rasche Aufbau von Wasserstofftransportnetzen, die schnellstmöglich und technologieoffen durch den Gesetzgeber in das Energiewirtschaftsgesetz aufgenommen werden müssen. Die Anpassung des Rechtsrahmens sollte kurzfristig und noch in dieser Legislaturperiode angestoßen werden. Wir unterstützen ausdrücklich die Grüngasvariante im Netzentwicklungsplan Gas 2030 und damit den Aufbau eines circa 1.300 Kilometer langen Wasserstoffnetzes bis 2030. Die Analysen des FZJ haben deutlich hervorgehoben, dass die Um- bzw. Weiternutzung der bestehenden Infrastrukturen entscheidend zu einer kosteneffizienten und vor allem auch zeitnahen Transformation beiträgt.

Nordrhein-Westfalen arbeitet schon heute am Markthochlauf der Wasserstoff-Technologien und wird seine Aktivitäten verstärken

Nordrhein-Westfalen arbeitet schon heute intensiv daran, die Voraussetzungen für die Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft zu schaffen und wird seine Aktivitäten insbesondere auf den nachfolgend genannten Handlungsfeldern verstärken. Wir haben uns für die einzelnen Sektoren konkrete Ziele vorgenommen und wollen mit den beteiligten Akteuren daran arbeiten, diese Ziele zu erreichen.

Nordrhein-Westfalen-Zielmarken 2025:

- ⌚ Industrie
 - Erste großtechnische Direktreduktionsanlage zur Erzeugung von Stahl auf Basis von Wasserstoff am Standort Duisburg
 - Power-to-Liquid Demonstrationsanlage zur Herstellung synthetischer Kraft- und Rohstoffe mit einer Kapazität von mehreren 100 Tonnen pro Tag
 - Erste großindustrielle Anlagen zur klimaneutralen Ammoniak- und Methanolsynthese
 - Test- und Pilotanlage zur pyrolytischen Herstellung von Wasserstoff

- ⌚ Mobilität
 - Mehr als 400 Brennstoffzellen-Lkw
 - Mindestens 20 Lkw Tankstellen
 - 60 Pkw Tankstellen
 - 500 Wasserstoff-Busse für den ÖPNV
 - Die ersten wasserstoffbetriebenen Binnenschiffe
- ⌚ Energie & Infrastruktur
 - Knapp 500 Kilometer Wasserstoffleitung in Deutschland, davon 120 Kilometer in Nordrhein-Westfalen
 - Anbindung Nordrhein-Westfalens an die ersten überregionalen Wasserstoffleitungen
 - Mehr als 100 Megawatt Elektrolyseanlagen für die industrielle Wasserstoffproduktion
 - Erdgasbasierte Strom- und Wärmeerzeuger zunehmend Richtung Wasserstoffverträglichkeit entwickeln
 - Umsetzung der Wasserstoffprojekte im Rheinischen Revier

Nordrhein-Westfalen-Zielmarken 2030:

- ⌚ Industrie:
 - Pilotanlage zur vollständigen Substitution von Erdgas durch Wasserstoff zur Wärmeerzeugung in der Glasproduktion
 - Integrierter Einsatz von synthetischen Brennstoffen und CCU in der Fliesen- und Ziegelindustrie in einer Anlage industriellen Maßstabs
 - Demonstrationsprojekt für einen mit Wasserstoff gefeuerten Drehofen in der Gießereitechnik
 - Entwicklung und Prüfung von Verfahren zum Einsatz von Wasserstoff in der Zementindustrie
 - Umsetzung der Projekte aus der Initiative „Aufbruch in die Zukunft“ von unternehmer nrw
 - Ausbau der wasserstoffbasierten Stahlherstellung
- ⌚ Mobilität:
 - 11.000 Brennstoffzellen-Lkw über 20 Tonnen
 - 200 Tankstellen für Lkw und Pkw
 - 1.000 Brennstoffzellen-Abfallsammler
 - 3.800 Brennstoffzellen Busse für den ÖPNV
- ⌚ Energie & Infrastruktur
 - 1.300 Kilometer Wasserstoffleitungen in Deutschland, hiervon 240 Kilometer in Nordrhein-Westfalen
 - Erste Investitionen in Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen auf Basis von Wasserstoff
 - 1 bis 3 Gigawatt Elektrolyseleistung in Nordrhein-Westfalen



Unsere wichtigsten Handlungsfelder auf dem Weg in die Wasserstoffwirtschaft:

→ Ausbau und Intensivierung internationaler Partnerschaften:

Wir streben den Beitritt zur europäischen Allianz für sauberen Wasserstoff (European Clean Hydrogen Alliance) an. Neben den bestehenden Kooperationsprojekten mit den Niederlanden werden wir weitere Kooperationen eingehen, um die Wasserstoffverfügbarkeit in Nordrhein-Westfalen verlässlich zu erhöhen. Darüber hinaus setzen wir uns gemeinsam mit europäischen Partnerländern für Unternehmenskonsortien ein, um beispielsweise im Rahmen des Important Project of Common European Interest (IPCEI) Investitionen nach Nordrhein-Westfalen zu holen.

→ Die Stärkung von Forschung und Innovation:

Eine Vielzahl leistungsstarker Institute mit Bezug zu den verschiedenen Wasserstofftechnologien zeichnet schon heute die Forschungslandschaft Nordrhein-Westfalens aus. Mit dem neuen Helmholtz-Cluster für nachhaltige und infrastrukturkompatible Wasserstoffwirtschaft, dem ersten Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) Testfeld in industrieller Größenordnung oder etwa dem Aufbau von Wasserstoff Start-ups wollen wir die Entwicklung weiter vorantreiben. Wir werden die bestehenden Forschungseinrichtungen auch dabei unterstützen, weitere Forschungsfelder zu erschließen.

→ Die Potenziale im Maschinen- und Anlagenbau heben:

Nordrhein-Westfalen ist Heimat unterschiedlichster Komponenten- und Systemhersteller im Bereich Wasserstofftechnologien. Angefangen von Brennstoffzellen-Systemen und Elektrolyseuren über Drucktanks, Gasturbinen, Sensoren und vielen mehr werden schon heute hochwertige Produkte in Nordrhein-Westfalen hergestellt. Durch die Umsetzung der Wasserstoffrevier-Projekte im Rheinischen Revier, den Aufbau eines Betriebsforschungszentrums für industrielle Elektrolysetechnologien im Ruhrgebiet ebenso wie viele weitere unternehmensseitige Aktivitäten im Bereich der Wasserstofftechnologie wollen wir am Standort Nordrhein-Westfalen nachhaltige Wertschöpfung stärken.

Darüber hinaus fordern wir von der Bundesregierung und der EU-Kommission:

→ Wasserstoffprojekte „ready for investment“ machen:

Anreizprogramme wie Carbon Contracts for Difference (CCfD) für industrielle Anwendungen und die Anpassung des Abgaben- und Umlagensystems müssen noch in dieser Legislaturperiode umgesetzt werden.

→ Ambitionierte Umsetzung der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (RED II):

Durch eine schnelle Umsetzung in nationales Recht kann ein wichtiger Schritt für die Skalierung der Elektrolysetechnologie erfolgen.

→ Technologieoffenheit gewährleisten:

Für einen schnellen und kosteneffizienten Markthochlauf sind grauer, blauer und türkiser Wasserstoff notwendige Übergangslösungen. Gerade in der Phase des Markthochlaufs müssen wir auf alle verfügbaren Optionen zurückgreifen können.

→ Die Transformation der energieintensiven Industrie ermöglichen:

Nur durch einen innovationsfreundlichen Investitionsrahmen und eine möglichst breit diversifizierte Importstruktur, die eine Versorgung zu international wettbewerbsfähigen Preisen ermöglicht, ist eine klimaneutrale Industrie bis 2050 möglich.

→ Europäische Standards entwickeln:

Für den internationalen Handel mit Wasserstoff und Power-to-Liquids braucht es mindestens europäisch definierte Zertifizierungs- und Herkunftsnachweissysteme.

→ Gasbasierte Versorgungssicherheit H₂-ready gestalten:

Möglichst frühzeitig muss die Weiterentwicklung der Wasserstoffverträglichkeit von Anlagen wie zum Beispiel Gasturbinen oder auch KWK-Anlagen und deren Komponenten im Sinne einer H₂-Readiness unterstützt werden.

→ Weiterentwicklung der Erdgas-speicher in Richtung Wasserstoff-speicherung unterstützen:

Durch die Weiterentwicklung in Richtung Wasserstoffspeicherung stehen Erdgasspeicherkapazitäten in Deutschland bereit, um auch weiterhin eine maßgebliche Rolle bei der sicheren und flexiblen Versorgung mit Gas zu ermöglichen. Nordrhein-Westfalen hat mit Blick auf bestehende und potentielle Lagerstätten sehr gute Voraussetzungen. Den Speichern fällt überdies zukünftig eine zusätzliche Rolle mit Blick auf die Überbrückung von Dunkelflauten und die Integration erneuerbarer Energien zu.

→ Systemübergreifende Betrachtung der Energieinfrastruktur:

Eine zukünftig integrierte Infrastrukturplanung für Strom, Erdgas und Wasserstoff muss dafür sorgen, dass sich zum Beispiel Elektrolyseur Netz- und systemdienlich in die bestehende Energieinfrastruktur einfügen.

→ Fortsetzung und Weiterentwicklung des Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie:

Insbesondere der Verkehrssektor sollte durch langfristige Förderrahmen beim Markthochlauf weiter unterstützt werden. Für den Markthochlauf braucht es eine kontinuierliche und ressourcenstarke Unterstützung.

Wir werden uns gegenüber der EU-Kommission und der Bundesregierung für die zügige Entwicklung geeigneter Rahmenbedingungen einsetzen, die zum Erfolg einer international verbundenen Wasserstoffwirtschaft beitragen. Denn wir sind davon überzeugt, dass Nordrhein-Westfalen Teil einer konzentrierten, stark vernetzten und einzigartigen Wasserstoff-Technologie-landschaft in Nord-West Europa sein kann.



Nord-West Europa hat außergewöhnliche Voraussetzungen, um zu einem Kristallisationspunkt für eine europäische Wasserstoffwirtschaft zu werden

Nord-West Europa zeichnet sich durch ein sehr gut ausgebautes und international angebundenes Energieinfrastrukturnetz mit zahlreichen Einspeisepunkten für Energieträgerimporte (zum Beispiel über Häfen) aus. Dies allein ist bereits eine sehr wichtige Ausgangsbasis für eine erfolgreiche Weiterentwicklung zu einem bedeutenden Kristallisationspunkt einer europäischen Wasserstoffwirtschaft. Begünstigend kommt hinzu, dass im Zuge der L- auf H-Gas Umstellung, die vor allem die Niederlande, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen betrifft, Erdgasleitungen frei werden, die für den Wasserstofftransport genutzt werden können. Diese Leitungen können die zukünftigen (industriellen) Verbrauchsschwerpunkte beispielsweise in der Rhein-Ruhr Region, in Lingen (oder auch Chemelot) mit den Erzeugungsschwerpunkten im Norden verbinden. Mit den Offshore-Windenergiestandorten in der europäischen Nordsee, aber auch guten Onshore-Windenergiestandorten in Norddeutschland und den Niederlanden können zukünftige Elektrolysestandorte an die Verbrauchsschwerpunkte weiter südlich angeschlossen werden. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal der Region Nord-West Europa ist das Vorhandensein enormer Energiespeicherkapazität in Form von Salzkavernen. Diese können zukünftig mit Wasserstoff gefüllt werden und so zur Integration erneuerbarer Energien und wie auch bisher zur Versorgungssicherheit gleichermaßen beitragen. Das Zusammenspiel dieser fünf Faktoren in einer räumlichen Nähe zueinander

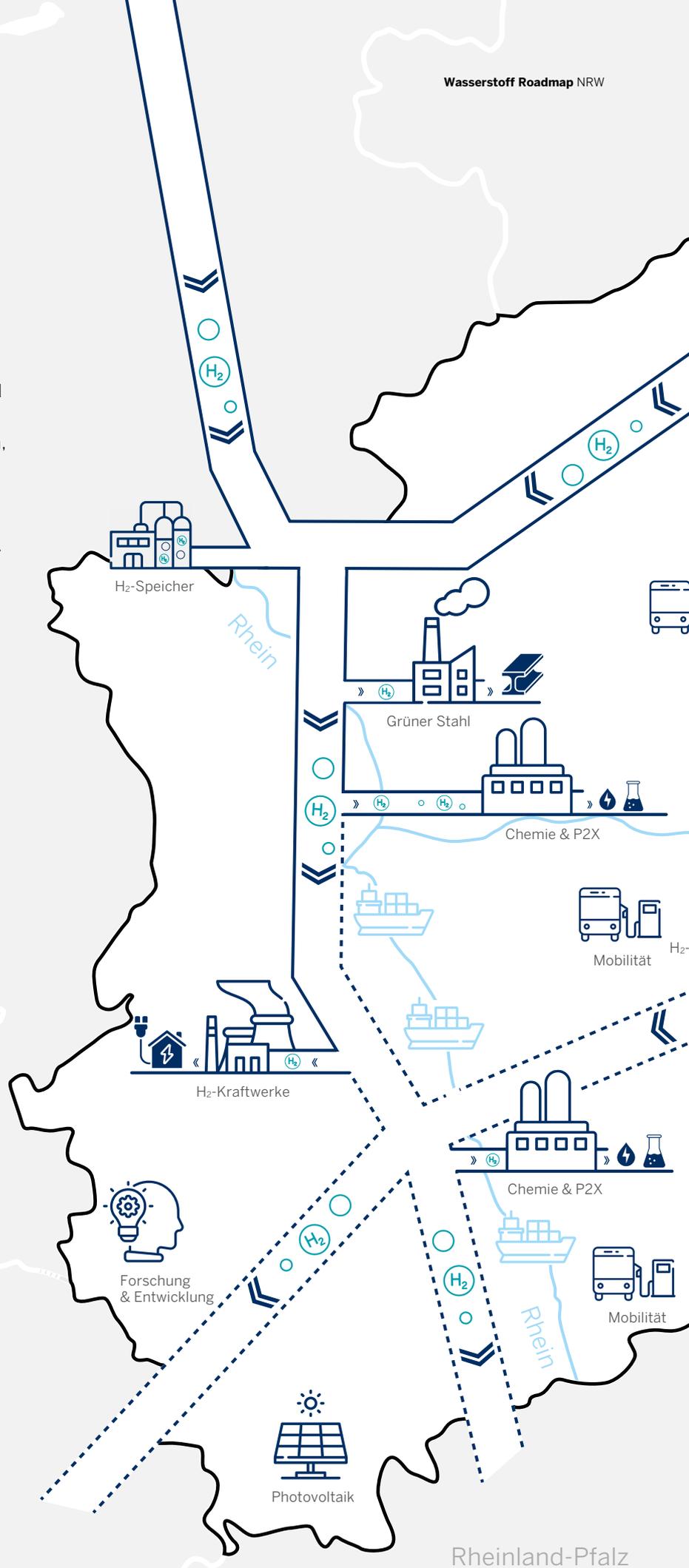
- ✔ gut international angebundenes Energieinfrastrukturnetz,
- ✔ freiwerdende Gasleitungen im Zuge der L- auf H-Gas Umstellung,
- ✔ die Nordsee als hervorragender Windenergiestandort,
- ✔ das Vorhandensein großer Salzkavernenspeicher und
- ✔ ein aufgrund der Industriedichte hoher Wasserstoffverbrauch

birgt außergewöhnliches Potenzial für den Aufbau einer europäischen und globalen Wasserstoffwirtschaft.

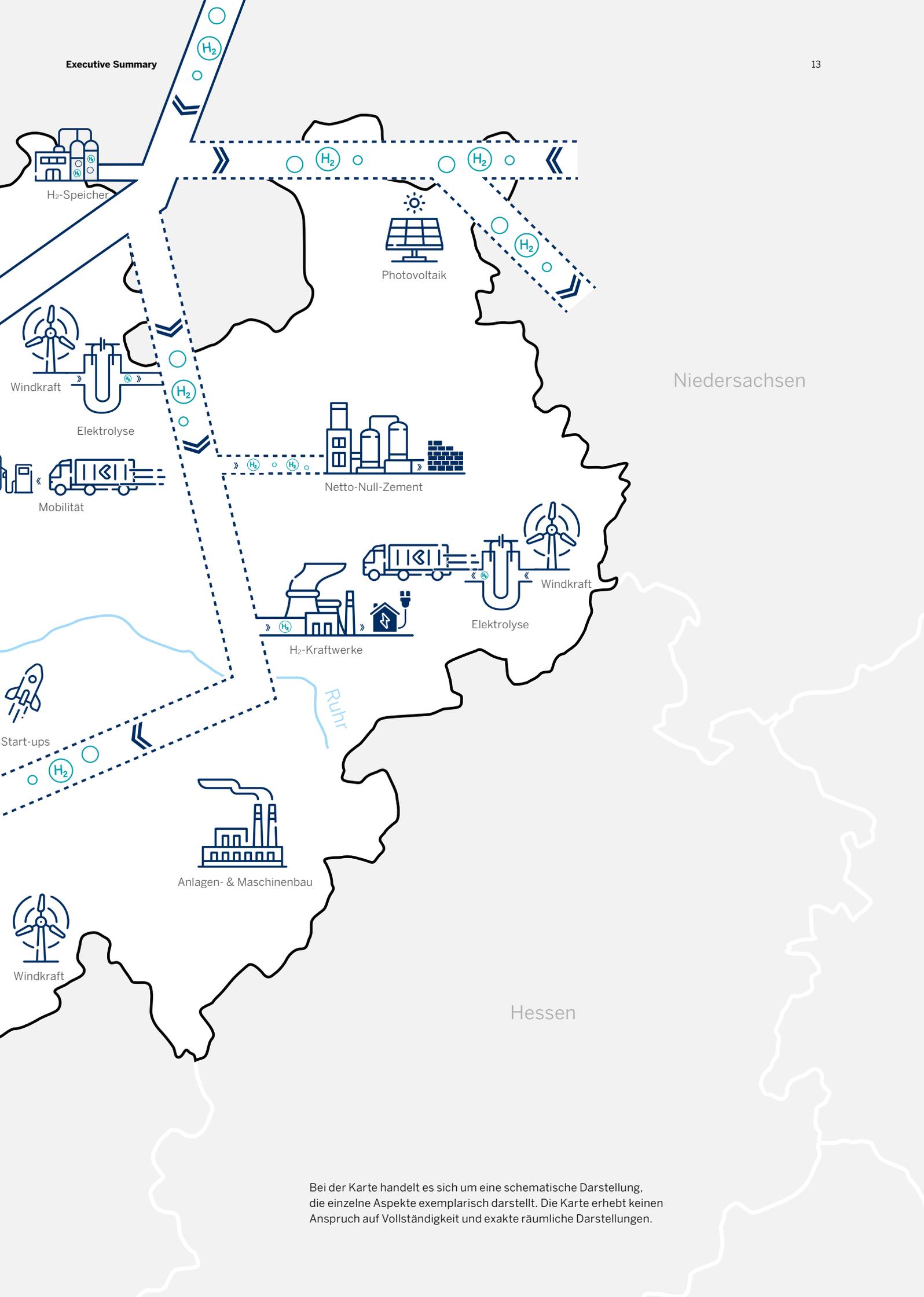
Unser Ziel ist es, dass Nordrhein-Westfalen Teil einer konzentrierten, stark vernetzten und einzigartigen Wasserstoff-Technologielandchaft in Nord-West Europa wird. Die Chancen, die der Einsatz von Wasserstoff in den einzelnen Sektoren zu bieten hat, möchten wir jetzt nutzen und damit unseren Industriestandort Nordrhein-Westfalen zukunftsfähig aufstellen. Wir werden alles daransetzen, dieses Ziel zu erreichen und wollen diesen Weg gemeinsam und im Zusammenspiel mit allen gesellschaftlichen Akteuren gehen.

Niederlande

Belgien



Rheinland-Pfalz



Bei der Karte handelt es sich um eine schematische Darstellung, die einzelne Aspekte exemplarisch darstellt. Die Karte erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und exakte räumliche Darstellungen.



02

14–17

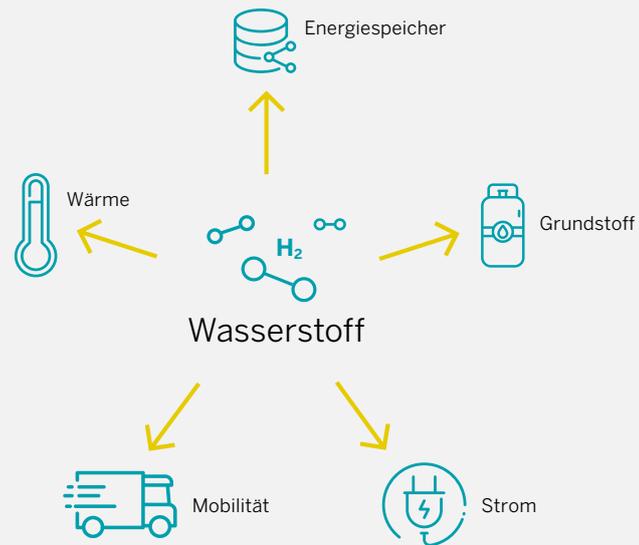
Wasserstoff: Eigenschaften, Farben und Technologien



Das kleinste chemische Element im Periodensystem ist der Hoffnungsträger für die Energiewende und eine klimafreundliche Wirtschaft. Wasserstoff kann auf vielfältige Weise als Energieträger und Rohstoff gewonnen werden, das größte Potenzial bietet jedoch grüner Wasserstoff, der mithilfe erneuerbarer Energien hergestellt wird.



Abbildung 3: Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff



Eigenschaften

Wasserstoff, das kleinste und leichteste Element im Universum, kann der Schlüssel für erfolgreichen Klimaschutz werden – in der Industrie, in der Mobilität und im gesamten Energiesektor. Wasserstoff ist geruchlos, ungiftig und leicht flüchtig – mit anderen Worten: unauffällig und dennoch sehr wirkungsstark.

In Wasserstoff steckt viel Energie: bei seiner Reaktion mit Sauerstoff zu Wasserdampf werden 33,3 Kilowattstunden pro Kilogramm bzw. 3 Kilowattstunden pro Normkubikmeter frei. Für den Klimaschutz ist dies eine besonders gute Eigenschaft, denn hier entsteht kein Gramm CO_2 .

Natürlich ist bei Wasserstoff, wie für alle anderen energiereichen Brennstoffe, eine umsichtige Handhabung sehr wichtig. Im Freien bieten die Flüchtigkeit von Wasserstoff und die Verbrennung mit kaum strahlender Flamme, deutliche Vorteile. Über hundert Jahre industrielle Praxis sprechen für sich.

Herstellung

Wasserstoff, so wie er für Brennstoffzellenfahrzeuge oder industrielle Prozesse benötigt wird, kommt in der Natur nicht vor. Er muss unter Energieeinsatz aus chemischen Verbindungen gewonnen werden. Die wichtigsten natürlichen Quellen sind Erdgas, Erdöl und Wasser.

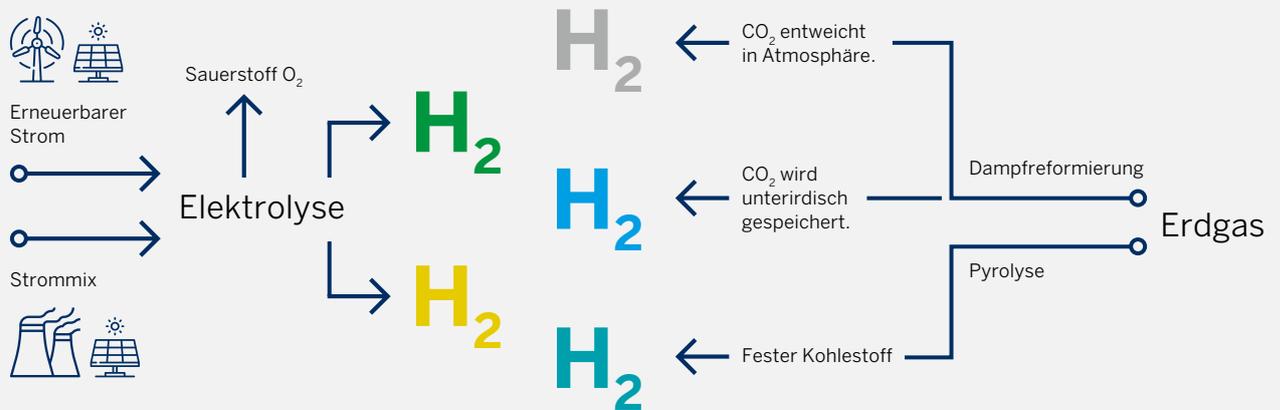
Farbpalette Wasserstoff

Wasserstoff ist ein farbloses Gas und trotzdem bekommt er allerhand Farben zugewiesen. Es wird über grauen, blauen, grünen, gelben oder sogar türkisen Wasserstoff diskutiert. Von **grauem Wasserstoff** ist die Rede, wenn die Herstellung auf Erdgas basiert. Die so genannte Dampfreformierung von Erdgas zur Wasserstofferzeugung erreicht energetische Wirkungsgrade um 75 Prozent. Aktuell wird so der Großteil des heute verwendeten Wasserstoffs erzeugt. Bei hocheffizienten Anwendungen lässt sich auch mit grauem Wasserstoff CO_2 einsparen: bei Brennstoffzellen-Pkw etwa 40 Prozent im Vergleich zu Benzin-Hybrid-Fahrzeugen¹.

Türkiser Wasserstoff entsteht bei der Pyrolyse von Erdgas mit thermischer oder elektrischer Energie. Im Unterschied zu grauem Wasserstoff wird bei diesem Prozess kein CO_2 frei, sondern es entsteht fester Kohlenstoff. Bei der Produktion von türkischem Wasserstoff besteht jedoch noch viel Forschungsbedarf.

Scheidet man nach der Dampfreformierung das CO_2 ab und speichert es langfristig, spricht man von **blauem Wasserstoff**. Je nach Prozess können so 90 Prozent des dort anfallenden CO_2 entfernt werden. Besonders effiziente Verfahren wie die autotherme Reformierung können sogar bis zu 95 Prozent des CO_2 abscheiden². Norwegen befasst sich intensiv mit diesem Thema. Eine erste Speicherstätte entsteht innerhalb des Projekts Northern Lights CCS vor der Küste Norwegens³. Blauer Wasserstoff kann dabei helfen, schnelle Erfolge beim Klimaschutz zu erzielen und die ersten Schritte in Richtung Wasserstoffwirtschaft zu gehen.

Abbildung 4: Die Farbenlehre des Wasserstoffs



Blauer Wasserstoff ist trotz der Restemissionen immer noch deutlich emissionsärmer als die derzeitigen Alternativen. Blauer Wasserstoff hat nur circa ein Zwölftel bis ein Fünftel der Emissionen von Wasserstoff, der mithilfe des heutigen Strommixes durch Elektrolyse erzeugt wird und deutlich weniger als die Hälfte der Emissionen von grauem Wasserstoff (siehe Abbildung 5). Sofern norwegisches Erdgas als Referenz dient, sogar nur ein Sechstel. Blauer Wasserstoff ist daher eine sinnvolle Übergangslösung auf dem Weg zu grünem Wasserstoff.

Grüner Wasserstoff wird durch Strom aus erneuerbaren Energien in Elektrolyseuren hergestellt. Elektrolyseure benötigen Strom, um Wasser (H_2O) in seine Bestandteile Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) zu zerlegen. Elektrolyseure werden nicht nur zur Wasserspaltung, sondern auch in großem Umfang für die Erzeugung von Chlor, Aluminium und anderen Grundstoffen eingesetzt.

Um das Ziel der Treibhausgasneutralität zu erreichen, muss der Anteil an grünem Wasserstoff bis zum Jahr 2050 kontinuierlich ansteigen, so dass am Ende nur noch dieser zum Einsatz kommt. Für die Phase des Markthochlaufs und um die Bedarfe der Industrie kurzfristig decken zu können, bedarf es allerdings eines offenen Spiels der verschiedenen Farben – immer verbunden mit dem Ziel, eine treibhausgasneutrale Wirtschaft zu erreichen.

Zur Herstellung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien gibt es eine Vielzahl verschiedener Elektrolysetechnologien. Seit etwa hundert Jahren erprobt und bekannt ist die alkalische Elektrolyse (AEL). Die Protonen-Austausch-Membran (PEM) Elektrolyse, die hohe Stromdichten erlaubt, aber teure Stack-Materialien erfordert, wird seit etwa 20 Jahren erprobt. Die Hochtemperatur-Festoxidelektrolyse (SOEC) ist zeitlich weniger flexibel und teurer, dafür aber hocheffizient. Neu ist die alkalische Membran-Elektrolyse (AEM) die niedrigere Material- und Systemkosten erwarten lässt, aber bisher nur in kleinen Einheiten gebaut wird.

Der Wirkungsgrad von Elektrolyseuren hängt von Anforderungen an Effizienz und Reinheit ab und liegt typischerweise bei 60 bis 70 Prozent. Prognosen über zukünftige Wirkungsgrade halten bei der SOEC Werte bis 83 Prozent für möglich, im Bereich der PEM sind es 65 bis 73 Prozent. Wird die bei der Elektrolyse entstehende Abwärme genutzt, kann der Energieausnutzungsgrad auf über 85 Prozent steigen⁴.

Tabelle 1: Wirkungsgrade der verschiedenen Elektrolysetechnologien (bezogen auf den Heizwert; Stand heute)⁵

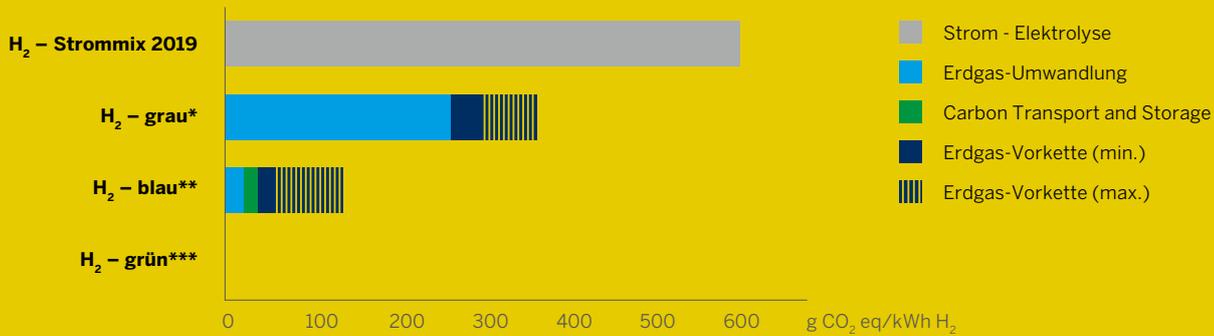
Elektrolysetechnologie	Wirkungsgrade
AEL	61 – 68 Prozent
PEM	61 – 63 Prozent
SOEC	77 – 81 Prozent

Exkurs: CO₂-Emissionen bei der Wasserstoffherstellung

Da blauer Wasserstoff auf der Zeitskala am ehesten preislich mit grauem Wasserstoff konkurrieren kann, soll er den Weg für zukünftige Wasserstoffanwendungen ebnen. Auch die nötigen Infrastrukturen können auf dieser Basis entwickelt werden.

Blauer Wasserstoff ist CO₂-arm, weil das entstehende CO₂ durch Carbon Capture and Storage (CCS) abgeschieden wird. Trotzdem wird diese Technologie kontrovers diskutiert, insbesondere mit Blick auf die Vorketten-Emissionen von Erdgas. Abbildung 5 zeigt die CO₂-Emissionen der verschiedenen Wasserstofffarben. Hierin sind auch die nach eingehender Literaturrecherche bekannten Bandbreiten der Vorketten-Emissionen abgebildet^{6,7}.

Abbildung 5: CO₂-Emissionen der verschiedenen Wasserstofffarben



* Vorketten-Emissionen bezogen auf den deutschen Erdgas-Mix

** Vorketten-Emissionen bezogen auf norwegisches Erdgas

*** Emissionen, die beim Bau bzw. der Installation von erneuerbaren Energien Anlagen entstehen, sind hier nicht berücksichtigt

Umwandlung

Wasserstoff wird in Brennstoffzellen effizient und emissionsfrei in Strom umgewandelt. In der Praxis sind Wirkungsgrade bis zu 60 Prozent möglich – in Fahrzeugen etwas weniger. Zum Vergleich: typische Diesel- oder Benzinmotoren in Pkw erreichen circa 30 bis 40 Prozent, Elektroautos hingegen sogar 90 Prozent. Wasserstoff kann zudem auch in Gasturbinen für die Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Auch die Herstellung von Stahl und anderen Grundstoffen ist mit Wasserstoff möglich.

Infrastruktur

Nach der Herstellung von Wasserstoff sind weitere Infrastruktur und Technologien notwendig, zum Beispiel zur Kompression, zur Speicherung, zum Transport, zur Verteilung und zur Betankung. Oftmals erfolgt der Transport von Wasserstoff zum jetzigen Zeitpunkt noch über Lkw, die zwischen 200 und 1.100 Kilogramm Wasserstoff transportieren können. Wasserstoff wird seit Jahrzehnten auch in Rohrnetzen transportiert. Eins davon liegt in Nordrhein-Westfalen, ein weiteres in der Region Leuna in Sachsen-Anhalt. Zudem lässt sich ein Großteil der deutschen Gasinfrastruktur auf Wasserstoff umstellen. Netzseitig müssen dabei alle Optionen von Wasserstoffbeimischungen bis zum Transport reinen Wasserstoffs ermöglicht werden.



03

18–23 Nordrhein-Westfalen: Industrie- und Wasserstoffland



Wasserstoff ist ein wichtiger Baustein für eine moderne, international wettbewerbsfähige und klimafreundliche Wirtschaft in Nordrhein-Westfalen. Damit dies gelingt, setzen wir auf eine enge Zusammenarbeit zwischen Industrie, Wissenschaft und Politik, internationale Partnerschaften, Forschung und Innovation sowie geeignete bereits vorhandene Infrastrukturen.



Nordrhein-Westfalen ist sowohl der bedeutendste Industriestandort Deutschlands als auch eine der größten Metropolregionen Europas. Etwa 20 Prozent des deutschen Bruttoinlandsprodukts werden hier erwirtschaftet. Nordrhein-Westfalen braucht auch dauerhaft eine moderne, international wettbewerbsfähige und klimafreundliche Wirtschaft zur Zukunftssicherung und zur Sicherung des Wohlstandes. Die hiesige Industrie hat schon heute einen hohen Wasserstoffbedarf und dieser wird sich in Zukunft noch um ein Vielfaches erhöhen.

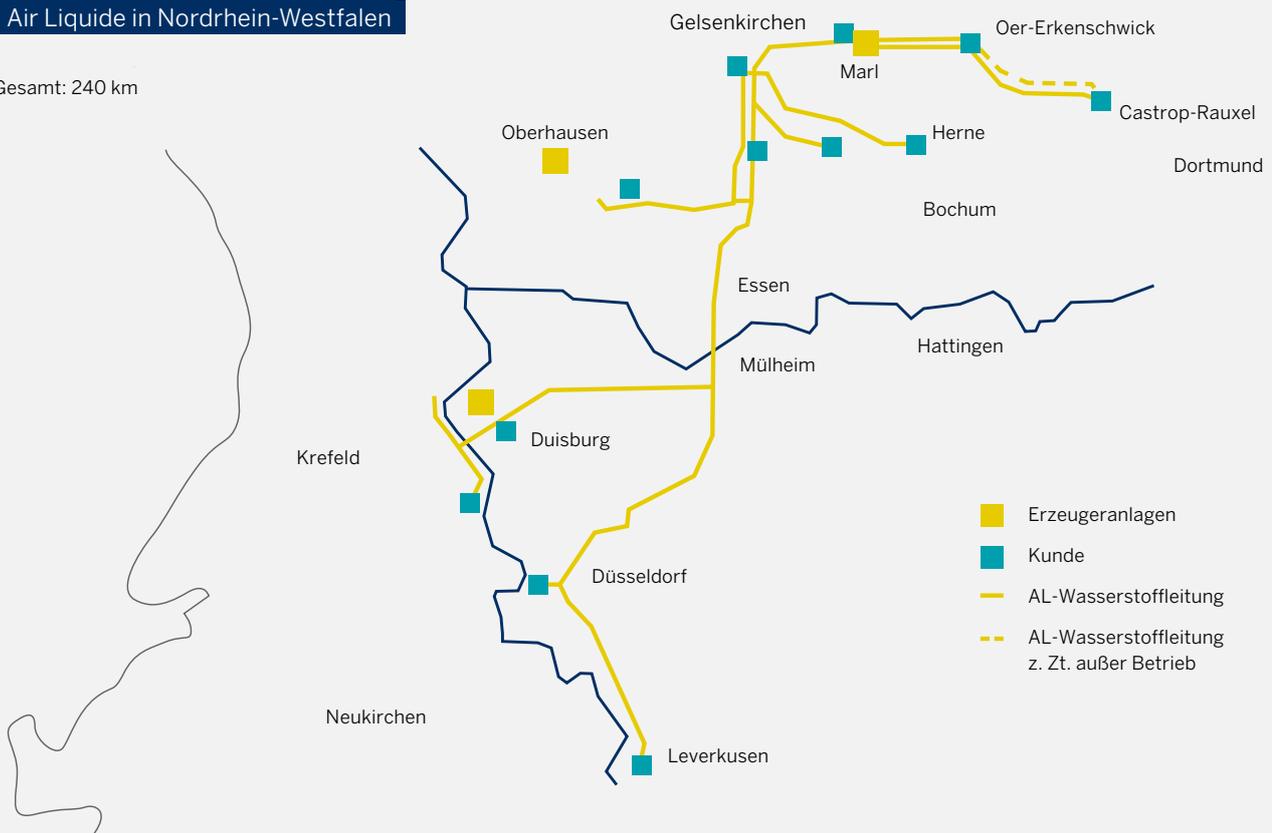
Die hohe Wasserstoffnachfrage ist nicht nur eine Herausforderung, sondern auch eine Chance für Nordrhein-Westfalen, zum Kristallisationspunkt für den Aufbau einer nationalen und europäischen Wasserstoffwirtschaft zu werden. Nicht nur die Nachfrage, sondern auch die hohe Industriedichte, gepaart mit der bereits bestehenden Infrastruktur und einer engen Verflechtung mit europäischen Nachbarregionen, sind weitere starke Voraussetzungen. Hier befindet sich ein dicht geknüpftes Erdgasnetz, ein Wasserstoffnetz sowie viele der künftigen Wasserstoff-Großverbraucher. Das bereits bestehende Wasserstoffnetz im Rhein-Ruhr-Gebiet, betrieben von Air Liquide, ist das größte Wasserstoffnetz in Deutschland und verläuft von Castrop-Rauxel über Marl bis nach Leverkusen (Abbildung 6). Insgesamt verfügt das Netz über eine Gesamtlänge von 240 Kilometer.

240 Kilometer

lang ist das größte **Wasserstoffnetz in Deutschland**, betrieben von Air Liquide im Rhein-Ruhr-Gebiet.

Abbildung 6: Wasserstoffnetz der Air Liquide in Nordrhein-Westfalen

Gesamt: 240 km



150 Millionen Euro

Fördermittel hat das Land NRW bereits für **Wasserstoff-Projekte** bereitgestellt.

Andere Verbraucher liegen nah an den wichtigsten Wasserstraßen, insbesondere dem Rhein. Auch im Bereich der Wasserstoff-Erzeugung hat Nordrhein-Westfalen eine Vorreiterrolle. Derzeit wird in der Raffinerie Rheinland, im Werk Wesseling, die weltweit größte PEM-Wasserstoff-Elektrolyse-Anlage errichtet. Nach Fertigstellung wird die Anlage eine Erzeugungsleistung von zehn Megawatt haben und rund 1.300 Tonnen grünen Wasserstoff pro Jahr bereitstellen, die vollständig in die Raffinerieprozesse integriert werden, beispielsweise für die Entschwefelung konventioneller Kraftstoffe. Darüber hinaus bieten sich Raffinerien als Produktionsstätte für synthetische Kraftstoffe an.

Nordrhein-Westfalen hat frühzeitig mit der Förderung von ersten Wasserstoff-Projekten begonnen. Bis heute wurden mehr als 150 Millionen Euro für mehr als 130 Projekte in der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik zur Verfügung gestellt. Bei der Projektinitiierung spielt seit nunmehr 20 Jahren auch das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität als Bestandteil der EnergieAgentur.NRW an vielen Stellen eine maßgebliche Rolle. Das Netzwerk bringt erfahrene und neue Akteure auf dem Gebiet der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik sowie der Elektromobilität zusammen, um gemeinsam deren Entwicklung und Markteinführung voranzutreiben. Das Netzwerk hat inzwischen über 500 Mitglieder.

Darüber hinaus hat mit IN4climate.NRW ein Zusammenschluss aus Industrie, Wissenschaft und Politik eine einzigartige Plattform geschaffen, um Lösungen für eine klimaneutrale Industrie zu entwickeln. Hierfür ist der Einsatz von Wasserstoff etwa in Raffinerien, der Chemie

oder aber der Stahlindustrie zwingend erforderlich. Das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIDE) fördert innerhalb von IN4climate.NRW beispielsweise den Einsatz von Wasserstoff in der Stahlindustrie. Hier findet die weltweit erste Demonstration der Wasserstoff-Einspeisung in einen Hochofen am Stahlwerk in Duisburg statt. Fortgesetzt wird das Projekt in dem vom Bund geförderten Reallabor H2Stahl: Bis Ende 2021 sollen dabei alle 28 Blasformen eines Hochofens auf den anteiligen Einsatz von Wasserstoff umgestellt werden. Mit dem Projekt HyGlass wird der Einsatz von Wasserstoff als Ersatz für fossile Energieträger in der Glasindustrie gefördert. Das Projekt untersucht die Eignung einer Wasserstoffzumischung bis hin zur Nutzung von reinem Wasserstoff bei der Herstellung von Glas.

Auch im Bereich Innovation zählt Wasserstoff zu den zentralen Themenfeldern. Das Spitzencluster Industrielle Innovation (SPIN) beschäftigt sich mit der Frage, wie sich die Metropolregion Ruhr im weltweiten Wettbewerb um neue Technologien positionieren und die Modernisierung der Industrie in Zeiten der Digitalisierung und des dringender werdenden Klimaschutzes vorantreiben kann. Das Land Nordrhein-Westfalen unterstützt Innovationsvorhaben des Clusters und fördert First-Mover-Projekte mit insgesamt 15 Millionen Euro. Eines der First-Mover Projekte ist P2X Herne: Auf dem Gelände des Heizkraftwerks Herne soll eine offene Versuchsplattform zur Entwicklung von Power-to-X-Technologien entstehen, welche aus Wasserstoff und CO₂ chemische Grundstoffe und synthetische Kraftstoffe herstellt.

Auch im Verkehrssektor unterstützt das MWIDE die Ausweitung des Wasserstoffeinsatzes, wie zum Beispiel mit dem Wettbewerb „Modellkommune/-region Wasserstoffmobilität NRW“. Drei Konzepte haben die Jury in der ersten Runde so sehr überzeugt, dass die Gewinnerregionen insgesamt 1,1 Millionen Euro für die Entwicklung von Feinkonzepten erhalten haben: die Region „DüsselRheinWupper“, die Region Köln mit Brühl, Hürth und Wesseling, dem Rheinisch-Bergischen-Kreis und dem Rhein-Sieg-Kreis sowie der Kreis Steinfurt. In der finalen Auswahlrunde hat die Region „DüsselRheinWupper“ nach Auffassung der

Jury das beste Konzept vorgelegt und ist damit die erste „Modellregion Wasserstoffmobilität NRW“ (mehr Informationen zum Wettbewerb finden sich in Kapitel 6.1.2).

Darüber hinaus fördert Nordrhein-Westfalen mit seiner Förderrichtlinie „Emissionsarme Mobilität“ unter anderem den Erwerb von Brennstoffzellenfahrzeugen. Die landeseigene NRW.BANK gewährt hierfür zinsgünstige Kredite. Die Anschaffung von Brennstoffzellenbussen für den ÖPNV wird auf Grundlage des ÖPNV-Gesetzes NRW gefördert.

3.1 Internationale Kooperationen und Partnerschaften

Nordrhein-Westfalen nutzt bereits heute seine einzigartige geografische Lage im Herzen Europas. Ausgehend von Regierungskonsultationen und Gesprächen mit anderen europäischen Regionen sind konkrete Initiativen im Bereich Wasserstoff erwachsen. Ein Schwerpunktland für

die internationale Zusammenarbeit im Themenfeld sind bisher die Niederlande. Um die steigenden Wasserstoffbedarfe in Zukunft decken zu können, wird die internationale Zusammenarbeit weiter ausgeweitet und ein dichtes Kooperationsnetzwerk aufgebaut.

Abbildung 7: Internationale Netzwerke und Partnerschaften



Internationaler Austausch und thematische Arbeitskreise

- Regierungskonsultationen
- Fachgespräche



Initiativen und Programme

- Hy3
- RH2INE
- Trilateraler Chemie-Cluster
- SustPipe Initiative



Multilaterale Vernetzung

- European Clean Hydrogen Alliance
- European Hydrogen Valleys Partnership
- H2 IPCEI
- Industry Transition Platform

Ein Beispiel für die Kooperation mit den Niederlanden ist das Projekt Hy3. Hierbei handelt es sich um eine gemeinsame Initiative des deutschen Bundeswirtschaftsministeriums, des niederländischen Wirtschaftsministeriums und des MWIDE. Hy3 untersucht die Potenziale grünen Wasserstoffs zwischen den Niederlanden und Nordrhein-Westfalen. Der Fokus liegt auf der Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Offshore Windenergieanlagen, der durch freiwerdende Gasleitungen zu industriellen Großkunden in den Niederlanden und Nordrhein-Westfalen transportiert werden kann.

Das Rhine Hydrogen Integration Network of Excellence (**RH2INE**) ist eine Initiative des Landes Nordrhein-Westfalen und der Provinz Süd-Holland. Ziel ist es, Wasserstoff im Rhein-Alpenkorridor in der Binnenschifffahrt und im Gütertransport auf Straße und Schiene einzusetzen und somit einen großen Schritt in Richtung eines emissionsfreien Transportkorridors zu gehen. Durch den Einsatz von Wasserstoff in der Intralogistik der Häfen, als Antrieb für Binnenschiffe und den Bau von Wasserstoff-Tankstationen in den Häfen werden zum einen eine Vielzahl an Anwendungsfällen für Wasserstoff geschaffen, zum anderen die Nachfrage nach Wasserstoff im Mobilitätsbereich angeregt. Die konkrete Zielvorstellung ist: drei Wasserstoff-Tankstationen, zehn Wasserstoff-Binnenschiffe, zwölf Wasserstoff-Lokomotiven und sechs Wasserstoff-Reach-Stacker. In einer Machbarkeitsstudie, die gemeinsam mit den Häfen Rotterdam, Duisport und RheinCargo durchgeführt wird, werden hierfür technische, regulatorische und ökonomische Fragestellungen untersucht. Die Studie wird durch die EU innerhalb von Connecting Europe Facility (CEF) gefördert. Somit bildet RH2INE eine starke Partnerschaft aus Politik und Wirtschaft und vereint zwei wichtige Zielmarken: Zum einen trägt der transnationale Charakter stark zur europäischen Vernetzung bei. Zum anderen wird hier die Möglichkeit einer weiteren Infrastruktur für den Wasserstoff-Transport nach Nordrhein-Westfalen geschaffen.

Ein weiteres Beispiel für grenzüberschreitende Kooperationen ist die seitens der Niederlande, Flandern und Nordrhein-Westfalen gemeinsam erarbeitete Chemiestrategie. Die Strategie hat zum Ziel, die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen im globalen Kontext für den trilateralen Chemie-Cluster zu verbessern. Hierbei ist unter anderem die Weiterentwicklung der Pipeline-Infrastruktur – auch für Wasserstoff – ein zentrales Thema. Hierzu hat sich ein Projekt „SustPipe Initiative – Pipeline connections for a sustainable, circular and climate-neutral chemical industry in the trilateral region“ entwickelt, welches eine zuverlässige und nachhaltige Ressourcenversorgung im Chemie-Cluster sicherstellen soll. Hierbei erarbeiten die beteiligten Unternehmen einen konkreten Business Case für eine Pipeline-Investition (auch Wasserstoff), die massiv zu den Zielen des „Green Deal“ beitragen würde.

Die Europäische Kommission ermöglicht es den EU-Mitgliedstaaten mit dem Instrument Important Project of Common European Interest (IPCEI) großvolumige Projekte zu fördern, um ein bestehendes Marktversagen zu beheben. Die einzelnen Projekte eines IPCEI müssen im gemeinsamen europäischen Interesse liegen, der gesamten EU zu Gute kommen und einen hohen Innovationsgrad aufweisen. Das Bundeswirtschaftsministerium wird ein solches IPCEI für den Bereich Wasserstofftechnologien und -systeme koordinieren. Teil des Vorhabens ist die gesamte Wertschöpfungskette von Wasserstoff (Erzeugung, Transport, Verteilung, Nutzung). Das MWIDE bringt sich engagiert in die deutsche Beteiligung am IPCEI ein und wird sich an der Finanzierung nordrhein-westfälischer Projekte, die Einzug in das IPCEI finden, beteiligen.

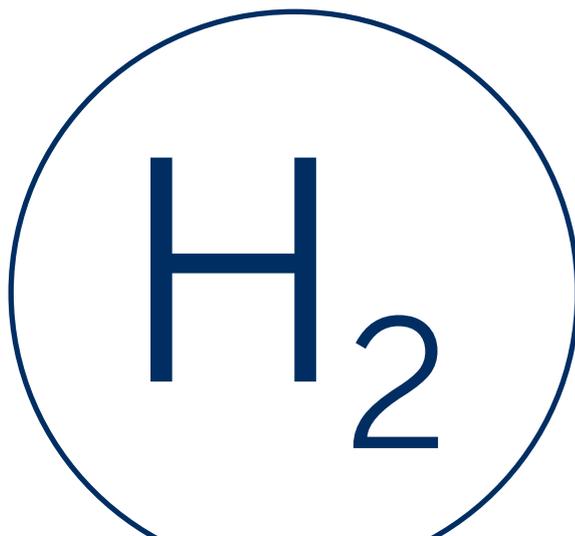


3.2 Forschungsstandort Nordrhein-Westfalen: so vielseitig wie Wasserstoff selbst

In ganz Nordrhein-Westfalen wird zu allen denkbaren Wasserstoff-Aspekten geforscht. Vom Rheinischen Revier bis ins Münsterland, nach Südwestfalen und einmal quer durch das Ruhrgebiet von Duisburg über Gelsenkirchen bis nach Bochum: Wasserstoff ist ein hochspannendes Thema mit vielen verschiedenen Facetten.

Dabei geht es zum Beispiel um die Frage, wie die bei der elektrolytischen Wasserstoffherstellung verwendeten Katalysatoren durch alternative, günstigere Materialien ersetzt werden können. Katalysatoren sind ein sehr wichtiger Bestandteil der Elektrolyse, da Sie dazu beitragen, die Reaktionsrate zu steigern, mit der Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt wird. Außerdem werden neue Grundkonzepte für modulare Brennstoffzellen- und Elektrolyseurstapel erforscht. Dabei ist das Ziel, Wasserstoff direkt auf einem hohen Druckniveau zu produzieren. Damit kann Energie eingespart werden, die ansonsten üblicherweise für die Komprimierung

benötigt wird. So können Elektrolyseure und Brennstoffzellen noch effizienter werden. Darüber hinaus geht es aber auch darum, das Zusammenspiel von erneuerbaren Energien und Elektrolyseuren im zukünftigen Energiesystem besser zu verstehen. Insgesamt sind somit vielfältige Fragen rund um Lebensdauer- und Effizienzsteigerung sowie Kostendegression und systemisches Zusammenspiel von Einzelkomponenten weiter zu untersuchen. Die Forschungslandschaft Nordrhein-Westfalens hat sich hier bereits sehr gut auf den Weg begeben. Mehr dazu stellt der aktuelle Energieforschungsbericht Nordrhein-Westfalen vor.



04

24–29

Der europäische und nationale Rahmen



Die Bundesregierung und die Europäische Union haben 2020 ihre ambitionierten Wasserstoffstrategien vorgelegt. Wie Nordrhein-Westfalen, verfolgen zudem auch zahlreiche weitere Bundesländer und die Niederlande Pläne für den zukünftigen Einsatz von Wasserstoff im Zuge der Energiewende und der Etablierung einer klimaneutralen und starken Wirtschaft.



Abbildung 8: Wegmarken der europäischen Wasserstoffstrategie



Im Juli 2020 hat die Europäische Kommission eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa vorgelegt. Die schrittweise Dekarbonisierung und Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der EU mithilfe von sauberem Wasserstoff soll durch einen in drei Phasen gegliederten Ausbau des europäischen Wasserstoffökosystems bis 2050 erreicht werden.

In der ersten Phase bis 2024 sieht der EU-Fahrplan die Installation von Elektrolyseuren mit einer Leistung von mindestens 6 Gigawatt und die Erzeugung von 1 Millionen Tonnen erneuerbarem Wasserstoff vor. Der erneuerbare Wasserstoff soll zunächst vor allem lokal eingesetzt werden, um die fossile Wasserstoffherstellung zu dekarbonisieren. In Verbindung mit Technologien zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) soll zusätzlich auch blauer Wasserstoff erzeugt werden.

Im Zeitraum von 2025 bis 2030 (Phase 2) soll der Ausbau der grünen Wasserstoffherstellung dann noch intensiver vorangetrieben werden. Bis 2030 sieht die EU die Installation von Elektrolyseuren mit einer Leistung von mindestens 40 Gigawatt und die Erzeugung von 10 Millionen Tonnen erneuerbarem Wasserstoff vor.

Grüner Wasserstoff wird dann auch in neuen Anwendungen, wie zum Beispiel der Direktreduktion von Stahl oder dem Antrieb von Brennstoffzellen-Fahrzeugen, zum Zuge kommen. Lokale und regionale Wasserstoffcluster (Hydrogen Valleys) sollen die räumliche Bündelung von Erzeugung und Verbrauch ermöglichen. Zugleich soll Wasserstoff zunehmend einen Beitrag zur Sektorenkopplung, der Versorgungssicherheit und zur Speicherung von Strom aus erneuerbaren Energien leisten, weshalb dafür ab 2025 ein erheblicher Infrastrukturausbau erforderlich wird. In erster Linie plant die Kommission Teile des Erdgasnetzes umzustellen.

10 Millionen Tonnen erneuerbarer Wasserstoff bis 2030 lassen Hydrogen Valleys in ganz Europa entstehen

Ab 2030 (Phase 3) geht die EU-Kommission davon aus, dass die Technologie für die Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff ausgereift und in großem Maßstab verfügbar ist. Erneuerbarer Wasserstoff soll dann überall dort zum Einsatz kommen, wo es keine wirtschaftlichen Alternativen für die Dekarbonisierung gibt. Dies setzt eine massive Erhöhung der Erzeugung erneuerbaren Stroms und den vollständigen Umbau des Energiesystems voraus. Eine Nutzung von Wasserstoff und CO₂-neutralen synthetischen Kraftstoffen wird in dieser Zeit dann in vielen Wirtschaftszweigen und in breitem Umfang erwartet. Der Aufbau eines liquiden Marktes ist für die EU-Kommission von essenzieller Bedeutung, weshalb Beimischungen kritisch gesehen und gemeinsame Qualitäts- und Zertifizierungsstandards gefordert werden.

Der Markthochlauf der Wasserstofftechnologien soll vor allem durch gezielte Anreize unterstützt werden. Das Maßnahmenportfolio umfasst unter anderem die Aufstockung verschiedener EU-Fonds und Förderinstrumente, Quoten- und Vorrangregelungen, Carbon Contracts for Difference (CCfD) und vieles mehr. Über CCfD-Verträge zwischen Staat (auf Bundes- und EU-Ebene) und Unternehmen lassen sich CO₂-Vermeidungspreise festlegen, die über einen längeren Zeitraum den planungssicheren und wettbewerbsfähigen Betrieb – und damit Anreize

für entsprechende Investitionen – sicherstellen. Abnehmerseitig sollen insbesondere die Leitmärkte Industrie und Mobilität entwickelt werden. Bis 2050 erwartet die Europäische Kommission Investitionsbedarfe von bis zu 488 Milliarden Euro.

Die Kommission betont mehrfach die Wichtigkeit von koordinierten Anstrengungen im Zusammenspiel aller Akteure und Mitgliedsstaaten und hat dazu jüngst die Europäische Allianz für sauberen Wasserstoff (Clean Hydrogen Alliance) ins Leben gerufen. Auch mehrere Unternehmen aus Nordrhein-Westfalen sind dieser Allianz bereits beigetreten.

Eine detaillierte Auseinandersetzung mit dem Sektor Mobilität soll laut Kommission in der Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität Ende 2020 vorgelegt werden, wobei zunächst die Dekarbonisierung des ÖPNV, gewerblicher Flotten und schwerer Nutzfahrzeuge mittels Brennstoffzellentechnologie fokussiert werden solle. Anschließend sollen synthetische Kraftstoffe in der Binnenschifffahrt sowie in der Luft- und Seefahrt zum Einsatz kommen.

488 Milliarden Euro
**Investitionsvolumen erwartet
die EU-Kommission bis 2050**





„Es ist damit zu rechnen, dass die Nachfrage nach Wasserstoff mittel- bis langfristig signifikant steigen wird. Um die Potenziale der Wasserstofftechnologien zu heben, gilt es jetzt, die nächsten Schritte zu gehen und gemeinsam mit der Wirtschaft einen echten Markthochlauf zu realisieren.“



Nationale Wasserstoffstrategie



Abbildung 9: Eckpunkte der nationalen Wasserstoffstrategie

5 _{GW}

Elektrolyse

bis 2030 und weitere
5 GW bis 2035/2040

7+2 _{Mrd. €}

für den **Markthochlauf** von
Wasserstoff

Von **55** _{TWh/a}
Wasserstoffbedarf
auf 90–110 TWh/a in 2030

Die deutsche Wasserstoffstrategie

Kurz vor Bekanntmachung der europäischen Strategie hat die Bundesregierung im Juni 2020 ihre nationale Wasserstoffstrategie vorgelegt. 38 Maßnahmen sollen kurz- und mittelfristig dazu beitragen, die Produktion von Wasserstoff im industriellen Maßstab zu etablieren, die Nachfrage insbesondere im Verkehrs- und Industriesektor zu fördern, die Weichenstellungen für den Infrastrukturaufbau richtig zu setzen, Forschung und Innovationen voranzutreiben und auch die Chancen durch internationale Partnerschaften zu nutzen. Die Zielsetzung ist klar: bis zum Jahr 2030 sollen in Deutschland 5 Gigawatt Elektrolysekapazität aufgebaut werden. Fünf Jahre später, spätestens aber bis 2040, sollen weitere 5 Gigawatt hinzukommen.

Die Bundesregierung sieht dabei einen Bedarf von 90 bis 110 TWh Wasserstoff in Deutschland für das Jahr 2030 – eine Verdopplung der jetzigen Nachfrage. Die entscheidenden Leitmärkte werden voraussichtlich im Mobilitäts- und Industriebereich liegen.

Zur Deckung des Bedarfs setzt die Bundesregierung auch auf internationale Kooperationen sowie übergangsweise auch auf blauen bzw. türkisen Wasserstoff. Dies insbesondere, da blauer Wasserstoff in den nächsten zehn Jahren auch Teil eines europaweiten bzw. globalen Marktes werde und Deutschland wegen der großen (industriellen) Bedarfe auf Wasserstoffimporte angewiesen sei.

Internationale Partnerschaften sind also mittel- und langfristig von entscheidender Bedeutung. Die Bundesregierung will daher die Zusammenarbeit sowohl im Bereich der Nord- und Ostsee als auch in Südeuropa vertiefen. Aber auch die jetzigen Exporteure fossiler Brennstoffe können in Zukunft eine wichtige Position einnehmen.



Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft gelingt nur gemeinsam

Neben Nordrhein-Westfalen arbeiten viele andere Bundesländer intensiv am Thema Wasserstoff. Die norddeutschen Länder sowie Bayern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg haben Strategien vorgelegt und sich deutlich für den Einsatz von Wasserstoff im Zuge der Energiewende ausgesprochen. Auch die Niederlande sind diesbezüglich sehr ambitioniert. Die niederländische Strategie hat die Themen Skalierung, Kostenreduktion und Innovation als Schlüsselemente für eine erfolgreiche Wasserstoffwirtschaft identifiziert.

Die Niederlande und hier insbesondere der in der Provinz Süd-Holland gelegene Hafen von Rotterdam haben für unser Land wichtige Funktionen. Gemeinsam bilden wir ein eng vernetztes Industriecluster und über Rotterdam und den Rhein besteht ein Zugang zum internationalen Güterverkehr. Das gemeinsame Ziel Nord-West Europa zum Frontrunner der europäischen Wasserstoffbewegung zu machen, bietet vielfältige Möglichkeiten der Zusammenarbeit, die schon heute genutzt (RH2INE, Hy3 und Trilateraler Chemie-Cluster) und ausgebaut werden. Nordrhein-Westfalen wird sich national und international noch stärker vernetzen und somit die globalen Bemühungen für eine Wasserstoffwirtschaft unterstützen.



„The developments in Germany are highly significant to the Netherlands, given that it is likely that a portion of German demand will have to be met through imports that enter Europe through the Netherlands.“





05

30–35

Wie Nordrhein-Westfalen die Wasserstoffwirtschaft startet – unsere Forderungen und Maßnahmen



Um eine Wasserstoffwirtschaft nachhaltig zu etablieren, sind ehrgeizige Marktanzreize für den Auf- und Ausbau von Wasserstofftechnologien und -infrastrukturen ebenso gefragt, wie ein Blick auf das Energieversorgungssystem als Ganzes. Hinzu kommen ein verlässlicher regulatorischer Rahmen, europaweite Standards sowie vertrauensvolle Partnerschaften als Voraussetzungen.



Unsere Forderungen an den Bund und die EU



→ Wasserstoffprojekte „ready for investment“ machen

Unter den derzeitigen Rahmenbedingungen sind Wasserstoff-Technologien noch nicht wettbewerbsfähig. Daher sind zeitnah Anreizprogramme notwendig, wie zum Beispiel Carbon Contracts for Difference (CCfD), die die Skalierung und Weiterentwicklung ermöglichen. Die Stahl-, Chemie- und petrochemische Industrie sollten hier primär adressiert werden. Außerdem sollte die Anpassung des Abgaben- und Umlagensystems im Energiesektor kurzfristig erfolgen und dabei Anreize für einen netz- und systemdienlichen Elektrolysebetrieb setzen.

→ Ambitionierte Umsetzung der RED II

Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) muss ambitioniert und zeitnah in nationales Recht umgesetzt werden. Schätzungen zufolge kann so ein Anreiz für etwa 2 Gigawatt Elektrolyseleistung in der petrochemischen Industrie geschaffen werden. Nordrhein-Westfalen als Standort von zwei großen Raffinerien hat sich bei der Erarbeitung der Bundesratsdrucksache 346/19 (B) klar für eine ambitionierte Umsetzung eingesetzt.

→ Deutschland- und europaweites Wasserstoffnetz

Es muss zeitnah eine Entscheidung zur Einführung von Wasserstofftransportnetzen in die Regulierung getroffen werden. Ein solcher Rechtsrahmen sollte den Transport von Wasserstoff unabhängig von der Art seiner Erzeugung erlauben. Mit der Aufnahme in die Regulierung können die bestehenden Planungen der Ferngasnetzbetreiber schnell umgesetzt werden. Für bereits existierende Wasserstoffnetze müssen vertretbare Lösungen gefunden werden.

→ Technologieoffenheit gewährleisten

Langfristig ist nur grüner Wasserstoff mit den Klimaschutzziele kompatibel. Für einen schnellen und kosteneffizienten Markthochlauf stellt grauer, blauer oder auch türkiser Wasserstoff eine geeignete Übergangslösung dar. Auch Wasserstoff, der als Nebenprodukt in der Industrie anfällt, sollte nutzbar gemacht werden.

→ Europäische Zertifizierungs- und Herkunftsnachweissysteme

Für den internationalen Handel mit Wasserstoff bedarf es harmonisierter Standards für die Produktqualität, die Zertifizierung bzw. Herkunftsnachweise sowie technische Normungsanforderungen. Dies sollte auf nationaler und europäischer Ebene harmonisiert, zügig und technologie-neutral entwickelt werden.

→ Gasbasierte Versorgungssicherheit „H₂-ready“ gestalten

Zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit und vor dem Hintergrund des Kernenergie- und Kohleausstiegs werden in Deutschland zeitnah umfangreiche Energieinfrastrukturen auf Gasbasis (GuD, Gasturbinen, KWK-Anlagen) benötigt. Mit Blick auf die notwendigen Investitionen in diese Technologien sollte frühzeitig die Weiterentwicklung der Wasserstoffverträglichkeit von Anlagen und Komponenten und die Möglichkeiten der Umrüstung bestehender und neu zu errichtender Erzeugungsanlagen im Sinne einer „H₂-readiness“ unterstützt werden.

→ CO₂-armen Wasserstoff zu international wettbewerbsfähigen Preisen ermöglichen

Langfristig können industrielle Wertschöpfungsstufen nur dann erhalten werden, wenn die hiesigen Unternehmen eine sichere und wettbewerbsfähige Versorgung mit Wasserstoff und erneuerbarem Strom vorfinden. Insbesondere für industrielle Anwendungen ist dies der entscheidende Treiber und Voraussetzung für eine zukunftsfähige Ausrichtung des Industriestandortes Nordrhein-Westfalen.

→ Carbon Leakage vermeiden

CO₂-arme Wasserstofftechnologien können einen großen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten, sind aber auch mit höheren Betriebs- und Investitionskosten verbunden. Die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie muss in der Transformationsphase stets berücksichtigt werden. Emissionen, die nur den Ort wechseln, haben für den globalen Klimaschutz keinen Mehrwert.

→ CCU-Potenzial für Low Carbon Industry nutzen

Carbon Capture and Usage (CCU) Technologien stellen neben Biomasse und Kohlenstoff aus Recycling einen dritten Pfad zur Low Carbon Industry dar, die als eine von sechs strategischen Feldern der Europäischen Kommission benannt wurde. Durch CCU kann beispielsweise bei der Dampfreformierung von Erdgas abgeschiedenes CO₂ unter Einsatz von Wasserstoff wieder genutzt werden (zum Beispiel als chemischer Grundstoff oder auch als synthetischer Kraftstoff).

→ Erdgasspeicher für die heutige und zukünftige Versorgungssicherheit nutzen und weiterentwickeln

Deutschland verfügt mit etwa 270 TWh über die größte Erdgasspeicherkapazität in ganz Europa, die gleichzeitig Garant für Versorgungssicherheit ist. Diese Aufgabe sollten Gasspeicher auch in einem Energiesystem mit hohem Wasserstoffanteil übernehmen. Insbesondere die Kavernenspeicher, die vorwiegend im Raum Gronau/Epe vorhanden sind, sind nach aktuellem Stand für die Speicherung von Wasserstoff gut geeignet. Durch die Weiterentwicklung in Richtung Wasserstoffspeicherung stehen in Nordrhein-Westfalen Kavernenspeicher bereit, um eine Versorgung flexibel sicherzustellen.

→ Systemübergreifende Betrachtung beim Ausbau der Energieinfrastruktur

Zur Verringerung des durch die weitere Sektorenkopplung bedingten Stromnetzausbaus sollte sich die Wasserstoffwirtschaft netzverträglich und systemdienlich in die bestehende Energieinfrastruktur einfügen und dies sollte bei der Ausgestaltung der Regulierung des Wasserstoffnetzes auch entsprechend berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 6.3). Wie bereits in der Energieversorgungsstrategie von Nordrhein-Westfalen werden auch auf Bundesebene zunehmend Forderungen nach einer integrierten Infrastrukturplanung für Strom, Gas und Wasserstoff erhoben. Dies werden wir im Blick behalten.

→ Fortsetzung und Weiterentwicklung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Es bedarf eines mehrjährigen Förderrahmens, der Einkaufsgemeinschaften (beispielsweise zur gemeinsamen Beschaffung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen für den ÖPNV) und Handlungssicherheit für Produzenten und Nachfragende ermöglicht. Weiterhin ist ein Förderrahmen für die temporäre Übernahme von Betriebskosten beziehungsweise für Preissicherungsmodelle erforderlich, der eine kostendeckende Wasserstoffproduktion und -sammlung (bei dezentral produziertem Wasserstoff in Kleinanlagen) ermöglicht.

→ Müllverbrennungsanlagen flexibilisieren und für die Wasserstoffproduktion nutzen

Die unflexible und nicht immer rentable Stromproduktion der Müllverbrennungsanlagen eignet sich gut für den Betrieb von Elektrolyseuren. Die Hälfte des dabei entstehenden Wasserstoffs sollte als grüner Wasserstoff anerkannt werden.

→ Infrastrukturnutzungsentgelte im Verkehr klimagerecht machen

Mindestens bis zum Jahr 2030 sind klare Signale notwendig, dass CO₂-frei betriebene Verkehrsmittel von Nutzungsentgelten auf Verkehrsinfrastruktur befreit sind.

→ Erhöhung der Regionalisierungsmittel für den ÖPNV

Um die durch die Clean-Vehicle-Directive der EU hervorgerufenen Mehrkosten für Fahrzeugbeschaffungen und Betriebshofanpassungen abzudecken sind Mehrmittel erforderlich.

→ Technische Standards unterstützen den Markthochlauf

Für die Betankung von schweren Nutzfahrzeugen, Binnenschiffen und Containern sowie den Langstreckentransport des Wasserstoffs in Tankschiffen bedarf es Standards, damit frühzeitig die erforderlichen (dezentralen) Infrastrukturen entstehen können.



Zentrale Maßnahmen und Ziele für Nordrhein-Westfalen



Stärkung von Forschung und Innovation

Auch wenn viele Technologien rund um Wasserstoff bereits erprobt und verfügbar sind, besteht noch großer Forschungsbedarf. Mit dem Helmholtz-Cluster für nachhaltige und infrastrukturkompatible Wasserstoffwirtschaft im Rheinischen Revier und dem ersten LOHC-Testfeld in industrieller Größenordnung wollen wir die Entwicklung vorantreiben. Außerdem werden wir die hiesigen Forschungseinrichtungen darin unterstützen, weitere Forschungsfelder zu erschließen. Durch den Aufbau von Wasserstoff Start-ups sowie die Fortsetzung der Projektinitiativen und -vernetzungen wollen wir den Transfer von der Forschung zum Business Case beschleunigen.



Wasserstoffeinsatz in der Gießereitechnik

Durch die Nutzung von Wasserstoff anstelle von fossilen Brennstoffen für das Erschmelzen oder Vorwärmen von Gießpfannen werden die verbrennungsbedingten Emissionen vermieden. Zudem ermöglichen die mit der Verbrennung von Wasserstoff einhergehenden höheren Flammentemperaturen einen effizienteren Wärmeübergang auf die Schmelze und reduzieren den Energieverbrauch. Bis 2030 soll daher ein Demonstrationsprojekt für einen mit Wasserstoff gefeuerten Drehofen zum Erschmelzen von Gusseisen umgesetzt werden.



Unternehmer Initiative „Aufbruch in die Zukunft“ gemeinsam umsetzen

Die Mitte Oktober vorgestellte Initiative mit insgesamt 13 Projekten und einem Investitionsvolumen von vier Milliarden Euro zeigt die Innovationskraft der hiesigen Unternehmenslandschaft. Gemeinsam werden wir diese Projekte, wie z. B. eine Pyrolyse-Pilotanlage für die Bandstahl-Produktion, den Elektrolyse-Aufbau im Rheinischen Revier und im Ruhrgebiet oder die Entwicklung neuer Membranen vorantreiben.



Entwicklung klimafreundlicher Kraftstoffe

Power-to-Liquids bieten vor allem Potenziale für schwer elektrifizierbare Anwendungen. Bisher bestehen nur einige Pilotanlagen im kleineren Maßstab. Wir wollen mit der Wirtschaft bis 2025 mindestens eine Demonstrationsanlage mit einer Kapazität von mehreren 100 Tonnen pro Tag realisieren. Außerdem wollen wir die Voraussetzungen dafür schaffen, dass synthetische Kraftstoffe gezielt strategisch weiterentwickelt und zu einem weiteren Baustein der klimaneutralen Transformation werden. Forschungsprojekte wie zum Beispiel das DLR Institut Future Fuels können erste Innovationstreiber sein.



Integrierter Einsatz von synthetischen Brennstoffen und CCU

In den Fliesen- und Ziegelindustrien wird vor allem Erdgas für die Beheizung von Trocknungsanlagen und Öfen eingesetzt. Synthetische Brennstoffe bieten hier kurz- bzw. mittelfristig die Möglichkeit, die CO₂-Bilanz zu verbessern. Die dadurch erreichbaren CO₂-Einsparungen sind jedoch begrenzt, da prozessbedingte Emissionen bei der Umwandlung der Ausgangsprodukte (zum Beispiel Kalkstein) ab einer Temperatur von etwa 450 Grad Celsius entstehen. Der zusätzliche Einsatz von CCU bietet aber die Möglichkeit, aus dem abgeschiedenen CO₂ wiederum synthetische Brennstoffe herzustellen. Bis 2030 streben wir den integrierten Einsatz von synthetischen Brennstoffen und CCU in der Fliesen- und Ziegelindustrie in einer Anlage industriellen Maßstabs an.



Erste großindustrielle Anlagen zur Ammoniak- und Methanolsynthese

Methanol ist ein wichtiger chemischer Grundstoff und Energieträger. Ammoniak stellt ein wertvolles Zwischenprodukt in der Produktion von Düngemitteln und Polyamiden dar. Zusätzlich könnte auch Ammoniak aufgrund seiner Transport- und Speicherfähigkeit sowie der Möglichkeit, den chemisch gebundenen Wasserstoff zurückzugewinnen, einer der Energieträger der Zukunft werden. Die jeweiligen Syntheseverfahren sind bereits erprobt und sollen daher bis 2025 in ersten Anlagen industriellen Maßstabs zum Einsatz kommen. Dies umfasst die Erschließung und Anbindung alternativer CO₂-Quellen (CCU).



Die Potenziale im Maschinen- und Anlagenbau heben

Durch die Weiterentwicklung und Umsetzung der Wasserstoffrevier-Projekte im Rheinischen Revier, dem 5-Standorte-Programm, den Aufbau eines Betriebsforschungszentrums für industrielle Elektrolýsetechnologien im Ruhrgebiet sowie den Ausbau vielfältiger und zahlreicher unternehmerischer Aktivitäten im ganzen Land können wir am Standort Nordrhein-Westfalen zukunftsfähige Arbeitsplätze entstehen lassen.



Den Markthochlauf beschleunigen

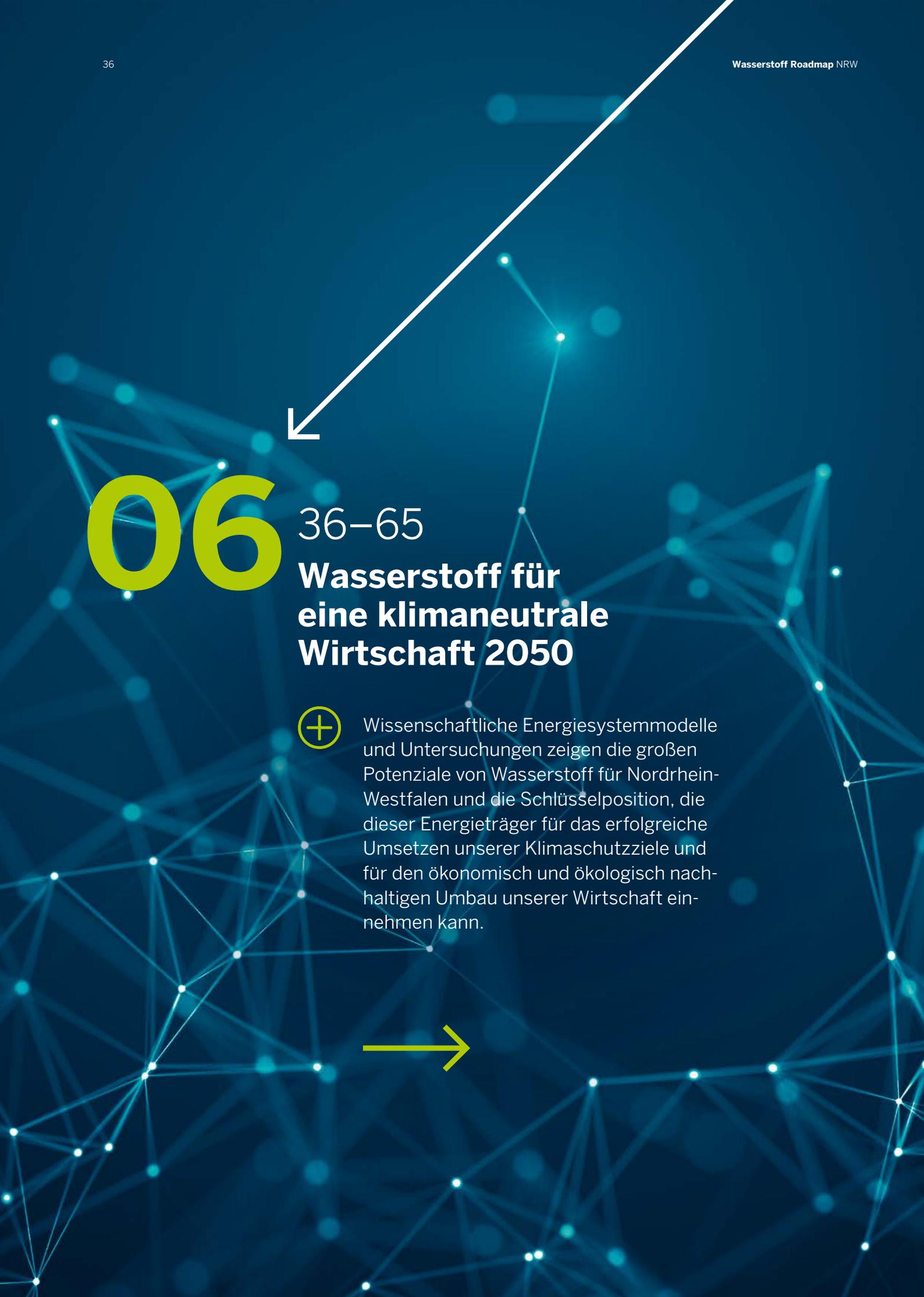
Wir wollen innerhalb des Projekts RH2INE zeitnah die ersten wasserstoffbetriebenen Binnenschiffe ermöglichen. Zusammen mit der Wirtschaft wollen wir 400 Brennstoffzellen-Lkw und die ersten Brennstoffzellen-Rangierlokomotiven bis zum Jahr 2024 auf die Straße bzw. die Schiene bringen. Die weltweit erste Direktreduktionsanlage zur Erzeugung von Stahl auf Basis von Wasserstoff soll am Standort Duisburg errichtet werden. Außerdem wollen wir die Markteinführung von Wasserstoffsystemen im Gebäudebereich anschieben und prüfen daher die Aufnahme in unsere Förderrichtlinie progres.nrw.



Ausbau und Intensivierung internationaler Partnerschaften

Importe müssen den Energie- und Rohstoffbedarf in Deutschland und Nordrhein-Westfalen zu einem großen Teil decken. Dies ist ohne eine starke und umfassende Vernetzung nicht möglich. Nordrhein-Westfalen strebt hierzu den Beitritt zur europäischen Clean Hydrogen Alliance an und wird neben den niederländischen Partnerschaften weitere Kooperationsprojekte aufbauen. Auch die grenzüberschreitende Kooperation im trilateralen Chemie-Cluster wird weiter intensiviert.





06

36–65

Wasserstoff für eine klimaneutrale Wirtschaft 2050



Wissenschaftliche Energiesystemmodelle und Untersuchungen zeigen die großen Potenziale von Wasserstoff für Nordrhein-Westfalen und die Schlüsselposition, die dieser Energieträger für das erfolgreiche Umsetzen unserer Klimaschutzziele und für den ökonomisch und ökologisch nachhaltigen Umbau unserer Wirtschaft einnehmen kann.

Die wissenschaftliche Begleitung durch das Forschungszentrum Jülich

Die im folgenden gezeigten Abbildungen und Grafiken sind das Ergebnis einer Energiesystemmodellierung des Forschungszentrum Jülich (FZJ), welche zur wissenschaftlichen Begleitung der hier vorliegenden Wasserstoff-Roadmap für das MWIDE durchgeführt wurde. Das Institut für Techno-Ökonomische Systemanalyse des FZJ arbeitet dabei nicht nur mit einem Modell, sondern mit einer ganzen Reihe von Modellen, welche unter anderem das europäische Höchst- und Hochspannungsnetz, weltweite Energiehandelsstrukturen, die Erzeugung erneuerbarer Energien oder die Auslegung von Wasserstoffinfrastrukturen abbilden. Die entwickelten Modelle sind miteinander gekoppelt und können Energieflüsse unter der Vorgabe von Klimaschutzziele in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung kostenoptimal berechnen.

Die hier gezeigten Ergebnisse können keine exakte Prognose für die weitere Entwicklung der Energiewende in Deutschland und Nordrhein-Westfalen darstellen, sondern zeigen die weiteren Entwicklungen im Energiesektor, die sich aus der Modellierung ergeben, unter Berücksichtigung der gesetzten Klimaschutzziele bis 2050. Für energiepolitische Handlungsnotwendigkeiten, die sich daraus ableiten lassen, ist es natürlich entscheidend, solche Modellergebnisse vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen, die jedes Modell zwangsläufig vornehmen muss, zu sehen und zu interpretieren.

Wesentliche Randbedingung für das hier zugrunde gelegte Szenario sind die aktuellen Klimaschutzziele. Bis zum Jahr 2030 sollen die Treibhausgase in Deutschland um 55 Prozent und bis zum Jahr 2050 um 95 Prozent reduziert werden. Auf Basis dieser und weiterer Annahmen beschreibt das Szenario einen volkswirtschaftlich kostenoptimierten Transformationspfad für das Erreichen der Ziele bis zum Jahr 2050.

55 Prozent

**Reduzierung der Treibhausgase
in Deutschland bis 2030**



95 Prozent

**Reduzierung der Treibhausgase
in Deutschland bis 2050**

6.1 Wo wird wie viel Wasserstoff benötigt?

In Deutschland werden heute jährlich etwa 55 TWh (1,65 Millionen Tonnen) Wasserstoff verbraucht, 30 Prozent davon in Nordrhein-Westfalen⁸. Der weit überwiegende Teil wird in der chemischen und petrochemischen Industrie eingesetzt. In der Petrochemie wird das Gas im Raffinerieprozess bei der Herstellung von Mineralölprodukten eingesetzt. Ein weiterer großer Anwendungsbereich sind Syntheseverfahren in der Grundstoffchemie (beispielsweise Ammoniak und Methanol). Der benötigte Wasserstoff wird dabei weit überwiegend vor Ort durch Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen.

Erwartet wird, dass der Wasserstoffbedarf in Zukunft deutschland- und weltweit erheblich ansteigen wird. Zunächst gilt dies voraussichtlich in der Industrie und im Verkehr, aber auch im Energiesektor inklusive Wärmeanwendungen. Prognosen sehen den Wasserstoffbedarf in Deutschland im Jahr 2050 bei 250 bis 800 TWh (7 bis 24 Millionen Tonnen) pro Jahr⁹, was bei einer elektrolytischen Erzeugung in etwa einem Strombedarf von 375 bis 1.333 TWh entspricht. Zum Vergleich: Die Nettostromerzeugung Deutschlands lag 2019 bei 518 TWh.

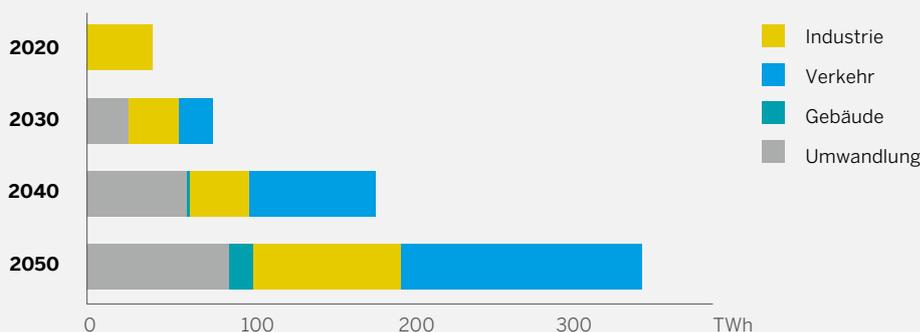
Die Ergebnisse des FZJ zeigen in Deutschland eine kontinuierlich ansteigende Wasserstoffnachfrage, die 370 TWh/a im Jahr 2050 erreicht (Abbildung 11). Die Sektoren Industrie und Verkehr gehören im Jahr 2050 mit Anteilen von 26 Prozent (94 TWh) und 38 Prozent (140 TWh) zu den wichtigsten Wasserstoffverbrauchern.

Im Jahr 2050 wird Wasserstoff im Verkehr für ein breites Spektrum von Anwendungen eingesetzt, inklusive Pkws, leichte und schwere Nutzfahrzeuge, Züge und Busse. Im Umwandlungssektor wird Wasserstoff vor allem für die Rückverstromung verwendet. In der Industrie wird Wasserstoff zur Stahldirektreduktion, Zementherstellung und Prozesswärmeerzeugung sowie als ein chemischer Grundstoff zur Herstellung von Methanol und Ammoniak eingesetzt. Der nicht-energetische Bedarf der Chemieindustrie ist modellseitig an dieser Stelle nicht abgebildet.

Nach Berechnungen des FZJ bleibt die Gesamtnachfrage nach Wasserstoff im Industriesektor bis 2040 in Summe konstant. Dies scheint zunächst nicht mit dem von uns erwarteten starken Hochlauf in der Industrie übereinzustimmen. Der scheinbare Widerspruch lässt sich aber auflösen: Der modellmäßige Einsatz von Wasserstoffanwendungen erfolgt im Zuge einer volkswirtschaftlichen Optimierung, die die Anwendungen nach der Höhe der CO₂-Vermeidungskosten reiht. Diese Betrachtung lässt jedoch die betriebswirtschaftliche Perspektive unberücksichtigt, die beispielsweise in der Stahl- und Chemieindustrie durch lange Investitionszyklen und damit frühzeitige Weichenstellungen bei Neuinvestitionen in Richtung Wasserstoffanwendungen gekennzeichnet ist. Insbesondere hier müssen also bereits heute die notwendigen Investitionsentscheidungen getroffen werden, so dass Wasserstoff deutlich vor 2040 zur Anwendung kommt.

Abbildung 11: Entwicklung des jährlichen Wasserstoffbedarfs in Deutschland nach Sektor

Quelle: Begleitsudie FZJ



104 Terawattstunden

Wasserstoffbedarf pro Jahr in NRW werden für das Jahr 2050 berechnet.

Für Nordrhein-Westfalen beläuft sich der vom FZJ für das Jahr 2050 modellierte Wasserstoffbedarf auf 104 TWh pro Jahr. Dies entspricht knapp 30 Prozent der deutschen Gesamtnachfrage. Der nicht-energetische Bedarf der Chemieindustrie ist hier nicht berücksichtigt und könnte die Nachfrage nochmal deutlich erhöhen. An dieser Stelle ist allerdings nicht abzusehen, ob dieser Bedarf tatsächlich in Form von Wasserstoff oder in Form von Power-to-Liquids bzw. jeweils anteilig importiert wird. Auch das chemische Recycling von Kunststoffabfällen kann einen großen Einfluss auf die langfristige Nachfrage haben. Bis zu zwei Millionen Tonnen Kunststoffabfälle pro Jahr könnten in Nordrhein-Westfalen stofflich genutzt werden und damit den Importbedarf reduzieren. Der Verband der Chemischen Industrie (VCI) hat für eine klimaneutrale Chemieindustrie einen gesamtdeutschen Wasserstoffbedarf von 227 TWh pro Jahr errechnet¹⁰.

Unter der Annahme, dass (konservativ geschätzt) etwa 30 Prozent dieser Nachfrage auf Nordrhein-Westfalen entfallen, entsteht ein Mehrbedarf von 68 TWh pro Jahr und somit ein Wasserstoffbedarf von 172 TWh in Nordrhein-Westfalen. Verfolgt man diesen Ansatz weiter, wird ebenfalls sehr deutlich, dass die dadurch ausgelöste Stromnachfrage die hiesigen Kapazitäten deutlich übersteigt (Abbildung 12).

Die in Abbildung 13 dargestellte räumliche Verteilung der Wasserstoffnachfrage zeigt die Bedeutung von Wasserstoff zur Sicherung der großen Industriestandorte im Land: das Rheinland, Gelsenkirchen, Oberhausen und Marl als große Chemiestandorte, die Stahlproduktion in Duisburg und die Zementindustrie in Soest, sowie in den Kreisen Warendorf, Steinfurt und dem Märkischen Kreis.

Abbildung 12: Vergleich zwischen der erwarteten Stromproduktion und dem theoretischen Strombedarf für eine vollständig klimaneutrale Versorgung in NRW

Quelle: Begleitstudie FZJ und VCI

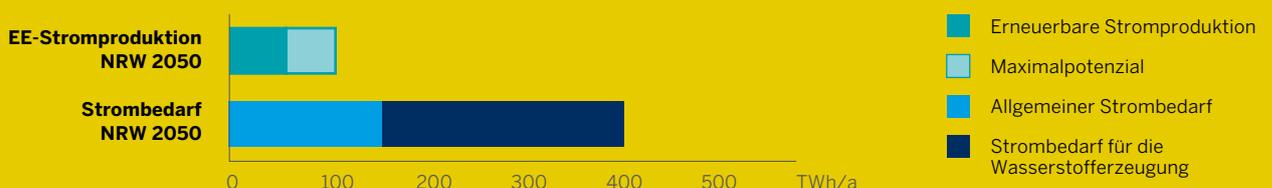
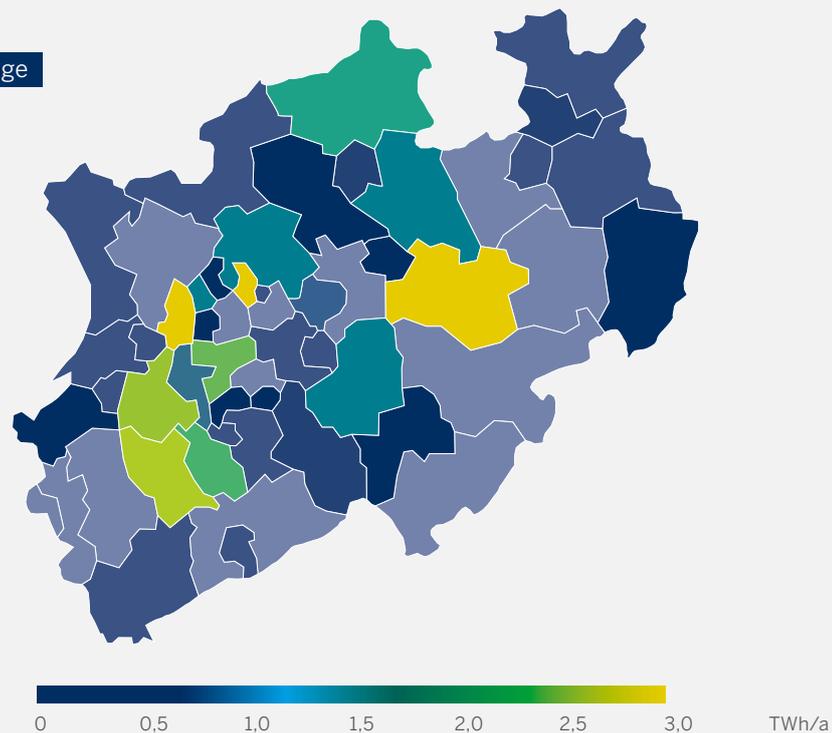


Abbildung 13: Wasserstoffnachfrage
in NRW im Jahr 2050

Quelle: Begleitstudie FZJ



Wasserstoff im Energiesektor

Im Energiesektor kann Wasserstoff ein wichtiger Baustein zur weiteren Dekarbonisierung des Strom- und Wärmesektors (zum Beispiel Fernwärme, aber auch lokale Versorgungsnetze) sein. Hierfür müssen Gaskraftwerke und KWK-Anlagen H₂-ready ausgelegt werden. Die Bundesregierung hat in der nationalen Wasserstoffstrategie angekündigt, zur Stärkung der langfristigen Ausrichtung der Wärmeversorgung auf die Nutzung von erneuerbaren Energien innerhalb des KWKG Möglichkeiten für die Förderung von H₂-ready Anlagen zu prüfen.

Aktuell ist eine 100 prozentige H₂-Readiness weder bei gasbasierten KWK-Anlage noch im Bereich der großen Gasturbinen und der Gasnetzinfrastruktur gängiger Stand der Technik. Eine Umrüstungsoption beinhaltet daher in erster Linie die Möglichkeit, Energieanlagen auf Basis des Energieträgers Erdgas sukzessive – und über einen längeren Zeitraum hinweg – auf die Verbrennung

bzw. auch den Transport von 100 Prozent Wasserstoff vorzubereiten. Dazu sind zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, die von den Anlagenbauern auch bereits intensiv betrieben werden und für Nordrhein-Westfalen als Standort vieler Anlagenbauer sehr wichtig sind, als auch Investitionen in neue umrüstbare Energieanlagen, Peripherie und Gasnetzinfrastruktur notwendig.

Die Weiterentwicklung der Wasserstoffverträglichkeit von Anlagen und Komponenten und die Möglichkeiten der Umrüstung bestehender und kurzfristig neu errichteter Erzeugungsanlagen auf Gasbasis sowie zugehöriger Infrastruktur im Sinne einer H₂-readiness sollte unterstützt werden. Dies verhindert Lock-In-Effekte und gibt gleichzeitig mehr Investitionssicherheit für den zeitnah erforderlichen Neubau gasbasierter, versorgungssicherer Erzeugungsanlagen und ihrer zugehörigen Infrastruktur.

6.1.1 Mit der Industrie jetzt die Wasserstoffwirtschaft starten

Nordrhein-Westfalen ist einer der wichtigsten Industriestandorte Europas. In über 10.000 Industriebetrieben arbeiten hier mehr als 1,26 Millionen Menschen. Die nordrhein-westfälische Industrie sorgt für Wohlstand, Arbeitsplätze und Wachstum: etwa 20 Prozent der Erwerbstätigen sind in der Industrie beschäftigt¹¹. Hinzu kommen viele Beschäftigte, die bei Dienstleistungsunternehmen tätig sind und so indirekt für den Industriesektor arbeiten.

Herausforderungen Klimaschutz und Standortsicherung

Zwischen 1990 und 2019 hat die nordrhein-westfälische Industrie ihre Emissionen bereits um rund 40 Millionen Tonnen CO₂ gesenkt¹². Dies entspricht einer Minderung von fast 50 Prozent. Die Landesregierung hat sich dem Klimaschutzabkommen von Paris verpflichtet und das Ziel der Treibhausgasneutralität für das Jahr 2050 fixiert. Das ist für die hiesige Industrie besonders herausfordernd, weil viele Unternehmen international tätig sind und ihre Produkte in Konkurrenz zu Unternehmen im europäischen und weltweiten Ausland anbieten. Diese Konkurrenten produzieren häufig unter deutlich niedrigeren Klima- und Umweltschutzanforderungen und somit kostengünstiger. Ein Abwandern der Industrie an solche Standorte wäre nicht nur ein wirtschaftlicher Verlust, sondern hätte aufgrund der globalen Wirksamkeit von Treibhausgasemissionen auch negative Folgen für den Klimaschutz. Um dies zu vermeiden, müssen Industrieprozesse neu gedacht und innovative Lösungen und Strategien entwickelt werden, die Klimaschutz und Wettbewerbsfähigkeit am Standort verbinden. Für die Industrie Nordrhein-Westfalens ergeben sich Chancen, eine Vorreiterrolle in der Entwicklung und Vermarktung neuer Technologien sowie dem Aufbau dazu nötiger Infrastruktur einzunehmen. Eine solche Chance ist der weitreichende Einsatz von Wasserstoff.

Dabei kann Wasserstoff auf zwei Arten genutzt werden: als Energieträger für beispielsweise besonders hohe Temperaturbedarfe und als Grundstoff (Feedstock), zum Beispiel für die Herstellung von Kunststoffen. Eine genauere Betrachtung einzelner Branchen zeigt, wo und warum Wasserstoff entscheidend für die klimaneutrale Industrie der Zukunft wird.

40
Millionen Tonnen
CO₂ hat die Industrie
in NRW seit 1990
eingespart. Das sind
fast 50 Prozent.

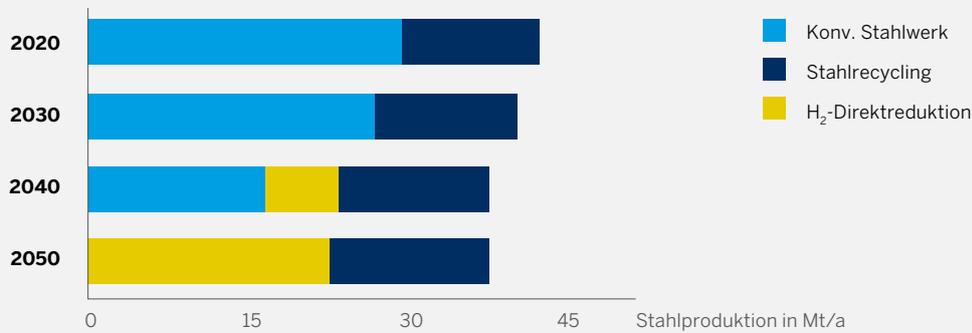
Nordrhein-Westfalens Stahlindustrie als Treiber der Wasserstoffwirtschaft

In Nordrhein-Westfalen werden 16 Millionen Tonnen Rohstahl und damit 38 Prozent der gesamten Produktion in Deutschland hergestellt. Der Großteil des Stahls wird über die klassische Hochofenroute hergestellt, bei der erhebliche CO₂-Mengen emittiert werden: Dabei entstehen etwa 40 Prozent der industriellen CO₂-Emissionen in Nordrhein-Westfalen¹³. Die nordrhein-westfälische Stahlbranche beschäftigt circa 45.500 Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer¹⁴. Noch mehr als in den anderen Branchen gilt es hier Klimaschutz mit der Sicherung des Produktionsstandorts und damit dem Erhalt vieler Arbeitsplätze in Einklang zu bringen.

In Deutschland wird heute rund 30 Prozent des Stahls über die Elektrolichtbogenroute produziert (Stahlrecycling, Abbildung 14). Der zukünftige Anteil dieses Verfahrens an der gesamten Stahlproduktion ist jedoch limitiert – zum einen da sich durch Verunreinigungen im Schrott nur eingeschränkt hochwertige Flachstähle herstellen lassen und zum anderen aufgrund der begrenzten Schrottverfügbarkeit. Die für diese Roadmap durchgeführte Begleitstudie des FZJ prognostiziert einen geringen Anstieg des Anteils von Sekundärstahl bis 2050, siehe Abbildung 14.

Abbildung 14: Entwicklung der Herstellungsverfahren in der Stahlproduktion bis 2050 in Deutschland

Quelle: Begleitstudie FZJ



Der Großteil der Produktion wird also weiterhin aus Eisenerz hergestellter Primärstahl sein. Das mit Abstand aussichtsreichste Verfahren für eine klimafreundliche Primärstahlproduktion ist die sogenannte Wasserstoffdirektreduktion. Hierbei wird zur Reduktion des Eisenerzes Wasserstoff statt Koks und Einblaskohle verwendet – so entsteht bei der Herstellung kein CO₂. Bei der Wasserstoffdirektreduktion entsteht fester Eisenschwamm, der dann noch in Elektrolichtbogenöfen zu Rohstahl weiterverarbeitet werden muss.

Die Umstellung auf Wasserstoffdirektreduktion wird für einen enormen Wasserstoffverbrauch sorgen. Berechnungen des FZJ gehen im Jahr 2050 von einem Bedarf von über 40 TWh pro Jahr im Stahlsektor in Deutschland aus. Im Vergleich mit anderen Studien fällt der Bedarf eher gering aus: eine Studie des Umweltbundesamts sieht eine jährliche Nachfrage von 66 TWh¹⁵ und die Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen sogar bis zu 80 TWh¹⁶. Die Bandbreite ergibt sich durch den Einfluss verschiedener Randbedingungen wie zum Beispiel der allgemeinen Entwicklung des Stahlmarkts, des zukünftigen Anteils der Sekundärstahlroute oder des spezifischen Wasserstoffverbrauchs pro Tonne Stahl.

Abbildung 14 zeigt die große Herausforderung, vor der wir stehen. Die Ergebnisse des FZJ sehen auf Basis der CO₂-Vermeidungskosten bis zu den 2040er Jahren trotz des großen Klimaschutzpotenzials kein Geschäftsmodell für Wasserstoff in der Stahlproduktion. Eine Umstellung der Primärroute zu diesem späten Zeitpunkt ist jedoch insbesondere mit Blick auf den von Agora Energiewende und dem Wuppertal Institut ermittelten Reinvestitionsbedarf der Hochöfen von 53 Prozent der gesamten Erzeugungskapazität bis 2030 fatal für den industriellen Klimaschutz und den Erhalt des Stahlstandorts Deutschland¹⁷. Investitionen in neue klimafreundliche Produktionskapazitäten müssen daher jetzt beginnen und nicht erst im Jahr 2040. Daher unterstützt Nordrhein-Westfalen die zeitnahe Einführung von Carbon Contracts for Difference (CCfD) um Investitionen und Technologieentwicklung schnell anzureizen und Investitionen für die Unternehmen attraktiver zu gestalten.

Nordrhein-Westfalen ist hier in einer Vorreiterrolle. In diesem Jahr hat Thyssenkrupp Steel seine Klimastrategie zur nachhaltigen Stahlproduktion veröffentlicht und plant ab 2024 die erste großindustrielle Wasserstoffdirektreduktionsanlage in Betrieb zu nehmen. Zur Versorgung der energieintensiven Industrie, wie der Stahlindustrie, muss der Aufbau der notwendigen Wasserstoffinfrastruktur und somit die Vernetzung mit günstigen Erzeugungsstandorten in insbesondere den Niederlanden und Norddeutschland schon jetzt vorangetrieben werden – so entsteht der Kristallisationskeim für eine europäische Wasserstoffwirtschaft.

55 Terawattstunden

Wasserstoff verbraucht die deutsche Chemieindustrie im Jahr.

Mit Wasserstoff zur klimaneutralen Chemieindustrie

Neben der Stahlindustrie ist die Chemieindustrie die wichtigste Branche der nordrhein-westfälischen energieintensiven Grundstoffindustrie. Die deutsche Chemieindustrie hat schon heute einen Wasserstoffbedarf von etwa 55 TWh pro Jahr. Der Großteil wird dabei stofflich – also nicht als Energieträger – für die Produktion der Grundstoffchemikalien Methanol und Ammoniak und in der Raffineriebranche benötigt. Für die Methanolsynthese wird der Wasserstoffbedarf heute vor allem über die partielle Oxidation von Schweröl und die Dampfreformierung von Erdgas gedeckt. Bis 2050 ist eine fast vollständig

defossilisierte Methanolproduktion nötig, die neben einem Wasserstoffbedarf von etwa 7 TWh pro Jahr auch einen erhöhten Strombedarf mit sich bringt, siehe Abbildung 15.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die zukünftige Produktion von Ammoniak. Der neben Stickstoff zur Ammoniak-synthese benötigte Wasserstoff wird heute vollständig durch die Dampfreformierung von Erdgas bereitgestellt. Für eine annähernd klimaneutrale Herstellung muss dieser Wasserstoffbedarf bis 2050 komplett durch Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. Dabei entsteht ein Wasserstoffbedarf von circa 15 TWh pro Jahr in Deutschland.

Abbildung 15: Entwicklung des Energiebedarfs zur Methanolsynthese bis 2050 in Deutschland

Quelle: Begleitsudie FZJ

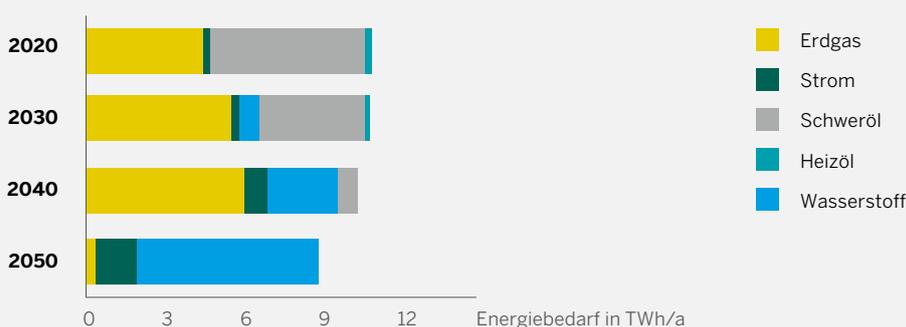
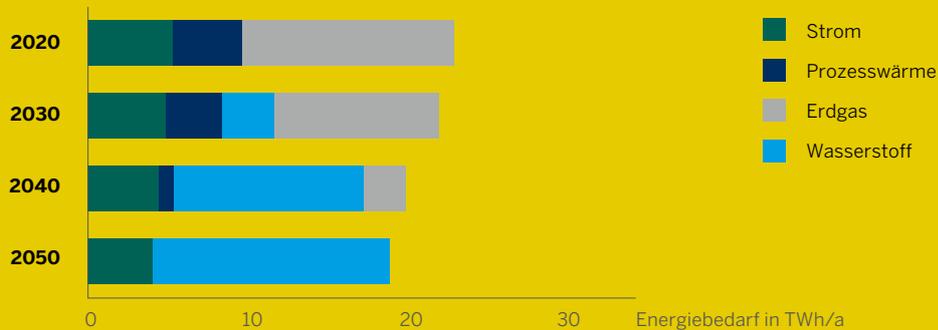


Abbildung 16: Entwicklung des Energiebedarfs zur Ammoniaksynthese bis 2050 in Deutschland

Quelle: Begleitsudie FZJ



Der Ersatz grauer Wasserstoffquellen durch grünen Wasserstoff beginnt in den Szenarioberechnungen zwar schon in den 2030er Jahren, allerdings wird erst ab den 2040er Jahren eine wirklich größere Menge grünen Wasserstoffs eingesetzt. Andere Studien sehen auf der Basis von CO₂-Vermeidungskosten ebenfalls eine späte Wirtschaftlichkeit der Methanol- und Ammoniaksynthese mit grünem Wasserstoff¹⁸.

Ähnlich wie in der Stahlindustrie berücksichtigen die FZJ-Ergebnisse jedoch auch hier nicht die langen Investitionszyklen und Reinvestitionsbedarfe. Auch die mit neuen innovativen Technologien verbundenen Exportpotenziale kann ein rein kostenbasiertes Modell nicht erfassen. Daher müssen frühzeitig die Rahmenbedingungen für Business Cases mit grünem Wasserstoff in der Chemieindustrie durch die EU und den Bund gesetzt werden.

Neben der Grundstoffindustrie steht insbesondere auch die Raffineriebranche vor großen Herausforderungen. Der Wandel von Verbrennungsmotoren zu anderen Mobilitätskonzepten wird die Nachfrage nach fossilen Kraftstoffen mehr und mehr reduzieren. Durch den Einsatz von grünem Wasserstoff, der grauen Wasserstoff im Raffinerieprozess ersetzt, können kurz- und mittelfristig CO₂-Emissionen eingespart werden. In der Shell Rheinland Raffinerie wird dieses Konzept bereits im Projekt REFHYNE umgesetzt. Durch Power-to-Liquid Technologien können synthetische Kraftstoffe hergestellt

werden, zum Beispiel für die Luft- und Schifffahrt. Durch die Fischer-Tropsch-Synthese lässt sich Naphtha, einer der wichtigsten Rohstoffe der chemischen Industrie, auf Basis von Kohlenmonoxid und Wasserstoff produzieren. Für Nordrhein-Westfalen als Standort zweier großer Raffinerien sind dies wichtige und zukunftssträchtige Technologiepfade, die weiter erschlossen werden sollten.

Wasserstoff als Energieträger für wärmeintensive Industriebranchen

In vielen Industriebranchen ist Erdgas der Hauptenergieträger um notwendige Prozesswärme zu erzeugen. Zum Erreichen der Klimaschutzziele muss die Wärmeerzeugung in diesen Branchen auf klimaneutrale Quellen umgestellt werden. Die Elektrifizierung ist in vielen Prozessen aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht möglich. Für die Zementindustrie stehen bisher noch keine elektrisch beheizten Drehrohröfen im großen Maßstab zur Verfügung. Auch in der Glasindustrie ist die elektrische Erzeugung der sehr hohen Schmelztemperaturen schwierig und die Elektrifizierung aufgrund der langen Laufzeiten der Schmelzwannen aktuell unwirtschaftlich. In der Ziegelherstellung wird die Oberflächenbeschaffenheit und Farbe durch die Brennraumatmosphäre eingestellt und in vielen metallverarbeitenden Betrieben sind die Bauteile zu groß um elektrisch aufgeheizt zu werden.

Daher kann in diesen Branchen ebenfalls ein erheblicher Wasserstoffbedarf entstehen. Die dena-Leitstudie „Integrierte Energiewende“ prognostiziert für Anwendungen dieser Art im Jahr 2050 einen gesamtdeutschen Wasserstoffbedarf von 40 TWh¹⁹. In der Begleitstudie des FZJ wurde ein Bedarf an Wasserstoff von circa 30 TWh pro Jahr ermittelt, wobei dieser hauptsächlich in der Zementherstellung anfällt. Dieses Ergebnis berücksichtigt nicht das Potenzial von CO₂-Abscheidungstechnologien (Carbon Capture), welche üblicherweise für die CO₂-Reduktion in der Zementindustrie gesehen werden.

In den Fliesen- und Ziegelindustrien werden circa 90 Prozent Erdgas und 10 Prozent Strom zur Umwandlung in thermische Energie zum Zweck der Beheizung von Trocknungsanlagen und Öfen eingesetzt. Synthetische Brennstoffe bieten hier kurz- bzw. mittelfristig die Möglichkeit, die CO₂-Bilanz zu verbessern. Die dadurch erreichbaren CO₂-Einsparungen sind jedoch begrenzt, da prozessbedingte Emissionen bei der Umwandlung der Ausgangsprodukte (zum Beispiel Kalkstein) ab einer Temperatur von etwa 450 Grad Celsius entstehen und für das Brennen der Fliesen und Ziegel Temperaturen im Bereich von 1000 Grad Celsius erforderlich sind. Der zusätzliche Einsatz von CCU bietet allerdings die Möglichkeit, aus dem abgeschiedenen CO₂ wiederum synthetische Brennstoffe zur Beheizung herzustellen. Bis 2030 wird somit der integrierte Einsatz von synthetischen Brennstoffen und CCU in der Fliesen- und Ziegelindustrie in einer Anlage industriellen Maßstabs angestrebt.

Erste Projekte der nordrhein-westfälischen Industrie zur Nutzung von Wasserstoff für wärmeintensive Prozesse wurden schon gestartet, wie zum Beispiel das Projekt HyGlass für die Glasindustrie, oder befinden sich aktuell in Planung oder Vorbereitung. Demonstrationsprojekte sind wichtig, da in der Industrie jetzt mit der Entwicklung notwendiger Technologien, wie zum Beispiel Wasserstoffbrennern, begonnen werden muss, um die Weichen für die Zukunft zu stellen.

Mit Nordrhein-Westfalens Industrie jetzt die Wasserstoffwirtschaft starten

Gemeinsam werden wir jetzt in die Wasserstoffwirtschaft starten. Die nordrhein-westfälischen Unternehmen haben ihr besonderes Engagement und ihre Innovationskraft mit der Projekt-Initiative „Aufbruch in die Zukunft“ eindrucksvoll unter Beweis gestellt. Im engen Schulterschluss werden wir die hierin skizzierten Projekte weiter qualifizieren und auf dem Weg in die Umsetzung unterstützen.

Die Technologien für klimaneutrale Industrieprozesse mit Wasserstoff sind größtenteils grundsätzlich vorhanden. Noch fehlt allerdings die Wirtschaftlichkeit, um frühzeitig auf diese Technologien umzustellen. Angesichts langer Investitionszyklen und zeitnah anstehender Investitionsbedarfe in der Industrie muss die Transformation in Richtung Klimaneutralität schon heute begonnen werden. Besonders die Grundstoffindustrie steht in den nächsten zehn Jahren vor großen Reinvestitionsaufgaben²⁰. Wird dann nicht in neue innovative Herstellungsverfahren investiert, drohen nicht nur die Klimaschutzziele verfehlt zu werden, sondern auch Wertschöpfung und Arbeitsplätze in Nordrhein-Westfalen bzw. in Deutschland und Europa wären gefährdet.

Um den Transformationspfad zur Klimaneutralität vor Ort mit der Industrie zu gestalten, müssen daher politische Instrumente, wie beispielsweise Carbon Contracts for Difference (CCfD), diskutiert werden, mit denen sich Investitionen in klimaneutrale Technologien bereits in den kommenden Jahren anregen lassen. So ließe sich der rechtzeitige Einstieg in eine industrielle Wasserstoffnutzung fördern. Dies ist auch nötig, um den zügigen Aufbau einer entsprechenden Versorgungsinfrastruktur mit Wasserstoff anzuregen. Auch der Infrastrukturaufbau ist eine langfristige Aufgabe, die nicht erst angegangen werden kann, wenn der Wasserstoffeinsatz wettbewerbsfähig ist. Daher wird für den so gestalteten Transformationspfad auch der übergangsweise Einsatz blauen Wasserstoffs aus Dampfreformierung von Erdgas mit CCS notwendig sein, um Versorgungssicherheit für die Industrie herzustellen. Enge Kooperationen innerhalb Europas aber auch mit anderen potenziellen Wasserstoffexportnationen (etwa in Nordafrika) sind dafür notwendig.

Die starke Grundstoffindustrie Nordrhein-Westfalens hat die Chance, durch den Umstieg auf wasserstoffbasierte Technologien der zentrale Treiber für eine Wasserstoffwirtschaft in Deutschland und Europa zu werden. So lässt sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette und über die verschiedenen Branchen hinweg eine Wasserstofftechnologieführerschaft entwickeln und sichern.

6.1.2 Wasserstoff-Kristallisationspunkte im Verkehr schaffen

Nordrhein-Westfalen ist mit seinen etwa 30.000 Kilometer überörtlichen Straßen, 6.000 Kilometer Gleisstrecke für Eisen- und Straßenbahn, 720 Kilometer Wasserstraßeninfrastruktur mit 120 Häfen sowie zwei internationalen Großflughäfen und vier weiteren Flughäfen eng in das europäische Verkehrsnetz eingebunden²¹.

Klimapolitische Ziele und Maßnahmen

Die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors im Jahr 2019 werden nach einer vorläufigen Abschätzung des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) Nordrhein-Westfalen 33,3 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente betragen²². Dies sind 14,7 Prozent der nordrhein-westfälischen CO₂-Emissionen. Die Emissionen im Verkehrssektor sind im letzten Jahr leicht angestiegen und seit Jahrzehnten nahezu konstant, so dass der Verkehrssektor weiterhin keinen Beitrag zur CO₂-Emissionsminderung leistet.

Laut dem Klimaschutzprogramm der Bundesregierung sollen die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor im Jahr 2030 gegenüber 1990 um 40 bis 42 Prozent sinken²³. Das Klimaschutzprogramm der Bundesregierung sieht hier umfassende Maßnahmen zur Verlagerung von Personen- beziehungsweise Güterverkehren auf die Schiene, den öffentlichen Verkehr, die Binnenschifffahrt und das Fahrrad. Alternative Kraftstoffe und Antriebe im Personen- und Güterverkehr und die dazugehörige Infrastruktur sollen ausgebaut und entwickelt werden. Verkehre sollen automatisiert und vernetzt sowie innovative Mobilitätsformen ermöglicht werden. Konkret sollen bis zum Jahr 2030 ein Drittel der Verkehrsleistung im schweren Straßengüterverkehr elektrisch oder mit strombasierten Kraftstoffen erbracht werden.

Darüber hinaus wird auf europäischer Ebene eine Erhöhung der europäischen Klimaschutzziele wahrscheinlich: Bis zum Jahr 2030 sollen die CO₂-Emissionen der EU um 55 Prozent statt bisher 40 Prozent sinken. Zu den Zielerreichungsmaßnahmen soll auch eine Verschärfung der europäischen Flottengrenzwerte und eine Einbeziehung des Verkehrssektors in den europäischen Emissionshandel gehören.

Aktuell gilt schon heute die europäische Richtlinie über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge²⁴, die Auftraggebern die dem europäischen Vergaberecht unterliegen, Mindestanteile von sauberen Fahrzeugen bei Fahrzeugneuanschaffungen vorschreibt. Dies sind bei leichten Nutzfahrzeugen 38,5 Prozent, bei schweren Nutzfahrzeugen 10 Prozent (ab 2026: 15 Prozent) und bei Bussen 45 Prozent (ab 2026: 65 Prozent).

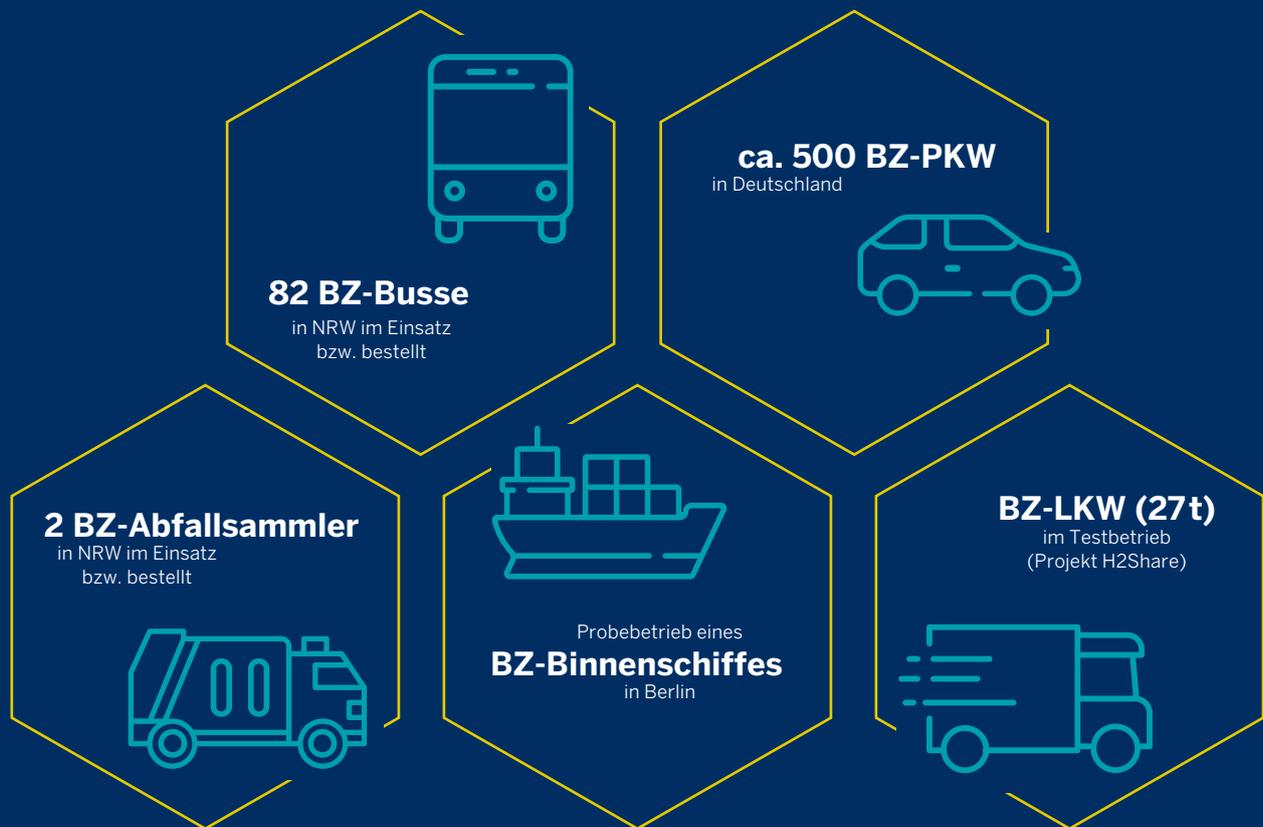
Europäische und nationale Wasserstoffstrategie

Die deutsche und europäische Wasserstoffstrategie kommen zu vergleichbaren Schlussfolgerungen hinsichtlich der Einsatzpotenziale von Wasserstoff-Anwendungen im Verkehrssektor:

- Intensiv genutzte Flotten
- Schwere Nutzfahrzeuge
- ÖPNV-Busse
- Binnenschifffahrt
- Intralogistik

Die angestrebten Verkehrsverlagerungen im Güterverkehr auf die Schiene und das Schiff sowie im Personenverkehr auf den ÖPNV, der weitere zunehmende Versandhandel und das EU-Mobilitätspaket I mit seinem enthaltenen Verbot die wöchentliche Ruhezeit im Fahrzeug zu verbringen, unterstützen massiv die Einsatzzwecke für die sich Brennstoffzellenfahrzeuge gut eignen, da wahrscheinlich zunehmend Strecken zurückgelegt werden, die in der täglichen Arbeitszeit zu schaffen sind.

Abbildung 17: Status Quo der Wasserstoffmobilität



Kristallisationspunkte für Wasserstoffanwendungen im Verkehr schaffen

Nordrhein-Westfalen will die dargestellten Potenziale von Wasserstoff-Anwendungen im Verkehrssektor ausschöpfen. Mit Unterstützung der weiter zu entwickelnden Förderprogramme des Bundes und der EU sollen in Nordrhein-Westfalen noch mehr regionale und branchenspezifische Kristallisationspunkte für Wasserstoffanwendungen im Verkehr geschaffen werden. Die bestehende Netzwerk- und Öffentlichkeitsarbeit soll dies unterstützen und soll weiter fortgesetzt werden. Die Kristallisationspunkte sollen vor allen Dingen branchenspezifisch verknüpft werden. Dies bedeutet konkret, dass branchenspezifische Initialberatungen erfolgen und die Akteure dabei unterstützt werden, Fördermittel zu erhalten. Aktuell haben sich in Nordrhein-Westfalen folgende Initiativen auf den Weg gemacht:

In der grenzüberschreitenden Kooperation „RH2INE“ mit der Provinz Süd-Holland für einen klimaneutralen Transportkorridor „Rhein-Alpen“ wird aktuell der Aufbau von Wasserstoff-Infrastruktur in den Häfen Rotterdam, Duisburg, Neuss/Düsseldorf und Köln mit EU-Mitteln untersucht. Außerdem wird für Rangierlokomotiven die Vorbereitung eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens zur Umrüstung von zwei Rangierlokomotiven auf Brennstoffzelleneinsatz in unterschiedlichen Leistungsklassen unterstützt (siehe auch Kapitel 3).

Die drei Finalisten im Wettbewerb Modellregion Wasserstoffmobilität Nordrhein-Westfalen

- ⌚ Die Gewinner-Region „DüsselRheinWupper“ mit den Städten Düsseldorf, Duisburg und Wuppertal sowie dem Rhein-Kreis Neuss will in drei Schritten ein flexibles, überregionales Wasserstoffgesamtsystem aufbauen. Im Jahr 2030 wird in der Region ein Potenzial für knapp 6.000 Brennstoffzellenfahrzeuge gesehen²⁵. Darüber hinaus arbeiten die lokalen Abfallwirtschaftsunternehmen an dem Einsatz von wasserstoffbetriebenen Abfallsammelfahrzeugen. Der benötigte Wasserstoff kann vor Ort am Müllheizkraftwerk erzeugt werden.
- ⌚ In der Region „H2R – Wasserstoff Rheinland“ sollen die Akteure vernetzt werden, Versorgungsinfrastruktur und -sicherheit soll aufgebaut werden und ein Marktplatz für Wasserstoff entstehen. Im Jahr 2030 sollen dort mehr als 1.000 Brennstoffzellenfahrzeuge, darunter auch eine Rheinfähre mit Brennstoffzellenantrieb, verkehren²⁶.
- ⌚ Der Kreis Steinfurt will mit fünf Standorten, an denen regenerativer Strom aus bestehenden Windparks und Photovoltaikanlagen zur Verfügung steht, die Grundlage schaffen, um im Jahr 2030 5.750 Tonnen grünen Wasserstoff herzustellen. Mit ihm sollen Bürgerbusse, Busse, Müllfahrzeuge und Züge angetrieben werden²⁷.

Alle drei Konzepte zur Modellregion Wasserstoff-Mobilität Nordrhein-Westfalen sehen Brennstoffzellenfahrzeuge für das Flughafenvorfeld und den Flughafenbetrieb vor. Hier gilt es, mit den Flughäfen einen ökonomisch tragfähigen Fahrzeugeinsatz zu konzipieren und die Umsetzung zu unterstützen.

Innerhalb des HyLand Wettbewerbs des Bundes – erhalten drei Regionen aus Nordrhein-Westfalen – von insgesamt 13 in ganz Deutschland – 300.000 Euro um Feinkonzepte zu entwickeln:

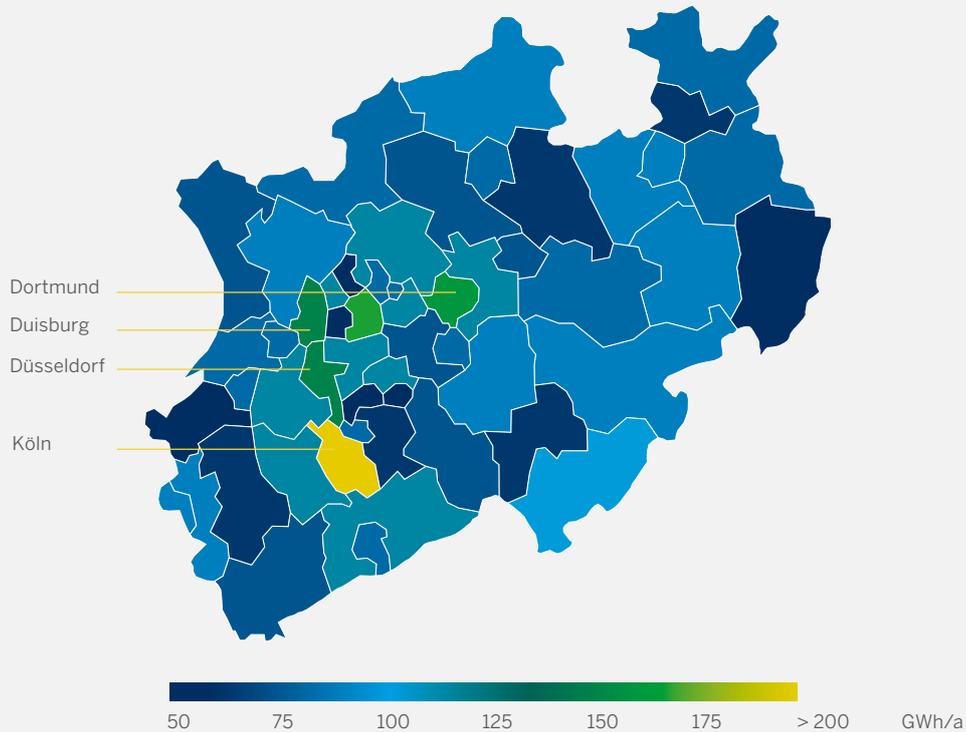
- ⌚ E-goH₂-Ecosystem: Die Stadt Essen will ein H₂-Ecosystem für nachhaltige und emissionsfreie Mobilität mit grünem Wasserstoff in Ballungsräumen am Beispiel des ÖPNV entwickeln.
- ⌚ HyDrive OWL: Der Kreis Lippe zusammen mit der Stadt Bielefeld und dem Kreis Minden-Lübbecke sollen Verkehrsanwendungen in allen Fahrzeugklassen mit regional erzeugtem grünem Wasserstoff versorgt werden.
- ⌚ Hy-LandEL: Der Kreis Recklinghausen will stellvertretend für die Emscher-Lippe-Region ein integriertes Konzept zum Einsatz von Wasserstoff in Mobilität und Logistik erstellen.

6.000

**Brennstoffzellenfahrzeuge
bis 2030: so viel Potenzial steckt in
der Modellregion Wasserstoffmobilität
NRW „DüsselRheinWupper“**

Abbildung 19: Verteilung der Wasserstoffnachfrage im Verkehrssektor im Jahr 2030

Quelle: Begleitstudie FZJ



In der zweiten Hälfte dieses Jahrzehnts soll erreicht werden, dass alle neu beschafften und geeigneten Abfallsammelfahrzeuge über einen Brennstoffzellenantrieb verfügen, so dass bei positiver Entwicklung im Jahr 2030 30 Prozent dieser Fahrzeuge mit einer Brennstoffzelle ausgestattet sind.

Angesichts der aktuellen großen Preisunterschiede zu batterieelektrischen Fahrzeugen und des fehlenden Angebots an Brennstoffzellen-Fahrzeugen seitens der OEM ist kein schneller Markthochlauf von Brennstoffzellen-Pkw und leichten Nutzfahrzeugen zu erwarten. Aus diesem Grund sieht die „Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität“ 350.000 Pkw und 100.000 (leichte) Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb im Jahr 2030 in Deutschland. Damit wären dann etwa 70.000 Pkw und 20.000 (leichte) Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb in Nordrhein-Westfalen zu erwarten²⁸.

In Nordrhein-Westfalen würden so je nach Fahrzeugeffizienz zwischen 35.000 und 45.000 Tonnen Wasserstoff jährlich benötigt. Werden die angestrebten Flottenveränderungen, wie oben dargestellt, erreicht, könnte im Jahr

2030 ein jährlicher Wasserstoffbedarf von etwa 200.000 Tonnen Wasserstoff bestehen: 45 Prozent des Wasserstoffs würden für den schweren Lkw-Verkehr, 27,5 Prozent für die ÖPNV-Busse, 4 Prozent für Fahrzeuge der Abfallwirtschaft, 2,5 Prozent für die Binnenschifffahrt und 1 Prozent für Personenzüge, Rangierlokomotiven, Fahrzeuge der Intralogistik, Vorfeldfahrzeuge an Flughäfen und weitere Anwendungen benötigt werden²⁹. Damit wird im Jahr 2030 ein höherer Wasserstoffbedarf erwartet als in der Begleitstudie des FZJ. Dort wird ein Bedarf von 4,5 TWh bzw. 135.000 Tonnen Wasserstoff für den Verkehrssektor gesehen.

Die zentrale Differenz ist eine unterschiedliche Bewertung der Entwicklung der Pkw- und Nutzfahrzeugmärkte in Verbindung mit den jeweiligen technischen Möglichkeiten hinsichtlich Fahrzeugreichweite, Lastentransportfähigkeit, Transporteigenschaften und Speichereigenschaften des Kraftstoffs sowie dem zunehmenden klimapolitischen Erfordernis im Verkehrssektor bei den großen CO₂-Emissionen – den Nutzfahrzeugen – zu spürbaren CO₂-Minderungen zu kommen.

Im Güter- und öffentlichen Personennahverkehr jetzt den Markthochlauf für Brennstoffzellen-Fahrzeuge beginnen

Schwere Nutzfahrzeuge und ÖPNV-Busse eignen sich besonders für den Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellen und somit zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors, bei dem bislang CO₂-Minderungen nahezu ausgeblieben sind. In einem ersten Schritt gilt es nun Koalitionen von First-Movern zu schmieden, damit Einkaufsgemeinschaften

gebildet werden, Nachfragepotenziale verbindlich werden und schließlich konkrete Aufträge vergeben werden. So kann der Produktionshochlauf bei den Herstellern endlich beginnen. Gleiches gilt für die Tankstelleninfrastruktur. Sind die Produktionshochläufe angekündigt, kann auch mit der Planung und Realisierung der Tankinfrastruktur begonnen werden. Hierfür brauchen wir den Mut von Unternehmen und öffentlicher Hand sich auf mehrjährige Fördervorhaben einzulassen und mit vielen Kooperationsbeziehungen einzugehen.

6.1.3 Wasserstoff für die dezentrale Gebäude- und Wärmeversorgung

Nach den Ergebnissen des FZJ spielt der Einsatz von Wasserstoff im Gebäudebereich eine eher untergeordnete Rolle. Mit einem Wasserstoffbedarf von etwas über 30 TWh pro Jahr erfolgt nur etwa 5 Prozent der Wärmebereitstellung für den Gebäudesektor im Jahr 2050 durch Wasserstoff. Wärmepumpen (mono- und bivalente Anlagen) übernehmen in diesen Berechnungen den Großteil der Wärmeversorgung.

Trotzdem kann es sehr sinnvoll sein, den Wärmesektor verstärkt in den Blick zu nehmen. Wasserstoff kann in Heizkesseln zur Deckung der Spitzenlasten bei bivalenten Systemen und in Brennstoffzellen-Systemen eingesetzt werden. Auch eine Beimischung in das bestehende Erdgasverteilnetz von bis zu 20 Prozent ist möglich. Die Mehrzahl der neueren Heizkessel ist bereits werkseitig für den anteiligen Einsatz von Wasserstoff geeignet. Trotzdem bestehen unter anderem noch Herausforderungen, wenn es um die Erfassung von fluktuierenden Brennwerten neuartiger Gasgemische geht. Sensoren und Messmethoden müssen im Betrieb erprobt werden und auch die Auswirkungen auf angeschlossene Endgeräte gilt es zu analysieren. Da eine 20-prozentige Beimischung nur einem energetischen Anteil von unter 10 Prozent entspricht, bedarf es einer genauen Bewertung hinsichtlich alternativer Lösungsoptionen. Zudem ist der Energieaufwand für die Bereitstellung von Wärme aus Wasserstoff um ein Vielfaches höher als für die Bereitstellung von Wärme aus Elektrizität.

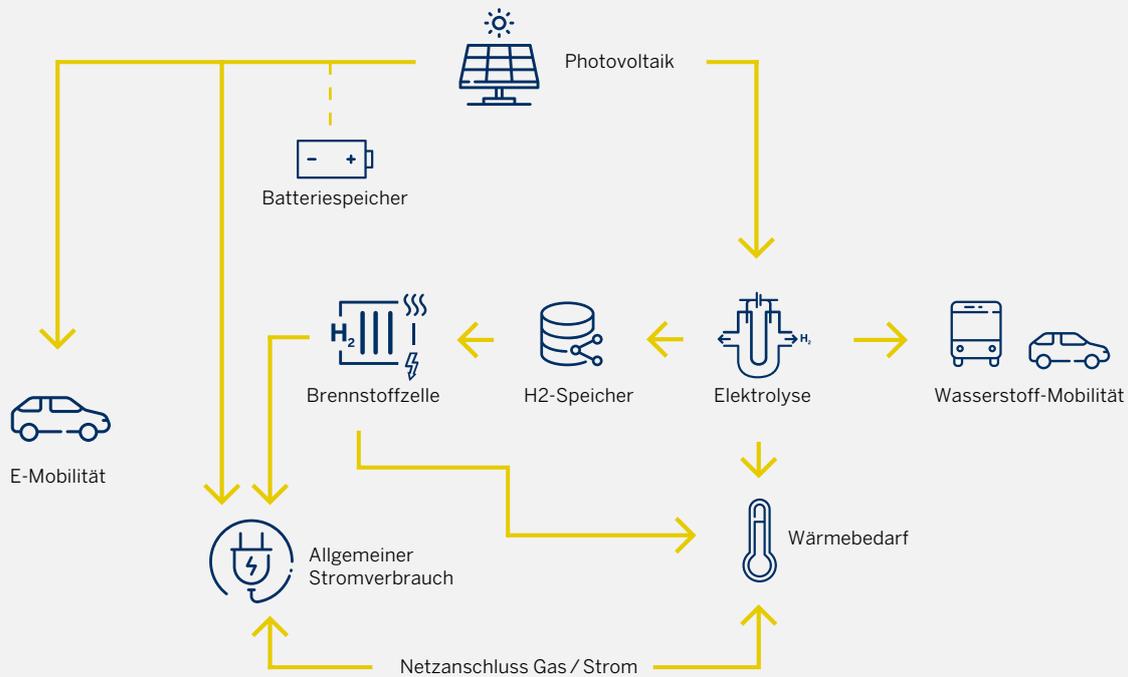
Eine Umstellung des bestehenden Gasverteilnetzes auf 100 Prozent Wasserstoff und der Einsatz von Wasserstoff in neuen Nah- und Fernwärmenetzen in urbanen Gebieten mit entsprechender Nachfrage ist prinzipiell ebenfalls möglich. Da Wasserstoff andere Brenneigenschaften als Erdgas aufweist, müssen die bestehenden Heizkessel zum Betrieb mit Wasserstoff nachgerüstet bzw. ausgetauscht werden. Dies betrifft vorrangig die Leckage-Anforderungen, das Brennverhalten und die Materialverträglichkeit der Geräte.

Erste Pilotprojekte, die eine Beimischung bis 20 Prozent erproben oder sogar 100 Prozent Wasserstoff in den Blick nehmen, werden in Nordrhein-Westfalen bereits konzipiert. Diese Projekte sollten zügig weiterentwickelt und realisiert werden, sodass die Potenziale von Wasserstoff für die leitungsgebundene Gebäude- und Wärmeversorgung besser verstanden und auch in der Praxis erlebbar gemacht werden können. Zur weiteren Begleitung und Entwicklung dieses Themas wird auf Seiten der Verbände ein neuer Arbeitskreis vorbereitet, der die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff in der Gebäude- und Wärmeversorgung in den Blick nimmt.

Wasserstoffprojekte in der Praxis

Die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff werden bereits modellhaft in der Praxis umgesetzt. Die Nutzung von Wasserstoff erfolgt sowohl im Kontext urbaner Energielösungen für ganze Quartiere als auch zur weitestgehend energieautarken Versorgung von Einzelgebäuden. Für eine klimaneutrale Energieversorgung kann Wasserstoff zum Beispiel mittels Photovoltaik durch Elektrolyse auf dem Gebäudegrundstück selbst erzeugt und dann zum Betrieb einer Brennstoffzelle genutzt werden, die das Gebäude mit Wärme und Strom versorgt.

Abbildung 20: Vereinfachtes Schema einer lokalen Energieversorgung mithilfe von Wasserstoff



Besonders sektorenübergreifende Projekte sind für den Einsatz von Wasserstoff geeignet. Überschüssiger Wasserstoff oder Strom können durch intelligente Energieversorgungskonzepte anderen Prozessen im Gebäude oder auch dem Betrieb von Fahrzeugen zur Verfügung gestellt werden.

Nicht nur Wasserstoff: Effizienz und erneuerbare Energien für eine klimafreundliche Gebäude- und Wärmeversorgung

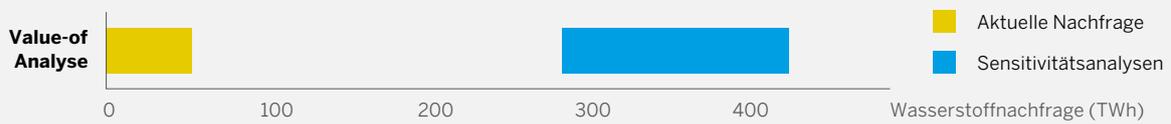
Die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen im Gebäudebereich und die breite Anwendung der Wärmepumpentechnik sind zentrale Handlungsfelder für die zukünftige, klimafreundliche Wärmeversorgung. Die Sanierungsrate sollte kurz- bis mittelfristig auf einen Wert von mindestens zwei Prozent verdoppelt werden. Die Möglichkeiten

einer gebäudeintegrierten Energieversorgung, wie die Nutzung von Photovoltaik- oder Solarthermieranlagen, sollten so gut es geht ausgeschöpft werden. Eine lokale Speicherung der erzeugten Energie erlaubt die flexible Nutzung nach den jeweiligen Bedarfen. Die jeweiligen Systeme können bei Bedarf technologieoffen durch beispielsweise Geothermie oder Wasserstoff ergänzt werden.

Die Energieträger Strom, Geothermie und Biomasse gelten bereits heute als wirtschaftliche und klimafreundliche Lösungen für die Wärme- und Kälteversorgung eines zukünftig emissionsfreien Energiesystems. Der zusätzliche Einsatz von Wasserstoff kann im Zuge der Energiewende dazu beitragen, einen klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen. Im Zuge der Novellierung unserer Förderrichtlinie „progres.nrw – Markteinführung“ prüfen wir die Aufnahme von wasserstoffbasierten Energiesystemen für die Gebäudeversorgung. Hiermit wollen wir zusätzliche Anreize zur teilweise schon existierenden Förderung auf Bundesebene setzen.

Abbildung 21: Bandbreite der deutschen Wasserstoffnachfrage im Jahr 2050 innerhalb der Sensitivitätsanalysen

Quelle: Begleitstudie FZJ



6.1.4 Exkurs Sensitivitätsanalyse: wie robust ist die zukünftige Wasserstoffnachfrage?

Mit so genannten Sensitivitätsanalysen wird untersucht, wie robust ein Modellierungsergebnis ist. Es geht darum, herauszufinden, ob das Ergebnis besonders stark von einem Faktor abhängt und daher leicht zu beeinflussen ist. Innerhalb der Szenario-Analyse des FZJ wurde die deutschlandweite Wasserstoffnachfrage unter verschiedensten Voraussetzungen berechnet (Abbildung 21).

Die Abbildung zeigt deutlich, dass Wasserstoff ein wesentliches Element für ein klimaneutrales Energiesystem ist – auch unter veränderten Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel Weltmarktpreise von Wasserstoff und Power-to-Liquids, dem Ausbau der Windenergie oder der Entwicklung eines Wasserstoffnetzes. Die Wasserstoffnachfrage in Deutschland bleibt dabei stets auf einem hohen Niveau und bewegt sich dabei zwischen 440 und 300 TWh pro Jahr. Dies entspricht einer Steigerung um das neun- bis sechsfache im Vergleich zu heute.



6.2 Wo kann der Wasserstoff herkommen?

Die im Zeitverlauf immer stringenteren CO₂-Reduktionsziele führen zu einer zunehmenden Bedeutung von Wasserstoff in den einzelnen Sektoren. So steigt die Wasserstoffherzeugung nach Berechnungen des FZJ bis zum Jahr 2050 auf einen Wert von circa 370 TWh (etwa 11 Millionen Tonnen) an. Diese Menge setzt sich zukünftig aus einem Mix von inländisch erzeugten Wasserstoff und Wasserstoffimporten zusammen. Während heute die Wasserstoffnutzung weitestgehend auf den Rohstoffstoffeinsatz in der Industrie beschränkt ist, stellt sich langfristig auch eine Wasserstoffnachfrage in anderen Sektoren (Verkehr, Energie) ein.

Abbildung 22 unterstreicht die Bedeutung eines technologieoffenen Ansatzes bei der Entwicklung einer schnellen und kosteneffizienten Wasserstoffversorgung. Der jetzige Wasserstoffbedarf von jährlich 55 TWh in Deutschland wird vor allem durch die Erdgas-Dampfreformierung oder andere etablierte Verfahren bereitgestellt. Neben diesen Verfahren wird der steigende Wasserstoffbedarf im ersten Schritt durch zusätzliche Elektrolysekapazitäten und importieren blauen Wasserstoff abgedeckt. Die Analysen des FZJ zeigen im Jahr 2030 circa 5 Gigawatt Elektrolyseleistung in Deutschland. Dies deckt sich sehr gut mit den Zielen der nationalen Wasserstoffstrategie. Im weiteren Verlauf nimmt der Ausbau der Elektrolyse stark zu. Im Jahr 2050 könnten in Deutschland etwa 70 Gigawatt Elektrolysekapazität installiert sein.

Nach den Berechnungen des FZJ wird der Großteil dieser Elektrolyseure aufgrund der relativ günstigen Windverhältnisse in Norddeutschland liegen. Über ein europa- und deutschlandweites Pipelinenetz werden auch weiter südlich gelegenen Industrie- und Ballungszentren mit Wasserstoff versorgt. Unter der Annahme, dass Offshore Windenergieleistung zunehmend südlich (und damit auch in Nordrhein-Westfalen) angebunden wird, ist auch eine Elektrolysekapazität von mehreren Gigawatt hier vor Ort zu erwarten.

Gleichzeitig zeigen die Analysen, dass die langfristig in Deutschland und Nordrhein-Westfalen benötigte Wasserstoffmenge – aufgrund der begrenzten Potenziale zum Ausbau der erneuerbaren Energie und wachsenden Nutzungskonkurrenzen durch direkte Stromanwendungen im Rahmen der Sektorenkopplung – nicht ausschließlich durch inländische Produktion abgedeckt werden kann. Etwas mehr als die Hälfte des langfristig benötigten Wasserstoffs wird durch Importe abgedeckt. Berücksichtigt man darüber hinaus auch noch die nicht-energetische Nachfrage der chemischen Industrie (jenseits der hier im Modell bereits berücksichtigten Ammoniak- und Methanol Produktion), so zeigen die Analysen einen weiteren Anstieg importierter Energieträger. In diesem Fall würden dann neben mehr Wasserstoff vor allem flüssige Energieträger, so genannte Power-to-Liquids, verstärkt importiert werden.

Abbildung 22: Entwicklung der jährlichen Wasserstoffherzeugung in Deutschland bis zum Jahr 2050

Quelle: Begleitstudie FZJ

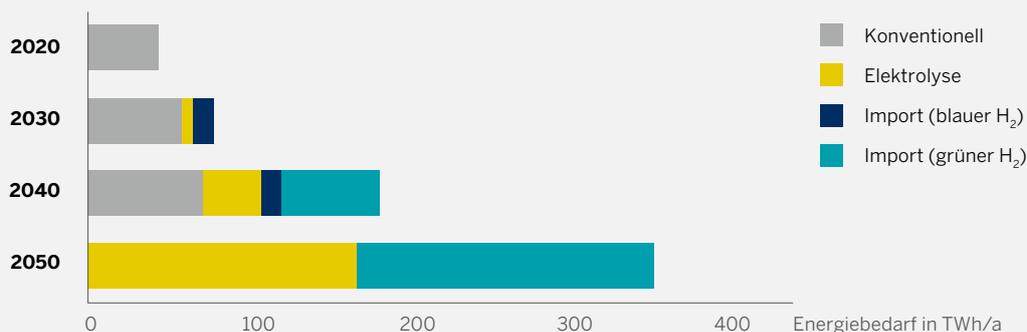
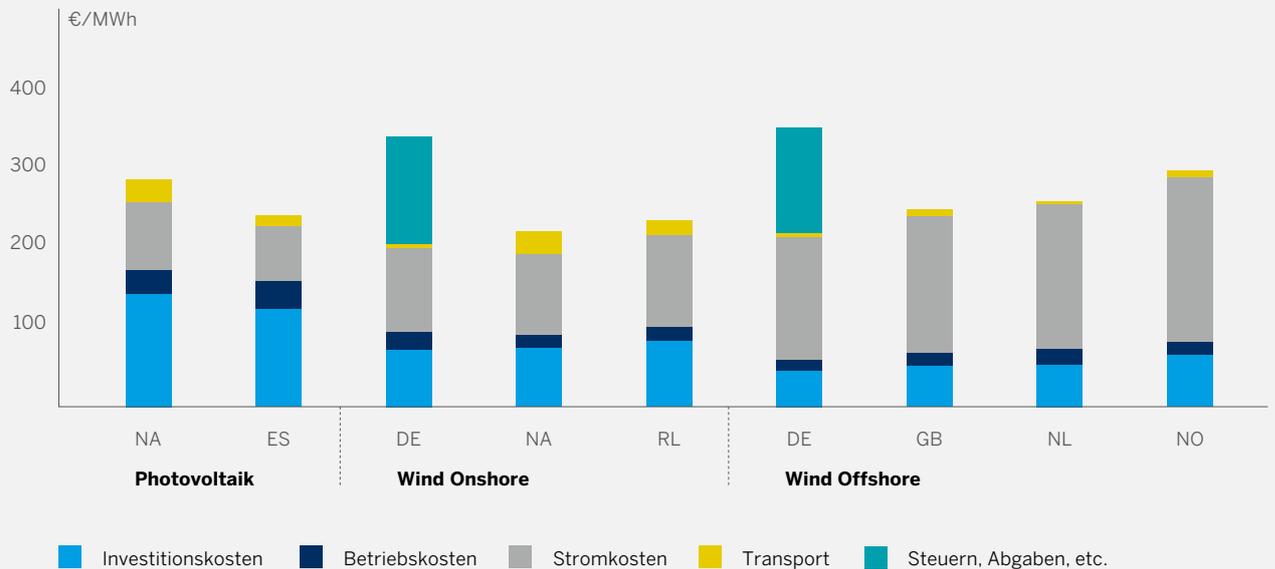


Abbildung 23: Wasserstoffgestehungskosten im Jahr 2020 auf Basis verschiedener erneuerbarer Energiequellen

Quelle: Enervis und EnergieAgentur.NRW



Das Potenzial internationaler Wasserstoffmärkte

Importe aus sonnen- und windreichen Regionen sind für die zukünftige Wasserstoffversorgung Nordrhein-Westfalens unverzichtbar. Im Zuge einer Marktmodellierung wurden die Herstellungskosten von Wasserstoff in verschiedenen Regionen dieser Welt untersucht. Zum einen wurden sonnenreiche Regionen und Länder wie Nordafrika und Spanien betrachtet, zum anderen windreiche Staaten wie die Niederlande, Großbritannien, Norwegen und Russland. Letztere gehören aktuell zu den führenden Exportländern fossiler Energien wie Erdgas, Erdöl und Kohle. Um ein möglichst wirklichkeitsnahes Bild zu erhalten, wurden in der Modellierung auch länderspezifische Kapitalzinsen, die das Risiko der Investition im jeweiligen Land abbilden, berücksichtigt.

Auf diese Weise wurden die Herstellungskosten von Wasserstoff für das Jahr 2020 und 2050 berechnet. Abbildung 23 zeigt beispielhaft die Kosten in Abhängigkeit der erneuerbaren Stromerzeugung. Diese unterteilen sich in die Kategorien Photovoltaik, Wind Onshore und Wind Offshore und in die jeweiligen Herkunftsländer.

Den größten Anteil an den Gestehungskosten haben die Investitions- und Stromkosten. Die Transportkosten sind gerade für Nordafrika und Russland nicht ganz vernachlässigbar, wirken aber im Vergleich zu den Investitions- und Stromkosten eher mäßig auf die Gesamtkostenbilanz ein. Gleichzeitig sind die Annahmen zu den Transportkosten noch mit einer hohen Unsicherheit behaftet, da es hier sehr unterschiedliche Angaben gibt.



Bei der Wasserstoffproduktion in Deutschland spielt der Kostenblock der Steuern und Abgaben auf den Strombezug eine bedeutende Rolle, was die Grafik deutlich zeigt. Dieser kann beim Strombezug aus dem öffentlichen Netz anfallen und führt zu deutlichen Kostensteigerungen. Nimmt man an, dass Strom für Elektrolyse in Deutschland von diesen Steuern und Abgaben befreit wird, oder dass die Elektrolyse direkt an Wind- oder Solarparks stattfindet, ergibt sich ein deutlich reduziertes Gesamtkostenbild. Dies unterstreicht die Berechtigung entsprechender Forderungen an den Bund, das Abgaben- und Umlagesystem zügig zu reformieren.

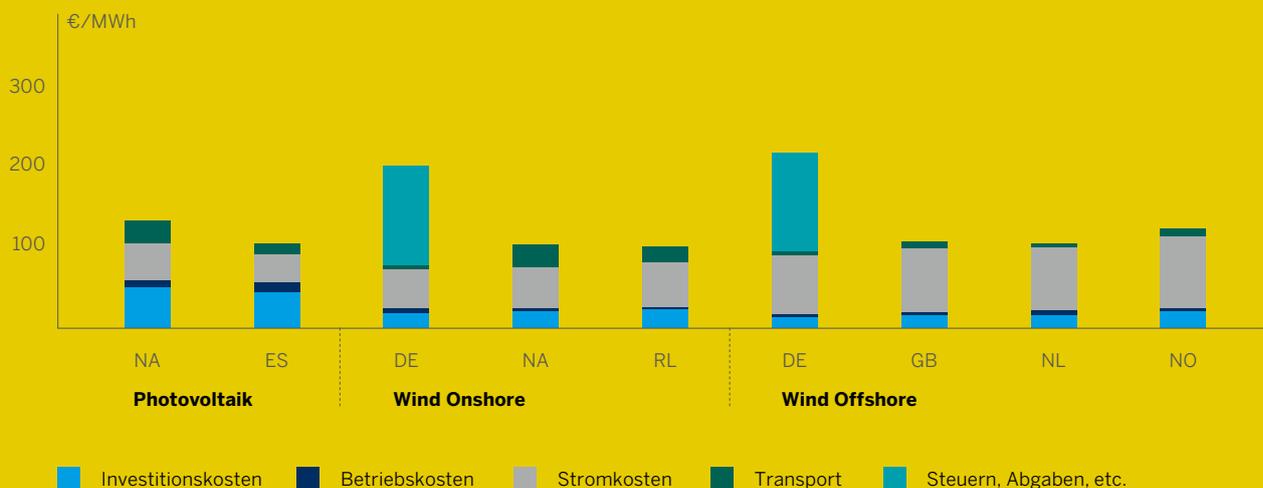
Wasserstoff aus Photovoltaik bewegt sich zwischen knapp 300 Euro/MWh in 2020 und etwa 140 Euro/MWh in 2050. Bei Wind Offshore bewegen sich die Kosten

zwischen 300 Euro/MWh (2020) und knapp 100 Euro/MWh (2050). Ähnlich günstig ist Wasserstoff aus Wind Onshore. Hier liegen die Kosten zwischen circa 240 Euro/MWh (2020) und etwas unter 100 Euro/MWh (2050).

Im Vergleich zu fossilem Wasserstoff oder Erdgas liegen die oben genannten Kosten für grünen Wasserstoff deutlich höher. Ähnlich verhält es sich mit auf Wasserstoff aufbauenden Folgeprodukten, wie beispielsweise Power-to-Liquids. Skaleneffekte durch Massenproduktion und weitere Lernkurvenerfolge durch Forschung und Entwicklung können die Kosten von Wasserstofferzeugungstechnologien bis 2050 deutlich sinken lassen. Um diesen Punkt zu erreichen, braucht es aber staatliche Anreizmechanismen.

Abbildung 24: Wasserstoffgestehungskosten im Jahr 2050 auf Basis verschiedener erneuerbarer Energiequellen

Quelle: Enervis und EnergieAgentur.NRW



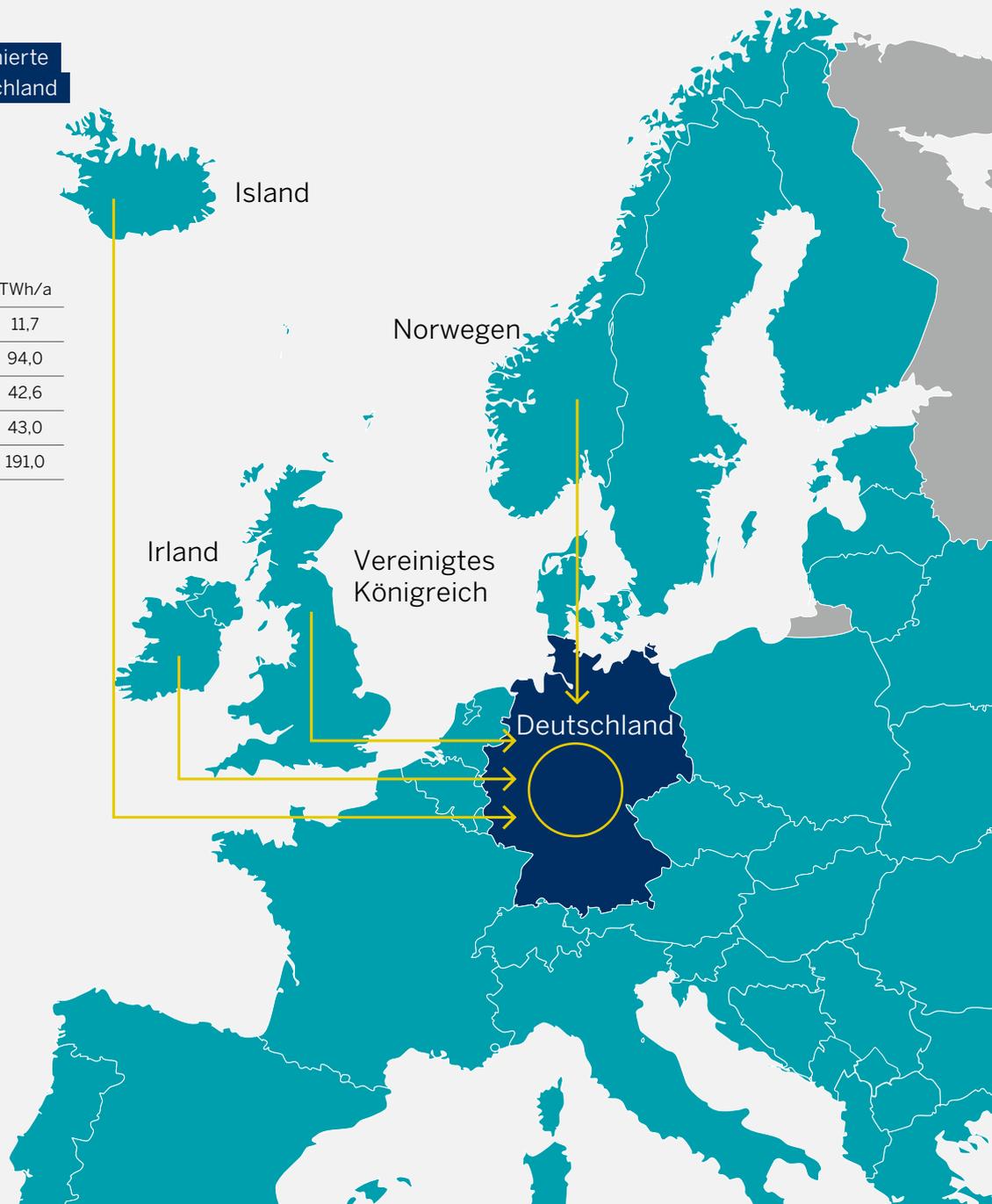
Die detaillierte Analyse der Kosten zeigt deutlich, dass Wasserstoff aus den europäischen Anrainerländern im Vergleich zu außereuropäischen Exportregionen wettbewerbsfähig ist. Vieles deutet darauf hin, dass für den Wasserstoffimport nach Deutschland gerade die Nordsee-Länder mit ihren sehr guten Windverhältnissen und meist gut ausgebauten Energieinfrastrukturen (Häfen, Pipelines) prädestiniert sind. Dies untermauert auch die Begleitstudie des FZJ, die untersucht hat, aus welchen Ländern die knapp 200 TWh pro Jahr importierten Wasserstoffs im Jahr 2050 kommen könnten. Unter der Annahme, dass Wasserstoff weltweit nachgefragt wird, kann der prognostizierte deutsche Bedarf vor allem durch Importe aus den Nordsee-Ländern gedeckt werden.

Der Auf- und Ausbau weiterer Partnerschaften ist für uns daher von enormer Bedeutung. Auf Basis dieser und anderer Analysen werden wir Kooperationspotenziale mit weiteren Länder analysieren und entsprechende Partnerschaften in die Wege leiten. Hierzu werden wir bestehende Austauschplattformen wie etwa die European Hydrogen Valleys Partnersip nutzen oder gänzlich neue Kooperationen aufbauen.

Abbildung 25: Kostenoptimierte Importströme nach Deutschland im Jahr 2050

Quelle: Begleitstudie FZJ

	Mt _{H₂} /a	TWh/a
Island	0,3	11,7
Irland	2,8	94,0
Vereinigtes Königreich	1,3	42,6
Norwegen	1,3	43,0
Deutschland	5,7	191,0



6.3 Welche Infrastrukturmaßnahmen sind notwendig?

Verstärkte Anwendungen von Wasserstofftechnologien machen umfangreiche Investitionen in Infrastrukturen notwendig. Nordrhein-Westfalen kommt dabei nicht nur als Verbrauchsschwerpunkt, sondern auch mit seinem dicht vermaschten Transportnetz – etwa jeder sechste Rohrkilometer des Gasnetzes liegt in Nordrhein-Westfalen – und umfangreichen Speicherinfrastrukturen bundesweit eine besondere Rolle bei der Entwicklung von Wasserstoffinfrastrukturen zu. Daher liegt uns ein zeitnaher strukturierter Ansatz zum Aufbau einer bedarfsorientierten Wasserstoffinfrastruktur sehr am Herzen, der heute begonnen werden muss. Dies ist ein wichtiger Baustein, um einen wettbewerbsfähigen Wasserstoffein- und -auslass überhaupt erst zu ermöglichen.

Wir setzen auf einen schnellen und kosteneffizienten Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur, die sich technologieoffen mit Blick auf zukünftige internationale Märkte für Wasserstoff und synthetische Energieträger entwickelt. Die Wasserstoffinfrastruktur sollte hierbei grundsätzlich offen für alle Erzeugungspfade von Wasserstoff sein. Wir müssen die Energieinfrastruktur hierzu werterhaltend und bedarfsgerecht aus- und umbauen. Dazu gehören sowohl die Änderung des Betriebskonzepts bestehender Erdgasleitungen für reinen Wasserstoff, Lückenschlüsse zwischen solchen Bestandsleitungen durch neue Wasserstoffleitungen, die Nutzung technischer Möglichkeiten des Erdgasnetzes für höhere Wasserstoff-Anteile als auch lokale Lösungen und Wasserstoff-Inselnetze.

Um die technischen bzw. infrastrukturellen Belange bei einer Einführung der Wasserstoffwirtschaft in Nordrhein-Westfalen umfassend zu behandeln, wurden seitens des MWIDE in Vorbereitung der Wasserstoff Roadmap zahlreiche strukturierte Gespräche mit Vertretern aus der Gaswirtschaft, der Wasserstoffwirtschaft, Netzbetreibern sowie Verbänden geführt, die sich mit dem Thema befassen. Dabei wurden detaillierte Fragestellungen und auch die Entwicklung möglicher Projekte zu dem Bereichen Verteilnetze und Fernleitungsnetze beraten, die in die Erarbeitung dieser Roadmap inhaltlich eingeflossen sind.

Perspektiven für die Entwicklung einer Wasserstoffinfrastruktur

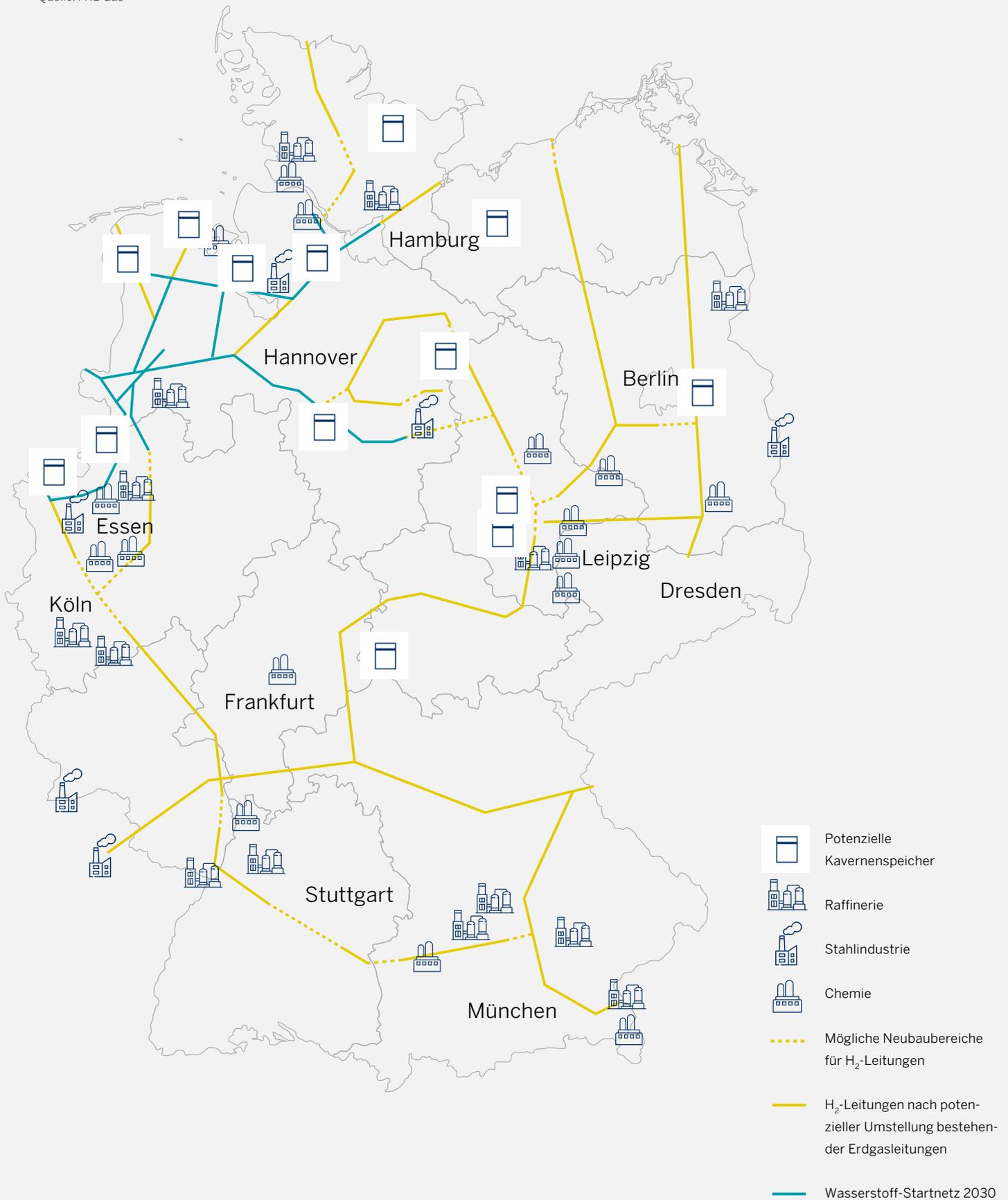
Der notwendige Aufbau der Infrastruktur hängt ganz wesentlich von der zeitlichen und geographischen Korrelation von Produktion und Verbrauch sowie vom sich entwickelnden Gasmix ab. Nord-West Europa hat die besten Voraussetzungen für den Aufbau eines Wasserstoffnetzes. Nicht zuletzt durch die Umstellung von L- auf H-Gas werden in den Niederlanden, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen sukzessive Erdgasleitungen frei, die grundsätzlich für den Wasserstofftransport genutzt werden können. Es bietet sich daher an, den Aufbau eines deutschen Wasserstoffnetzes im Nord-Westen der Bundesrepublik zu beginnen.

Die deutschen Fernleitungsnetzbetreiber (FNB) haben bereits Anfang dieses Jahres einen konzeptionellen Vorschlag für ein deutsches Wasserstoffnetz mit Grenzübergangsstellen zu europäischen Nachbarländern vorgelegt: das sogenannte „visionäre Wasserstoffnetz“ (siehe Abbildung 26).



Abbildung 26: Vision für ein deutschlandweites Wasserstoffnetz

Quelle: FNB Gas



Bei der Karte handelt es sich um eine schematische Darstellung, die hinsichtlich der eingezeichneten Speicher und Abnehmer keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Diese Vision für eine erste deutschlandweite Wasserstoffinfrastruktur umfasst Leitungen mit einer Gesamtlänge von etwa 5.900 Kilometer und basiert zu über 90 Prozent auf dem bereits bestehenden Erdgasnetz. Ein Großteil der zukünftigen Verbrauchsschwerpunkte von Wasserstoff in den Sektoren Industrie, Mobilität und Wärme sowie zahlreiche Untertagespeicher können über das Leitungssystem überregional mit den Aufkommensschwerpunkten verbunden werden. Auch die Modellierungsergebnisse des FZJ bestätigen die volkswirtschaftliche Sinnhaftigkeit einer großräumigen verbundenen Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland.

Die FNBs haben ihre Vision eines Wasserstoffnetzes innerhalb des Netzentwicklungsplans NEP Gas 2020 – 2030 in der sogenannten „Grüngasvariante“ für das Zieljahr 2030 konkretisiert. Basis der Modellierung von zukünftigen Quellen und Senken für Wasserstoff war dabei eine Marktpartnerabfrage, bei der die FNBs Projekte für die Produktion und die Nutzung von grünem Wasserstoff abgefragt haben. Die berücksichtigten Aus- und Umbaumaßnahmen der Gasnetzinfrastrukturen spiegeln den Großteil der bekannten Wasserstoff-Projekte, der vorhandenen Infrastrukturen und -bedarfe in Nordrhein-Westfalen und darüber hinaus wider. Demnach könnten bis 2030 insgesamt knapp 1.300 Kilometer Erdgasleitung auf Wasserstoff umgestellt und rund 94 Kilometer neue Wasserstoffleitungen gebaut werden, was Investitionen von knapp 700 Millionen Euro auslösen soll. Dies entspricht dem Aufbau von etwa 240 Kilometern Wasserstoffleitungen in Nordrhein-Westfalen, von denen rund 190 Kilometer durch die Umstellung von Erdgasleitungen zustande kommen könnten. Ohne eine Anpassung des geltenden Rechtsrahmens fallen diese Aus- und Umbauvorhaben jedoch nicht in den Aufgabenbereich der FNBs, so dass ein in der Grüngasvariante ermittelter Bedarf für eine Wasserstoffinfrastruktur voraussichtlich nicht durch die zuständige Bundesnetzagentur bestätigt werden wird.

Die weit überwiegende Zahl der Projekte aus der Grüngasvariante liegt in der Region West. Sie konzentrieren sich räumlich in einem recht schmalen Band zwischen Düsseldorf und Emden an der deutsch-niederländischen Grenze. Es zeigte sich im Ergebnis der Modellierungen, dass in Deutschland insgesamt und vor allem in der Region West eine große Unterdeckung des gemeldeten Bedarfes an Wasserstoff besteht. Durch einen möglichen Anschluss an das niederländische Gasnetz bestehen je-

doch Importmöglichkeiten insbesondere aus den Niederlanden, aber auch aus Norwegen.

Für Nordrhein-Westfalen ergibt sich die Einbindung in die Wasserstoffinfrastruktur in besonderem Maße, da der überwiegende (industrielle) Bedarf an Wasserstoff hier verortet ist. Für die Wasserstoff-Verwendung werden vor allem Abnehmer in der Stahlproduktion, bei Raffinerien und in der Chemie gesehen. Die Modellierungsergebnisse des FZJ gehen davon aus, dass 2050 knapp 30 Prozent des insgesamt in Deutschland benötigten Wasserstoffs in Nordrhein-Westfalen eingesetzt wird.

Im Gesamtbild zeigt sich, dass der mit rund 10 Prozent zwar in der Gesamtschau kleine Neubauanteil von Wasserstoffleitungen oft den Charakter von Lückenschlüssen hat und insofern für den Aufbau einer zusammenhängenden und funktionierenden Wasserstoffinfrastruktur von Bedeutung ist. Da die Realisierung neuer Infrastrukturen naturgemäß mit größeren Vorlaufzeiten verbunden ist, müssen die Planungen für konkrete Vorhaben zügig beginnen, um 2030 sicher verfügbar zu sein. Hierzu muss jedoch auch der zugehörige Rechtsrahmen zeitnah zur Verfügung stehen (siehe unten).

Da über längere Zeiträume darüber hinaus Erdgasinfrastruktur und Wasserstoffinfrastruktur nebeneinander erforderlich sind und sich, bei Umnutzungen bestehender Erdgasleitungen für die Wasserstoffinfrastruktur, auch gegenseitig beeinflussen, müssen zum einen beide Systeme über alle Netzebenen bis zum Verteilnetz funktionsfähig gehalten und zum anderen gleichzeitig optimal aufeinander abgestimmt werden. Eines ist ebenfalls zu berücksichtigen: wenngleich sich die Diskussion mittlerweile sehr stark auf die Etablierung reiner Wasserstoffnetze fokussiert, bleibt die Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas eine mögliche Option. In den meisten Netzabschnitten ist derzeit eine Beimischung von 10 Prozent möglich. Der technische Verband der Gas- und Wasserwirtschaft (DVGW) arbeitet an den Voraussetzungen für eine Anhebung der Grenze auf zunächst 20 Prozent.

Diese vielfältigen Anforderungen an die Ausgestaltung von Energienetzen zukünftig in Balance zu bringen, wird eine komplexe Aufgabe für die Netzbetreiber auf allen Netzebenen. Die Herausforderung wird noch größer, da beim Ausbau der Energieinfrastrukturen die künftig zu erwartende verstärkte Sektorenkopplung die Infrastrukturen für Strom und Gas stärker miteinander verzahnt. Bereits die Energieversorgungsstrategie der Landesregierung von Nordrhein-Westfalen aus dem Jahr 2019 hat eine systemübergreifende Betrachtung beim Ausbau der Energieinfrastruktur adressiert. Zur Stärkung der Kommunikation landesspezifischer Interessen Nordrhein-Westfalens bei der Entwicklung einer integrierten Netzentwicklungsplanung auf Bundesebene unterstützt das MWIDE derzeit ein Vorhaben mehrerer Netzbetreiber der Fernleitungs-, Übertragungs- und Verteilnetze. Ziel des Projekts ist, die netz- und sektorenübergreifenden Schnittstellen in Nordrhein-Westfalen sowie no-regret-Maßnahmen für den weiteren Ausbau der Netzinfrastrukturen auch im Sinne der Sektorenkopplung zu identifizieren. Hierbei werden insbesondere die Bedarfe für Flexibilitäten sowie die Wasserstoffinfrastrukturentwicklung in den Blick genommen.

Das MWIDE begrüßt es sehr, dass die Unternehmen sich über alle Netzebenen hinweg gemeinsam um konstruktive Ansätze in Richtung der Entwicklung zukünftiger Energieinfrastrukturen bemühen. Vielfältige Projektansätze, die im Kontext der Erarbeitung der Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen insbesondere auch auf der Verteilnetzebene entwickelt wurden, verdeutlichen die facettenreichen Fragen rund um die Entwicklung einer Wasserstoffinfrastruktur und können wertvolle Erfahrungen für deren Ausbau liefern. Das MWIDE wird diese Aktivitäten daher auch weiterhin unterstützend begleiten.

Auch auf Bundesebene werden zunehmend Forderungen nach einer integrierten Infrastrukturplanung für Strom, Gas und Wasserstoff erhoben. Dies wird die Landesregierung ebenfalls im Blick behalten. Zu berücksichtigen ist in diesem Zusammenhang auch, dass der Ausbau von Wasserstoffinfrastrukturen kein Ersatz für den weiterhin erforderlichen Ausbau des Stromnetzes gemäß dem Netzentwicklungsplan Strom sein wird. Dieser Ausbau hat mit Blick auf die Gewährleistung der Versorgungssicherheit in Deutschland weiterhin eine sehr hohe Priorität.

Zur Verringerung des durch die weitere Sektorenkopplung bedingten Stromnetzausbaus sollte sich die Wasserstoffwirtschaft und ihre zugehörige Infrastruktur netzverträglich und systemdienlich in die bestehende Energieinfrastruktur einfügen. Dieser Aspekt sollte bei der marktorientierten Allokation von Elektrolyseuren ebenso berücksichtigt werden wie der netz- und systemdienliche Betrieb von Elektrolyseuren bei den Netzentgelten. Gleichwohl sind die erwartbar zunehmenden direkten strombasierten Anwendungen (zum Beispiel Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen) und der damit einhergehende Stromnetzausbau zu berücksichtigen.

Wichtig ist auch die Betonung der großen Bedeutung der Gasspeicher, die im heutigen erdgasbasierten Energiesystem entscheidend mit zur Versorgungssicherheit beitragen und diese Aufgabe auch in einem wasserstoffbasierten System übernehmen werden müssen. Eine vollständig treibhausgasneutrale Energieversorgung in Deutschland wird in erheblichem Umfang langfristige Gasspeicherkapazitäten erfordern. Insbesondere die Gasnetze und Gasspeicher, die bisher Erdgas transportiert, verteilt und gespeichert haben, werden zukünftig mit treibhausgasneutralen Gasen aller Farben umgehen müssen.

Da der Leitungsinhalt der Gasnetze im einstelligen TWh-Bereich liegt, können sie bei der Deckung des erforderlichen Gasspeicherbedarfs keinen relevanten Beitrag leisten. Die gute Botschaft: Wasserstoff als Energieträger ermöglicht die Nutzung der vorhandenen Gasspeicher zur Speicherung erneuerbarer Energien. Die in Deutschland verfügbaren Erdgasspeicherkapazitäten liegen bei über 270 TWh. In Nordrhein-Westfalen liegen davon knapp 39 TWh; weit überwiegend als Kavernenspeicher im Bereich Gronau/Epe.

Für eine Speicherung von grünen Gasen, wie etwa Wasserstoff, müssen Gasspeicher geeignet bzw. umrüstbar sein. Im Bereich der Kavernenspeicher wird nach aktuellem Wissenstand davon ausgegangen, dass eine vollständige Tauglichkeit für die Speicherung von Wasserstoff gegeben ist. Die Umstellung einer ehemaligen Salzkaverne auf 100 Prozent Wasserstoff wird auch bereits im Reallabor getestet (im VNG-Gasspeicherprojekt Bad Lauchstädt). Darüber hinaus werden Studien zu höheren Wasserstoff-Anteilen vorbereitet.

23.000

Kilometer

**lang soll das europaweite
Leitungssystem im Jahr 2040 sein.**

Auch in europäischen Nachbarländern und im europäischen Verbundnetz insgesamt zeigen sich viele Ansätze zur Weiterentwicklung der Energieinfrastrukturen in Richtung Wasserstoff. Viele dieser Aktivitäten haben wegen der prädestinierten geografischen Lage von Nordrhein-Westfalen und seiner guten Anbindung an das europäische Verbundnetz auch einen direkten Bezug zu unserem Bundesland.

So teilte beispielsweise die Hafengesellschaft Rotterdam im Mai 2020 mit, dass sich Rotterdam zu einer der Wasserstoffdrehscheibe für Deutschland entwickeln wolle. Infrastrukturell sollen dafür Elektrolyseure, Importterminals und Pipelines entstehen, die die Erzeugung in und den Import von Wasserstoff über Rotterdam ermöglichen. Erwartet wird seitens der Niederländer eine Nachfrage nach Wasserstoff aus den Nachbarländern (insbesondere Deutschland) im Jahre 2050 von voraussichtlich rund 13 Millionen Tonnen Wasserstoff. Um diesen Bedarf bedienen zu können, müsse der überwiegende Teil des Wasserstoffs zunächst von den Niederlanden importiert werden. Der niederländische Transportnetzbetreiber Gasunie ist offenbar zudem bestrebt, durch Umstellung nicht mehr benötigter Erdgasleitungen bis 2026 alle industriellen Cluster der Niederlande mit Wasserstoff-Pipelines zu verbinden und in den nördlichen Niederlanden mindestens eine Grenzübergangsstelle nach Deutschland zu schaffen – bis zu drei weitere sollen dort später hinzukommen. Weitere Wasserstoffprojekte finden beispielsweise auch in Südholland, Zeeland und an der belgischen Küste statt.

Eine Gruppe von elf Fernleitungsnetzbetreibern aus neun EU-Staaten hat darüber hinaus ein Konzept für den Aufbau eines europäischen Wasserstoffnetzes vorgestellt. Geplant ist ein Netz, das ab Mitte der 2020er Jahre bis 2030 schrittweise zu einem zunächst 6.800 Kilometer langen Leitungssystem ausgebaut wird, das sogenannte „Hydrogen Valleys“ miteinander verbindet. Bis 2040 soll das Netz eine Länge von 23.000 Kilometer haben. 75 Prozent dieses Netzes wird aus umgewidmeten Erdgasleitungen bestehen, die durch neue Leitungsabschnitte miteinander verbunden werden.

Die Novellierung der aus dem Jahr 2013 datierende TEN-E-Verordnung für die Ziele des European Green Deals soll nach Zielsetzung der EU-Kommission unter deutscher Ratspräsidentschaft beginnen. Damit besteht auch die Chance, Wasserstoffprojekten in diesem grenzüberschreitenden Regelwerk rechtzeitig so Rechnung zu tragen, dass hierüber eine grenzüberschreitende europäische Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut werden kann. Dies ist für Nordrhein-Westfalen mit seinen bereits bestehenden Gasnetzverbindungen in die Niederlande und nach Belgien von besonderer Bedeutung. Die Landesregierung sieht hierin eine Chance, gemeinsam mit den Nachbarn die zukünftige Energieinfrastruktur rechtzeitig zu entwickeln.

Zügige Anpassung des rechtlichen Rahmens zur Entwicklung der Wasserstoffinfrastruktur

Die oben skizzierten Entwicklungspfade einer Wasserstoffinfrastruktur sind an eine wichtige Voraussetzung geknüpft, die aktuell vielfach öffentlich diskutiert, aber auch in vielen Gesprächen mit Unternehmen der Energiewirtschaft bei der Erarbeitung dieser Roadmap erörtert wurde: Zügige Anpassungen des rechtlichen und regulatorischen Rahmens mit Blick auf die Entwicklung einer Wasserstoffinfrastruktur und Wasserstoffwirtschaft sind erforderlich. Es geht dabei insbesondere um folgende Aspekte:

- ⌚ Technologieneutrale Aufnahme von Wasserstoff in den Anwendungsbereich des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) zur Einbeziehung von Wasserstoff in das Planungs- und Genehmigungsregime sowie zur weitergehenden Einbeziehung von Wasserstoffinfrastruktur in die Bedarfsplanung.
- ⌚ Klarstellung der rechtlichen Voraussetzungen für Änderungen der Betriebsweise bestehender Erdgasleitungen hin zu Wasserstoffleitungen und rechtliche Voraussetzungen der Planung und Genehmigung neuer Wasserstoffleitungen im Bereich einer öffentlichen Versorgung einer Vielzahl von Nutzern.
- ⌚ Rechtliche/regulatorische Regelung für bestehende Wasserstoff-Leitungen bzw. eines bestehenden Wasserstoff-Verteilnetzes.
- ⌚ Rechtliche/regulatorische Einordnung des Baus und Betriebs von Elektrolyseuranlagen zur Herstellung von Wasserstoff unter Berücksichtigung der einhergehenden CO₂-Minderung des jeweiligen Erzeugungspfades.

Nach dem derzeit geltenden nationalen Rechtsrahmen fallen die Errichtung und der Betrieb von Wasserstofftransportinfrastruktur, einschließlich der Erzeugung von Wasserstoff in der Elektrolyse nicht in den Anwendungsbereich des Energiewirtschaftsgesetzes. Somit ist bisher weder die Möglichkeit der Weiterentwicklung von Erdgastransportinfrastruktur hin zu einer Wasserstofftransportinfrastruktur, noch ein systemdienlicher Betrieb – geschweige denn eine systemdienliche Allokation, wie sie von den Netzbetreibern gefordert wird – vorgesehen.

Gleichzeitig verhindern die kurz- und mittelfristig weiterhin (zu) hohen Kosten der erforderlichen Erzeugungsstrukturen ihre rein marktgetriebene Entfaltung. Gegenwärtig bestehen auch keine geeigneten Rahmenbedingungen, die Investitionen dennoch anreizen könnten.

Das Umlagen-, Steuer- und Abgabensystem im Energiesektor muss einer grundlegenden Reform unterzogen und hierbei technologieoffen, systematisch, sektorenkopplungsfreundlich und dekarbonisierungsorientiert weiterentwickelt werden. Dazu gehört auch eine schrittweise Reduzierung der EEG-Umlage für Sektorenkopplungstechnologien, wie beispielsweise Elektrolyseure. Hierdurch darf weder die EEG-Umlage für den nichtprivilegierten Verbrauch steigen, noch dürfen andere Sektorenkopplungstechnologien im Wettbewerb benachteiligt werden.

Es erscheint daher im Sinne einer zumindest mittelfristigen Umsetzung der energiewirtschaftlichen Aus- und Umbauziele sowie zur Deckung der industriellen Bedarfe zielführend, kurzfristig ein geeignetes Regulierungsregime für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur zu implementieren. Dies gilt gerade auch unter Berücksichtigung der Zielsetzung, dass der sogenannte Raffineriepfad im Sinne einer Umsetzung der europäischen Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (RED II) und Pilotprogrammen im Stahl- und Chemiesektor über Carbon Contracts for Difference (CCfD) angereizt werden sollen.

Die maßgeblichen Schritte zur Anpassung des Rechtsrahmens müssen dabei aus Sicht des MWIDE kurzfristig und noch in dieser Legislaturperiode angestoßen werden, denn die energiepolitischen Zielsetzungen des Bundes und der Länder lassen es nicht zu, eine gesetzgeberische Entscheidung über die Rahmenbedingungen für eine Wasserstoffwirtschaft hinauszuzögern. Wir sehen ansonsten die Gefahr, dass die energiewirtschaftlich notwendige Wasserstoffinfrastruktur andernfalls nicht rechtzeitig fertiggestellt und in Betrieb genommen werden kann. Für die rechtzeitige Implementierung von infrastrukturellen Wasserstofftechnologien sind unter anderem die Schaffung der planungs- und genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen, die technische Erprobung im realen Netzbetrieb sowie die Schaffung wirtschaftlicher Rahmenbedingungen für die Breitenanwendung im Gigawattvolumina-Maßstab erforderlich. Gleichzeitig setzt sich das MWIDE dafür ein, dass für bestehende Wasserstoffleitungen insbesondere im industriellen Bereich – beispielsweise als industrielle Verteilnetze – eine ihren Interessen entsprechende Regelung geschaffen wird.



Insbesondere mit Blick auf eine Umsetzung der bereits angekündigten Wasserstoffprojekte – so zusammengeführt im Rahmen der „Grüingasvariante“ im NEP Gas 2030 – und eine Umsetzung der dafür erforderlichen Wasserstoffinfrastruktur im Zeithorizont bis 2030 bedarf es daher neben der Anpassung des Planungs- und Genehmigungsrechts insbesondere der weitergehenden Einbeziehung von Wasserstoffinfrastruktur in die Bedarfsplanung. So sollte zumindest die Grüingasvariante des Netzentwicklungsplanes Gas 2020 – 2030 durch die Bundesnetzagentur (BNetzA) bestätigungs- und damit letztendlich auch erstattungsfähig werden, aber auch die mit der nationalen Wasserstoffstrategie verankerten Ausbauziele für Wasserstoffinfrastruktur erreichbar werden. Auf diese Weise kann auch die werterhaltende Nutzung bestehender Gasinfrastruktur – beispielsweise dank freier Leitungen durch die L-H-Gasumstellung – zum Transport von Wasserstoff ermöglicht werden.

Letztlich muss die Regulierung von Wasserstoffnetzen in Deutschland auch in einen europäischen Rahmen eingebettet werden, da keine nationale Autarkie, sondern ein insgesamt funktionsfähiges System innerhalb des europäischen Binnenmarkts und letztlich Weltmarkts für handelbare klimaneutrale Produkte (Gase/synthetische Kraftstoffe) verfolgt wird. Dies gilt sowohl für reine Wasserstoffnetze, die auf einer Umstellung von Teilen der bisherigen L-Gasinfrastruktur zwischen den Niederlanden und Deutschland beruhen, als auch für die Frage der Beimischungen von Wasserstoff im Erdgasnetz.

Ein supranationaler Handel und der grenzüberschreitende Transport von zukünftigen (erneuerbaren) Gasqualitäten im europäischen Verbundnetz erfordert harmonisierte Standards für die Produktqualitäten, eine Zertifizierung bzw. Herkunftsnachweise sowie technische Normungsanforderungen. Hierbei spielt die wirkungsvolle Anrechnung von CO₂-Vermeidungsfaktoren für das Inverkehrbringen entsprechender Produkte auf europäischer Ebene eine wichtige Rolle. Nur so wird es möglich sein, den Industrieverbrauchern die erforderlichen Wasserstoffmengen und -qualitäten zur Verfügung zu stellen. Gleichzeitig sollte dies nicht dazu verleiten, die kommenden Jahre europäischer Normgebung abzuwarten und den zügigen Aufbau eines nationalen Nukleus einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft zu verzögern. Erste nationale Schritte zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur und Wasserstoffwirtschaft sind nicht nur für die nationale Zielerreichung wichtig, sondern auch erforderlich, um mit diesen ersten Erfahrungen Einfluss auf die zu schaffenden europäischen Standards zu nehmen.

Dies gilt auch für Überlegungen zum „Grünen Kerosin“ als wesentlicher Antriebsstoff für die Luftfahrt der Zukunft. Mit Blick auf Beimischungsquoten für alternative Kraftstoffe ist hier primär eine europäische oder internationale Lösung anzustreben. Bei einer nationalen Lösung für eine Beimischungsquote wären Schutzmechanismen erforderlich, die eine Schlechterstellung deutscher Unternehmen vermeiden. Geprüft werden sollte auch, ob neben einer Beimischungsquote auch andere Einführungsmodelle zielführend sein können.

Konkrete Vorschläge zum europäischen Rahmen für die Regulierung von Wasserstoffnetzen seitens der EU werden etwa Mitte 2021 erwartet. Die Bundesregierung sollte sich hier frühzeitig einbringen, da eine maßgebliche Beteiligung an der Setzung geeigneter Normen auch wirtschaftliche Vorteile in der Vermarktung von Wasserstofftechnologien ergeben können. Hierin wird von Seiten des MWIDE eine maßgebliche Gestaltungschance für den Energie- und Industriestandort Nordrhein-Westfalen gesehen.

Die für die rechtliche/regulatorische Umsetzung in Deutschland federführend zuständige Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA) hat im Juli 2020 eine Bestandsaufnahme zur Regulierung von Wasserstoffnetzen vorgelegt und ein Konsultations- oder Marktbefragungsverfahren zum notwendigen Regulierungsrahmen für Wasserstoffnetze eröffnet, welches bis zum 4. September 2020 durchgeführt wurde. Das MWIDE hat sich mit den hier skizzierten grundsätzlichen Positionierungen daran beteiligt. Die Ergebnisse der Auswertung des Konsultationsverfahrens der BNetzA bleiben abzuwarten. Das MWIDE wird sich am nachgelagerten Entscheidungsfindungsprozess entsprechend beteiligen.





07

66–70

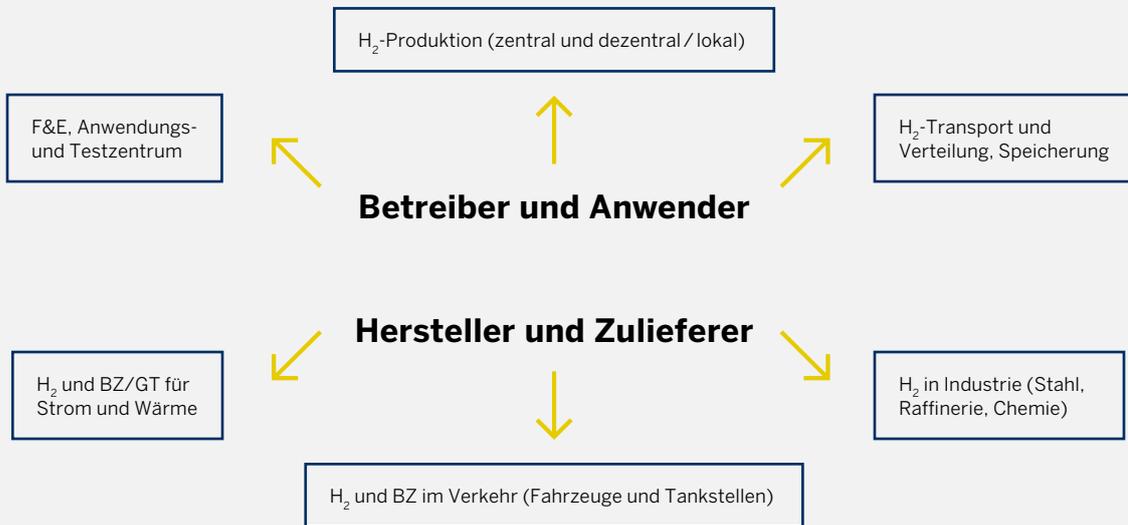
Brennstoffzelle, Elektrolyse und Co.: Chancen für nachhaltige Wertschöpfung



Nordrhein-Westfalen ist bereits heute mit zahlreichen Forschungseinrichtungen und Unternehmen breit aufgestellt entlang der Wertschöpfungskette für Wasserstoff: von Brennstoffzellen- und Elektrolysetechnologien bis hin zu Speicherung, Lagerung, Transport und Nutzung. Darüber hinaus entstehen attraktive Möglichkeiten für Unternehmen, ihr Portfolio organisch um Wasserstoffthemen zu erweitern.



Abbildung 27: Handlungsfelder mit Wertschöpfung in NRW



In Nordrhein-Westfalen befinden sich schon heute eine Vielzahl an Unternehmen, die an den unterschiedlichen Punkten der Wertschöpfungskette von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik tätig sind. Dies hat auch eine erst kürzlich vorgestellte Initiative, koordiniert durch die Landesvereinigung der Unternehmensverbände Nordrhein-Westfalen, sehr deutlich gemacht. Unter dem Titel „Aufbruch in die Zukunft: Transformationspfade für nachhaltige industrielle Projekte in Nordrhein-Westfalen“ versammeln sich Projektvorschläge mit einem Investitionsvolumen von rund vier Milliarden Euro. Die Initiative wird sowohl von großen Industrieunternehmen als auch von vielen mittelständischen Familienunternehmen getragen.

In Nordrhein-Westfalen werden Brennstoffzellen-Systeme, Wasserstoff-Drucktanks, Transportcontainer und Fahrzeugtanksysteme hergestellt. Hinzu kommen Unternehmen, die Elektrolyse-Systeme und Wasserstoff-Gasturbinen bauen, darüber hinaus die Produktion von Membranen für die alkalische Membranelektrolyse und von Reaktoren, unter anderem für Reformierung und Methanisierung. Auch die Herstellung von Großkompressoren ist ein immer wichtigeres Geschäftsfeld, für das Wasserstoff ein immer wichtigerer Wirtschaftszweig wird.

Im Anwendungsfeld Mobilität gibt es Aktivitäten im Wasserstoff-Pkw-Bau, in der Entwicklung von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren und der Herstellung von Brennstoffzellensystemen und Zügen. Hinzu kommen einige Produzenten von Komponenten, wie beispielweise Wasserstoff-Drucktanks, Druckminderern, Sensoren und Hochdruckverrohrungen, sowie die Entwicklung und der Bau von Wasserstoff-Tankstellen.

Nordrhein-westfälische Unternehmen sind auch im Bereich der stationären Stromerzeugung gut aufgestellt. Es werden Blockheizkraftwerke und Festoxid-Brennstoffzellen mit höchsten Stromerzeugungs-Wirkungsgraden hergestellt. Zudem bieten Firmen Brennstoffzellen Systeme für die netzferne Stromversorgung auf Basis klassischer Brennstoffe mit eigenen Reformern, sowie netzunabhängige Stromversorgungen auf Basis von Wasserstoff und Brennstoffzelle an. Außerdem werden Wasserstoff-Gasturbinen und Brennstoffzellen-Kraft-Wärme-Kopplungs-Systeme und wasserstoffbasierte Heizsysteme angeboten.

Das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität der EnergieAgentur.NRW vereint die Komponenten- und Systemhersteller im Auftrag des MWIDE, um gemeinsam deren Entwicklung voranzutreiben. Dabei kann der Technologiebedarf durch die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Entwicklung noch deutlich zunehmen, so dass im Zukunftsmarkt Wasserstoff auch große Chancen für den Strukturwandel im Rheinischen Revier und im Ruhrgebiet liegen.

Wasserstofflabor Ruhr

Elektrolysekapazitäten im industriellen Maßstab gehören zu den entscheidenden Faktoren einer Wasserstoffwirtschaft. Die Technologie ist in vielen Fällen marktreif, aber heutige Anlagen werden meistens unter Manufakturbedingungen und in Kleinserie produziert. Eine Reihe von Elektrolyseanlagen wurde im kleinen Maßstab erfolgreich getestet und betrieben. Nun aber stehen Skalierung und Betriebserfahrungen im Realbetrieb im Vordergrund.

Die Akteure in der Region Ruhr haben dies erkannt und treiben anwendungsbezogene Forschungs- und Entwicklungsprojekte bereits mit eigenen Projekten voran. In einem nächsten Schritt möchten die Akteure der Region die Kompetenzen gezielt im „Wasserstofflabor Ruhr“ vernetzen. Hier können innovative Technologien im Bereich der Elektrolyse umgesetzt, getestet und validiert werden.

Der zukünftige Markt für Elektrolyseure wird nach diverser Prognosen im dreistelligen Gigawatt Bereich liegen. Für die Metropolregion Ruhr bietet sich die Chance, zu einem Zentrum dieses Zukunftsmarkts zu werden, nachhaltige Wertschöpfung zu generieren und diese in der Metropole Ruhr zu verankern.

Im Zentrum dieser Initiative steht dabei der Aufbau eines Demonstrations- und Betriebsforschungszentrums. Die Akteure der Region wollen an einem solchen Zentrum nicht nur ihre vorhandenen Kompetenzen bündeln, sondern auch Ausbildungskapazitäten schaffen, das Zusammenwirken von Systemkomponenten untersuchen und die Einbindung der Elektrolyse in das Energiesystem erproben. Die beim Testbetrieb großer Elektrolyseure erzeugte Menge an Wasserstoff und Sauerstoff kann durch lokale Industrieanlagen sinnvoll genutzt werden. Auch die anfallende Abwärme kann potenziell in vorhandene Fernwärmestrukturen integriert werden. Ein neuer Campus bietet darüber hinaus Ansiedlungsmöglichkeiten für Start-ups und Forschungsdienstleister. Neben den für eine Hochskalierung der Elektrolyse notwendigen Forschungszielen, wie Effizienzsteigerung und Kostenreduzierung, geht es in dem Zentrum auch um die Entwicklung von Produktionsverfahren für die industrielle Fertigung.

Das Demonstrations- und Betriebsforschungszentrum stellt einen Mehrwert für die Entwickler und Produzenten von Elektrolyseuren dar und soll künftig dazu beitragen, bedeutende Produktionsanlagen in der Region anzusiedeln.

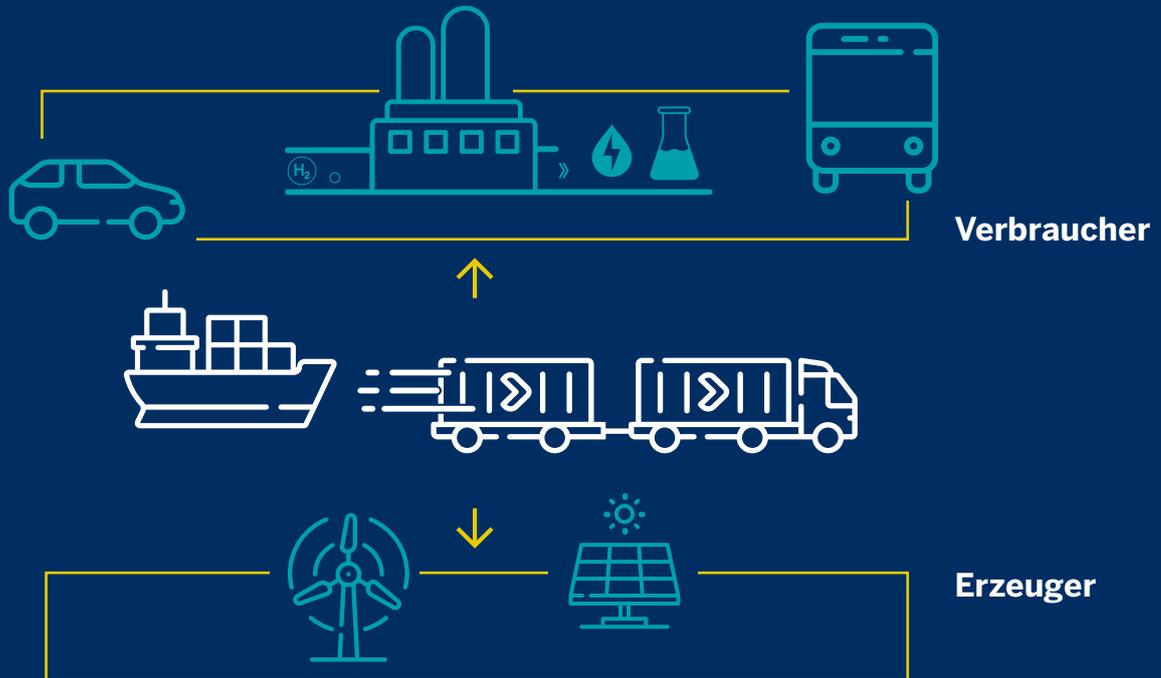
Wasserstoffrevier

Wasserstoff wird eine Schlüsselrolle zur Erreichung der europäischen und deutschen Klimaschutzziele spielen. Die Weiterentwicklung und Anwendung der damit zusammenhängenden Technologien birgt große Potenziale für Wertschöpfung und Beschäftigung. Aufgrund seiner Wissenschafts- und Hochschullandschaft sowie der vorhandenen industriellen Kompetenzen verfügt das Rheinische Revier über sehr gute Rahmenbedingungen, um zu einer international führenden Region der Wasserstoffwirtschaft zu werden.

Durch Innovationen und Technologieentwicklung rund um das Thema Wasserstoff ergeben sich neue Märkte für Unternehmen nicht nur im Rheinischen Revier, sondern in der gesamten Bundesrepublik. Das Rheinische Revier kann damit einen entscheidenden Beitrag zur Umsetzung der von der Bundesregierung vorgelegten Wasserstoffstrategie leisten und auch konjunktureller Treiber für die wirtschaftliche Erholung nach der COVID-19 Pandemie sein.

Abbildung 28: LOHC Technologie verbindet Erzeuger und Verbraucher

©MWIDE



Eines der zentralen Projekte innerhalb des Wasserstoffreviers ist das Helmholtz-Cluster für nachhaltige und infrastrukturkompatible Wasserstoffwirtschaft am Forschungszentrum Jülich. Kernaufgabe des Clusters ist es, innovative Wasserstofftechnologien in den Bereichen Produktion, Speicherung, Transport und Verwertung zu erforschen, zu entwickeln und großskalig zu demonstrieren. Als wesentliche Säulen werden der innovative Logistikanatz der flüssigen Wasserstoffträger (LOHC) betrachtet sowie Schlüsselthemen der Wasserstoffherzeugung und -nutzung.

Neben dem Helmholtz-Cluster spielt auch die wasserstoffbasierte Mobilität eine entscheidende Rolle. Die Verwendung von Brennstoffzellen in Verbindung mit grünem Wasserstoff trägt zu einer emissionsarmen und klimagerechten Mobilität bei. Die Brennstoffzellentechnologie weist im Vergleich zu batteriebetriebenen Fahrzeugen Vorteile bei der Tankdauer und den Reichweiten

auf. Dem stehen jedoch hohe Kosten für Wasserstoff und insbesondere für die Brennstoffzelle selbst entgegen. Aufgrund der geringen Stückzahlen lassen sich Skaleneffekte derzeit nicht zur Kostenreduzierung nutzen. Zudem ist der Automatisierungsgrad in der Fertigung als gering anzusehen. Günstige Brennstoffzellen stellen jedoch den Schlüssel für den Durchbruch der Wasserstoffmobilität dar. Die Erforschung einer hochskalierbaren Brennstoffzellenproduktion ist Gegenstand zweier Projekte in der Programmlinie SofortprogrammPLUS, über die ersten Impulse für einen gelingenden Strukturwandel im Rheinischen Revier gesetzt werden sollen. Unter Einbindung mehrerer Partner decken die Antragsteller wichtige Themenkomplexe der Brennstoffzelle, bestehend aus Stack und Nebenaggregaten, in ihren Projektskizzen ab. Eine Brennstoffzellenproduktion bietet das Potenzial, große Anteile an der Wertschöpfung in Nordrhein-Westfalen zu erzielen und verfügt über eine Anreizwirkung für die Ansiedlung weiterer Unternehmen.

Während in Europa Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe vorwiegend mithilfe von Elektrolyseuren erzeugt werden, können in anderen Regionen der Welt auch solarthermische Verfahren zum Zuge kommen. Daher sollen mit dem Aufbau des DLR-Instituts Future Fuels solare Hochtemperaturtechnologien bis hin zur Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen erforscht werden. Die zu entwickelnden Technologien sollen gemeinsam mit der Industrie hoch skaliert werden, um sie möglichst zügig an die Industrie zu übergeben. Ziel ist es, international ein Vorreiter für die Realisierung von Herstellungs- und Logistikwegen für erneuerbare Kraftstoffe aus Sonnenenergie zu sein. Es soll der globale Export von Hochtechnologie aus dem Rheinischen Revier für die Produktion solarer Brennstoffe stimuliert werden.

Neben den Projekten im SofortprogrammPLUS soll der Entwicklungsschwerpunkt Wasserstoffrevier in den kommenden Jahren durch zielgerichtete Förderaufrufe weiterentwickelt werden. Zu diesen zählen beispielsweise innovative Produktions- und Speichertechnologien wie auch neue Anwendungen in den Bereichen Industrie, Mobilität und Energie.

Tabelle 2: Das Wasserstoffrevier im SofortprogrammPLUS

Projekt	Landkreis
DLR-Institut Future Fuels in Jülich	Kreis Düren
Helmholtz-Cluster für nachhaltige und infrastrukturkompatible Wasserstoffwirtschaft	Kreis Düren
Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft – Weiterentwicklung und Herstellung von Wasserstoff-Sensoren und Wasserstoff-Brenner als Schlüsselkomponenten einer Wasserstoffwirtschaft	Rhein-Kreis Neuss
H2Revier – Aufbau einer Brennstoffzellen-Produktion im Rahmen einer wasserstoffbasierten Wertschöpfungskette in NRW	Kreis Düren
Brennstoffzellenfahrzeuge im Netz Düren	Kreis Düren
Euregio-H2-Center	Kreis Düren
Grüne Wasserstoffanlagen	Rhein-Erft-Kreis



Ausblick

Wichtige Entscheidungen, die für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft notwendig sind, können und sollten noch in diesem Jahr erfolgen.

Sowohl die Umsetzung der EEG-Novelle und die Implementierung der RED II als auch die Frage nach der Aufnahme von Wasserstoff-Transportnetzen in das Energiewirtschaftsgesetz sind hier von zentraler Bedeutung. Im nächsten Jahr wird es darum gehen, Carbon Contracts for Difference (CCfD) auszugestalten und zeitnah die ersten Aufrufe durchzuführen.

Diese und weitere Maßnahmen werden wir nun, im intensiven Austausch mit allen gesellschaftlichen Akteuren und in Kooperation mit europäischen und internationalen Partnern angehen. Wir werden geeignete Formate finden, die den Fortschritt der hier skizzierten Maßnahmen und Ziele begleiten und uns weiterhin aktiv an der Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft beteiligen.

Unsere Roadmap soll hierbei nicht als abschließende Abhandlung verstanden werden, sondern vielmehr als eine Momentaufnahme und Zielvision, die wir gemeinsam mit allen gesellschaftlichen Akteuren weiterentwickeln wollen.



Quellenverzeichnis

- ¹ Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. JRC Report. 2011. <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/publications/archive-2011> (abgerufen am 15.09.2020)
- ² Gas for Climate. The optimal role for gas in a net-zero emissions energy system. Navigant. 2019. <https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2020/03/Navigant-Gas-for-Climate-The-optimal-role-for-gas-in-a-net-zero-emissions-energy-system-March-2019.pdf> (abgerufen am 14.09.2020)
- ³ <https://northernlightsccs.eu/> (abgerufen am 14.09.2020)
- ⁴ <https://www.designetz.de/blaupause-und-bausteine/sektorkopplung/ptg-ibbenbueren/> (abgerufen am 17.09.2020)
- ⁵ Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. NOW GmbH. 2018. https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/indwede-studie_v04.1.pdf (abgerufen am 17.09.2020)
- ⁶ Bewertung der Vorkettenemissionen bei der Erdgasförderung in Deutschland. Umweltbundesamt. 2018. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-01-30_climate-change_02-2018_roadmap-gas_0.pdf (abgerufen am 18.09.2020)
- ⁷ Kurzstudie Blauer Wasserstoff. Perspektiven und Grenzen eines neuen Technologiepfades. Bukold. 2020. <https://www.energycomment.de/neue-studie-blauer-vs-gruner-wasserstoff-kosten-emissionen-trends/> (abgerufen am 17.09.2020)
- ⁸ Die Nationale Wasserstoffstrategie. BMWi. 2020. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html> (abgerufen am 17.09.2020)
- ⁹ Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Fraunhofer. 2019. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf (abgerufen am 21.09.2020)
- ¹⁰ VCI Roadmap 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Dechema. 2019. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf> (abgerufen am 21.09.2020)
- ¹¹ Industrie ist Zukunft: Industriepolitische Leitbild des Landes Nordrhein-Westfalen. MWIDE. 2019. https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/190925_industriepolitische_leitbild_finale_fassung.pdf (abgerufen am 28.09.2020)
- ¹² Treibhausgas-Emissionsinventar Nordrhein-Westfalen 2018 - LANUV-Fachbericht 105. 2020. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30105.pdf (abgerufen am 29.09.2020)
- ¹³ Industrie ist Zukunft: Industriepolitische Leitbild des Landes Nordrhein-Westfalen. MWIDE. 2019. https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/190925_industriepolitische_leitbild_finale_fassung.pdf (abgerufen am 29.09.2020)
- ¹⁴ Stahl und Metalle. MWIDE. 2020. <https://www.wirtschaft.nrw/stahl-und-metalle> (abgerufen am 17.09.2020)

- 15 Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. UBA. 2019. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/den-weg-zu-einem-treibhausgasneutralen-deutschland> (abgerufen am 10.09.2020)
- 16 Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen. Eine Expertise für das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. LBST. 2019. https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/bericht_wasserstoffstudie_nrw-2019-04-09_komp.pdf (abgerufen am 10.09.2020)
- 17 Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Agora Energiewende und Wuppertal Institut. 2019. <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrale-industrie-hauptstudie/> (abgerufen am 30.09.2020)
- 18 VCI Roadmap 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Dechema. 2019. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf> (abgerufen am 30.09.2020)
- 19 dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. dena. 2018. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf (abgerufen am 30.09.2020)
- 20 Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Agora Energiewende und Wuppertal Institut. 2019. <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrale-industrie-hauptstudie/> (abgerufen am 30.09.2020)
- 21 Mobilität in Nordrhein-Westfalen Daten und Fakten 2018/2019 Straßenverkehr – ÖPNV und Eisenbahn – Binnenschiffsverkehr – Luftverkehr. Ministerium für Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen .2019). https://www.vm.nrw.de/verkehr/strasse/Strassenverkehr/Daten_und_Fakten/MFV041319_Broschuere_Mobilitaet_in_NRW_RZ_Web_150dpi.pdf (abgerufen am 30.09.2020)
- 22 Treibhausgas-Emissionsinventar Nordrhein-Westfalen 2018/19 (LANUV-Fachbericht 105) Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. 2020. <https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaschutz/treibhausgas-emissionsinventar>
- 23 Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. BMU.
- 24 EU Richtlinie 2019/1161 des europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1161&from=DE> (abgerufen am 30.09.2020)
- 25 Hier.Heute.H₂. Ein Beitrag im Wettbewerb „Modellkommune/-region Wasserstoffmobilität NRW“ – Teil 1/Endbericht. Kompetenzregion Wasserstoff Düssel.Rhein.Wupper. 2020.
- 26 Feinkonzept zum Wettbewerb Modellregion Wasserstoff-Mobilität NRW. H₂R – Wasserstoff Rhein-land. 2020.
- 27 Treibstoff der Zukunft – Grüner Wasserstoff mobilisiert das energieland 2050. Bewerbung des Kreises Steinfurt als Modellregion Wasserstoff-Mobilität NRW. Kreis Steinfurt. 2020.
- 28 Einsatzmöglichkeiten unter realen Rahmenbedingungen (2. Kurzbericht der AG 2). Arbeitsgruppe 2 „Alternative Antriebe und Kraftstoffe für nachhaltige Mobilität“ der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität. 2020. <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/2download/einsatzmoeglichkeiten-unter-realen-rahmenbedingungen/> (abgerufen am 30.09.2020)
- 29 20 Prozent des abgeschätzten Wasserstoffbedarfs für das Jahr 2030 von 200.000 Tonnen Wasserstoff würde auf die Brennstoffzellen Pkw und leichte Nutzfahrzeuge entfallen.

Impressum

Herausgeber:

Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen

Berger Allee 25
40213 Düsseldorf

Tel. +49 (0) 211/61772-0

Fax: +49 (0) 211/61772-777

Internet: www.wirtschaft.nrw

Referat VII.5

Sektorübergreifende Energiesysteme der
Zukunft, Klimaschutz in der Industrie,
Energieeffizienz

Bildnachweise:

© MWIDE NRW/F. Wiedemeier (3),

© stock.adobe.com/sarawut795 (6)

© stock.adobe.com/korkeng (14),

© stock.adobe.com/romankosolapov (18),

© [unsplash/Adrien Ledoux](https://unsplash.com/AdrienLedoux) (24)

© [unsplash/Pawel Czerwinski](https://unsplash.com/PawelCzerwinski) (30),

© stock.adobe.com/your123 (36),

© stock.adobe.com/Looker_Studio (66)

Gestaltung:

www.heimrich-hannot.de

Die Broschüre ist auf der Homepage des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen als PDF-Dokument abrufbar.

Hinweis

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Landesregierung Nordrhein-Westfalen herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerberinnen und -bewerbern oder Wahlhelferinnen und -helfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden.

Dies gilt auch für Landtags-, Bundestags- und Kommunalwahlen sowie für die Wahl der Mitglieder des Europäischen Parlaments.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Eine Verwendung dieser Druckschrift durch Parteien oder sie unterstützende Organisationen ausschließlich zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder bleibt hiervon unberührt. Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin oder dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

**Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen**
Berger Allee 25, 40213 Düsseldorf
www.wirtschaft.nrw