



Klimaschutz und Resilienz

Der Umsetzungsplan für
Wasserstoff und klimaneutrale Gase

Herausgeber

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e. V.

Technisch-wissenschaftlicher Verein

Josef-Wirmer-Straße 1–3

53123 Bonn

Telefon: +49 228 9188-5

Fax: +49 228 9188-990

E-Mail: info@dvgw.de

Internet: www.dvgw.de

@DVGW

Ansprechpartner

Dr. Dennis Rendschmidt

rendschmidt@dvgw.de

Konzeption und Gestaltung

365 Sherpas GmbH

www.365sherpas.com

Bildnachweise

Titel: malp / Artinun / philipus / stock.adobe.com, freepik.com

Stand

April 2021



Inhaltsverzeichnis

3	Vorwort: Aus der Wasserstoff-Vision Realität machen
4	Kapitel 1: Wasserstoff – Win-win für Klima und Wirtschaft
6	Kapitel 2: Erzeugung
8	2.1 Klimaneutraler Wasserstoff: ein sicherer, moderner und nachhaltiger Weg in die Zukunft
10	2.2 Die verschiedenen Arten der Wasserstoff-Erzeugung
10	2.2.1 Power-to-Gas: Zentral für die Sektorenkoppelung
13	2.2.2 Reforming aus Erdgas: Verlässlich und klimaneutral
14	2.2.3 Pyrolyse: Potenzial für Wasserstoff und neue CO ₂ -Kreisläufe
15	2.3 Synthesegase: Mit CO ₂ -Kreisläufen Gase veredeln
17	2.4 Importe: Weshalb wir sie brauchen, woher sie kommen sollten und wie wir sie organisieren
22	Kapitel 3: Transport, Verteilung und Speicherung
23	3.1 Die wertvolle Ressource der Gasnetze
25	3.2 Was mit den bestehenden Transportleitungen und Verteilnetzen passieren muss
30	3.3 Bestehende Erdgasspeicher neu nutzen
32	3.4 Was mit den Speichern geschehen muss
34	Kapitel 4: Anwendung
36	4.1. Beschränkung auf einzelne Sektoren verschenkt Potenziale
37	4.2. Wärme
41	4.3. Industrie
44	4.4. Mobilität
47	4.5. Stromerzeugung
50	Kapitel 5: Zusammenfassung
52	Glossar
54	Literaturverzeichnis

Vorwort

Aus der Wasserstoff-Vision Realität machen

Der Klimawandel stellt eine globale und vor allem drängende Herausforderung dar. Deshalb wurden und werden Klimaschutzziele auf nationaler, europäischer und multilateraler Ebene formuliert. In Deutschland haben wir uns mit der Energiewende ambitionierte Wechsel der Energieträger vorgenommen. Durch den massiven Ausbau und die Förderregime für erneuerbare Energieträger wurde der Atomausstieg im Stromsektor eingeleitet, der noch in diesem Jahrzehnt abgeschlossen wird. Weitere Wechsel der Energieträger stehen an, um Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren – und das nachhaltiger als durch eine schrittweise Innovation der bestehenden Kohle- und Erdöl-Technologien. Der DVGW hat diese Wechsel in den vergangenen Jahren in einem Prozess aus drei parallel verlaufenden Schritten beschrieben.

Fuel Switch

Ablösung von Kohle und Öl durch Gas

Content Switch

Parallel dazu steigende Beimischung von klimaneutralen Gasen (Biogas, Wasserstoff, Biomethan)

Modal Switch

Verwendung von Gasen in ausnahmslos allen Sektoren über die schon bestehende Infrastruktur (Sektorenkopplung)

Der DVGW ist davon überzeugt, dass es eines ganzheitlichen Blicks auf die Energieträgerwelt bedarf, damit die Energiewende gelingt. Während bei der Energiewende der Fokus bisher vor allem auf dem Markthochlauf der erneuerbaren Energien, also von Elektronen, lag, muss in der beginnenden zweiten Phase der Energiewende der Fokus vor allem auf Gas, also Molekülen, liegen. Dieser birgt ein großes Potenzial zur Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Reduktion, das vergleichsweise schnell und kostengünstig ausgeschöpft werden und damit zur Erreichung der Klimaziele unmittelbar beitragen kann. Denn etwa 80 Prozent des Energiebedarfs in Deutschland werden derzeit durch Moleküle den verschiedenen Sektoren bereitgestellt (Abbildung 1).

Die nun beginnenden Anstrengungen um den Markthochlauf von Wasserstoff und die Nutzung klimaneutraler Gase sind zu unterstützen, denn sie haben für die CO₂-Reduktion in nahezu allen Sektoren eine zentrale Bedeutung. Wie dies gelingen kann, dem widmet sich diese Broschüre.

Der DVGW ist davon überzeugt, dass durch klimaneutrale Gase im Allgemeinen und Wasserstoff im Besonderen Impulse für die Wirtschaft und den Klimaschutz gleichermaßen gesetzt werden können, sofern der Markthochlauf technologieoffen und ganzheitlich organisiert wird. Mit den Perspektiven und der Erfahrung aus Regelsetzung, Forschung und Branchenservices hat der DVGW, in dem 91 Prozent der deutschen Gasnetzbetreiber Mitglied sind, einen unabhängigen und ganzheitlichen Blick auf das Thema. Somit bringt der DVGW das Know-how mit, einen Umsetzungspfad zu beschreiben, der aus der Wasserstoff-Vision Realität werden lässt.

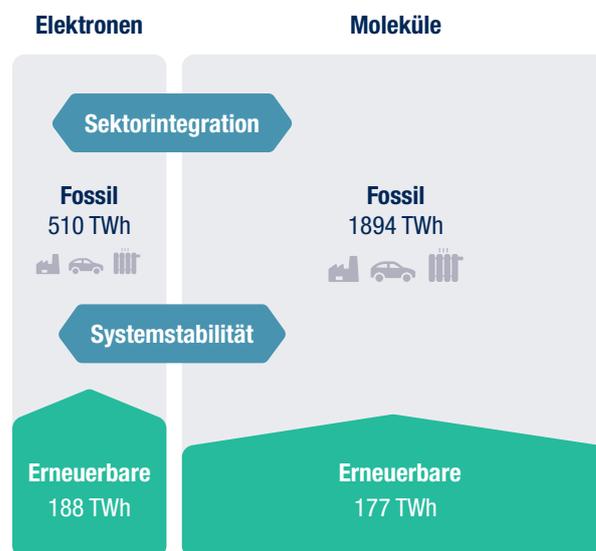
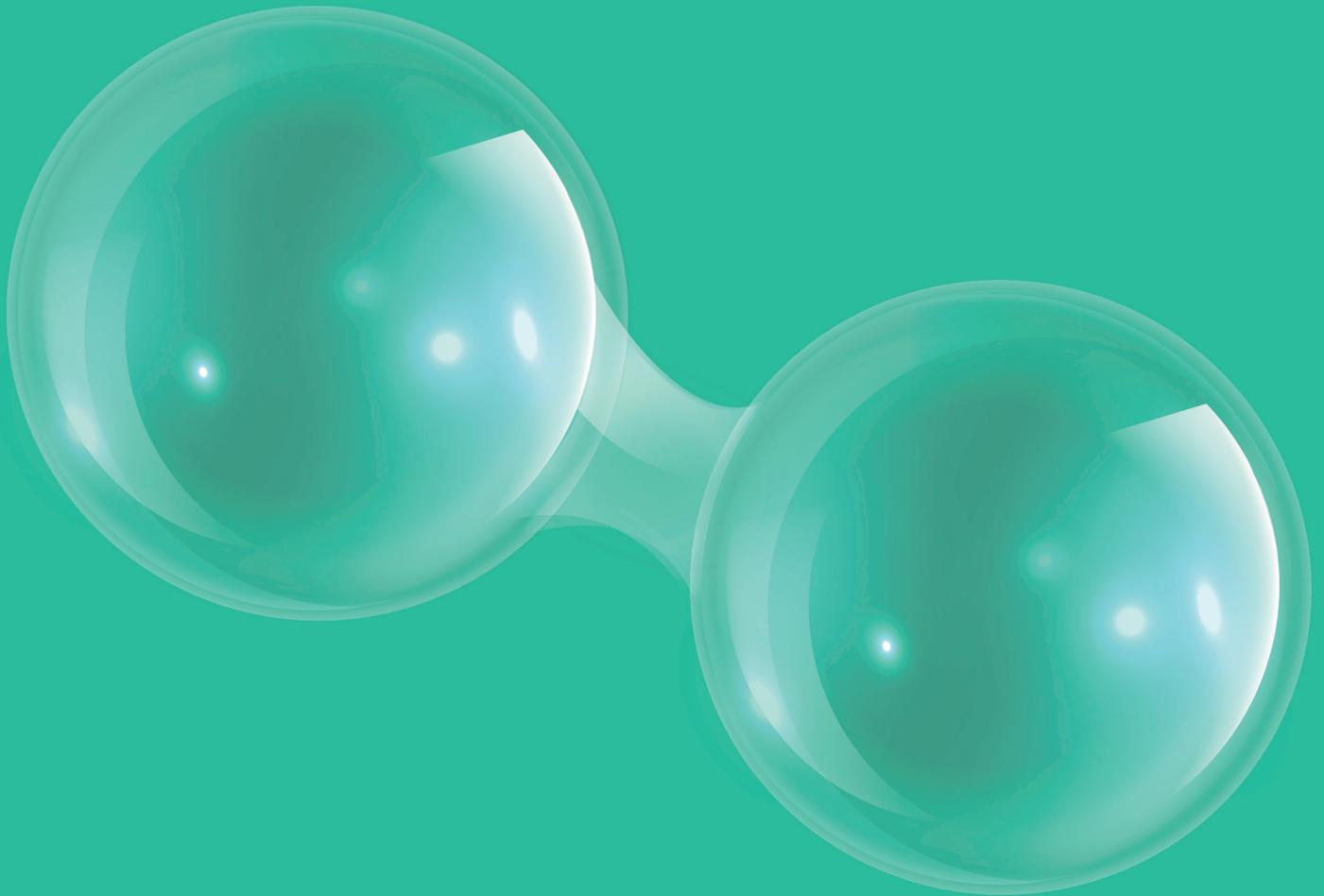


Abbildung 1: Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2019. Die Mächtigkeit der Substitutionsaufgabe fordert eine Strategie der Defossilierung. Gase spielen dabei eine Schlüsselrolle, da sie klimaneutral hergestellt werden können.
Quelle: Open Grid Europe, 2019



Kapitel 1

Wasserstoff – Win-win für Klima und Wirtschaft

Ein faktenbasierter Blick auf die Energiewende zeigt: Nur klimaneutrale Gase besitzen das Potenzial, den CO₂-Fußabdruck unserer Energieversorgung in klar definierbaren Schritten zu minimieren. Sie verbinden effektiven Klimaschutz mit innovativem Wirtschaften.

In 20 Jahren Energiewende ist es Deutschland gelungen, etwa die Hälfte seines Strombedarfs aus erneuerbaren Quellen zu decken. Allerdings wird nur ein Fünftel des Endenergieverbrauchs durch Strom bzw. Elektronen gedeckt. Die übrigen 80 Prozent werden durch Moleküle gedeckt – derzeit hauptsächlich in Form von Erdöl, Erdgas und Kohle. Die wahre Herausforderung einer ganzheitlichen Energiewende liegt also darin, diesen Löwenanteil des Energieverbrauchs klimaneutral zu gestalten – bei gleichbleibend hoher Sicherheit und Bezahlbarkeit der Energieversorgung.

Mit dieser Broschüre möchte der DVGW die Potenziale von Wasserstoff und klimaneutralen Gasen erläutern und Empfehlungen für die verlässliche Umsetzung dieses nächsten Schrittes der Energiewende geben. Die detaillierte Beschreibung der Potenziale folgt der Wertschöpfungskette von Wasserstoff und Biogas in den Bereichen Erzeugung, Transport, Verteilung und Speicherung sowie seinen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten. Neben den Chancen wird auch auf Lücken in Regelwerken, Möglichkeiten von Forschung und Entwicklung sowie auf Erwartungen an gegenwärtige und künftige Regulierung hingewiesen.

Der Kernpunkt: Wasserstoff und klimaneutrale Gase sind eine enorme wirtschaftliche und gleichermaßen ökologische Chance. Beide Bereiche müssen zusammen gedacht und dürfen nicht gegeneinander ausgespielt werden. Mit seiner Erfahrung in der Gaswirtschaft und der damit bereits vorhandenen Technologien und Infrastrukturen hat Deutschland die besten Voraussetzungen, weltweiter Vorreiter in der Wasserstofftechnologie, in der Produktion und Anwendung von klimaneutralen Gasen zu werden – wenn Politik, Wissenschaft und Wirtschaft jetzt Erkenntnisse teilen und gemeinsam die richtigen Entscheidungen treffen.

Der Einsatz von Wasserstoff und weiteren klimaneutralen Gasen ist eine Win-win-Situation für Umwelt und Wirtschaft – Wasserstoff kann die CO₂-intensiven Energieträger Kohle und Erdöl ablösen. Die Entwicklung und Produktion von Wasserstofftechnologien bietet deutschen Unternehmen weltweit wachsende Absatzmärkte. Die Wasserstoff-Roadmap des Fraunhofer ISE geht von einem Anstieg der globalen Wertschöpfung deutscher Hersteller bei Elektrolyse und Brennstoffzellen von etwa zehn Milliarden Euro in 2030 auf etwa 32 Milliarden Euro in 2050 aus.¹ Der DVGW ist überzeugt davon, dass nach derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnissen der technologieoffene Markthochlauf von Wasserstoff und klimaneutralen Gasen den volkswirtschaftlich bedeutendsten und in Sachen Klimaschutz effektivsten Beitrag zur Energiewende leisten kann. Wasserstoff spielt dabei eine ganz zentrale Rolle: Als Kern und Treiber für klimaneutrale Gase, als verbindendes Element der Sektorkopplung, als Katalysator für Innovationen bei der Wärmeversorgung, in der Industrie, Mobilität und der Energieerzeugung.

Quellen

¹ Fraunhofer ISE (Hrsg.) 2019: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Online abrufbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf [letzter Zugriff am 16.11.2020]



Kapitel 2

Erzeugung

Deutschland möchte weltweit führend bei Wasserstofftechnologien werden. Dieses ambitionierte Ziel hat die Bundesregierung in der Nationalen Wasserstoffstrategie formuliert. Bis 2030 wird Deutschland laut der Nationalen Wasserstoffstrategie einen Wasserstoffbedarf von 90 bis 110 TWh haben.

Heute liegt dieser bereits bei 55 TWh. Deutschland wird auf einen Mix aus unterschiedlichen Quellen für klimaneutrale Gase zurückgreifen müssen, um den erforderlichen schnellen Markthochlauf zu gewährleisten und langfristig sämtliche Sektoren klimaneutral mit Energie zu versorgen.

Definition: Klimaneutrale Gase

Um die Klimaziele der Bundesregierung, der Europäischen Union (EU) und des Pariser Klimaabkommens etappenweise zu erreichen, ist die sukzessive CO₂-Reduktion des Energieverbrauchs ausschlaggebend. Wasserstoff ist dabei ein zentraler Treiber und Katalysator. Er muss von weiteren klimaneutralen Gasen unterstützt werden.

Denn entscheidend für den Klimaschutz ist die CO₂-Bilanz der Gase: Für die CO₂-Reduktion sind die spezifischen CO₂-Emissionen von Gasen einschließlich der Vorkette ausschlaggebend. Bei der Definition klimaneutraler Gase nimmt der DVGW deshalb die CO₂-Äquivalenz in den Fokus. Gase, die unterhalb eines bestimmten Grenzwertes liegen, sollten als klimaneutral definiert werden. Für die Festlegung dieser Grenzwerte bieten sich die Maßgaben der europäischen Richtlinie zur Förderung der Nutzung von erneuerbaren Quellen (RED II) an. Demnach liegt der Grenzwert für ein klimaneutrales Gas bei 131 g CO₂eq/kWh. Die Richtlinie fordert eine Verbesserung der CO₂-Emissionen von 60 Prozent bezogen auf die derzeit beste verfügbare Technologie. H₂ aus der Dampfreformierung von Erdgas mit der besten verfügbaren Technologie verursacht 328g CO₂eq/kWh.

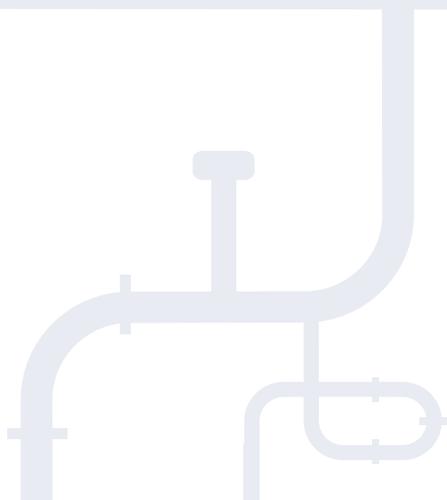
Für die Erzeugung von Wasserstoff gibt es unterschiedliche Verfahren. Das dabei produzierte H₂ wird in der öffentlichen Debatte nach Farben benannt:

Grau: Bisher wird Wasserstoff überwiegend durch die Dampfreformierung von Erdgas hergestellt, wobei CO₂ entsteht.

Blau: Das bei der Reformierung entstehende CO₂ lässt sich technisch abscheiden und danach speichern (Carbon Capture and Storage, CCS). Für die Speicherung gibt es beispielsweise in nordeuropäischen Ländern erprobte Lagerstätten. Das abgeschiedene Kohlendioxid lässt sich aber auch für Produktionsverfahren nutzen (Carbon Capture and Utilization, CCU). CCS ist in Deutschland zwar umstritten, jedoch international anerkannt. CCU wird derzeit erforscht und entwickelt. Beide Mechanismen werden im Pariser Klimavertrag als Ausgleichsmechanismen aufgeführt. Eine acatech-Studie aus dem Jahr 2018 empfiehlt für Deutschland deshalb eine „zeitnahe Debatte über den Einsatz von CCU und CCS als Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie“.²

Türkis: Durch die Pyrolyse von Erdgas entsteht sogenannter türkiser Wasserstoff. Dabei fällt kein CO₂ an, sondern fester Kohlenstoff, der sich noch vielfältiger nutzen lässt als Kohlendioxid.

Grün: Durch Elektrolyse lässt sich Wasser mit Hilfe von Strom in Sauerstoff und Wasserstoff spalten. Wird ausschließlich grüner Strom genutzt, fällt bei der Produktion kein CO₂ an und der Wasserstoff wird als grün bezeichnet.



2.1 Klimaneutraler Wasserstoff: ein sicherer, moderner und nachhaltiger Weg in die Zukunft

Beim Zukunftsthema Wasserstoff sollte Deutschland auf einen Pfad der Technologieoffenheit und Innovationen setzen. Dafür sollte der Ordnungs- und Förderrahmen angepasst und eine Definition für klimaneutrale Gase festgelegt werden. Am besten kann der von allen Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft gewünschte schnelle Markthochlauf von Wasserstoff-Anwendungen gelingen, wenn neben grünem Wasserstoff auch andere Erzeugungsarten aus der Farbpalette klimaneutraler Gase zum Einsatz kommen. Denn es braucht große Mengen Wasserstoff, um die notwendige CO₂-Reduktion zu erreichen.

- » Der DVGW setzt sich für eine verbindliche Definition klimaneutraler Gase ein.
- » Ein politisches Grüngas-Ziel sollte zügig formuliert und umgesetzt werden. Es sollte mit konkreten Hochlaufmengen für Referenzjahre, vergleichbar mit den Zielen im Stromsektor, hinterlegt werden. Die bisherige alleinige Festlegung von grünen Zielen für Strom und Fernwärme diskriminiert den Energieträger Gas und verhindert eine ambitionierte Politik klimaneutraler Gase.
- » Angesichts des enormen Potenzials der breiten Palette klimaneutraler Gase setzt sich der DVGW für Technologieoffenheit bei der Ausgestaltung des Ordnungs- und Förderungsrahmens ein.

Die öffentliche Debatte um klimaneutrale Gase dreht sich häufig um die unterschiedlichen „Farben“ von Wasserstoff, die unterschiedliche Erzeugungsarten bezeichnen. Nach Überzeugung des DVGW hilft diese Farbenlehre beim Klimaschutz und dem Einstieg in die Wasserstoffwelt aber nur begrenzt weiter.

Denn es bedarf aufgrund der schieren Größe der Herausforderung und der gewaltigen Menge an Energie, die bisher über die Verbrennung von Erdgas, Kohle und Öl produziert wird, eines schnellen und großflächigen Einstiegs in die Wasserstoffproduktion. Dafür sollten alle zur Verfügung stehenden Arten der Wasserstoffproduktion genutzt werden, um den Ausstieg aus der Verbrennung von Kohle, Öl und Erdgas so schnell wie möglich umzusetzen und den CO₂-Ausstoß zu senken (Abbildung 2).

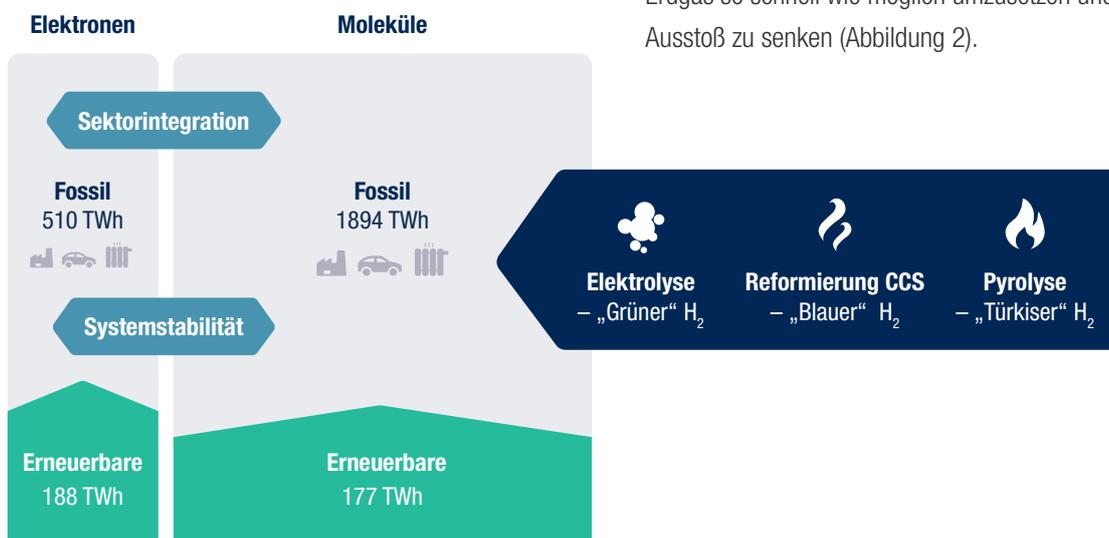


Abbildung 2: Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2019. Die Mächtigkeit der Substitutionsaufgabe erlaubt es nicht, von Anfang an eine H₂-Quelle auszuschließen.

Quelle: Open Grid Europe, 2019

Entscheidend für die CO₂-Reduktion sind dabei allein die spezifischen CO₂-Emissionen von Gasen. Nach diesem Kriterium sollten Gase klassifiziert und Anreize für klimaneutrale Gase geschaffen werden. So können ausreichende Mengen klimaneutraler Gase in relativ kurzer Zeit in den Markt gelangen. Einen Überblick über weitere, aktuell verwendete Energieträger und deren CO₂-Ausstoß bietet Abbildung 3.

Technologieoffenheit ist die beste Strategie, um großflächig CO₂-Reduktionen zu erreichen und klimaneutrale Gase schnell in den Markt zu bringen. Technologieoffenheit bedeutet, dass alle Erzeugungsarten von Wasserstoff im Definitionsrahmen klimaneutraler Gase zugelassen und gefördert werden sollten. Deshalb sollte sich Deutschland auch am geplanten H₂-Innovationsfond der EU-Kommission beteiligen, um grünen Wasserstoff zu fördern. Doch anders als häufig in politischen Debatten gefordert, sollte sich Deutschland nicht allein auf grünen Wasserstoff fokussieren.

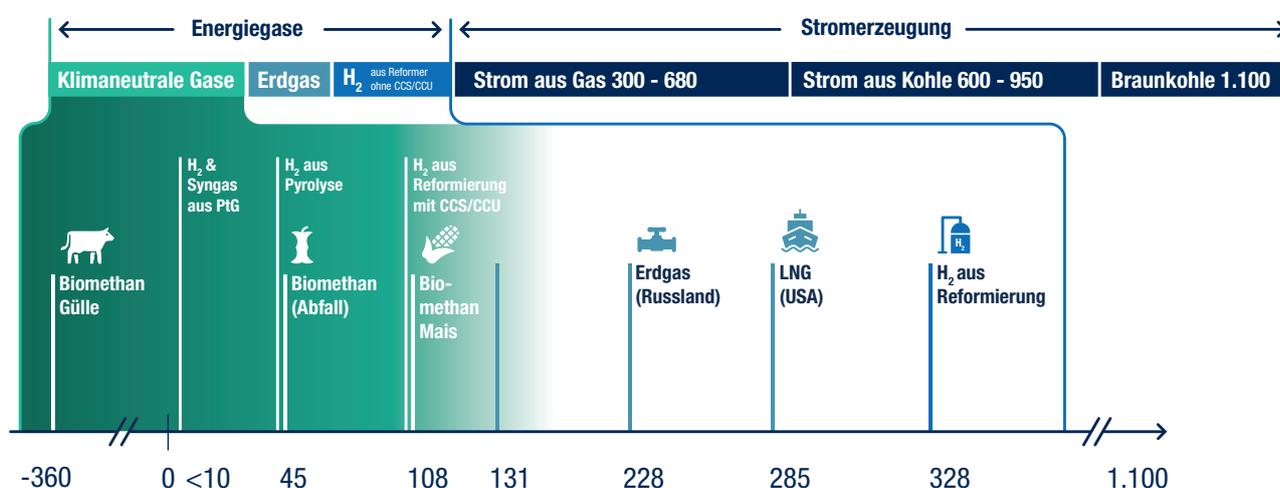


Abbildung 3: CO₂-Skala: Treibhausgasemissionen in g CO₂eq/kWh erneuerbarer und fossiler Gase im Vergleich (vollständige Umwandlung)
Quelle: DVGW

Schon heute wird der Grenzwert von 131 g CO₂eq/kWh bzw. 36,4 g CO₂eq/MJ erfolgreich in der Praxis angewendet und damit gearbeitet. Das Public-Private-Partnership-Projekt zwischen EU-Kommission, Forschungsinstitutionen und Industrie, CertifHy, verwendet diesen Wert und hat sich zum Ziel gesetzt, einen Weg für die Implementierung von nachhaltigem Wasserstoff aufzuzeigen.

Gelänge es, den gesamten Erdgasverbrauch der Europäischen Union (EU) von 4.500 TWh und rund 230 g CO₂eq/kWh auf spezifische Emissionen von 131 g CO₂eq/kWh umzustellen, würde dadurch pro Jahr die gewaltige Menge von 600 Millionen Tonnen CO₂eq vermieden. Das entspräche mehr als zwei Drittel der CO₂-Emissionen Deutschlands im Jahr 2018.³

Er wäre kurzfristig nur in geringen Mengen verfügbar und sein Beitrag für den Klimaschutz und die Impulswirkung für die Wirtschaft wäre gering. Vielmehr sollte Deutschland auch auf blauen Wasserstoff setzen, bei dem abgetrenntes CO₂ gespeichert oder genutzt wird. Blauer Wasserstoff kann in großen Mengen verfügbar gemacht werden, die entsprechenden Technologien sind bereits vorhanden. Durch die Nutzung von Kohlenstoff in geschlossenen Kreisläufen entstehen weitere Perspektiven (vgl. Kapitel 2.2).

Schließlich bietet auch türkiser Wasserstoff ein enormes Potenzial. Denn sobald die Technologie ausgereift ist, ist sie gut skalierbar. Darüber hinaus fallen bei der Produktion von türkischem Wasserstoff keine Klimagase an.

Mit einer solchen Strategie – der Förderung unterschiedlicher Arten klimaneutralen Wasserstoffs – lässt sich die schnelle Markteinführung am besten erreichen.

2.2 Die verschiedenen Arten der Wasserstoff-Erzeugung

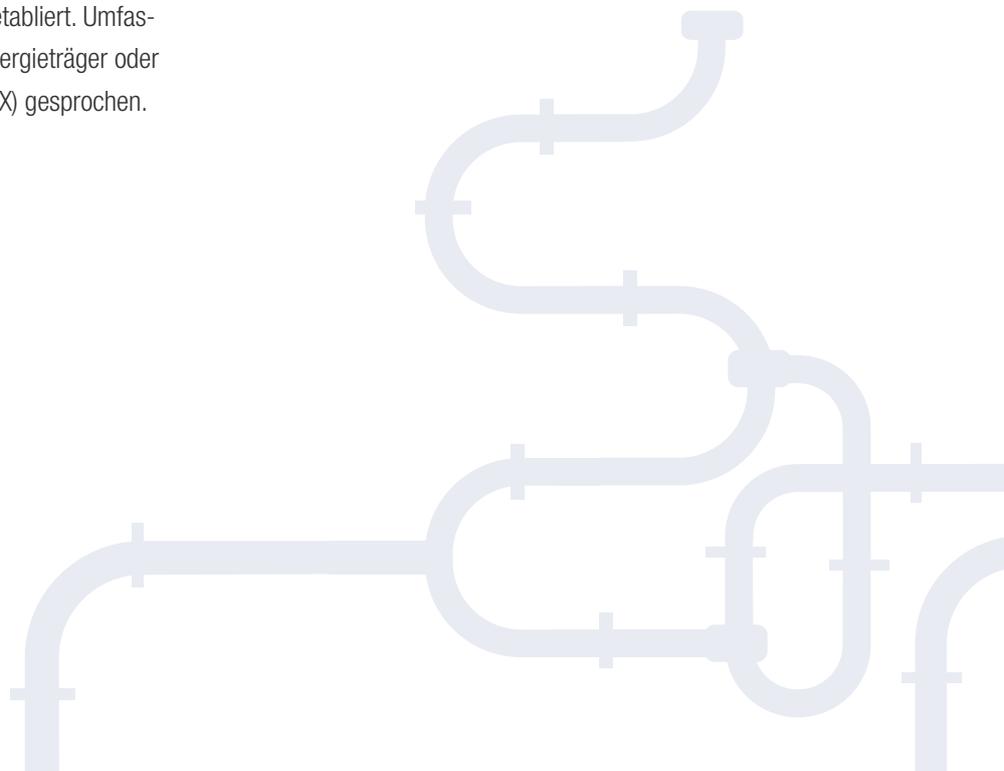
Um klimaneutrale Gase schnell und großflächig in den Markt zu bringen, sollten alle derzeit technologisch angewendeten und denkbaren Produktionsverfahren von klimaneutralem Wasserstoff genutzt werden.

2.2.1 Power-to-Gas: Zentral für die Sektorenkoppelung

Aus Strom gewonnener Wasserstoff bietet zahlreiche Vorteile. Er ist CO₂-frei, mit weniger zusätzlichem Aufwand zu transportieren als Strom, speicherbar und flexibel einsetzbar. Power-to-Gas-Verfahren sind dadurch zentral für die Sektorenkopplung und zur Vermeidung regionaler Engpässe.

» Zur Förderung des Energieträgers Wasserstoff sollten Kosten, die aktuell bei der Entstehung anfallen, reduziert werden: Kurzfristig ist die durch die EEG-Novelle 2020 geschaffene Umlageentlastung für Elektrolyseure über die Besondere Ausgleichsregel eine pragmatische Lösung, langfristig braucht es die vollständige Befreiung über einen eigenen Entlastungstatbestand.

Das aktuell meistdiskutierte und meist angewendete Herstellungsverfahren für klimaneutralen Wasserstoff ist die Elektrolyse. Dabei wird Wasser in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff gespalten. Stammt die eingesetzte Elektrizität aus erneuerbaren Quellen, wird der gewonnene Wasserstoff als grün bezeichnet. Weil durch die Elektrolyse Strom in Gas umgewandelt wird, hat sich für diese Art von Verfahren die englische Bezeichnung Power-to-Gas (PtG) etabliert. Umfassen die erzeugten Produkte auch flüssige Energieträger oder Wärme, wird allgemeiner von Power-to-X (PtX) gesprochen.



Quantifizierbarer Effekt für das Klima, großes Potenzial für die Wirtschaft

Bis 2030 rechnet die Bundesregierung in ihrer Nationalen Wasserstoffstrategie mit einem Potenzial von 14 TWh allein an grünem Wasserstoff, der in Elektrolyseuren in Deutschland hergestellt werden kann. Allerdings reicht dies nicht aus, um die für unser Energiesystem benötigten Mengen bereitzustellen. Daher werden Importe benötigt.

International und langfristig ergeben sich vielfach große Chancen für den deutschen Maschinenbau und verwandte Branchen, wenn die Nachfrage nach Wasserstoff-Produktionsmitteln steigt. Bis 2050 rechnet die Unternehmensberatung Frontier Economics⁴ mit einer weltweiten Nachfrage nach wasserstoffbasierten PtX-Brennstoffen von 20.000 TWh.

Die Fraunhofer-Gesellschaft erwartet bis 2050 weltweit eine installierte Elektrolysekapazität von 3 TW.⁵ Die globale Wertschöpfung deutscher Hersteller bei Elektrolyse und Brennstoffzellen könnte demzufolge in einem optimistischen Szenario von etwa 10 Milliarden Euro 2030 auf etwa 32 Milliarden Euro 2050 ansteigen.⁶

Diese und weitere Potenziale des Beitrags klimaneutraler Gase für die Wertschöpfung in Deutschland mit ihrer exportorientierten Industrie werden bisher nicht ausreichend betrachtet. Wichtige Märkte mit großem Potenzial für die deutsche Industrie liegen laut Fraunhofer-Gesellschaft im Bereich der Erzeugungstechnologien für erneuerbare Energien, im Bereich der Power-to-Liquid-Technologien, bei Gasturbinen für Wasserstoff, im Bereich der Methanisierung, der industriellen Nutzung von Wasserstoff sowie neuer Gasinfrastrukturen für Wasserstoff.⁷

Um diese Märkte anzukurbeln und den Hochlauf der Wasserstoffindustrie in Deutschland zu begünstigen, sollte die Produktion von klimaneutralen Gasen, inklusive aller Arten von klimaneutralem Wasserstoff, langfristig von sämtlichen Umlagen befreit werden. Die EEG-Umlageentlastung durch die Anpassung der Besonderen Ausgleichsregelung (BesAR), wie sie in der EEG-Novelle 2020 beschlossen wurde, sollte dabei nur ein Zwischenschritt zu einer Komplettbefreiung über einen eigenen Entlastungstatbestand sein.

Denn dadurch werden die Stromkosten von PtG-Anlagen vollumfänglich ab dem Zeitpunkt der ersten Inbetriebnahme reduziert. Auch würden PtG-Anlagen nicht vorrangig in Anschluss an Industrieanlagen bzw. stromkostenintensiven Unternehmen errichtet, sondern an Orten, an denen PtG-Anlagen weitere Beiträge (z. B. netzdienliche) leisten können. Schließlich führt eine Komplettbefreiung auch zu einem deutlich reduzierten bürokratischen Aufwand für Unternehmen.⁸

Vor einer Komplettbefreiung stehen rechtliche Hürden. So ist unter anderem eine Notifizierung durch die EU-Kommission nötig. Dies sollte den Gesetzgeber jedoch nicht davon abhalten, die Komplettbefreiung zu initiieren. Sie stellt ein wirksames Instrument zur Förderung der klimaneutralen Wasserstoffproduktion in Deutschland dar.

Schon in den kommenden Jahren sind für die EU-Kommission Investitionen in Wasserstoff ein wichtiges Instrument, um die wirtschaftlichen Folgen der COVID-19-Krise zu überwinden. Die Kommission hat Wasserstoff deshalb zum Teil des EU-Aufbauplans und der neuen Fazilität für strategische Investitionen gemacht.⁹ Klimaneutrale Gase sollen somit ein Beitrag zur Resilienz der europäischen Wirtschaft sein und Arbeitsplätze sichern und neue schaffen.



Klimaschutz durch Sektorenkopplung

In Deutschland hergestellter grüner Wasserstoff behebt ein Problem der Energiewende: In den ersten drei Monaten des Jahres 2019 mussten rund 3,230 TWh Strom in Deutschland aufgrund fehlender Leitungskapazitäten abgeregelt werden (Redispatching), davon 99 Prozent¹⁰ aus Windkraftanlagen. Diese fehlenden Leitungskapazitäten für Strom lassen sich jedoch nicht ohne Weiteres rasch aufbauen. Würde hingegen mit dem Strom vor Ort Wasserstoff hergestellt, wären die Leitungskapazitäten kein Problem mehr.

Die Gasleitungsinfrastruktur ist in großen Teilen bereits vorhanden und H₂-ready.¹¹ Statt verloren zu gehen, könnte der grüne Strom umgewandelt in grünen Wasserstoff schon heute einen Beitrag zur Klimaneutralität leisten: Klimaschutz durch Sektorenkopplung. Durch die Anhebung des Ausbauzieles von Offshore-Windkraftanlagen bis zum Jahr 2030 auf 20 Gigawatt werden auch die Investitionen in lastferne Erzeugung steigen. Der schleppende Stromnetzausbau erhöht den Redispatch-Bedarf weiter. Mit dem Clean Energy Package der EU werden klimaneutrale Technologien für Redispatch forciert, was den Einsatz von Power-to-Gas begünstigt.

Wasserentnahme für die PtX-Produktion

Die Nutzung von Elektrolyseuren ist mit einem geringen Einsatz von Wasser durchführbar. Für die Herstellung der 14 TWh grünen Wasserstoffs, mit denen die Bundesregierung bis 2030 rechnet, wird nicht mehr Wasser benötigt als für die Versorgung einer Stadt mit etwa 200.000

Einwohnern.¹² Auch im Vergleich zu Kohlekraftwerken schneiden Elektrolyseure vorteilhaft ab. Dem gegenüber steht der Wasserbedarf der Energiewirtschaft heutzutage, der mehr als 50 Prozent der gesamten Wasserentnahme Deutschlands ausmacht.¹³



2.2.2 Reformierung aus Erdgas: Verlässlich und klimaneutral

Die Dampfreformierung von Erdgas ist heute der technische Standard für die Herstellung von Wasserstoff. Wird das entstehende CO₂ gespeichert oder genutzt, lässt sich durch die Erdgasreformierung klimaneutraler Wasserstoff in großen Mengen herstellen. Deutschland hat so die Chance, zeitnah innovative Anwendungen für Wasserstoff zu entwickeln.

- » Klimaneutraler blauer Wasserstoff sollte nicht diskriminiert werden.
- » CCS und CCU sollten als sichere Verfahren für die CO₂-Reduktion weiter erprobt und angewendet werden.

Der weit überwiegende Teil der Weltproduktion von 115 Millionen Tonnen Wasserstoff und wasserstoffreichen Gasmischen geschieht aktuell durch Dampfreformierung von Erdgas. Dabei wird der Kohlenwasserstoff zusammen mit Wasserdampf bei Temperaturen von 800 bis 900°C unter hohem Druck und mit Hilfe eines Katalysators zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt. International gebräuchlich ist die englische Bezeichnung Steam Methane Reforming (SMR). Bei einem verwandten Verfahren, der autothermen Reformierung (ATR), wird der Kohlenwasserstoff vor der Reformierung unter Zugabe von Sauerstoff partiell oxidiert.

Mit verschiedenen bereits erprobten Verfahren kann das bei der Reformierung entstehende CO₂ abgeschieden werden. Je nachdem, ob es dauerhaft gespeichert oder stofflich gebunden weiterverwertet wird, spricht man von Carbon Capture and Storage (CCS) oder Carbon Capture and Utilization (CCU). Beide Methoden ermöglichen es, große Mengen Wasserstoff durch die bewährte Reformierung klimaneutral zu produzieren. Das abgeschiedene CO₂ kann beispielsweise in der Chemie für die Produktion kohlenstoffneutraler Produkte genutzt werden. Im europäischen Forschungsprojekt Carbon2Chem, einer Kooperation von Gasnetzbetreibern, Forschungsinstituten und Stahlherstellern, wird etwa erforscht, wie aus Hüttengasen der Stahlproduktion wertvolle Vorprodukte für Kraftstoffe, Kunststoffe oder Düngemittel hergestellt werden können.¹⁴ Auf diese Weise lässt sich der Weg hin zu einem Kohlenstoffkreislauf schließen.

Um den Markthochlauf für verschiedene Anwendungen von Wasserstoff zeitnah umzusetzen, ist der Einsatz von Wasserstoff aus Reformierung und CO₂-Abscheidung eine wichtige Option. Auch wird dadurch Wasserstoff der Weg geebnet, der in anderen Verfahren hergestellt wird. Mittel- bis langfristig lässt sich die Wasserstoffversorgung in Deutschland durch einen Mix aus unterschiedlichen Arten sicherstellen. Durch diese Herangehensweise lassen sich CO₂-Emissionen bereits kurzfristig nennenswert verringern.

Klimaneutraler blauer Wasserstoff ist außerdem heute deutlich günstiger als grüner Wasserstoff. Laut Internationaler Energieagentur (IEA) liegen die Kosten von Elektrolyse-Wasserstoff bei 25 bis 65 US-Dollar/MBtu, während sie bei H₂ aus der Reformierung von Erdgas nur 12 bis 20 US-Dollar/MBtu betragen.¹⁵

Die Verbindung von CO₂-Abscheidung und Dampfreformierung wird bereits praktiziert. In Port Jérôme in der Normandie läuft seit 2015 eine Demonstrationsanlage, die laut Betreiber¹⁶ mehr als 95 Prozent des entstehenden CO₂ abscheiden kann. Auch die Speicherung von CO₂ wird international vorangetrieben. Am norwegischen Sleipner-Gasfeld wird bereits seit 1996 CO₂ unter den Meeresboden¹⁷ verpresst. Im norwegischen Projekt Northern Lights sollen künftig bis zu fünf Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr unter dem Meeresgrund gespeichert werden.¹⁸

2.2.3 Pyrolyse: Potenzial für Wasserstoff und neue CO₂-Kreisläufe

Wegen ihrer hohen Energieeffizienz hat die Herstellung von türkischem Wasserstoff durch Pyrolyse das Potenzial, die Erzeugung von klimaneutralen Gasen zu revolutionieren. Neben Wasserstoff fällt bei der Pyrolyse Kohlenstoff in fester Form an, mit dem sich neue Wertschöpfungsketten initiieren lassen.

» Um Pyrolyseverfahren schnell zur Marktreife zu bringen, setzt sich der DVGW für eine breite Forschungs- und Entwicklungsförderung sowie den Aufbau von Demonstrationsanlagen ein.

Bei der Pyrolyse wird Wasserstoff aus Erdgas gewonnen. Im Gegensatz zur Reformierung bleibt jedoch kein gasförmiges Kohlenstoffdioxid zurück, sondern fester, reiner Kohlenstoff. Wie bei der Elektrolyse werden die CO₂-Emissionen des gesamten Prozesses im Wesentlichen durch den eingesetzten Strom bestimmt. Allerdings ist die Pyrolyse deutlich energieeffizienter: Im Vergleich mit der Herstellung von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse wird für die Erzeugung von türkischem Wasserstoff mittels Pyrolyse nur etwa ein Achtel der Energie benötigt.^{19 20}

Für den hochreinen festen Kohlenstoff gibt es mehrere Verwendungsmöglichkeiten: von der Stahl- und Aluminiumherstellung bis zur Produktion von Reifen, Batterien, Druckerpatronen, Leichtbaustoffen und als Bodenverbesserer in der Landwirtschaft (Terra preta). Industrieseitig ergeben sich so zusätzliche Erlösmöglichkeiten bei der Wasserstoffherzeugung.²¹

Aktuell werden in Deutschland mehrere vielversprechende Versuchsreihen für die Pyrolyse durchgeführt, die sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden. Eine Übersicht liefert eine aktuelle Veröffentlichung der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut (EBI) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).²² Aufgrund dieser jahrelangen Forschungsbemühungen hat Deutschlands Industrie das Potenzial, bei dieser Zukunftstechnologie künftig international eine führende Rolle zu spielen.

Ein Beispiel aus der EBI-Studie ist das Projekt „Me²H₂“, in dem BASF, ThyssenKrupp und Partner aus der Forschung gemeinsam ein Anlagenkonzept zur pyrolytischen Herstellung von Wasserstoff entwickeln.²³ Teil des bis Mai 2022 laufenden Vorhabens ist auch bereits die Entwicklung von Qualitätskriterien für den Einsatz von Grafit in der Stahlindustrie. BASF und ThyssenKrupp hatten mit dem Gasespezialisten Linde zuvor bereits verschiedene Pyrolyseverfahren erprobt und in Versuchen festen Kohlenstoff produziert. Auch in anderen Projekten wird an der pyrolytischen Erzeugung von Wasserstoff aus Methan gearbeitet. So hat beispielsweise die Firma Graforce diese Technologie für den Wärmesektor designed und dafür 2020 den Preis der deutschen Gaswirtschaft erhalten.

Der DVGW sieht in der Methanpyrolyse ein großes Innovations- und Marktpotenzial, das nicht zuletzt zur geopolitischen Stabilisierung heutiger Erdgasförderländer beitragen kann.

2.3 Synthesegase: Mit CO₂-Kreisläufen Gase veredeln

Synthesegase auf Basis von Wasserstoff lassen sich eins zu eins in vorhandener Infrastruktur und Anwendungstechnik einsetzen. Durch bilanziell geschlossene CO₂-Kreisläufe erhalten sie einen CO₂-neutralen Fußabdruck. Wegen ihrer breiten Einsatzmöglichkeiten haben Synthesegase eine herausragende Bedeutung innerhalb der Gruppe der klimaneutralen Gase.

» Zur Förderung von Synthesegasen sollten diese im politischen Grüngas-Ziel inkludiert werden.

Synthesegase sind Kohlenwasserstoffe, die aus Wasserstoff und Kohlenstoff synthetisch hergestellt werden. Klimaneutral sind Synthesegase, wenn bereits der verwendete Wasserstoff klimaneutral ist und das bei der Nutzung entstehende Kohlendioxid in geschlossenen Kreisläufen geführt wird oder aus biogenen Quellen stammt.

Als Kohlenstoffquelle lässt sich für Synthesegase insbesondere CO₂ nutzen – also genau der Stoff, der in zu hoher Konzentration in unserer Atmosphäre eine Gefahr für das Klima darstellt. Die Etablierung geschlossener CO₂-Kreisläufe ist deshalb eine strategische Chance für den Klimaschutz.

Synthesegase aus Biogas sind CO₂-Senken

Die Herstellung von Biogasen erfolgt klimaneutral: Pflanzen nehmen im Wachstumsprozess CO₂ auf, das dann bei der Verbrennung als Biogas wieder freigesetzt wird. Wird jedoch durch Pyrolyse aus Biogas Wasserstoff produziert, so hat dieser einen negativen CO₂-Fußabdruck. Durch den Pyrolyse-Prozess wird das CO₂ in seine Bestandteile Kohlenstoff und Wasserstoff aufgespalten. Der Kohlenstoff aus den Biogasen wird stofflich gebunden und genutzt, sodass eine negative CO₂-Bilanz zustande kommt, die positiv fürs Klima ist.



Langfristig können klimaneutrale Synthesegase sogar eine stärkere Bedeutung für die Energieversorgung und den Klimaschutz haben als die direkte Nutzung von Wasserstoff. Für eine 95-prozentige Treibhausgassenkung in Deutschland rechnet die dena-Leitstudie „Integrierte Energiewende“ in ihrem Technologiemix-Szenario bis 2050 mit einem Bedarf von 169 TWh an Wasserstoff und von 630 TWh an syntheti-

chem Methan,²⁴ also fast der vierfachen Menge gemessen am Energiegehalt. Zur Förderung von Synthesegasen sollten diese im politischen Grüngas-Ziel inkludiert werden. Abbildung 4 bietet eine Übersicht über klimaneutrale (Synthese) Gase aus technischer Sicht.

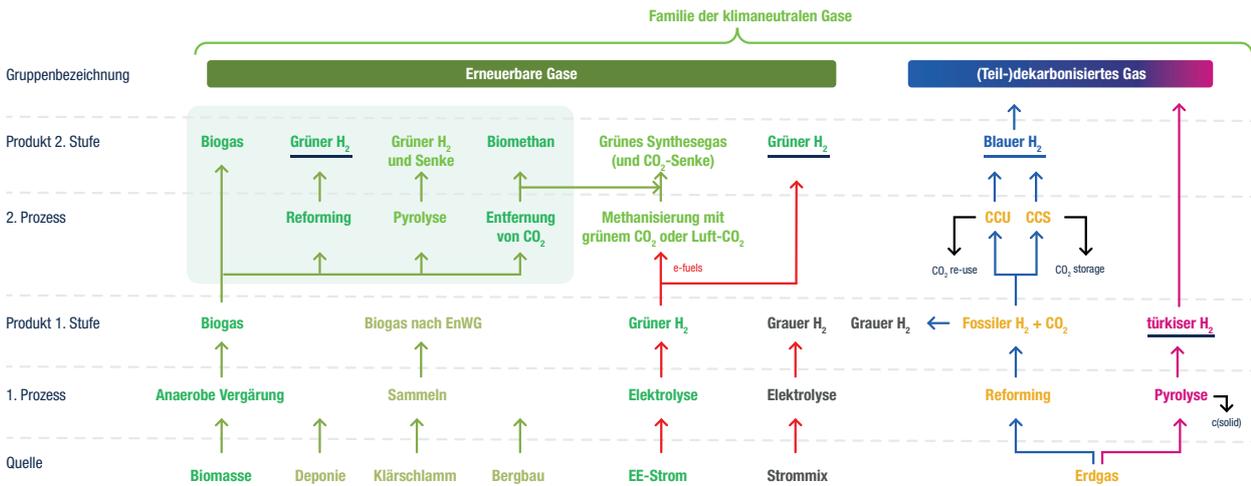
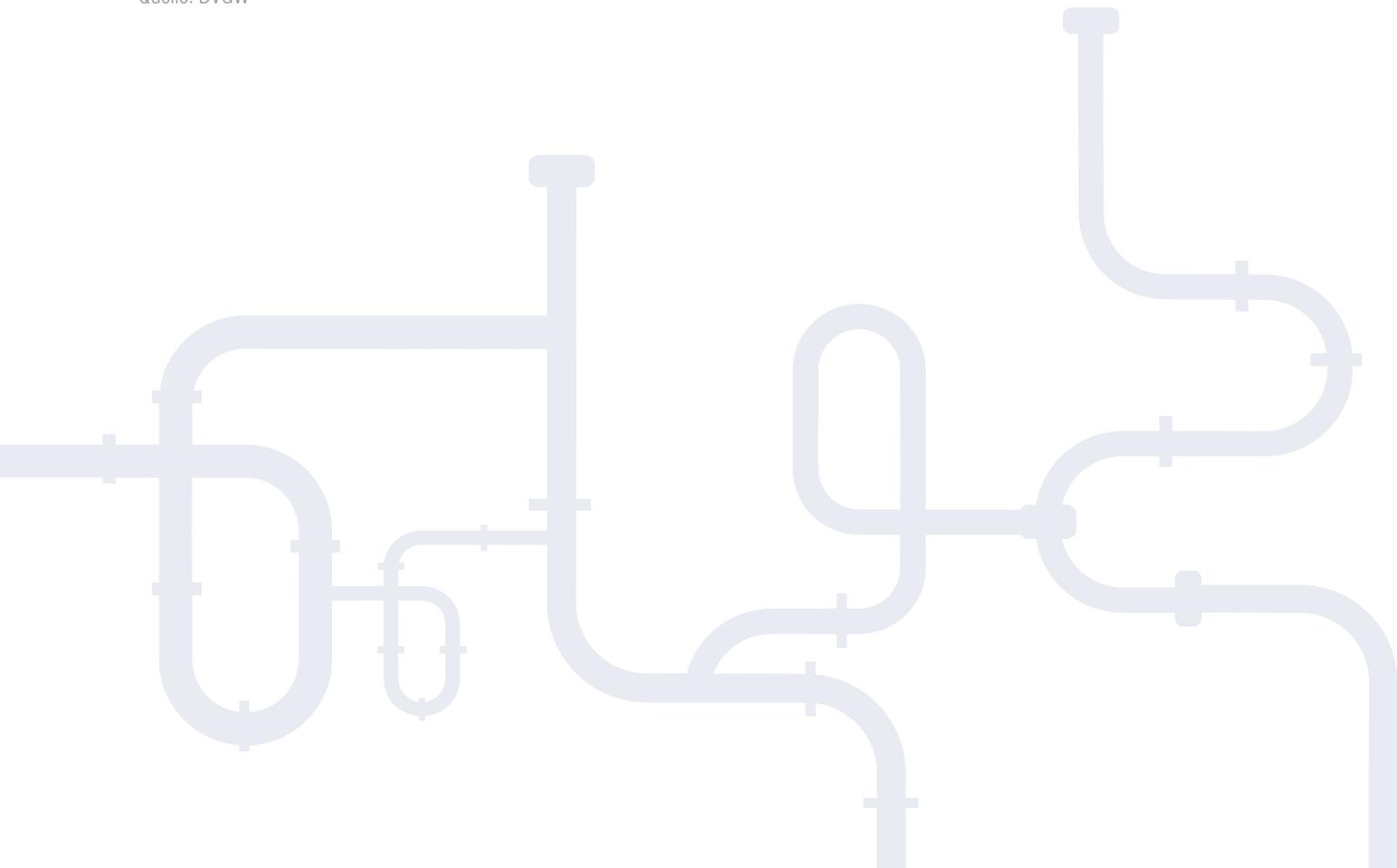


Abbildung 4: Darstellung der Quellen von Wasserstoff und Syngas und Systematisierung der Familie der klimaneutralen Gase aus technischer Sicht
Quelle: DVGW



2.4 Importe: Weshalb wir sie brauchen, woher sie kommen sollten und wie wir sie organisieren

Deutschland könnte zwar rund die Hälfte seines heutigen Gasbedarfes aus heimischen erneuerbaren Quellen decken, dennoch wird es auch zukünftig Wasserstoff und Synthesegase importieren müssen. Um die Strukturen für kosteneffiziente Importe aufzubauen, sollte Deutschland frühzeitig mit entsprechenden Planungen und Verhandlungen beginnen.

- » Deutschland sollte frühzeitig Energiepartnerschaften mit jenen Ländern schließen, die erneuerbare Energien besonders kostengünstig produzieren können.
- » Deutschland sollte sich außerdem frühzeitig daran beteiligen, die Voraussetzungen für einen weltweiten Wasserstoffmarkt zu schaffen.
- » Die Infrastruktur, Transportleitungen, Gas-Terminals und Häfen müssen systematisch ergänzt und ausgebaut werden.

Mit dem inländischen Potenzial an erneuerbaren Energien kann Deutschland seinen Bedarf an klimaneutralen Gasen, Wasserstoff und Synthesegasen nicht auf wirtschaftlich sinnvolle Weise decken und nur rund zur Hälfte überhaupt erzeugen. In anderen Staaten sind die Erzeugungskosten für erneuerbare Energien deutlich geringer – sei es an europäischen Standorten wie den Nordsee-Anrainerstaaten für Windstrom, wo es teils bereits Erdgaspipelines gibt, die für

Wasserstoff genutzt werden können, Südeuropa für Photovoltaikstrom oder aber Nicht-EU-Staaten in Nordafrika, dem Nahen Osten oder weiteren Ländern mit günstigen Bedingungen für erneuerbare Energien. Das Windenergie-Verteilkreuz-Konzept des North Sea Wind Power Hub (NSWPH) (Abbildung 5) zeigt die Möglichkeiten der Wasserstoffproduktion mit Offshore-Windstrom in der Nordsee auf.

Das modulare **Windenergie-Verteilkreuz-Konzept** stellt eine technisch machbare Lösung dar, die an spezifische strukturelle Anforderungen angepasst werden kann.

-  **Netzanschlusspunkt**
-  **H₂-Anschlusspunkt**
-  **P2X-Umwandlung**
-  **Umwandlung Gas in Strom**
-  **Stromanschluss**
-  **H₂-Anschluss**
-  **Endnutzer**



Abbildung 5: Umwidmung von Erdgas-Förderplattformen zu Power-to-Gas-Hubs in der Nordsee und Nutzung bestehender Infrastrukturen
Quelle: DVGW, basierend auf Darstellung von North Sea Wind Power Hub (NSWPH)

Wie vorteilhaft die Standortfaktoren in anderen Staaten sind, zeigt sich an einem Vergleich der Jahresvolllaststunden bei der Erzeugung erneuerbarer Energien. Während mit deutschen Erneuerbare-Energien-Anlagen derzeit 1.577 Volllaststunden möglich sind, liegt der Wert in Marokko bei 5.000 und in Patagonien in Chile bei 6.500 Volllaststunden. Abbildung 6 zeigt weltweit sonnen- und windreiche Regionen mit Potenzial für die Produktion von grünem Wasserstoff.

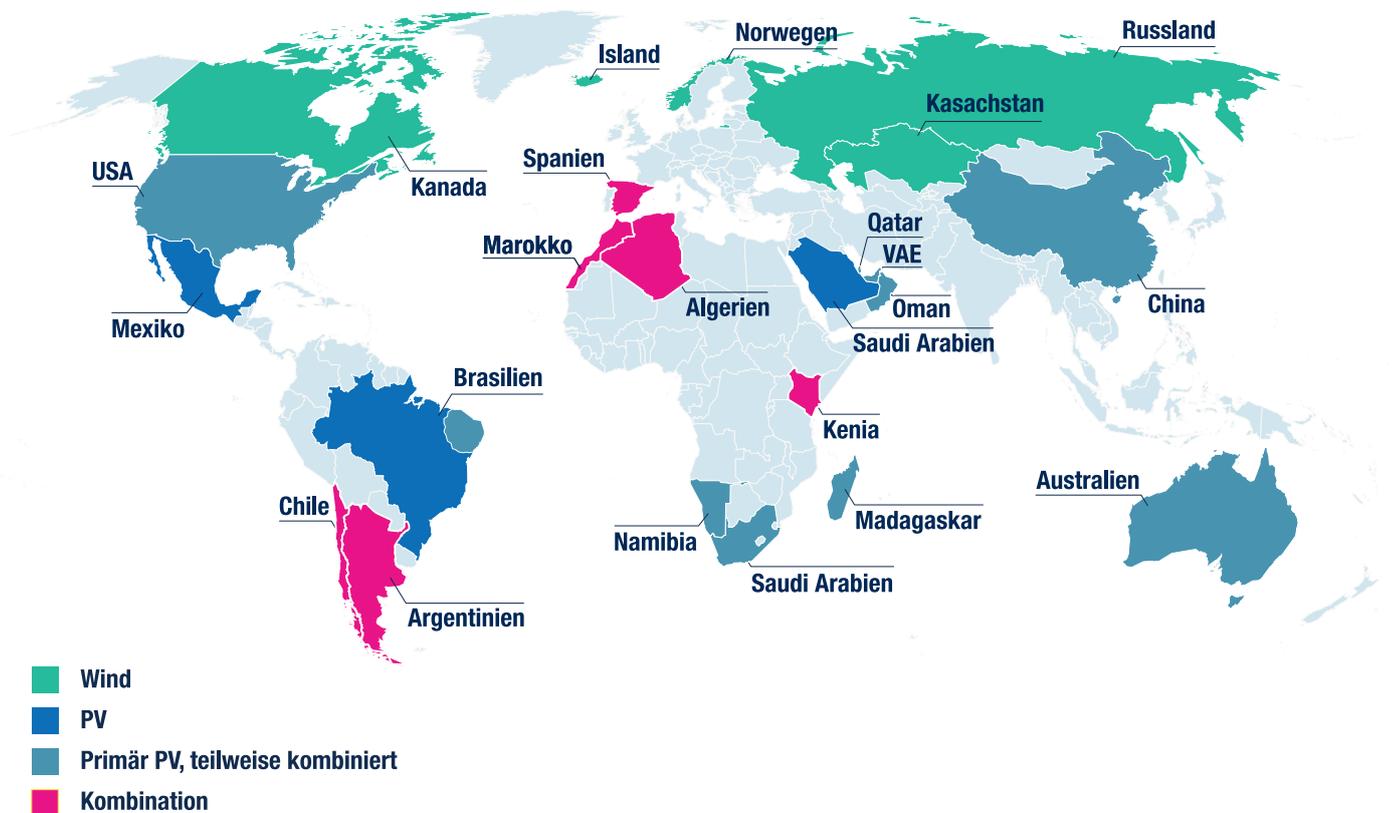


Abbildung 6: Wind- und sonnenreiche Gebiete mit dem Potenzial zur Erzeugung von grünem Wasserstoff

Quelle: DVGW, basierend auf der Studie des Weltenergieerats „Internationale Aspekte einer Power-to-X Roadmap“

Die unterschiedliche Wirtschaftlichkeit der Erneuerbare-Energien-Erzeugung wird sich mit ihrer wachsenden Bedeutung immer stärker auf die Quellen der verwendeten Energieträger auswirken. Die dena-Leitstudie „Integrierte Energiewende“ rechnet in ihrem Technologiemix-Szenario damit, dass Deutschland im Jahr 2050 erneuerbare Energien mit 1.029 TWh selbst produzieren wird,²⁵ was bereits eine sehr ehrgeizige Größenordnung wäre. Dies geht einher mit einem Netto-Import von 744 TWh an gasförmigen und flüssigen

PtX-Energieträgern.²⁶ Das entspricht einer Importquote von 37 Prozent am gesamten deutschen Primärenergiebedarf. Je nach Preisentwicklung werden klimaneutrale Gase und andere synthetische Energieträger mehrheitlich entweder aus der EU oder dem Nicht-EU-Ausland importiert werden. Deutschland sollte deshalb frühzeitig Energiepartnerschaften mit jenen Ländern schließen, die erneuerbare Energien besonders kostengünstig produzieren können.

Außerdem sollte sich Deutschland frühzeitig daran beteiligen, die Voraussetzungen für einen weltweiten Wasserstoffmarkt zu schaffen. Ein liquider Handel und der daraus resultierende Wettbewerb sind die sichersten strategischen Weichenstellungen für einen kosteneffizienten Import von klimaneutralen Gasen.

Bedingung für die Etablierung eines Weltmarktes für klimaneutrale Gase ist die Schaffung entsprechender Infrastrukturen. In der EU betrifft das Transportleitungen wie auch Gas-Terminals. Die bestehenden transeuropäischen Gasnetze bieten bereits eine wichtige Grundlage für den Import von Wasserstoff. Elf Fernleitungsnetzbetreiber aus neun EU-Staaten haben in 2020 Pläne für einen europäischen Wasserstoff Backbone vorgelegt.²⁷ Bis 2040 soll das Netz aus 23.000 Kilometer Leitungen bestehen, davon über 75 Prozent aus umgerüsteten Erdgas-Pipelines. Die Pläne zeigen aber auch, dass Investitionen in neue Infrastrukturen nötig sein werden.²⁸

Proof of Origin

Ist Wasserstoff einmal produziert, so lässt sich nicht mehr nachvollziehen, auf welche Art er hergestellt wurde. Für den sicheren Import von klimaneutralem Wasserstoff ist eine funktionierende Zertifizierung daher unerlässlich. Nur so kann sichergestellt werden, dass Wasserstoff, der als klimaneutral ausgezeichnet wird, auch wirklich klimaneutral in der Herstellung ist. Projekte wie CertifHy (siehe S. 11) schaffen aktuell die Grundlage, für europaweit einheitliche Proof of Origin-Regeln.

Als Ergänzung zu Transportleitungen hat eine gut ausgebaute Hafeninfrastruktur eine strategische Bedeutung. Der Import von flüssigem Erdgas (LNG) und langfristig flüssigem synthetischen Methan bietet die Chance, klimaneutrale Gase auch aus weiter entfernten Regionen zu beziehen, die besonders günstige Bedingungen für erneuerbare Energien aufweisen. Flüssiggasimporte bieten somit einen wichtigen Beitrag zur wirtschaftlichen Diversifizierung und geopolitischen Resilienz der europäischen Energieversorgung.

Wasserverbrauch bei Wasserstoffimporten

Beim Import von Wasserstoff, der durch Elektrolyseverfahren hergestellt wird, ist darauf zu achten, dass die Herstellung nicht zu einer Verknappung von Trinkwasser vor Ort führt. Dies lässt sich jedoch leicht vermeiden, da entsalztes Meerwasser für die Elektrolyse genutzt werden kann. Ebenfalls notwendig ist eine funktionierende Zertifizierung, die aktuell erarbeitet wird.



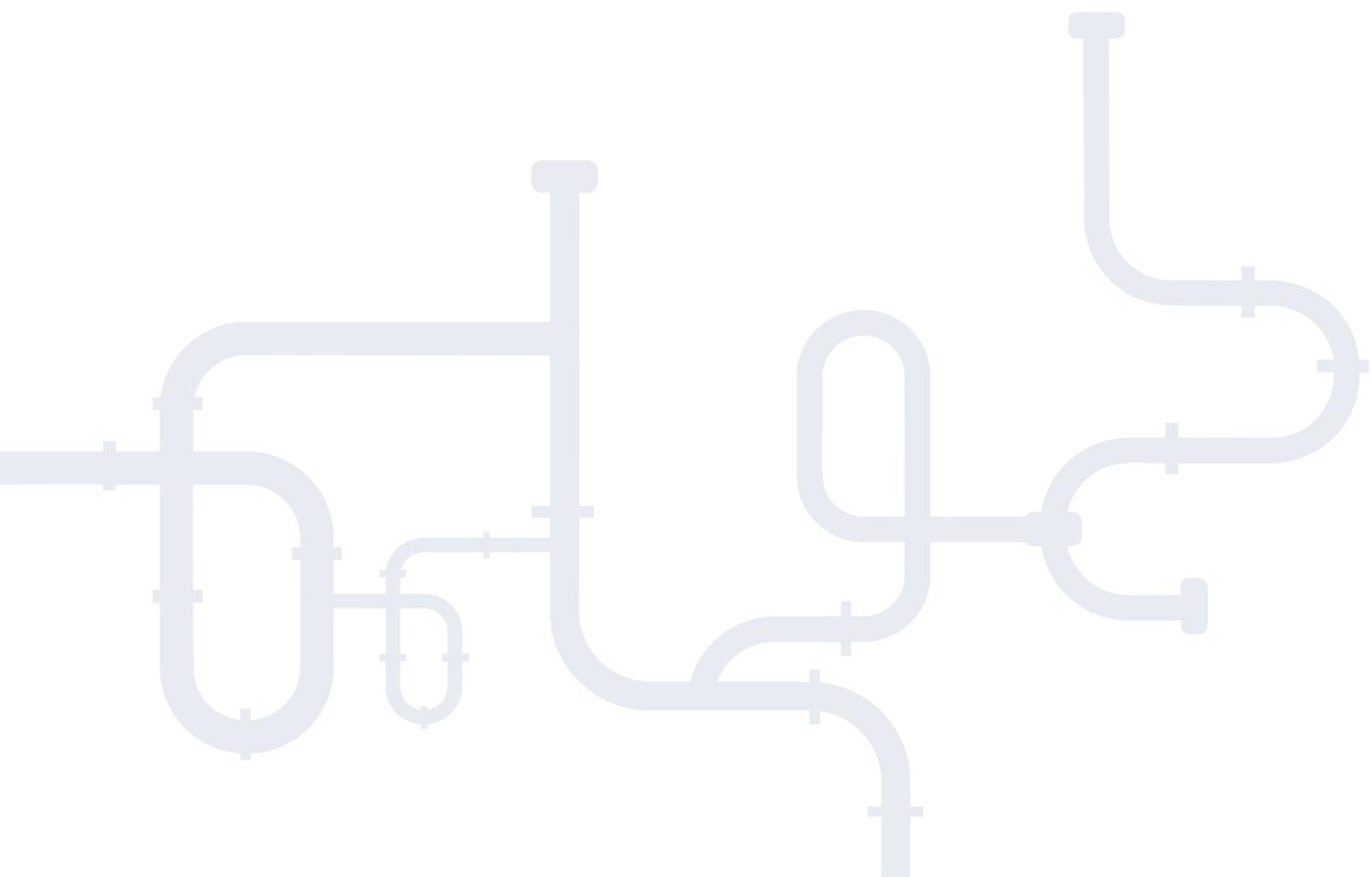
Kurzzusammenfassung

Klima

- » Der Einsatz von klimaneutralen Gasen führt bereits kurzfristig zu relevanten CO₂-Einsparungen.
- » Damit Deutschland dieses Potenzial vollumfänglich nutzen kann, ist eine technologieneutrale Definition für klimaneutrale Gase notwendig anhand von CO₂-Äquivalenten pro Kilowattstunde.
- » Der DVGW regt die Debatte über einen adäquaten Grenzwert für die Definition von klimaneutralen Gasen an. Als Ausgangswert hierfür kann der Wert der EU-Richtlinie REDII 131 g CO₂eq/kWh dienen.
- » Gelänge es, den gesamten Erdgasverbrauch der EU von aktuell 4.500 TWh und 230 g CO₂eq/kWh auf spezifische Emissionen von 131 g CO₂eq/kWh umzustellen, würde dadurch pro Jahr die gewaltige Menge von 600 Millionen Tonnen CO₂eq vermieden.

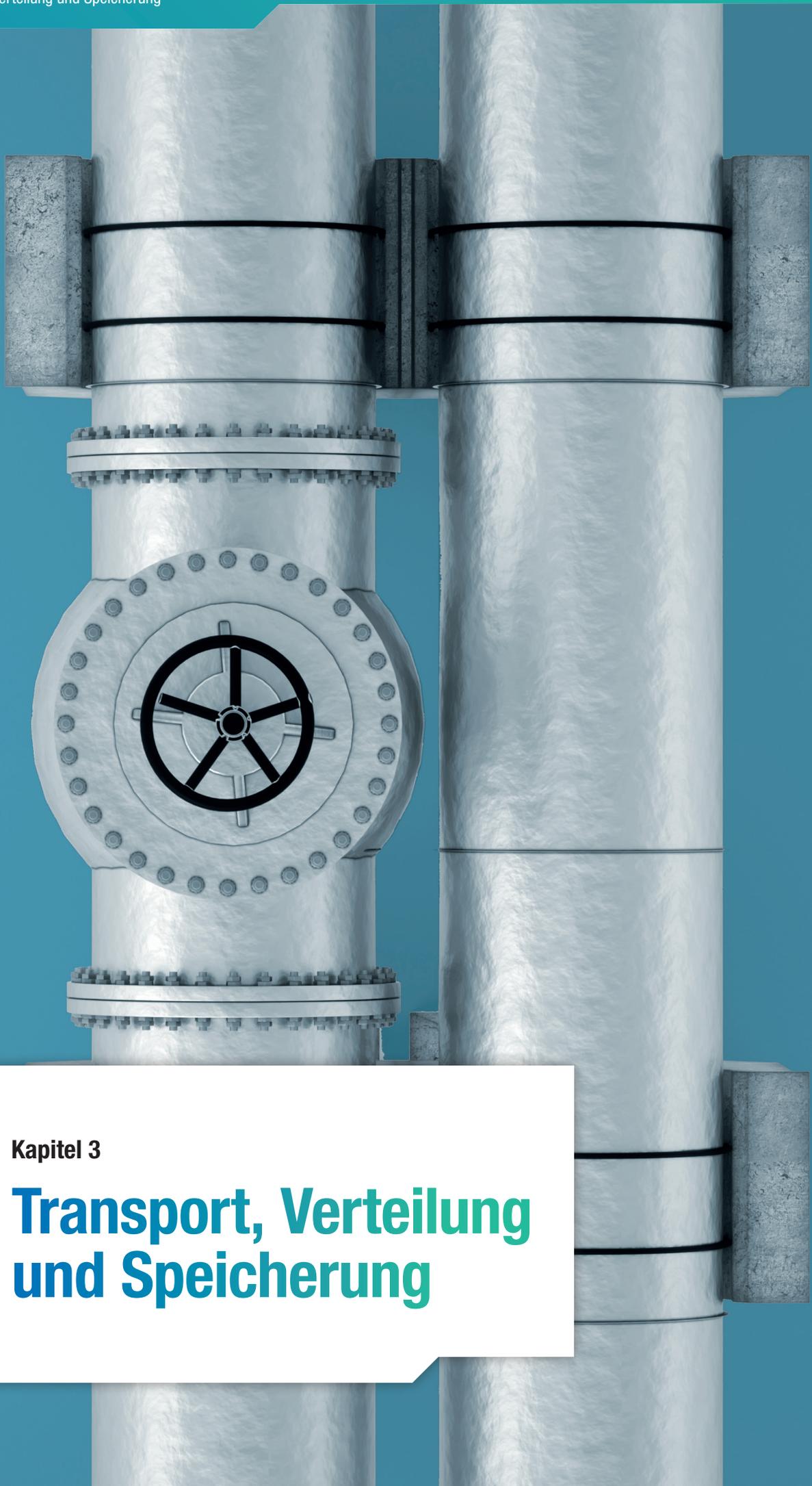
Wirtschaft

- » Die Nachfrage nach Technologien zur Herstellung von klimaneutralen Gasen steigt weltweit.
- » Deutschland hat das Potenzial, Technologieführer zu werden, wodurch ein enormes Exportpotenzial entsteht.
- » Durch die Verwendung von bei der Pyrolyse anfallendem Kohlenstoff können neue Wertschöpfungsketten initiiert werden.
- » Um das Potenzial einer großflächigen Anwendung von Wasserstoff voll auszuschöpfen, sollte sich Deutschland für die Entwicklung EU- und weltweiter Wasserstoffmärkte engagieren.



Quellen

- 2 Acatech (Hrsg), 2018: CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie (acatech POSITION). Online abrufbar unter: <https://www.acatech.de/publikation/ccu-und-ccs-bausteine-fuer-den-klimaschutz-in-der-industrie-analyse-handlungsoptionen-und-empfehlungen/> [letzter Zugriff am 29.09.2020]
- 3 Umweltbundesamt Deutschland, 2020: Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. Online abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung-1990-bis-2018> [letzter Zugriff am 01.10.2020]
- 4 Frontier Economics, 2018: International Aspects of a Power-to-X Roadmap. Online abrufbar unter: <https://www.frontier-economics.com/media/2642/frontier-int-ptx-roadmap-stc-12-10-18-final-report.pdf> [letzter Zugriff am 22.07.2020]
- 5 Fraunhofer ISE (u.a.), 2019: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. S. 41. Online abrufbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-> [letzter Zugriff am 29.09.2020]
- 6 Ebd., S. 47 [letzter Zugriff am 29.09.2020]
- 7 Ebd., S. 47 [letzter Zugriff am 29.09.2020]
- 8 DVGW (2020): Stellungnahme vom 15. Oktober 2020 zur Frage der Befreiung von PtG-Anlagen von der EEG-Umlage im Rahmen der Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften. Online abrufbar unter: https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/aktuelles/stellungnahmen/dvgw-stellungnahme_eeg-umlage.pdf [letzter Zugriff am 07.12.2020]
- 9 Europäische Kommission, 2020: Mitteilung der Europäischen Kommission COM (2020) 456. Die Stunde Europas – Schäden beheben und Perspektiven für die nächste Generation eröffnen. Online abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0456&from=DE> [letzter Zugriff am 22.07.2020]
- 10 Bundesnetzagentur, 2019: Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen. Erstes Quartal 2019. Online abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Quartalsbericht_Q1_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [letzter Zugriff am 29.09.2020]
- 11 Vgl. Kapitel 3
- 12 DVGW-interne Berechnung
- 13 Umweltbundesamt 2020: Wasserressourcen und ihre Nutzung. Online abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung#wassernachfrage> [letzter Zugriff am 10.11.2020]
- 14 Vgl. <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/carbon2chem.php> [letzter Zugriff am 03.11.2020]
- 15 International Energy Agency, 2019: World Energy Outlook 2019. Druckfassung beziehbar unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019> [letzter Zugriff am 22.07.2020]
- 16 Air Liquide, 2019: Cryocap™ H2. A Carbon Capture technology for Hydrogen production units. Online abrufbar unter: https://www.engineering-airliquide.com/sites/activity_eandc/files/2019/11/13/air-liquide-e-c-cryo-cap-h2-november-2019.pdf [letzter Zugriff am 22.07.2020]
- 17 Norwegische Botschaft in Deutschland. Online abrufbar: <https://www.norway.no/de/germany/norwegen-germany/aktuelles-veranstaltungen/aktuelles/weltweit-erste-co2-lagerstatte-feiert-jubilaum--und-weist-in-die-zukunft/> [letzter Zugriff am 05.10.2020]
- 18 <https://northernlightsccs.com/en/about> [letzter Zugriff am 05.10.2020]
- 19 Vgl. <https://www.sueddeutsche.de/wissen/wasserstoff-erdgas-co-1.4935847> [letzter Zugriff am 08.12.2020]
- 20 BASF (2019): New Process for clean Hydrogen.
- 21 PÖYRY management consulting, 2019: Hydrogen from natural gas –The key to deep decarbonization. Online abrufbar unter: https://www.poyry.com/sites/default/files/zukunft_erdgas_key_to_deep_decarbonisation_0.pdf [letzter Zugriff am 01.10.2020]
- 22 Schneider et.al., 2020: Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse. Online abrufbar unter: https://www.dvgw-ebi.de/download/2020_Schneider_CIT_Erdgaspyrolyse_Open_Access.pdf [letzter Zugriff am 29.09.2020]
- 23 <http://www.bfi.de/en/projects/mephy-methane-pyrolysis/> [letzter Zugriff am 05.10.2020]
- 24 Dena, 2018: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Online abrufbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf [letzter Zugriff am 22.07.2020]
- 25 Ebd.
- 26 Vgl. ebd.
- 27 OGE (u.a.), 2020: Fernleitungsnetzbetreiber stellen Plan für Europäischen Wasserstoff Backbone vor. Pressemitteilung vom 17.7.2020. Online abrufbar unter: <https://oge.net/de/pressemitteilungen/2020/fernleitungsnetzbetreiber-stellen-plan-fuer-europaischen-wasserstoff-backbone-vor> [letzter Zugriff am 22.07.2020]
- 28 28 Vgl. Kapitel 3



Kapitel 3

Transport, Verteilung und Speicherung

Deutschland verfügt durch seine Gasnetze bereits über eine bestens ausgebaute Infrastruktur für die Verteilung und Speicherung klimaneutraler Gase. Um zukünftig hohe Anteile von Wasserstoff transportieren zu können, arbeitet der DVGW bereits an einer Anpassung des Regelwerks. An strategisch wichtigen Punkten kann das Erdgasnetz außerdem kosteneffizient um eine parallele Wasserstoffinfrastruktur ergänzt werden. Für einen schnellen Aufbau der Infrastruktur ist es essenziell, dass der Gasbegriff in der bestehenden Regulierung um gesetzliche Regeln für Wasserstoff erweitert wird.

3.1 Die wertvolle Ressource der Gasnetze

Das Gasnetz steht für hohe Leistungsfähigkeit und Versorgungssicherheit. Schon heute sind die Leitungen in der Lage, auch Wasserstoff und andere klimaneutrale Gase zu transportieren. Für die Verteilung hoher Mengen an H₂ können sie kosteneffizient ertüchtigt und ergänzt werden. Somit ist das Gasnetz die physische Plattform für die Energieflüsse der integrierten Energiewelt.

» Die Gasnetze sollten als wirtschafts- und klimafreundliche Assets begriffen werden.

Deutschland verfügt über eine dicht ausgebaute Gasinfrastruktur aus 50.000 Kilometer Hochdruckleitungsnetzen, über 500.000 Kilometer Verteilnetze und Speicher für 225 TWh Energie. Pro Jahr fließen durch die Rohrleitungen über 900 TWh zuverlässig an Haushalte, Gewerbebetriebe und Industrieunternehmen, Kraftwerke und andere Verbraucher. Damit transportieren die Gasnetze etwa doppelt so viel Energie pro Jahr wie die Stromnetze. Der Transport von Gasen über die Gasnetze ist aufgrund des höheren Volumens nicht nur um ein Vielfaches effizienter als über LKW oder Schiffe, sondern auch deutlich günstiger als das Durchleiten von Energie über die Stromnetze.

Die Gasinfrastrukturen können, anders als bei Stromnetzen der Fall, extreme Lastspitzen bewältigen und haben darüber hinaus die Fähigkeit, Energie zu speichern. Während Stromnetze nicht in der Lage sind, größere Mengen an Energie über einen längeren Zeitraum zu speichern, wodurch es immer wieder zu negativen Strompreisen an den Märkten kommt, können Gasnetze und -speicher große Mengen Energie über mehrere Monate bevorraten. Dadurch sorgen sie für Preisstabilität.

In lokalen Feldversuchen werden klimaneutrale Gase bereits in die Verteilnetze eingespeist – in Form von Biomethan, Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen sowie aus H_2 erzeugtem synthetischem Methan. In einem gemeinsamen Pilotprojekt von DVGW und der Avacon AG wird in Schoppsdorf, einem Ortsteil von Genthin in Sachsen-Anhalt, Wasserstoff dem Gasnetz bis zu einem Anteil von 20 Prozent beigemischt.²⁹ Solche regionalen Feldversuche bilden die Grundlage für flächendeckende Lösungen für ganz Deutschland, für die weitere Investitionen notwendig sind.

Wenn die Sektorenkopplung künftig in noch größeren Schritten voranschreitet, werden sich die Gasnetze zur unverzichtbaren Drehscheibe für die Energieflüsse aus allen Sektoren der Wirtschaft entwickeln. Die Gasnetze ermöglichen somit eine nachhaltige Produktion und bleiben gerade auch in der klimaneutralen Energiewelt ein strategischer Wettbewerbsvorteil für die deutsche Industrie.

Das deutsche Gasverteilstromnetz hat nach Schätzungen des DVGW einen ökonomischen Wiederbeschaffungswert von rund 270 Milliarden Euro. Die Betreiber investieren kontinuierlich in dieses Asset. Derzeit belaufen sich die jährlichen Investitionen und Aufwendungen bundesweit auf rund 2,5 Milliarden Euro.³⁰ Diese Investitionen fließen zu einem großen Teil in die jeweiligen Regionen und sichern dadurch seit Jahrzehnten Beschäftigung und Wertschöpfung vor Ort. Die über 700 deutschen Verteilnetzbetreiber haben zudem zum

überwiegenden Teil kommunale Anteilseigner und leisten in diesem Kontext signifikante und kontinuierliche Beiträge zur Finanzierung und Absicherung zahlreicher kommunaler Haushalte.

Der kosteneffizienteste Weg für den Transport von Wasserstoff ist die Nutzung der bestehenden Transport- und Verteilnetze und wo nötig deren Ausbau und Ergänzung. Erste Ausbaupläne bestätigen dies. Das visionäre Wasserstofftransportnetz der deutschen FNB Gas (Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas) basiert zu über 90 Prozent auf dem bestehenden Erdgasnetz,³¹ bei den Plänen von elf Fernleitungsnetzbetreibern aus neun EU-Staaten für einen Europäischen Wasserstoff Backbone sind es über 75 Prozent.³² Neue Wasserstoffleitungen verbinden die wichtigsten Transportrouten untereinander oder mit Nachfragern in Wasserstoff-Hotspots mit einem besonders hohen Bedarf.

Zahlreiche Verteilnetzbetreiber haben mit dem DVGW-Projekt „H2vorOrt“ gezeigt, wie der Umstellungsprozess in den Verteilnetzen mit wachsenden Wasserstoffanteilen bis zu 100 Prozent ablaufen kann.³³ Das Projekt ist vor allem deshalb wegweisend, weil der überwiegende Teil der Kunden von der Industrie über das Gewerbe bis hin zu Haushalten an die Gasverteilstromnetze angeschlossen ist – in Deutschland ist das heute bereits jeder zweite Haushalt (Abbildung 7).



Abbildung 7: Jeder zweite Haushalt in Deutschland ist ans Gasnetz angeschlossen.
Quelle: DVGW

3.2 Was mit den bestehenden Transportleitungen und Verteilnetzen passieren muss

Der DVGW hat einen Stufenplan entwickelt, um das Erdgasnetz auch für hohe Wasserstoffanteile H₂-ready zu machen. Die Weiterentwicklung des entsprechenden Regelwerks treibt der Verein intensiv voran. Die Fernleitungsnetzbetreiber haben die Vision eines prospektiven Wasserstoffbackbones vorgelegt. Über 30 Gasverteilnetzbetreiber haben außerdem mit dem DVGW einen Fahrplan für die Transformation der Gasverteilnetze entwickelt. Der gesetzliche Rahmen für die Energiewirtschaft ist allerdings noch ganz auf Erdgas ausgerichtet. Für den Markthochlauf von klimaneutralen Gasen braucht es deshalb jetzt politische Entscheidungen, um Wasserstoff innerhalb der Regulierung anzuerkennen.

- » Die bestehenden Gasnetze sind H₂-ready zu machen und um reine Wasserstoff-Netze zu ergänzen.
- » Um Erdgasleitungen umzurüsten und neue Wasserstoffleitungen planen sowie errichten zu können, bedarf es aus Sicht des DVGW zeitnaher Anpassungen des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) und des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG).
- » Wasserstoff ist in den Netzentwicklungsplan Gas aufzunehmen und dadurch zu regulieren.
- » Der Gesetzgeber sollte prüfen, ob die Einführung innovativer Instrumente der KfW zur Kapitalausstattung der Verteilnetzbetreiber für Investitionen in die H₂-Readiness der Verteilnetze benötigt wird.

Die derzeit geringen verfügbaren Mengen von Wasserstoff können bereits jetzt großflächig zur CO₂-Reduzierung genutzt werden. Rein technisch ließen sich den Gasnetzen für viele Anwendungen schon heute bis zu zehn Prozent H₂ beimischen. Diese Möglichkeit wird jedoch noch nicht in vollem Umfang genutzt. Wachsende Erzeugungs- und Importkapazitäten bieten die Chance, den Anteil von zehn Prozent in den kommenden Jahren auszuschöpfen.

Der DVGW arbeitet bereits daran, das Netz für immer höhere Beimischungen und den reinen Wasserstoffbetrieb kompatibel zu machen.³⁴

Schritt 1: 20 Prozent Wasserstoff im Gasnetz

Die 50 wichtigsten Regelwerke werden vom DVGW aktuell überarbeitet, um sowohl die Netze als auch die Abnehmer auf den Einsatz von 20 Prozent H_2 im Gasnetz, insbesondere auf der Verteilnetzebene, vorzubereiten. Dieser Prozess wird 2022/23 abgeschlossen sein. Die 20-prozentige Beimischung ist mit nur leichten Anpassungen in den Verteil- und Transportnetzen und zu überschaubaren Kosten umsetzbar. Diese Anpassungen stellen eine No-regret-Option dar. Denn durch die Umstellung der Netze wird einerseits die Einspa-

rung von CO_2 im Wärmemarkt umgehend ermöglicht (Vergleiche Kapitel 4.2). Andererseits können Kunden, die reines Erdgas benötigen, dieses weiterhin erhalten (Abbildung 8). Solange die Netze und Abnehmer noch nicht dafür bereit sind, 100 Prozent Wasserstoff abzunehmen, können weitere positive Klimaeffekte dadurch erreicht werden, dass Erdgas durch klimaneutrale Synthesegase und Biogase ersetzt wird. Dies kann schrittweise erfolgen.

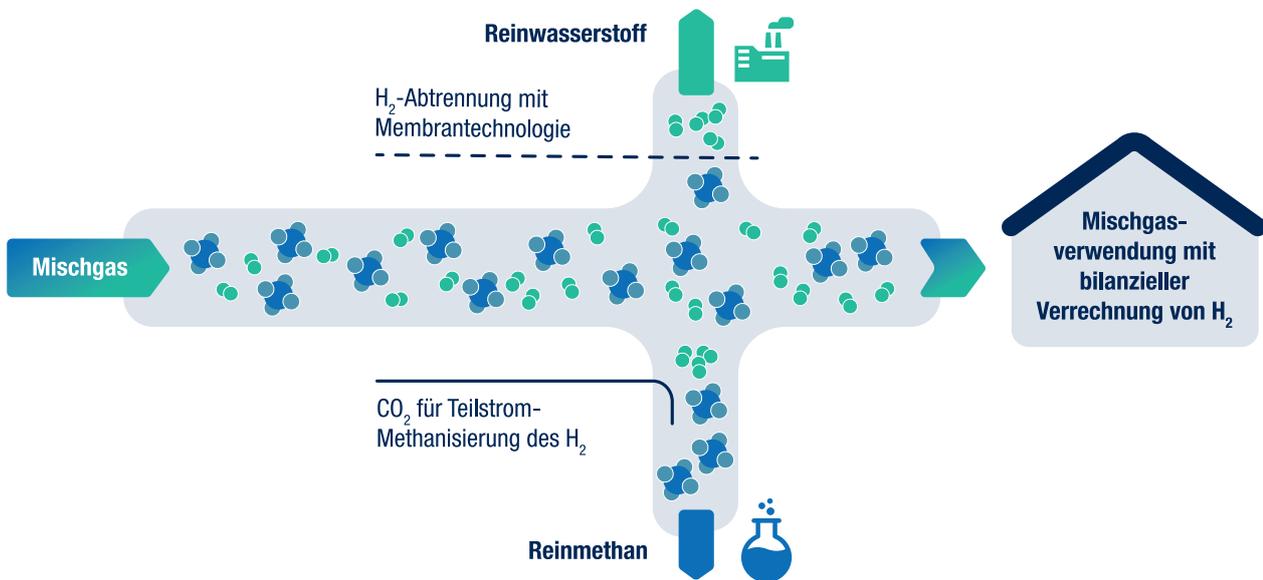


Abbildung 8: Mischgas (H_2 oder CH_4) kann auch der Reingasversorgung (H_2 oder CH_4) der Industrie dienen.
Quelle: DVGW

Schritt 2: 100 Prozent Wasserstoff im Gasnetz

Ein reines Wasserstoffnetz, aufbauend auf Teilen des Erdgasnetzes und betrieben mit Import-Wasserstoff sowie heimisch erzeugtem Wasserstoff, ist aus Sicht des DVGW realisierbar. Allerdings ist dies anspruchsvoller, da alle Abnehmer für diese Umstellung bereit sein müssen. Der Weg zu einer vollständigen Versorgung mit Wasserstoff erfolgt daher, neben einem Mischgasnetz basierend auf dem bisherigen Erdgasnetz, an strategischen Punkten durch ein reines Wasserstoffnetz – bestehend aus umgestellten Erdgas- und neu zu errichtenden Wasserstoffleitungen. Ein solcher Parallelbetrieb würde es ermöglichen, den H₂-Anteil im Mischgasnetz konstant zu halten und erste Abnehmer mit 100 Prozent Wasserstoff zu versorgen.

Die Umstellung der Verteilnetze erfordert Investitionen durch die Verteilnetzbetreiber, die zeitnah getätigt werden müssen. Um sicherzustellen, dass alle Verteilnetzbetreiber die nötigen Investitionsmittel zur Verfügung haben, sollte die Politik prüfen, ob eine Fondsfinanzierung, zum Beispiel durch die KfW, notwendig ist.

Mit der dezentralen Erzeugung von H₂ werden einzelne Netzgebiete früh zu lokalen Wasserstoffinseln.

- Power-to-Gas-Anlagen
- Pyrolyse-/Plasmalyse-Anlagen

Der DVGW hat zusammen mit 33 Verteilnetzbetreibern das Projekt „H₂vorOrt“ durchgeführt. Dabei wurde ein Transformationsfahrplan erarbeitet und untersucht, wie eine regionale und sichere Versorgung mit klimaneutralen Gasen konkret sowohl über die Gastransportnetze als auch über die Gasverteilnetze ausgestaltet werden kann. Insbesondere die Verteilnetze spielen bei der Gasversorgung von Industrie und Gewerbe eine hervorgehobene Rolle: Rund 1,6 Millionen industrielle und gewerbliche Letztverbraucher sind an die Verteilnetze angeschlossen. Sie können durch regionale Power-to-Gas- und Biomethan-Anlagen mit klimaneutralen Gasen schrittweise versorgt werden (Abbildung 9), auch wenn es regional noch keinen vollständigen H₂-Backbone gibt (Abbildung 10).³⁵

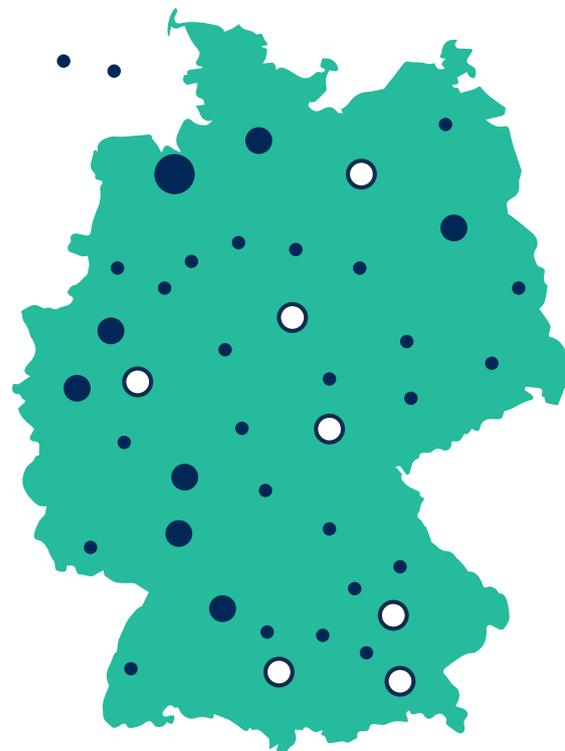


Abbildung 9: Power-to-Gas-Potenzial in Deutschland (schematische Darstellung)
Quelle: DVGW, basierend auf der Darstellung von „H₂vorOrt“

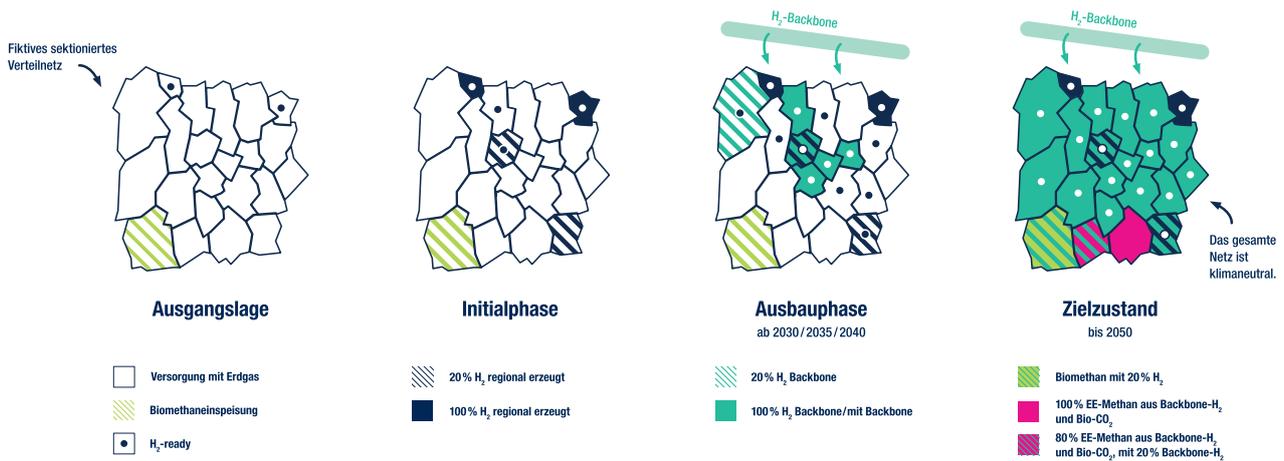


Abbildung 10: Exemplarischer Transformationspfad eines fiktiven, sektorierten Gasverteilnetzgebiets
Quelle: DVGW, basierend auf der Darstellung von „H2vorOrt“

Direkt an die Gastransportnetze sind demgegenüber rund 600 Großindustriekunden angeschlossen. Für den Ausbau eines flächendeckenden H₂-Backbones haben die Projektpartner einen Transformationspfad bis 2040 entwickelt (Abbildung 11).³⁶

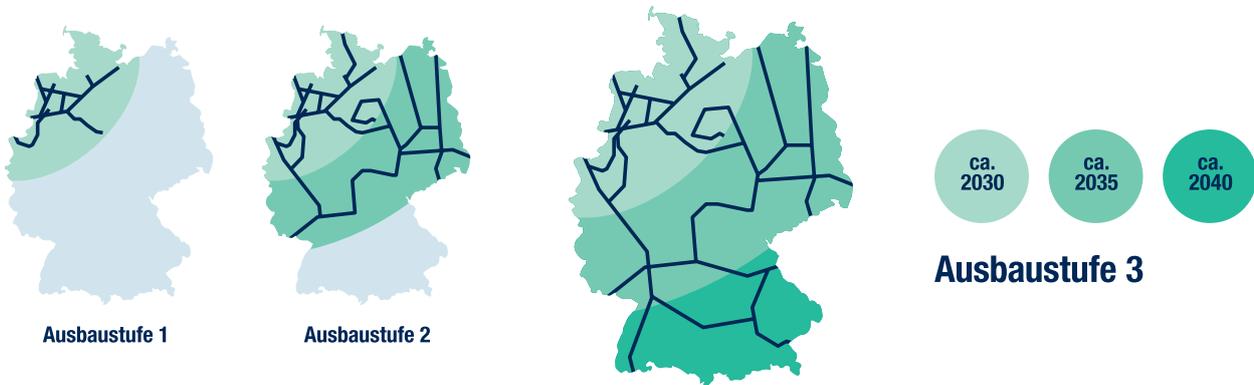


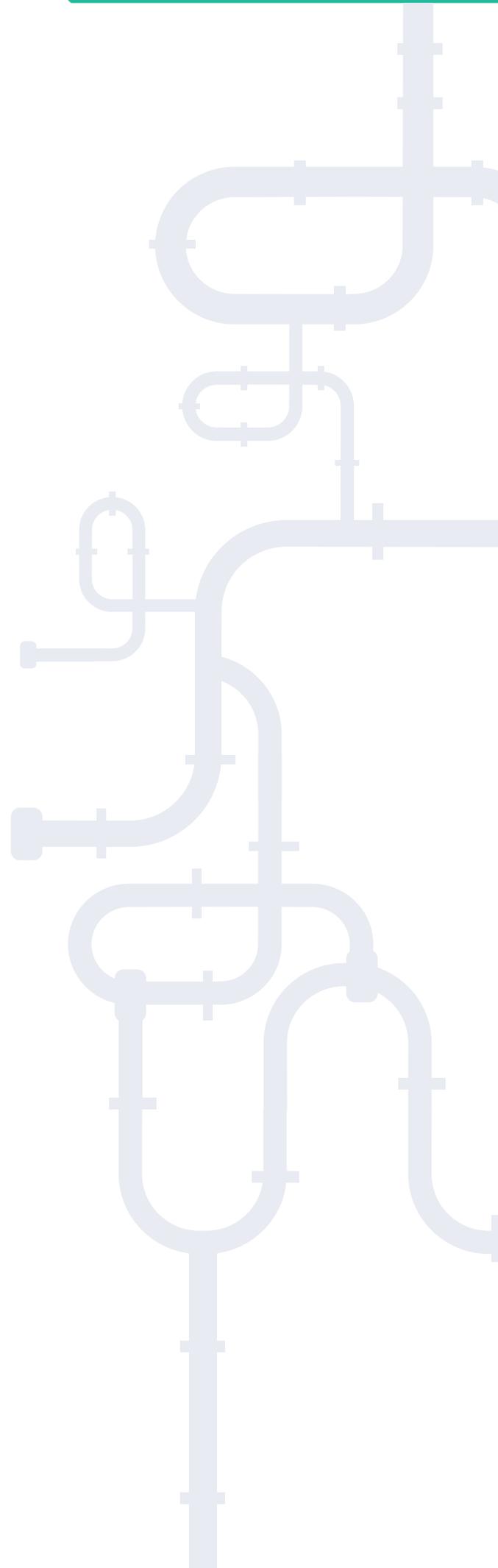
Abbildung 11: Drei Ausbaustufen des prospektiven H₂-Backbones
Quelle: DVGW, basierend auf der Darstellung von „H2vorOrt“

Die Fernleitungsnetzbetreiber haben im Entwurf des Netzentwicklungsplans Gas 2020-2030 konkrete Erdgasleitungen zur Umstellung auf reinen Wasserstoffbetrieb sowie Neubau-maßnahmen für ein Wasserstoffnetz empfohlen.³⁷

Europaweit haben sich elf europäische Gasnetzbetreiber zusammengeschlossen, um den Plan eines „European Hydrogen Backbones“ umzusetzen. Dabei soll bis 2030 ein erstes internationales Netzwerk geschaffen werden, das durch ein reines Wasserstoffnetz in Länge von 6.800 Kilometern miteinander verbunden ist. Bis 2040 soll ein europaweit verbundenes Wasserstoffnetz in Länge von 23.000 Kilometern entstehen. Dafür nötig sind, nach Einschätzung der Leitungsbetreiber, Investitionen in Höhe von 27 bis 64 Milliarden Euro bis 2040.³⁸ Die chronologische Abfolge der Errichtung der Anschlüsse zu den nachgelagerten Verteilnetzen und damit das Ineinandergreifen der Top-down-Entwicklung des Transportnetzes mit dem Bottom-up-Ansatz der Verteilnetzbetreiber stellt eine Planungsaufgabe für die kommenden Monate und Jahre dar.

Um Erdgasleitungen umzurüsten und neue Wasserstoffleitungen planen und errichten zu können, bedarf es aus Sicht des DVGW zeitnaher Anpassungen des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) und des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG). Damit ein fairer Wettbewerb möglich ist und die Allgemeinheit über die bestehende und wachsende Netzinfrastruktur mit Wasserstoff versorgt werden kann, sollten Wasserstoff-Leitungen mit in den Netzentwicklungsplan Gas (NEP), und damit in die Regulierung, aufgenommen werden. Um es auf eine kurze Formel zu bringen: Wasserstoff muss ins EnWG! Deshalb begrüßt der DVGW den Beschluss des Bundesrates vom 27. November 2020, der sich für die schrittweise Reduzierung der EEG-Umlage für Wasserstoffelektrolyseanlagen ausspricht. Ebenso ist zu begrüßen, dass die Bundesregierung im Zuge der EnWG-Novelle den Weg für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur geebnet hat.

Auch auf europäischer Ebene sind Anpassungen des rechtlichen Rahmens notwendig, um klimaneutrale Gase für verschiedene Anwendungen beispielsweise im Verkehrssektor anrechnen zu können³⁹ und die Netze H₂-ready zu machen. Der DVGW bietet sich für die nötigen Anpassungen als Gesprächspartner an, um den Umstellungsprozess mit seiner langjährigen Expertise zu unterstützen.



3.3 Bestehende Erdgasspeicher neu nutzen

Die bestehenden Erdgasspeicher sind die wirtschaftlichste Möglichkeit, große Mengen regenerativ erzeugten Stroms saisonal zu speichern. Für die Aufnahme von Wasserstoff können Erdgasspeicher mit geringem Aufwand umgerüstet werden.

» Bestehende Erdgasspeicher als strategische Assets begreifen und für Wasserstoff und klimaneutrale Gase neu nutzen.

Ein Stromsystem, das hauptsächlich auf volatilen erneuerbaren Energien mit ihrer Abhängigkeit von Wetter und Jahreszeiten basiert, braucht zwingend saisonale Langzeitspeicher. Gasspeicher sind die kosteneffizienteste Lösung, Strom aus erneuerbaren Energien über Wochen und Monate in Form von klimaneutralen Gasen zu speichern. In Abbildung 12 sind die unterschiedlichen Speicherkapazitäten der deutschen Stromspeicher im Vergleich zur den deutschen Gasinfrastruktur dargestellt.

Deutschland verfügt mit 24 Milliarden Kubikmetern an 36 Standorten über die größten Kapazitäten an Erdgasspeichern innerhalb der EU.⁴⁰ Die H₂-Readiness hängt davon ab, um welchen Typ von Untergrundspeichern es sich handelt, wobei auf jeden der beiden Typen etwa die Hälfte der Kapazitäten entfällt:

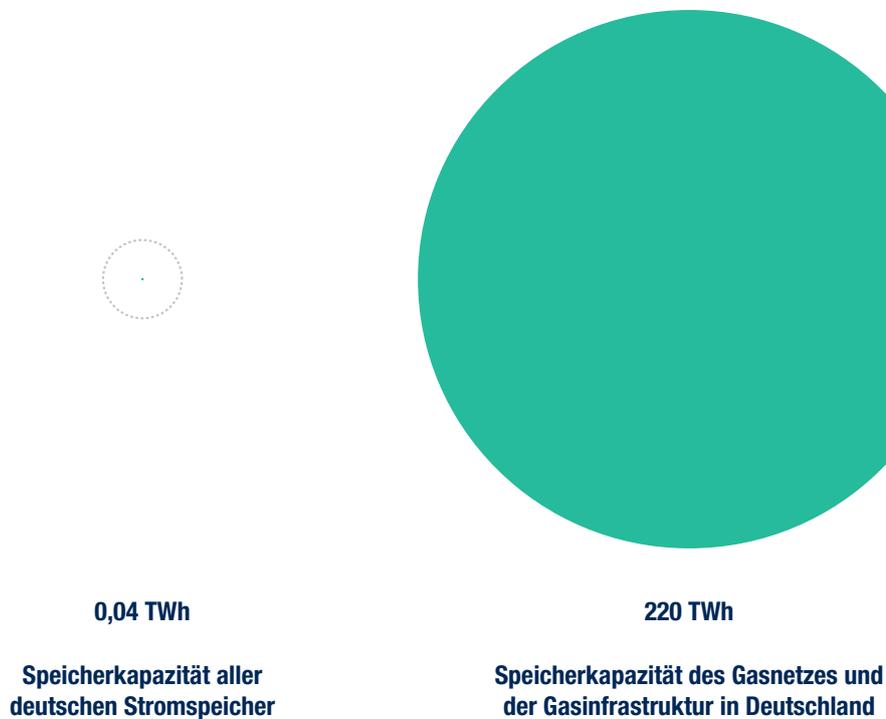


Abbildung 12: Vergleich der Speicherkapazitäten der deutschen Stromspeicher und der deutschen Gasinfrastruktur
Quelle: DVGW, basierend auf DVGW Energie-Impuls

Kavernenspeicher sind große Hohlräume in ehemaligen Salzstöcken. Sie können 100 Prozent Wasserstoff aufnehmen. Mit der in Erdgasspeichern installierten Technik sind derzeit Beimischungsquoten von fünf Prozent möglich. Im Reallabor Bad Lauchstädt wird eine Kaverne des dortigen Erdgasspeichers für 100 Prozent Wasserstoff umgerüstet.

Porenspeicher nutzen feinste Hohlräume im Gestein, entweder in ausgeförderten Erdöl- und Erdgaslagerstätten oder in Aquiferen. Porenspeicher lassen sich eins zu eins für synthetisches Methan sowie Biomethan nutzen, an der Beimischungsquote für Wasserstoff wird derzeit noch geforscht. Beim österreichische Forschungsprojekt Underground Sun Storage wurde eine Beimischung von zehn Prozent Wasserstoff in Porenspeichern erreicht.

Schon heute steht fest, dass die bestehenden Speicher der Gaswirtschaft ein strategisches Asset sind, das es für klimaneutrale Gase zu nutzen gilt. Eine Übersicht über bestehende Gasspeicherstandorte in Deutschland und deren Speichervolumen bietet Abbildung 13.

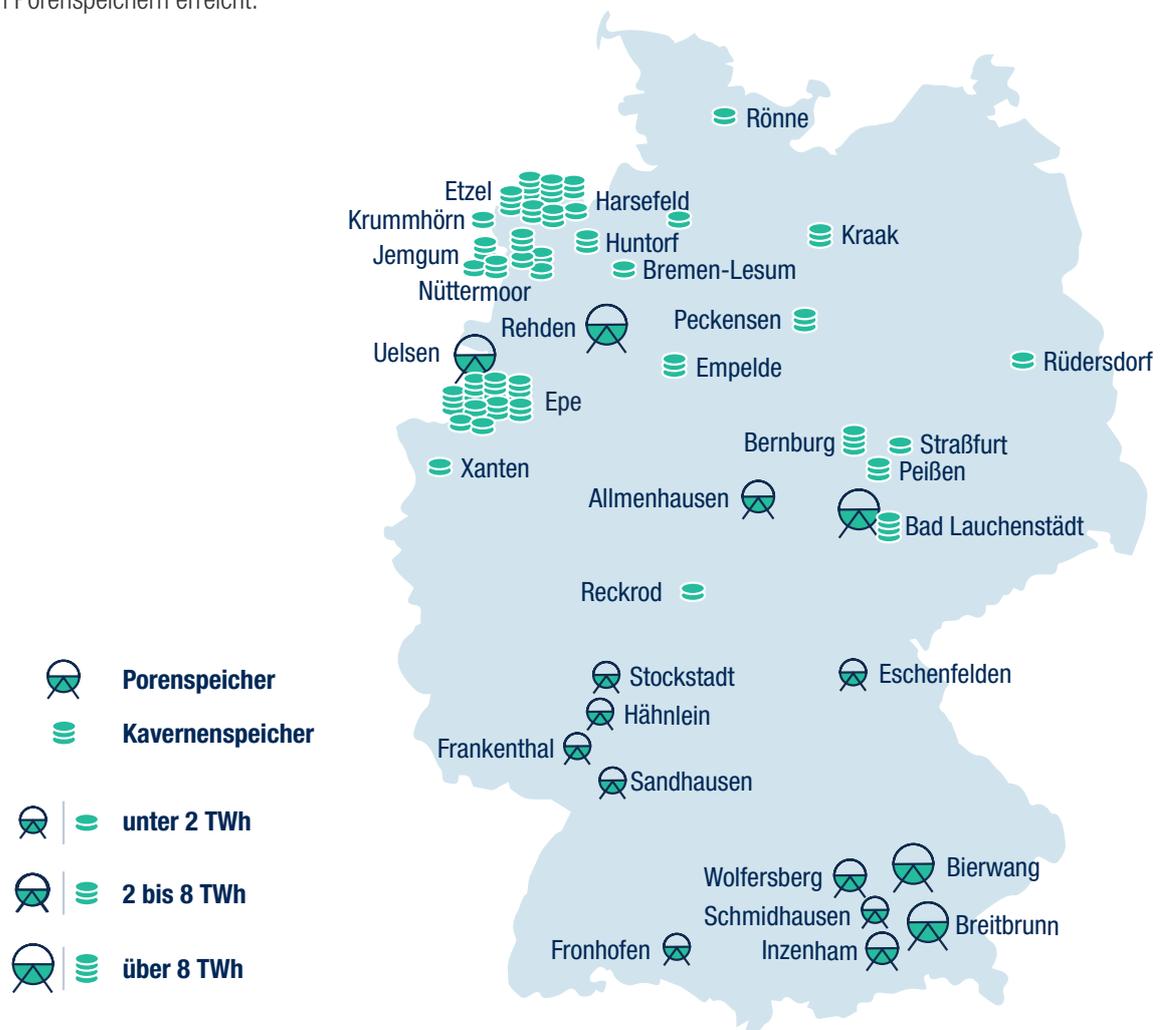


Abbildung 13: Gasspeicherstandorte in Deutschland

Quelle: DVGW, basierend auf Gas Infrastructure Europe, Initiative Erdgasspeicher (INES)

3.4 Was mit den Speichern geschehen muss

Angesichts der zu erwartenden hohen Wasserstoffmengen im Energiesystem muss der Bedarf an der entsprechenden Speicherinfrastruktur schon jetzt evaluiert werden. Die Gaswirtschaft braucht Klarheit, wo bestehende Untergrundspeicher H₂-ready gemacht und wo neue Wasserstoffspeicher errichtet werden müssen.

- » Es bedarf eines abgestimmten Speicherkonzepts, das sich am energetischen Gesamtkonzept für klimaneutrale Gase orientiert und darauf aufbauend einen Plan, welche Speicher um- oder neugebaut werden müssen.

Technisch ist der Um- und Neubau von Speichern realisierbar, zuvor müssen jedoch wichtige Parameter feststehen. Entscheidend ist, wo künftig welche energetischen Mengen und Lasten benötigt werden.

Dazu wird ein energetisches Gesamtkonzept für klimaneutrale Gase benötigt. Zu planen ist, wo Wasserstoff oder andere klimaneutrale Gase in welchen Mengen nachgefragt werden. In der Gaswirtschaft gehen quantitative und qualitative Anforderungen Hand in Hand. Wenn Klarheit über die Mengen besteht, lässt sich die Gasaufbereitung am Speicher an die spezifischen Qualitätsanforderungen der Gase für die jeweilige Verwendung anpassen.

Planungssicherheit wird auch für die abzurufenden Lasten benötigt, also vor allem die auszuspeichernden Gasmengen pro Zeit. Für Porenspeicher ist besonders die Kenntnis der Grundlast wichtig, für Kavernenspeicher die Anforderungen an die Spitzenlasten.

Wenn die Politik Planungssicherheit schafft – durch die Aufnahme von Wasserstoff ins EnWG, ein ambitioniertes Grüngas-Ziel und die Etablierung eines Förderregimes –, wird die Gaswirtschaft alles daransetzen, auch die Speicherinfrastruktur H₂-ready zu machen und die Gasversorgung auch in Zukunft für alle Anwendungen jederzeit zu sichern. Mit dem Projekt „H2vorOrt“ wurde hierfür bereits die Grundlage geschaffen.

Kurzzusammenfassung

Klima

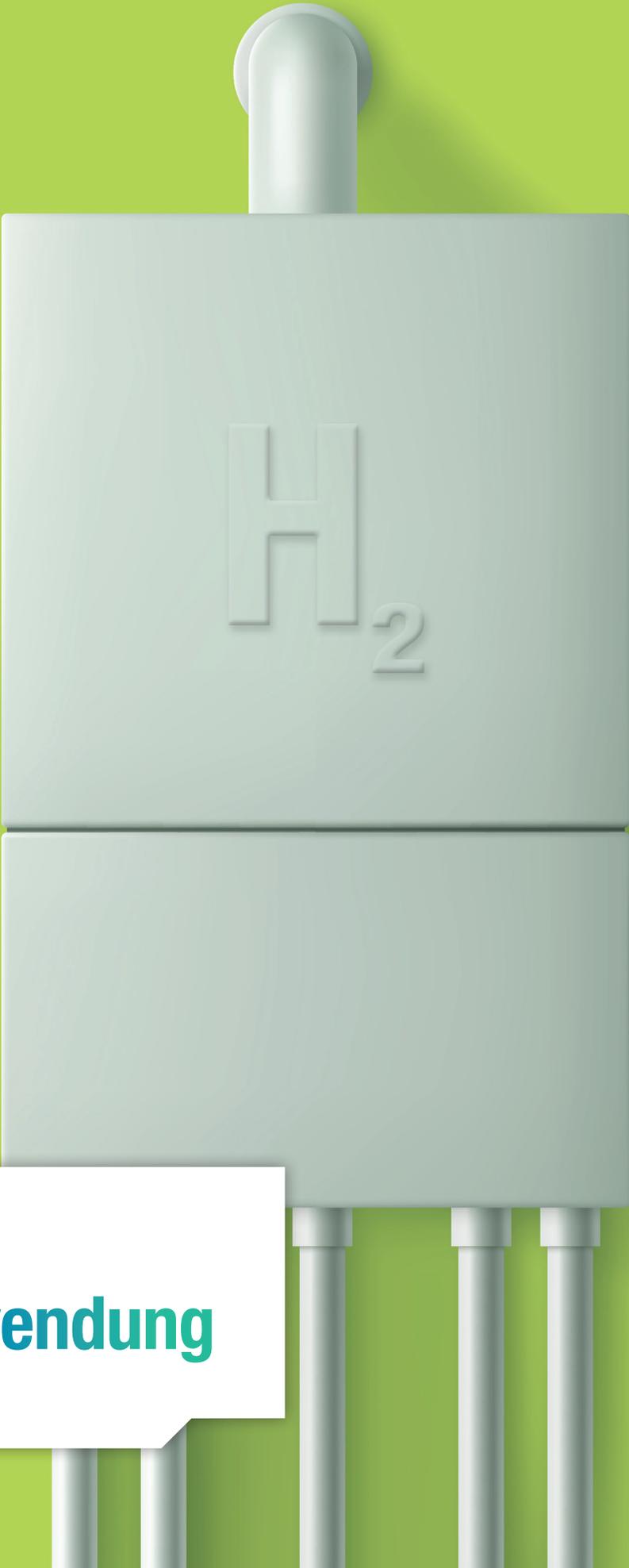
- » Gasnetze und Speicher sind eine hocheffiziente Form der Energieversorgung.
- » Durch die Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas können bereits früh signifikante Mengen an verfügbarem Wasserstoff großflächig zur CO₂-Reduzierung genutzt werden.
- » PtX ist eine der besten Formen der saisonalen Speicherung von volatilen erneuerbaren Energien.

Wirtschaft

- » Gasnetze und Speicher bilden die Grundlage für eine sichere und wirtschaftliche Energieversorgung.
- » Die Infrastruktur jetzt H₂-ready zu machen, ist eine Investition in die Zukunft, die direkt und regional wertsteigernd wirkt.
- » PtX ist auch die wirtschaftlichste Art der saisonalen Speicherung von volatilen erneuerbaren Energien.

Quellen

- 29 Avacon AG, 2019: Erstmals bis zu 20 Prozent Wasserstoff in einem deutschen Gasverteilnetz geplant
- 30 Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt (2019): Monitoringbericht 2019. Online unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Monitoringbericht_Energie2019.pdf [letzter Zugriff am 16.11.2020]
- 31 FNB Gas, 2020: Fernleitungsnetzbetreiber veröffentlichen Karte für visionäres Wasserstoffnetz. Pressemitteilung vom 28.1.2020. Online unter: <https://www.fnb-gas.de/fnb-gas/veroeffentlichungen/pressemitteilungen/fernleitungsnetzbetreiber-veroeffentlichen-karte-fuer-visionaeres-wasserstoffnetz-h2-netz/> [letzter Zugriff am 15.07.2020]
- 32 OGE u. a., 2020: Fernleitungsnetzbetreiber stellen Plan für Europäischen Wasserstoff Backbone vor. Pressemitteilung vom 17.7.2020. Online unter: <https://oge.net/de/pressemitteilungen/2020/fernleitungsnetzbetreiber-stellen-plan-fuer-europaeischen-wasserstoff-backbone-vor> [letzter Zugriff am 17.07.2020]
- 33 DVGW (2020): H2VorOrt. Wasserstoff über die Gasverteilnetze für alle nutzbar machen. Online abrufbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/h2vorort-wasserstoff-gasverteilnetz-dvgw-broschuere.pdf> [letzter Zugriff am 16.11.2020]
- 34 Vgl.: DVGW, 2020: H2 im Netz
Voruntersuchungen zu Gasbeschaffenaspekten bei Transport und Verteilung von Wasserstoff mit Hilfe der bestehenden Erdgasinfrastruktur (G 201921). Online abrufbar unter: <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsprojekt-h2-im-netz/>
- 35 DVGW (2020): H2VorOrt. Wasserstoff über die Gasverteilnetze für alle nutzbar machen. Online abrufbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/h2vorort-wasserstoff-gasverteilnetz-dvgw-broschuere.pdf> [letzter Zugriff am 16.11.2020]
- 36 Ebd.
- 37 FNB Gas, 2020: Netzentwicklungsplan Gas 2020–2030. Konsultation. Stand 01.07.2020. Online abrufbar unter: https://www.fnb-gas.de/media/2020_04_30_fnb_gas_2020_nep_konsultation_de.pdf [letzter Zugriff am 16.07.2020]
- 38 Enagás, et al. (Hrsg), 2020: European Hydrogen Backbone: how a dedicated hydrogen infrastructure can be created. Online abrufbar unter: https://www.fluxys.com/-/media/project/fluxys/public/corporate/fluxyscom/news-press-events/fluxys-belgium/2020/european-backbone-plan/20200715_european-hydrogen-backbone_report.pdf [letzter Zugriff am 01.10.2020]
- 39 Industriekreis CNG, 2020: Anrechenbarkeit nachhaltiger Kraftstoffe auf Flottengrenzwerte. Online abrufbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/aktuelles/presse/2020-06-17-Gemeinsame-Pressemitteilung-CNG-Industriekreis-Flottengrenzwerte.pdf> [letzter Zugriff am 09.11.2020]
- 40 Initiative Erdgasspeicher (INES), 2020: Gasspeicherkapazitäten. Online abrufbar unter: <https://erdgasspeicher.de/erdgasspeicher/gasspeicherkapazitaeten/> [letzter Zugriff am 08.12.2020]



H_2

Kapitel 4

Anwendung

Die innovative Kraft des Energieträgers Wasserstoff liegt insbesondere in seinen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten. Möchten wir das Potenzial von Wasserstoff voll ausschöpfen, sollten wir ihn in allen Sektoren einsetzen und keine Nutzungsart ausschließen. Von großem Vorteil ist dabei, dass bereits heute ein Großteil der Energieabnehmer in den Sektoren Industrie, Gewerbe, Wärme sowie Stromerzeugung in Deutschland an die Gasverteilnetze angeschlossen ist.⁴¹ Dabei befinden sich die einzelnen Sektoren in unterschiedlichen Situationen und stehen vor Herausforderungen, die individuelle zeitliche Abläufe und Investitionskosten bedingen (Abbildung 14).

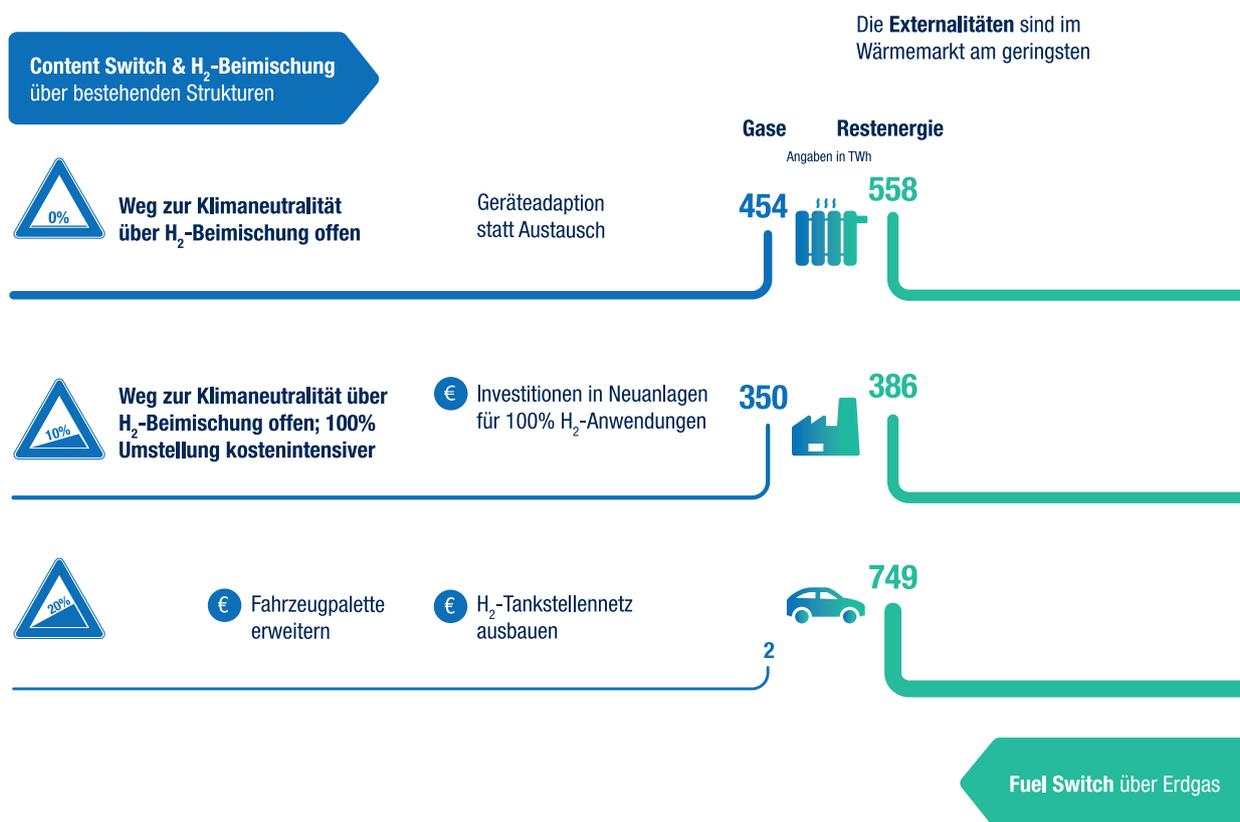


Abbildung 14: Wärmemarkt: Sektor mit den geringsten volkswirtschaftlichen Eintrittskosten für H₂
Quelle: DVGW, eigene Darstellung

4.1. Beschränkung auf einzelne Sektoren verschenkt Potenziale

Statt Anwendungsbereiche auszuschließen, muss der Einsatz von Wasserstoff sektorenübergreifend geplant und umgesetzt werden. So gelingt auch der Markthochlauf am schnellsten.

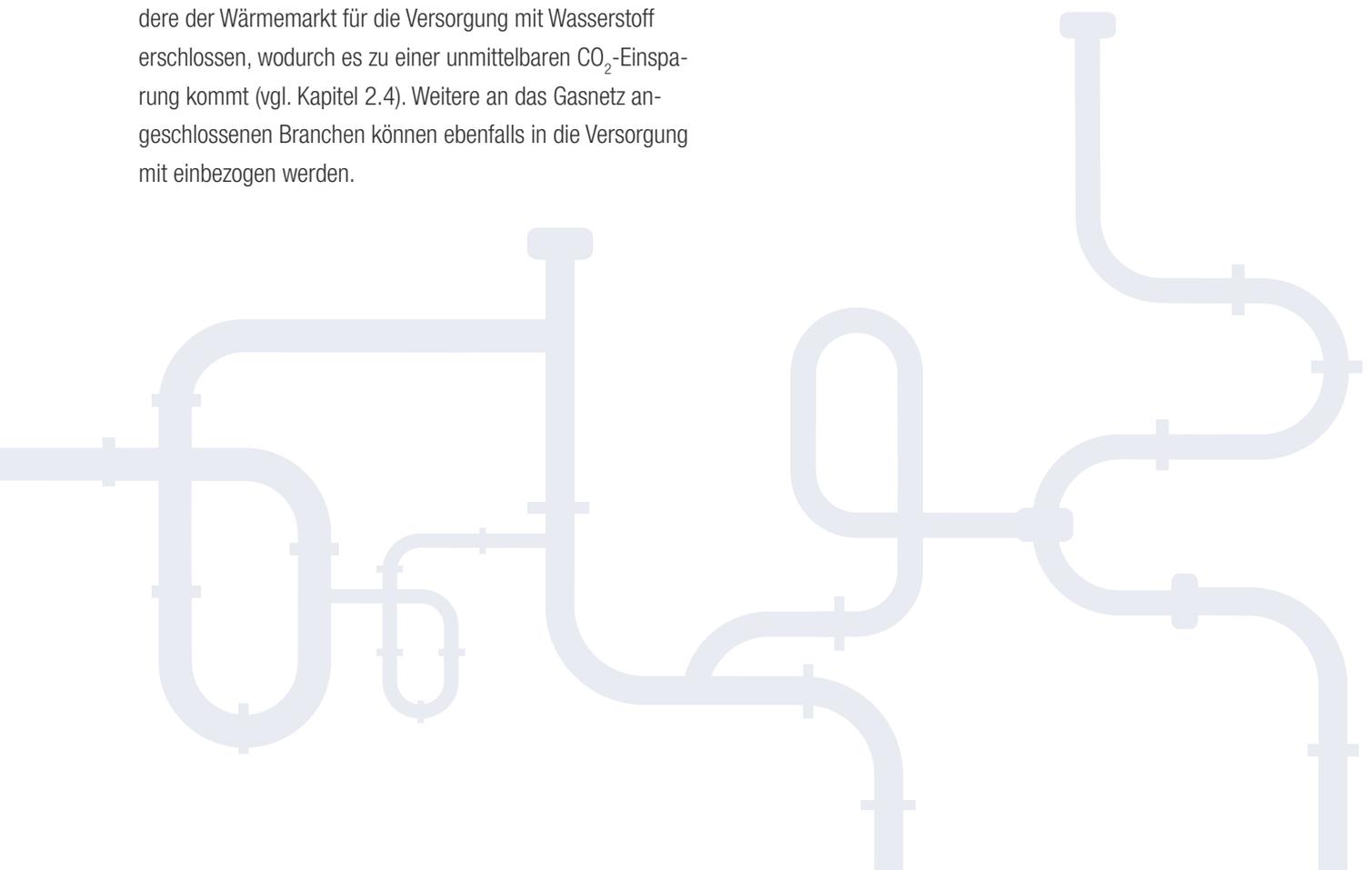
» Keine Branche sollte bei der Anwendung von klimaneutralen Gasen ausgeschlossen werden. Es braucht ein Level-Playing-Field, in dem alle Sektoren zum Zuge kommen können.

Wasserstoff ist das perfekte Energiegas: Mit ihm lässt sich grüner Strom speichern, in der Anwendung ist er flexibel und ermöglicht hohe Leistungen. Langfristig sollte Wasserstoff deshalb in sämtlichen Sektoren genutzt werden, wobei unterschiedliche Ausgangssituationen unterschiedliche Herangehensweisen und Ziele bedingen.

Es gilt, den Markthochlauf technologieoffen zu organisieren und die spezifischen Vorteile jedes Sektors zu nutzen.

Während der Transformation hin zu einer dezidierten Wasserstoffinfrastruktur kann Wasserstoff bereits der Erdgasinfrastruktur beigemischt werden. Wasserstoff wird also in den Netzen der allgemeinen Versorgung transportiert und erreicht alle daran angeschlossenen Nutzer. Dadurch wird insbesondere der Wärmemarkt für die Versorgung mit Wasserstoff erschlossen, wodurch es zu einer unmittelbaren CO₂-Einsparung kommt (vgl. Kapitel 2.4). Weitere an das Gasnetz angeschlossenen Branchen können ebenfalls in die Versorgung mit einbezogen werden.

Der Umbau bestehender Erdgas-Infrastrukturen sowie der teilweise Neubau von Wasserstoffleitungen kann und wird parallel erfolgen. Durch dieses simultane Vorgehen kann der Markthochlauf in kürzerer Zeit gelingen. Zu beachten ist gleichwohl, dass für alle Sektoren spezifische Herausforderungen gelten, die Anpassungsbedarfe mit sich bringen. Klar ist dabei, dass sämtliche Sektoren bis 2030 und 2050 ihren Ausstoß senken müssen, um die Klimaziele der EU zu erreichen.



4.2. Wärme

Die CO₂-Reduzierung im Wärmesektor kommt trotz aller Anstrengungen nur langsam voran. Deutlich schnellere CO₂-Einsparungen brächte der Einsatz von klimaneutralen Gasen gepaart mit einer geförderten Steigerung der Kesselaustauschraten. Wasserstoff kann dem Erdgasnetz derzeit bis zu einem Anteil von zehn Prozent, bald bis 20 Prozent beigemischt werden. Die Nutzung von Biomethan ist ein weiterer, etablierter Weg, um den CO₂-Fußabdruck des Wärmesektors zu senken.

- » Um die Klimaziele im Wärmesektor zeitnah und sozialverträglich zu erreichen, sollten zeitnah ineffiziente Heizungen durch moderne, effiziente Gasbrennwertkessel ersetzt werden.
- » Durch die Beimischung von Wasserstoff und weiteren klimaneutralen Gasen ins bestehende Gasnetz können zusätzliche Klimapotentiale genutzt werden.
- » Förderliche Impulse in beide Richtungen können von einem klaren politischen Bekenntnis zu Energiegasen und zu effizienten und innovativen Gastechnologien ausgehen. Einer allgemeinen Verunsicherung der Verbraucher ist mit Aufklärung über die geeignete Wahl der passenden Heizungstechnologie zu begegnen, mit der zu geringen Kosten und damit sozialverträglich ein Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden kann.

Der Wärmemarkt in Deutschland verbrauchte im Jahr 2019 1.330 TWh Energie und war damit für 53 Prozent des Endenergieverbrauchs in Deutschland verantwortlich.⁴² Der Großteil dieser Energie wurde in Form von Erdöl und Erdgas bereitgestellt, das Potenzial zur CO₂-Minderung ist dort also besonders groß. Bis 2030 muss Deutschland seine Emissionen im Vergleich zu 1990 im Wärmesektor um 67 Prozent reduzieren.

Lange wurde im Wärmesektor eine Doppelstrategie aus Dämmung und Elektrifizierung angestrebt. Die geringe jährliche Sanierungsrate von nur 1,1 Prozent der Wohngebäude spricht jedoch für sich. Tiefgreifende Sanierungen mit Dämmung als Schwerpunkt sind nicht wirtschaftlich und können zu bauphysikalischen Schäden an den Gebäuden führen.⁴³ Bei einer Elektrifizierung durch Wärmepumpen ist noch nicht abzusehen, welche Auswirkungen dies auf die Stromnetze haben wird. Mit den vorhandenen Übertragungs- und Verteilkapazitäten ist der großflächige Einsatz von Wärmepumpen wahrscheinlich nicht möglich. Infolge des Kernenergie- und Kohleausstiegs geht die gesicherte Erzeugungsleistung in Deutschland zurück, die verbleibende Stromerzeugung ist

zu überwiegenden Teilen volatil. Zeiten der sogenannten „dunklen Flaute“ treten insbesondere in den Wintermonaten auf. In diesen liegen auch die Tage mit den Verbrauchsspitzen für die Wärmeversorgung. Es kommt also der Höchstverbrauch mit einer Mangellage zusammen: Die Stromlücke wird dadurch gleichzeitig zur Wärmelücke und verschärft sich deutlich. Hierdurch wird die Versorgungssicherheit sowohl strom- als auch wärmeseitig massiv gefährdet. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass sich diese Zusammenhänge zudem erheblich auf die Preise am Energiemarkt auswirken. Realistischer, sozialverträglicher und effizienter ist es, für die CO₂-Reduktion auf den Austausch von alten Niedertemperaturkesseln durch moderne Gasbrennwertkessel sowie auf den Einsatz von klimaneutralen Gase zu setzen.

Deutschlandweit sind zur Wärmeerzeugung rund 21 Millionen Gas-, Öl-, und Biomasse-Kessel sowie Wärmepumpen verbaut. Davon sind rund 11,8 Millionen ineffiziente Gas- und Öl-Niedertemperaturkessel (Abbildung 15).

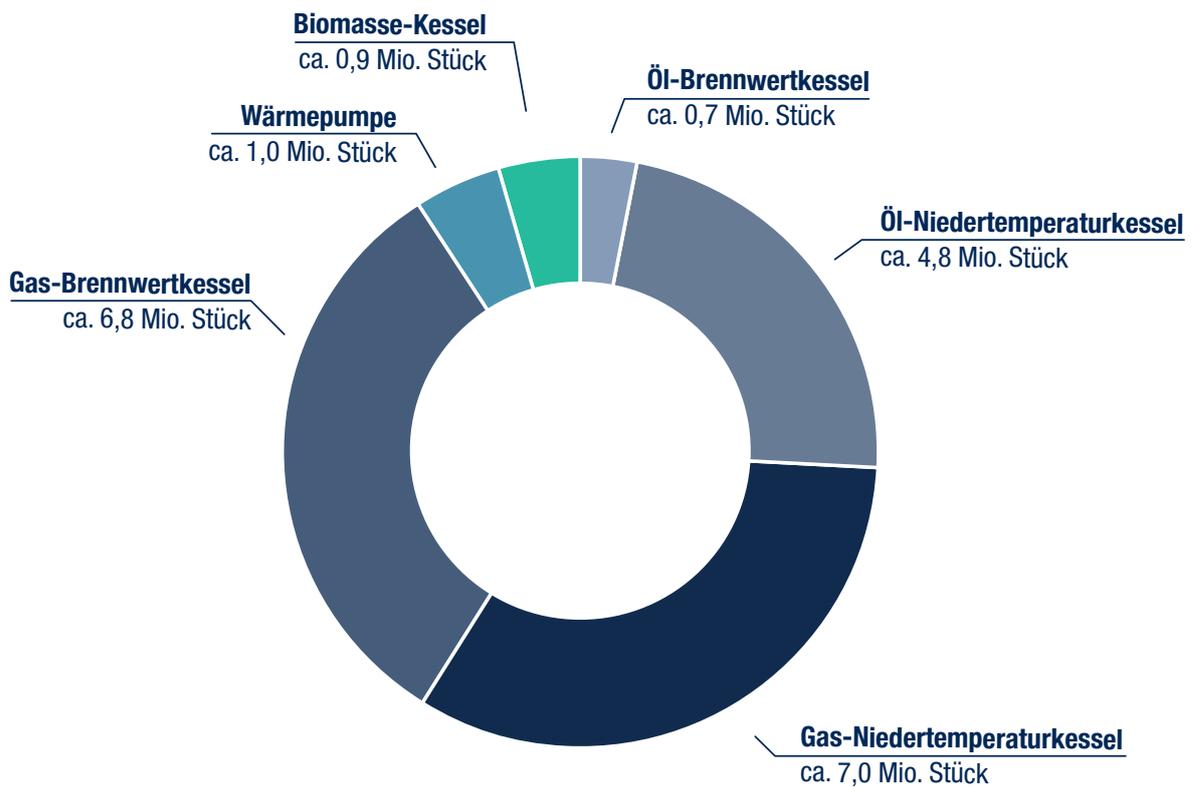


Abbildung 15: Wärmeerzeugung im Jahr 2019

Quelle: Erhebung des Schornsteinfegerhandwerkes für 2019 und BDH-Schätzung

Um die Klimaziele im Wärmesektor schnell und sozialverträglich zu erreichen, sollten zeitnah ineffiziente Ölheizungen und Gas-Niedertemperaturkessel durch moderne, effiziente Gasbrennwertkessel ersetzt werden. Dies ebnet auch den Weg für einen weiteren Emissionsminderungspfad, denn diese modernen Geräte verbessern ihre CO₂-Bilanz über die weitere Beimischung von Wasserstoff. Tabelle 1 bietet einen

Überblick über die relativen Treibhausgaseinsparungen, die durch den Einsatz von modereren Gasbrennwertkesseln im Vergleich zu alten Gas-Niedertemperaturkesseln zustande kommen. Im Vergleich zu Öl-Niedertemperaturkesseln schneiden moderne Gaskessel noch besser ab.

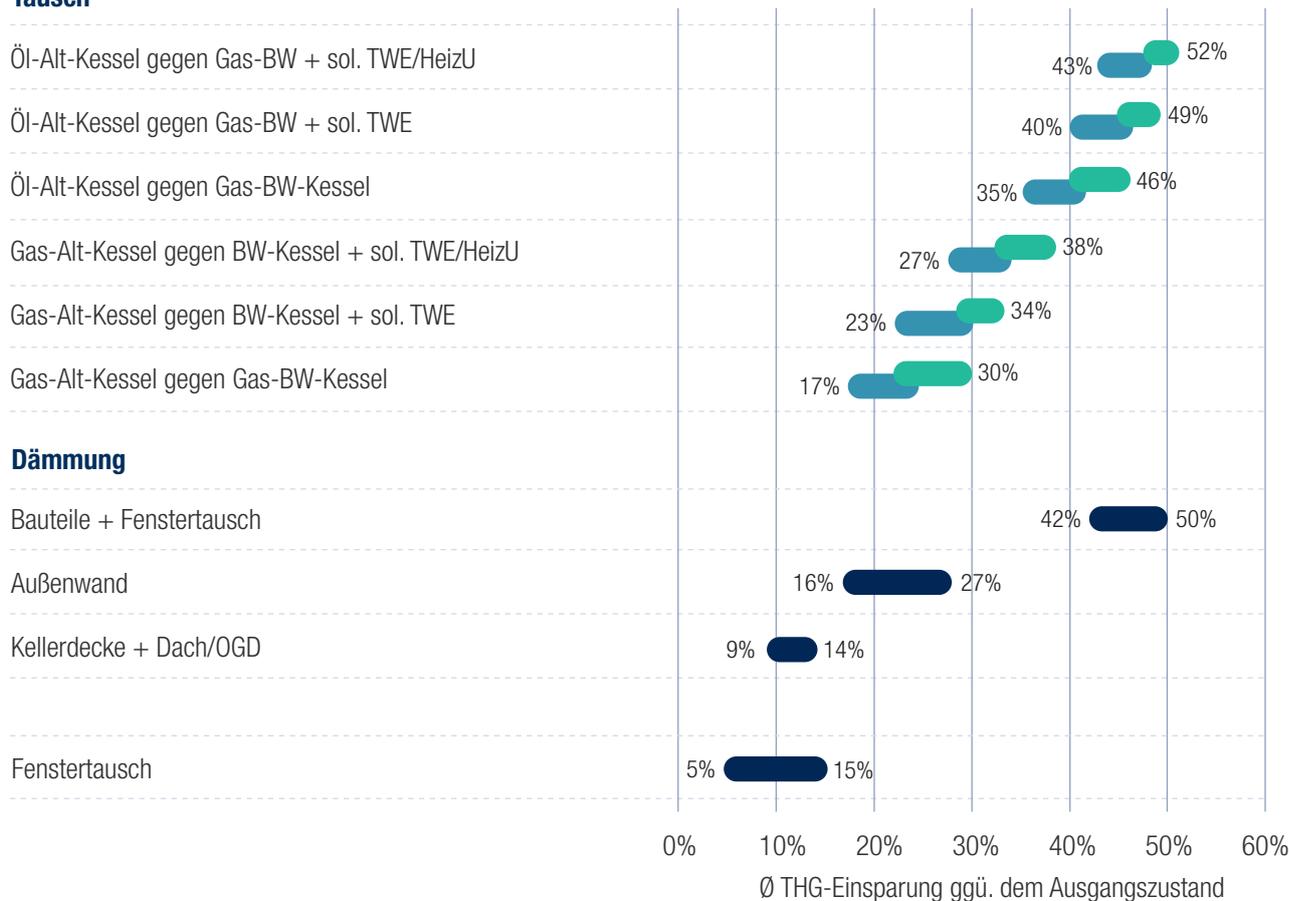
		Relative THG-Einsparung im Sanierungsfall						
		0%	10%	20%	30%	50%	80%	100%
Ausgangszustand		Gas-Niedertemperaturkessel, Betrieb mit Erdgas						
Sanierungs- variante	Gas-BW	17%	20%	23%	27%	36%	61%	98%
	Gas-BW + sol. TWE	23%	25%	28%	31%	40%	63%	97%
	Gas-BW + sol. TWE/HeizU	27%	29%	32%	35%	43%	65%	96%

Tabelle 1: Relative Verringerung der Treibhausgas-Emissionen bei Ersatz eines Gas-Niedertemperaturkessels durch einen Gas-Brennwertkessel und zusätzliche Wasserstoffbeimischung zum Verbrennungsgas

Quelle: Oschatz et al.: CO₂-Einsparungen im Gebäudebereich durch den Einsatz von Wasserstoff, Energie – Wasser – Praxis, S. 50-56, 10/2020

Auch der Aspekt der Sozialverträglichkeit kommt in einer vergleichenden Gegenüberstellung der alternativen Sanierungsmaßnahmen klar zum Ausdruck, denn viel teurere Maßnahmen an Gebäudehülle oder Fenstern liefern nur geringe THG-Einsparungen (Abbildung 16).

Tausch



- Betrieb mit Erdgas
- Betrieb mit Wasserstoff (20 Vol.-%)

Gas-BW: Gas-Brennwertkessel

sol. TWE/HeizU: solarer Trinkwassererwärmer/Heizung

OGD: Oberste Geschosdecke

Abbildung 16: Durchschnittliche Treibhausgaseinsparungen unterschiedlicher Modernisierungsmaßnahmen

Quelle: Oschatz et al.: CO₂-Einsparungen im Gebäudebereich durch den Einsatz von Wasserstoff, Energie – Wasser – Praxis, S. 50-56, 10/2020

Die vorhandene Versorgungsinfrastruktur ist ein weiterer Grund, warum die Wärmewende mit klimaneutralen Gasen schneller gelingen kann als mit einem auf Dämmung fokussierten Pfad. Denn bereits jetzt können im Wärmesektor auch schon Wasserstoffanteile genutzt und somit der CO₂-Ausstoß reduziert werden. Wasserstoff wird bereits in Gasnetze eingespeist und in der Fläche ist das Beimischpotenzial noch bei Weitem nicht ausgeschöpft. Schrittweise wird sich die Beimischungsquote in bestehenden Leitungen auf 20 Prozent Wasserstoff erhöhen lassen. Insgesamt sind im Gasnetz noch deutlich höhere Anteile klimaneutraler Gase bis zu 100 Prozent möglich (vgl. Kapitel 3.2). Synthetisches Methan auf Basis von erneuerbaren Energien kann Erdgas eins zu eins ersetzen. Regional ist Biomethan schon seit Langem eine wichtige Stütze zur CO₂-Reduktion im Wärmesektor.

Das Gebäudeenergiegesetz ist ein weiterer wichtiger Schritt, um das Potenzial von Biogas zur CO₂-Vermeidung noch stärker zu entfalten. Nach den neuen Rahmenbedingungen aus dem TRGE-Regelwerk dürfen Brennwertheizungen über das Gasnetz mit 50 Prozent Biomethan gespeist werden, was auf die verpflichtende Quote zum Einsatz erneuerbarer Energien im Wärmemarkt anrechenbar ist. Damit hat die Politik erkannt, dass innovative, mit steigenden Anteilen erneuerbarer Gase betriebene Brennwertkessel einen großen Beitrag zur Senkung der CO₂-Emissionen leisten können.

Nutzung von Biomasse zur regionalen Wärmeerzeugung

Biogas ist ein regionales Produkt und wird durch die Vergärung von Biomasse gewonnen. Von insgesamt rund 9.000 Biogasanlagen fallen derzeit die ersten aus der Förderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) aus dem Jahr 2000. Die Anlagen tragen sowohl zu regionalen Wertschöpfung als auch zum Klimaschutz bei und sollten unbedingt erhalten bleiben. Über 20 Milliarden Kubikmeter oder ein Fünftel des deutschen Gasbedarfs lassen sich durch Biogas decken.

Weitere 20 Milliarden Kubikmeter sind durch innovative Methoden der Biogaserzeugung zu realisieren, wie der DVGW in seiner 2018 erschienenen Studie „Die Rolle von Gas im zukünftigen Energiesystem“ gezeigt hat.⁴⁵ Ein erster Schritt zur weiteren Nutzung von Biogas ist im Gebäudeenergiegesetz angelegt. Durch die Neuregelung kann Biogas im Erdgasnetz auf die verpflichtende Quote zum Einsatz erneuerbarer Energien im Wärmemarkt angerechnet werden.

4.3. Industrie

Wichtige Industriezweige lassen sich nicht zu 100 Prozent elektrifizieren. In der Stahl- und Chemieindustrie etwa werden gasförmige Energieträger für zahlreiche Produktionsverfahren benötigt. Um dort Kohle und Erdöl zu ersetzen, ist der Einsatz von Wasserstoff und klimaneutralen Synthesegasen langfristig unumgänglich. Neben dem Einsatz von Wasserstoff sind effizienzsteigernde Maßnahmen in Produktionsprozessen erforderlich, um die CO₂-Emissionen in der Produktion zu senken.

- » Durch den Einsatz klimaneutraler Gase und Wasserstoff können Einsparpotenziale für Treibhausgase in der Industrie genutzt und ein nachhaltiger Klimaschutz realisiert werden.
- » Für den effizienten Einsatz von Wasserstoff und klimaneutralen Gasen sind in verschiedenen Branchen Investitionen zur Anpassung der Produktionsprozesse notwendig.

Die Industrie hat nach dem Sektor Verkehr den zweitgrößten Energieverbrauch in Deutschland.⁴⁶ Gleichzeitig trägt sie ganz wesentlich zur Wertschöpfung in Deutschland bei. Die herausragende Rolle von Gasen für die CO₂-Reduktion ergibt sich aus der Doppelfunktion, die Energieträger in vielen Industriebranchen einnehmen.

Weltweit war der Industriesektor 2018 für rund ein Viertel der CO₂-Emissionen verantwortlich. Von diesem Viertel verantwortet die Herstellung von Eisen, Stahl und Zement rund zwei Drittel (Abbildung 17).

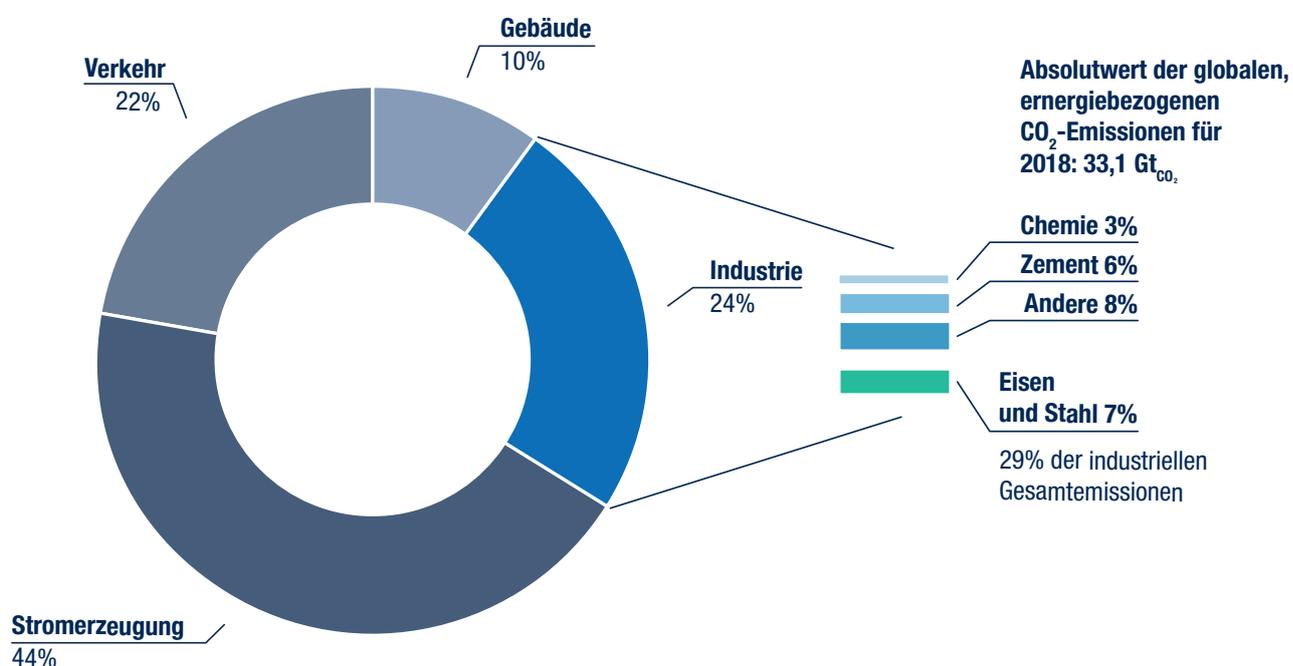


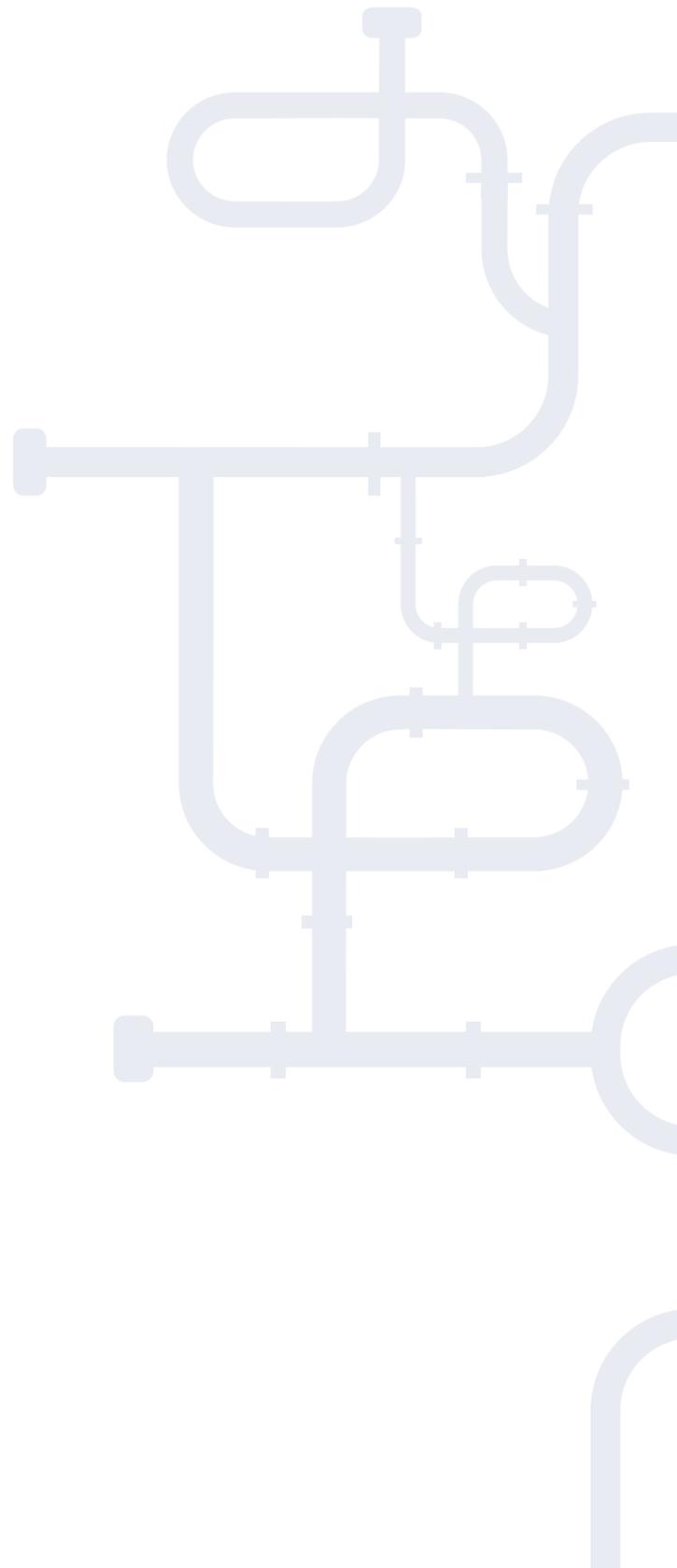
Abbildung 17: Übersicht CO₂-Emissionen 2018
Quelle: DVGW; basierend auf International Energy Agency

Einerseits nutzt die Industrie Energieträger thermisch, um Prozesswärme auf hohen Temperaturniveaus zu erzeugen. Zementklinker für die Bauwirtschaft zum Beispiel wird bei 1.450 °C gebrannt. Strombasierte Produktionsprozesse sind dazu derzeit nicht in ausreichendem Maß in der Lage. Andererseits werden Energieträger auch stofflich genutzt. Aus Erdgas lässt sich etwa Methanol erzeugen, das in der Chemieindustrie für die Herstellung von komplexeren Produkten wie Isolierungen oder Lacken Verwendung findet. In der Fläche kommen Gase in vielen mittelständischen Produktionsbetrieben zum Einsatz, etwa bei der Glasproduktion oder in metallverarbeitenden Betrieben.

Das Potenzial zur CO₂-Reduktion in wichtigen Industriebranchen ist vorhanden:

- » Die deutsche Stahlindustrie verursacht 67 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr. In Hochöfen wird bisher Kohle bzw. Koks zur Reduktion von Eisenerz verwendet. Durch Direktreduktion mit grünem Wasserstoff ließen sich bis zu 95 Prozent der Emissionen im Vergleich zur Hochofenroute einsparen.⁴⁷
- » Die Verbrennung fossiler Brennstoffe für die Bereitstellung industrieller Prozesswärme verursachte 2016 Emissionen von 126 Millionen Tonnen CO₂. Mit synthetischem Methan könnten erprobte Technologien wie Industriekessel klimaneutral weiterbetrieben werden.⁴⁸
- » In der Chemieindustrie wurden 2015 rund 44 Millionen Tonnen CO₂ emittiert. Als Ausgangsprodukt für viele Chemikalien kommt bisher grauer Wasserstoff zum Einsatz. Allein durch die Verwendung von grünem Wasserstoff zur Herstellung von Propylen und Ethylen ließen sich pro Jahr 24,3 Millionen Tonnen CO₂ vermeiden. Weitere bedeutende Einsparpotenziale gibt es beispielsweise bei Ammoniak und Methanol.⁴⁹

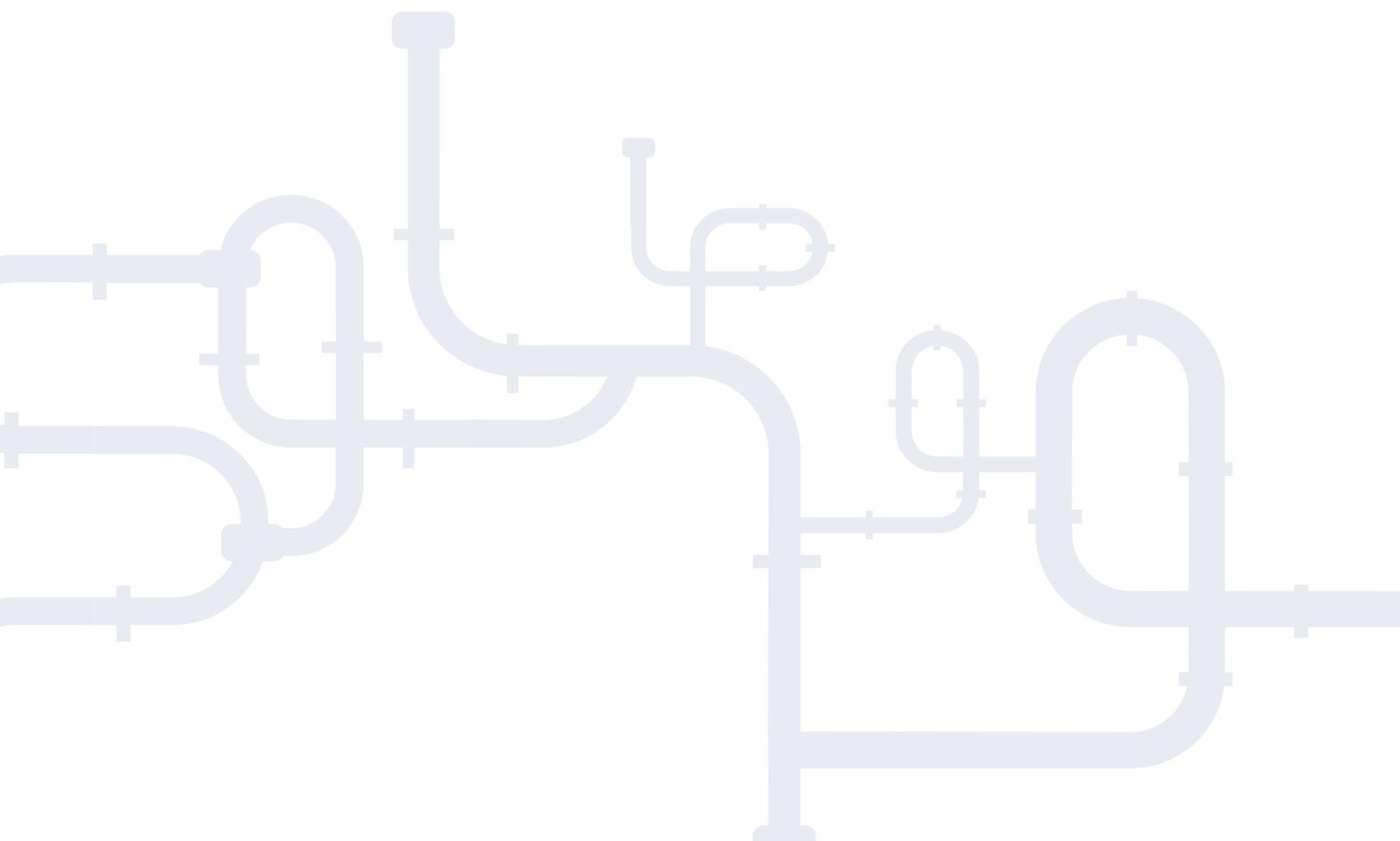
Anders als im Gebäudesektor ist in der Industrie eine Umstellung jedoch nicht so leicht umzusetzen. Investitionen sind an vielen Stellen notwendig, um einzelne Produktionsprozesse auf Wasserstoff umzustellen und CO₂-intensive Prozesse klimaneutral zu gestalten. Das erfordert einerseits hohe Investitionsmittel und bedeutet andererseits einen höheren zeitlichen Aufwand.



Nichtsdestotrotz ist der Einsatz von klimaneutralem Wasserstoff mittel- bis langfristig in der Industrie erforderlich, um Treibhausgasemissionen zu minimieren, Arbeitsplätze zu sichern und die deutsche Industrie resilienter zu machen. Denn durch nachgelagerte Wertschöpfungsketten deutscher Schlüsselindustrien hat die Nutzung von Gasen für Produktionszwecke auch für den Mittelstand strategische Bedeutung.

Dem Gasnetz wird somit auch langfristig eine entscheidende Bedeutung für die Industrie zukommen. Schon heute hängt die industrielle Wertschöpfung in Deutschland ganz entscheidend auch vom gut ausgebauten Gasnetz ab. Wie sich alte und neue Gasnetze optimal ergänzen, zeigt beispielhaft das Reallabor Westküste 100. Ein verzweigtes Wasserstoffnetz soll im Nordwesten Deutschlands perspektivisch einen Elektrolyseur mit einer Raffinerie, den lokalen Stadtwerken, einem Kavernenspeichersystem und dem bestehenden Erdgasnetz auf Basis einer erstmalig eingesetzten Pipeline-technologie verbinden. Das CO₂ aus einem benachbarten Zementwerk soll in der Raffinerie mit Wasserstoff aus der Elektrolyse zur Herstellung von klimaneutralen PtX-Produkten wie Methanol eingesetzt werden.

In ganz Deutschland lassen sich beim Wandel hin zu klimaneutralen Gasen Synergien zwischen der Industrie und anderen Sektoren nutzen. Wenn Wasserstoff oder synthetisches Methan zur Wärmeversorgung in Privathaushalten genutzt wird, kann er perspektivisch auch – ohne größere Umstellprozesse in den Leitungen – in der Industrie verwendet werden, falls die Anpassungsprozesse dort zielstrebig umgesetzt werden. Neben dem Einsatz von Wasserstoff und anderen klimaneutralen Gasen gibt es im Industriesektor daneben auch große Potenziale zur CO₂-Reduktion durch Prozessoptimierungen, die noch nicht ausreichend identifiziert und ausgeschöpft sind.⁵⁰



4.4. Mobilität

Für die Automobilindustrie ist die Brennstoffzelle ein unverzichtbarer Beitrag zur Entwicklung zukunftssträchtiger Mobilitätsangebote. Für Wasserstoff gibt es ein schlagendes Argument: Richtig umgesetzt kann die Gesamteffizienz beim Einsatz von Wasserstoff sowohl für Pkw als auch für Lkw deutlich höher sein als bei batterieelektrischen Modellen. Als Wegbereiter eines deutschlandweiten H₂-Tankstellennetzes bieten sich der Schwerlastverkehr und der öffentliche Nahverkehr an.

- » Umweltfreundliche Mobilität benötigt den Einsatz verschiedener Technologien und Antriebsformen, die Förderung von Energieeffizienz und die Umsetzung des Fuel Switch.
- » Die schnelle und kosteneffiziente Reduktion der Treibhausgasemissionen im Personen- und Schwerlastverkehr ist durch den konsequenten Einsatz von Gas im Verkehrssektor möglich.
- » Klimaschutzpotenziale von gasförmigen oder verflüssigten Treibstoffen aus Gasen und neuer CNG- und LNG-Technologien sollten genutzt werden.

Ausgerechnet im Verkehr kommt der Klimaschutz nicht von der Stelle. Mobilität ist der einzige Sektor, in dem der Ausstoß von Treibhausgasen mit 163 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr⁵¹ noch genauso hoch ist wie 1990. Klimaneutrale Gase können hier enorme Beiträge zum Klimaschutz leisten und weltweit zum zweiten Standbein der Elektromobilität werden.

Im Verkehrssektor besitzen neben Wasserstoff auch klimaneutrales LNG⁵² und CNG ein großes Potenzial. Über den LNG-Pfad können insbesondere die CO₂-Emissionen von Schwerlasttransporten reduziert werden. Sowohl im privaten als auch im öffentlichen Personennahverkehr liefern CNG-Fahrzeuge, welche mit Biomethan betankt werden, einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele. Im Bahn-, Schifffahrts- und Luftverkehr ist Wasserstoff der zentrale Baustein für eine klimaneutrale Mobilität.

Bei Pkw und Lkw steht Wasserstoff im Wettbewerb mit batterieelektrischen Fahrzeugen. Im Fall einer ganzheitlichen Betrachtung ist Wasserstoffmobilität allerdings effizienter. Brennstoffzellen-Fahrzeuge, die mit Wasserstoff aus günstigen internationalen Standorten für erneuerbare Energien betrieben werden, können höhere Nutzungsgrade erreichen als Batteriefahrzeuge, die mit grünem Strom aus Deutschland geladen werden. Insgesamt weisen Pkw mit Brennstoffzellen, die klimaneutrale Gase nutzen, geringere Well-to-Wheel-Emissionen je kg eq/km auf als Batterie-Pkw, die mit Solarstrom geladen werden (Abbildung 18). Wasserstoffantriebe sind auch im Sinne einer europäischen Vernetzung des Transportsektors anschlussfähig, im Gegensatz zu rein nationalen Konzepten wie etwa Oberleitungs-Lkw.

Weniger CO₂ bei Wasserstoff-Pkw

Vergleich von Brennstoffzellen-, Batterie- und Diesel-Pkw über den gesamten Lebenszyklus und bei einer Laufleistung von 150.000 Kilometern

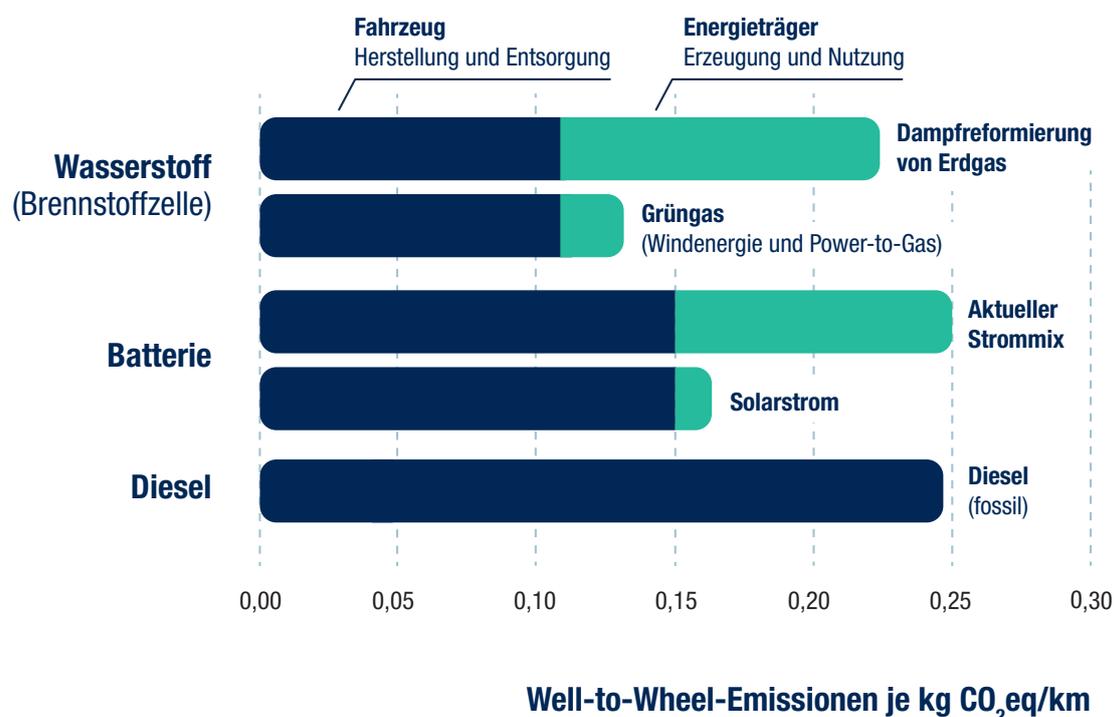


Abbildung 18: Well-to-Wheel-Emissionen von PKW mit unterschiedlichen Antriebsarten

Quelle: DVGW, basierend auf DVGW (Hrsg.): Wasserstoffmobilität: Stand, Trends, Perspektiven (2020). Online abrufbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201910-abschlussbericht-h2-mobilitaet.pdf> [letzter Zugriff am 20.01.2021]

Darüber hinaus besitzt der Einsatz von Wasserstoff gegenüber dem Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen einen weiteren Kostenvorteil. Denn die Infrastruktur, die für den großflächigen Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen benötigt wird, ist aktuell nicht vorhanden. Bei gleichbleibenden Übertragungs- und Verteilkapazitäten im Stromnetz und einem großen Zuwachs an batterieelektrischen Fahrzeugen droht vielerorts eine Überbelastung der Netze. Dieses Problem wird durch einen forcierten Aufbau von elektrischen Wärmepumpen weiter verschärft und ließe sich durch den Einsatz von mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen abschwächen.⁵³

Im Fall der Pkw wird sich Wasserstoff etablieren, sobald die Rahmenbedingungen für einen Massenmarkt geschaffen werden – insbesondere ein dichtes Netz an Wasserstoff-Tankstellen. Aller Voraussicht nach werden Wasserstoff- und Batterie-Fahrzeuge nebeneinander existieren und sich gegenseitig ergänzen. Die kumulativen Investitionen, die für den Aufbau der Infrastruktur für Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge notwendig sind, werden in Abbildung 19 dargestellt.

Kumulierte Investitionen (in Mrd. Euro)

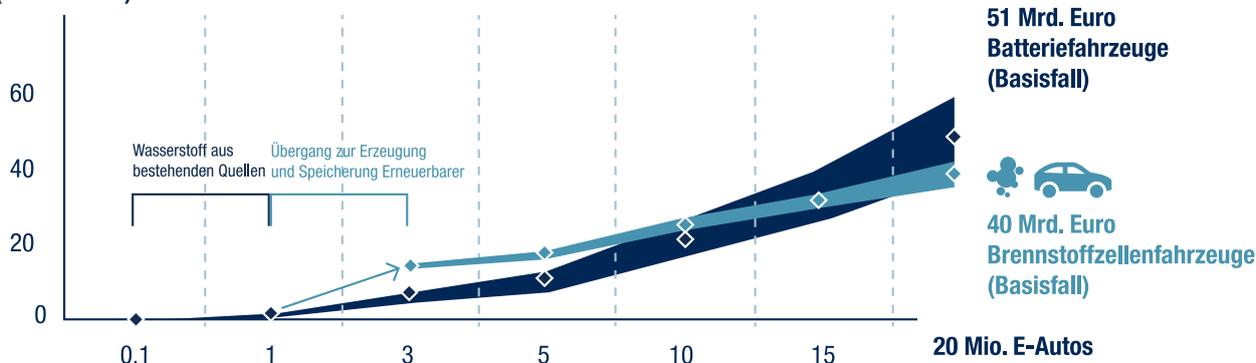


Abbildung 19: Vergleich der kumulativen Investitionen des Infrastrukturaufbaus für Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge
Quelle: M. Robinius, et al., „Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles“, 2018. Online abrufbar unter: https://www.researchgate.net/publication/322698780_Comparative_Analysis_of_Infrastructures_Hydrogen_Fueling_and_Electric_Charging_of_Vehicles [letzter Zugriff am 05.10.2020]

Die Brennstoffzelle als Antriebsform spielt im Gegensatz zu Batterieantrieben ihre Vorteile dann aus, wenn lange Strecken zurückgelegt oder schwere Güter transportiert werden müssen. Darüber hinaus ist die geografische Lage von hoher Bedeutung. Kälte und Hitze können Leistung und Lebensdauer einer Batterie negativ beeinflussen. In besonders bergigem Terrain ist eine Brennstoffzelle von Vorteil, weil sie über deutlich mehr Leistungsreserven verfügt.

Für den öffentlichen Nahverkehr sind Brennstoffzellen aus mehreren Gründen besonders geeignet. Bei Bussen kommen hohes Gewicht und hohe tägliche Laufleistungen zusammen, wodurch der Einsatz von Batterieantrieben nur in Ausnahmefällen umsetzbar ist. Im Bahnverkehr werden bereits wasserstoffbetriebene Züge auf Regionalstrecken erprobt. Bisher fahren auf vielen Abschnitten immer noch Dieselloks: Im Jahr 2015 waren 43 Prozent des gesamten deutschen Streckennetzes nicht elektrifiziert.⁵⁴ Züge mit Wasserstoff-Antrieb sind eine schnell umsetzbare Alternative zum Bau von Oberleitungen an 17.000 Kilometern Schienenwegen.

Im internationalen Flugverkehr schließlich existiert ein gewaltiges Potenzial zur Treibhausgas-Vermeidung. Weltweit war die Luftfahrt 2017 für 859 Millionen Tonnen CO₂ verantwortlich.⁵⁵ Aus Wasserstoff lässt sich für Flugzeuge synthetisches Kerosin erzeugen, das mit bestehenden Antrieben voll kompatibel ist. PtX-Kraftstoffe auf Basis von Wasserstoff können somit zeitnah klimaneutrales Reisen ermöglichen.

4.5. Stromerzeugung

Die Stromerzeugung aus Wind und Sonne benötigt zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit bei Flaute und Dunkelheit einen Partner: schnell reagierende Gaskraftwerke. Wasserstoff übernimmt dabei eine unverzichtbare Funktion als Langzeitspeicher für elektrische Energie. Die Rückverstromung von Wasserstoff ist schon heute leistbar und wird schrittweise zunehmen. Gaskraftwerke müssen daher schon früh zukunftssicher ausgelegt werden. Deshalb sollten sie zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) fähig und H₂-ready sein.

- » Durch den Umstieg von Kohle auf Gas lassen sich sofort große Mengen an Treibhausgasemissionen vermeiden.
- » Moderne Gas- und Blockheizkraftwerke zeichnen sich durch niedrige Treibhausgasemissionen aus und können durch ihre flexible Betriebsweise effizient mit erneuerbaren Energien kombiniert werden.

Für Wasserstoff bieten sich vielseitige Verwendungsmöglichkeiten in allen Sektoren an. Zur Stromerzeugung sollte der Einsatz von Wasserstoff dennoch vorerst vermieden werden, weil er in anderen Bereichen früher Potenziale zur CO₂-Minderung bietet. Eine Treibhausgassenkung im Stromsektor lässt sich schneller mit dem Fuel Switch von Kohle zu Erdgas vollziehen. In einem zweiten Schritt wird dann Erdgas durch Wasserstoff und weitere klimaneutrale Gase ersetzt.

Schon heute müssen die Weichen für den schnellen Austausch von Kohlekraftwerken durch Gaskraftwerke und den folgenden kontinuierlichen Wechsel hin zu Wasserstoff und anderen klimaneutralen Gasen gestellt werden. Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist eine hocheffiziente Technik, die den Einsatz von Primärenergie gleich welcher Art reduziert. KWK-Anlagen produzieren gleichzeitig Strom und nutzbare Wärme für eine Vielzahl von Anwendungen und erreichen so hohe Wirkungsgrade. Neue Erzeugungskapazitäten für gesicherte Leistung sollten deshalb grundsätzlich als KWK-Anlagen vorgesehen werden und für den späteren Content

Switch H₂-ready sein. Langfristig kann überschüssiger Strom aus erneuerbaren Energien dann als Wasserstoff gespeichert und in zukunftsfähigen Kraftwerken wieder verstromt werden.

Für die Strompreise hätte die Nutzung von Wasserstoff in Kraftwerken einen stabilisierenden Effekt. Bei sehr niedrigen oder gar negativen Börsenstrompreisen lässt sich die überschüssige Elektrizität sinnvoll zur Herstellung von Wasserstoff verwenden. Bei Preisspitzen im Stromhandel hat die erneute Verstromung von H₂ eine entlastende Wirkung. Power-to-Gas ist deshalb die entscheidende Technologie, um die Strompreise in einem System mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien zu verstetigen.

Kurzzusammenfassung

Klima

- » H₂ ist das perfekte Energiegas. Es kann an etlichen Stellen eingesetzt werden, um den CO₂-Ausstoß zu senken.
- » Durch eine Beimischung von H₂ im Gasnetz kann deutlich schneller (und realistischer) eine CO₂-Reduktion im Wärmesektor erfolgen als durch Dämmung allein.
- » Indem Wasserstoff fossile Brennstoffe in energieintensiven Industrieprozessen ersetzt, lassen sich große Mengen CO₂ einsparen.
- » Für planbaren Schwerlastverkehr und ÖPNV kann ein grundlegendes H₂-Tankstellennetz aufgebaut werden, das dann sukzessive erweitert wird. Dadurch lässt sich für Lkw/ÖPNV kurzfristig und für Pkw langfristig CO₂ einsparen.

Wirtschaft

- » Die Anpassung bestehender Strukturen an H₂ und technologische Neuentwicklungen bieten die Möglichkeit zur Etablierung neuer und zur Aufwertung bestehender Wertschöpfungsketten.
- » Bei einer Beimischung von 20 Volumenprozent Wasserstoff lassen sich bestehende Gasheizungen weiter nutzen, sodass keine Umstellungskosten anfallen.
- » Energieintensive Industrien erhalten durch den Einsatz von H₂ langfristig Planungssicherheit.
- » Die Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben bietet großes Potenzial für die deutsche Automobilindustrie.



Quellen

- 41 DVGW (2020): H2VorOrt. Wasserstoff über die Gasverteilnetze für alle nutzbar machen. Online abrufbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/h2vorort-wasserstoff-gasverteilnetz-dvgw-broschuere.pdf> [letzter Zugriff am 16.11.2020]
- 42 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Energiedaten: Gesamtausgabe, Aktualisierung vom 22.6.2020. Online unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls.xlsx> [letzter Zugriff am 16.11.2020]
- 43 Prognos, 2020: Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Online abrufbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/klimagutachten.pdf?__blob=publicationFile&v=8 [letzter Zugriff am 30.07.2020]
- 45 DVGW, 2018: Die Rolle von Gas im zukünftigen Energiesystem. Online abrufbar unter: <https://www.dvgw.de/der-dvgw/aktuelles/presse/presseinformationen/dvgw-presseinformation-vom-14022019-studie-zum-gruengas-potenzial/> [letzter Zugriff am 28.07.2020]
- 46 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Energiedaten: Gesamtausgabe, Aktualisierung vom 22.6.2020. Online unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls.xlsx> [letzter Zugriff am 16.11.2020]
- 47 dena, 2018: Factsheet Stahlproduktion & industrielle Prozesswärme. Online abrufbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/Factsheet_PowerFuels_Stahlproduktion_Industrielle_Prozesswaerme.pdf [letzter Zugriff am 29.07.2020]
- 48 Ebd.
- 49 dena, 2018: Factsheet Chemische Industrie. Online abrufbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/Factsheet_PowerFuels_Chemische_Industrie.pdf [letzter Zugriff am 29.07.2020]
- 50 Details siehe TRGE (G 800-2)
- 51 Umweltbundesamt, 2020: Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 Prozent zurück. Pressemitteilung vom 16.3.2020. Online abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-gingen-2019-um-63-prozent> [letzter Zugriff am 29.07.2020]
- 52 LNG steht für Liquefied Natural Gas und bezeichnet ursprünglich verflüssigtes Erdgas. LNG lässt sich aber auch synthetisch und klimaneutral aus Wasserstoff und einer Kohlenstoffquelle herstellen.
- 53 Regionale Auswirkungen auf die Netzstabilität durch den steigenden Einsatz von Wärmepumpen sowie der Zunahme von Elektro-Mobilität sind derzeit Gegenstand von Untersuchungen des DVGW.
- 54 NOW, 2016: Ergebnisbericht Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene. Online verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20160701-bmwi-studie-untersucht-wirtschaftliche-rechtliche-und-technische-voraussetzungen-fuer-den-einsatz-von-brennstoffzellenantriebswagen-im-zugverkehr/h2-schiene_ergebnisbericht_online.pdf [letzter Zugriff am 29.07.2020]
- 55 dena, 2018: Factsheet Flugverkehr. Online abrufbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/Factsheet_PowerFuels_Flugverkehr.pdf [letzter Zugriff am 30.07.2020]



Kapitel 5

Zusammenfassung

Wasserstoff und klimaneutrale Gase sind zentrale Säulen für das nachhaltige Energiesystem der Zukunft. Vielseitig einsetzbar kann Wasserstoff Sektorengrenzen überwinden, einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz leisten und neue Impulse für die wirtschaftliche Entwicklung und Resilienz Deutschlands setzen.

In dieser Broschüre hat der DVGW entlang der Wertschöpfungsketten von Wasserstoff und klimaneutralen Gasen gezeigt, wo genau die Potenziale für Klimaschutz und Wirtschaft liegen, wenn sich die Politik zu einem technologieoffenen und wissenschaftlich basierten Ansatz entschließt. Es wurde herausgestellt, dass durch die Nutzung bestehender Assets – insbesondere der Gasfernnetze und -verteilnetze – erste Potenziale bereits kurzfristig realisiert werden können. Diese können durch den weiteren Ausbau der Netze noch weiter gesteigert werden. Klimaneutrale Gase können somit einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele und zur wirtschaftlichen Entwicklung Deutschlands leisten.

Insbesondere in den Anwendungssektoren Wärme, Industrie, Mobilität und Stromerzeugung wird deutlich, welcher Beitrag kurz-, mittel- und langfristig durch Wasserstoff und klimaneutrale Gase möglich ist. Der DVGW setzt sich für eine Umsetzung ein, die sich entlang der Nutzung und Weiterentwicklung der Gasnetze – Ferntransportnetze und Verteilnetze gleichermaßen – orientiert. Diese Assets sollten genutzt werden, um Investitionen in die Bahnen zu lenken, in denen sie die größte und schnellste Wirkung für den Klimaschutz und einen wirtschaftlichen Impuls leisten können. Besonderes Augenmerk ist auf die Realisierung eines Transformationspfades zu legen, der sich durch die richtige Reihenfolge der Zwischenschritte auszeichnet. Wasserstoff kann somit seine klimaschützende Wirkung zu den niedrigsten volkswirtschaftlichen Gesamtkosten entfalten. So werden Klima- und Wirtschaftspolitik vereinbar.

Die Politik kann durch eine gezielte Förderkulisse für Wasserstoff Wirtschaft und Umwelt gleichzeitig unterstützen. Dafür muss der richtige politische Rahmen gesetzt werden. Der DVGW setzt sich dafür ein, Wasserstoff als Energiegas ins Energiewirtschaftsgesetz aufzunehmen. Für einen schnellen Markthochlauf kann insbesondere ein Förderrahmen helfen, der Anreize für Investitionen in die H₂-ready-Infrastruktur schafft und die Kostendegression der Wasserstoffproduktion durch das Beliefern des Wärmemarkts nutzt.

Deutschland ist auf dem Weg hin zu einer klimaneutralen Wirtschaft und Gesellschaft. Ein großer Schritt dorthin ist der sinnvolle, großflächige Einsatz von Wasserstoff und anderen klimaneutralen Gasen als Ersatz für Kohle und Öl. Der DVGW möchte mit seiner über 160-jährigen Erfahrung als Regelsetzer im Gas- und Wasserfach auf diesem Gebiet Wegbegleiter und Wegführer für Deutschland sein.

Glossar

Biomethan: Methan, das nicht fossilen Ursprungs ist, sondern aus biogenen Stoffen erzeugt wird

Blauer Wasserstoff: Wasserstoff, der durch Dampfreformierung von Erdgas hergestellt wird. Das dabei anfallende CO₂ wird abgetrennt und gespeichert (Carbon Capture and Storage, CCS) oder genutzt (Carbon Capture and Usage, CCU). Blauer Wasserstoff ist klimaneutral.

Brennwertkessel: Moderne Heizkessel, entweder mit Öl oder Gas betrieben, mit hohem Wirkungsgrad. In Deutschland waren 2019 rund 7,5 Millionen Brennwertkessel verbaut.

Carbon Capture and Storage (CCU): Bei der Herstellung von blauem Wasserstoff fällt CO₂ an. Dieses wird vor dem Austritt in die Atmosphäre abgetrennt. Anschließend wird es in unterirdische Lagerstätten transportiert. Dabei gelangt kein CO₂ in die Atmosphäre. CCS wird im Pariser Klimavertrag als Ausgleichsmechanismus anerkannt.

Carbon Capture and Usage (CCU): Wenn blauer Wasserstoff hergestellt wird, fällt CO₂ an. Dieses wird vor dem Austritt in die Atmosphäre abgetrennt. Anschließend wird es in weiteren chemischen Prozessen eingesetzt. CCU wird im Pariser Klimavertrag als Ausgleichsmechanismus anerkannt.

Content Switch: Kontinuierliche Erhöhung des Anteils klimaneutraler Gase in den Gasinfrastrukturen, und dadurch schrittweise Erreichung von Klimaneutralität bei der Nutzung von Gas

Dampfreformierung: Chemischer Prozess, durch den Wasserstoff aus Erdgas gewonnen wird (siehe blauer Wasserstoff und grauer Wasserstoff)

Elektrolyse: Chemischer Prozess zur Herstellung von Wasserstoff durch Aufspaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff (vgl. grüner Wasserstoff)

Flüssigerdgas (liquefied natural gas, LNG):

LNG entsteht durch Abkühlung von Erdgas auf -162 °C bei Umgebungsdruck. LNG weist nur etwa ein Sechshundertstel des Volumens von gasförmigem Erdgas auf und eignet sich besonders gut als Kraftstoff in der Schifffahrt und im Schwerlastverkehr.

Fuel Switch: Austausch von Kohle und Erdöl durch Erdgas in Produktionsprozessen. Durch den Fuel Switch lassen sich in kurzer Zeit signifikante Klimaschutzeffekte erzielen, ohne einen kostenaufwendigen und umfangreichen Ausbau von Infrastrukturen – die vorhandenen Gasinfrastrukturen können hierfür genutzt werden.

Grauer Wasserstoff: Wasserstoff, der überwiegend durch die Dampfreformierung von Erdgas hergestellt wird

Grüner Wasserstoff: Wasserstoff, der durch Elektrolyse unter Einsatz von grünem Strom, etwa aus Fotovoltaik oder Windkraftanlagen hergestellt wird und klimaneutral ist

H₂-Backbone: Geplantes überregionales und transnationales Fernleitungsnetz zum Transport von Wasserstoff, das bis 2040 fertiggestellt sein soll. Der H₂-Backbone basiert zu 90 Prozent auf dem bestehenden Erdgasnetz und soll nach Fertigstellung ca. 5.900 Kilometer in Deutschland umfassen.

Kavernenspeicher: Gasspeicher in ehemaligen Salzstöcken. Sie können 100 Prozent Wasserstoff aufnehmen.

Modal Switch: Intelligente, intersektorale Verknüpfung der bestehenden Infrastrukturen

Niedertemperaturkessel: Alte Heizkessel, entweder mit Öl oder mit Gas betrieben, mit niedrigem Wirkungsgrad. In Deutschland sind noch rund 11,8 Millionen Niedertemperaturkessel im Einsatz.

Porenspeicher: Gasspeicher, die feinste Hohlräume im Gestein nutzen, entweder in ausgeförderten Erdöl- und Erdgaslagerstätten oder in Aquiferen. Porenspeicher lassen sich eins zu eins für synthetisches Methan sowie Biomethan nutzen, an der Beimischungsquote für Wasserstoff wird derzeit noch geforscht.

Pyrolyse: Chemischer Prozess, bei dem Wasserstoff und fester Kohlenstoff, jedoch kein CO₂ anfällt (vgl. türkiser Wasserstoff)

Synthesegase: Gase, die in Bezug auf ihre Zusammensetzung designed werden können und Wasserstoff und andere brennbare Bestandteile, etwa Kohlenstoff, enthalten. Das wirtschaftlich bedeutendste Synthesegas ist synthetisches Methan (CH₄).

Türkiser Wasserstoff: Wasserstoff, der durch Pyrolyse von Erdgas entsteht. Dabei fällt kein CO₂ an, sondern fester Kohlenstoff. Türkiser Wasserstoff ist klimaneutral.

Literaturverzeichnis

Acatech (Hrsg), 2018: CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie (acatech POSITION). Online abrufbar unter: <https://www.acatech.de/publikation/ccu-und-ccs-bausteine-fuer-den-klimaschutz-in-der-industrie-analyse-handlungsoptionen-und-empfehlungen/> [letzter Zugriff am 29.09.2020]

Air Liquide, 2019: Cryocap™ H₂. A Carbon Capture technology for Hydrogen production units. Online abrufbar unter: https://www.engineering-airliquide.com/sites/activity_eandc/files/2019/11/13/air-liquide-e-c-cryo-cap-h2-november-2019.pdf [letzter Zugriff am 22.07.2020]

BASF (2019): New Process for clean Hydrogen.

BFI: Me²H₂-Methane pyrolysis. Online abrufbar unter: <http://www.bfi.de/en/projects/mephy-methane-pyrolysis/> [letzter Zugriff am 05.10.2020]

Bundesnetzagentur, 2019: Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen. Erstes Quartal 2019. Online abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Quartalsbericht_Q1_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [letzter Zugriff am 29.09.2020]

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt (2019): Monitoringbericht 2019. Online abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Monitoringbericht_Energie2019.pdf [letzter Zugriff am 16.11.2020]

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2016): Carbon2Chem. Online abrufbar unter: <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/carbon2chem.php> [letzter Zugriff am 03.11.2020]

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Energiedaten: Gesamtausgabe, Aktualisierung vom 22.6.2020. Online abrufbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls.xlsx> [letzter Zugriff am 16.11.2020]

Dena, 2018: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Online abrufbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf [letzter Zugriff am 22.07.2020]

Dena, 2018: Factsheet Stahlproduktion & industrielle Prozesswärme. Online abrufbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/Factsheet_PowerFuels_Stahlproduktion_Industrielle_Prozesswaerme.pdf [letzter Zugriff am 29.07.2020]

Dena, 2018: Factsheet Flugverkehr. Online abrufbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/Factsheet_PowerFuels_Flugverkehr.pdf [letzter Zugriff am 30.07.2020]

Diermann, Ralph (2020): Methan und Hitze für den Klimaschutz. Online abrufbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/wasserstoff-erdgas-co-1.4935847> [letzter Zugriff am 08.12.2020]

DVGW, 2011: Bewertung der Energieversorgung mit leitungsgebundenen gasförmigen Brennstoffen im Vergleich zu anderen Energieträgern. Online abrufbar unter: <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsberichte-g-50409-teile-i-und-ii/> [letzter Zugriff am 28.07.2020]

DVGW, 2018: Die Rolle von Gas im zukünftigen Energiesystem. Online abrufbar unter: <https://www.dvgw.de/der-dvgw/aktuelles/presse/presseinformationen/dvgw-presseinformation-vom-14022019-studie-zum-gruen-gas-potenzial/> [letzter Zugriff am 28.07.2020]

DVGW (2020): Stellungnahme vom 15. Oktober 2020 zur Frage der Befreiung von PtG-Anlagen von der EEG-Umlage im Rahmen der Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften. Online abrufbar unter: https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/aktuelles/stellungnahmen/dvgw-stellungnahme_eeg-umlage.pdf [letzter Zugriff am 07.12.2020]

DVGW, 2020: H₂ im Netz Voruntersuchungen zu Gasbeschaffheitsaspekten bei Transport und Verteilung von Wasserstoff mit Hilfe der bestehenden Erdgasinfrastruktur (G 201921). Online abrufbar unter: <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsprojekt-h2-im-netz/>

DVGW (2020): H₂VorOrt. Wasserstoff über die Gasverteilnetze für alle nutzbar machen. Online abrufbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/h2vorort-wasserstoff-gasverteilnetz-dvgw-broschuere.pdf> [letzter Zugriff am 16.11.2020]

Enagás, et al. (Hrsg.), 2020: European Hydrogen Backbone: how a dedicated hydrogen infrastructure can be created. Online abrufbar unter: https://www.fluxys.com/-/media/project/fluxys/public/corporate/fluxyscom/news-press-events/fluxys-belgium/2020/european-backbone-plan/20200715_european-hydrogen-backbone_report.pdf [letzter Zugriff am 01.10.2020]

Europäische Kommission, 2020: Mitteilung der Europäischen Kommission COM (2020) 456. Die Stunde Europas – Schäden beheben und Perspektiven für die nächste Generation eröffnen. Online abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0456&from=DE> [letzter Zugriff am 22.07.2020]

FNB Gas, 2020: Fernleitungsnetzbetreiber veröffentlichen Karte für visionäres Wasserstoffnetz. Pressemitteilung vom 28.1.2020. Online abrufbar unter: <https://www.fnb-gas.de/fnb-gas/veroeffentlichungen/pressemitteilungen/fernleitungsnetzbetreiber-veroeffentlichen-karte-fuer-visionaeres-wasserstoffnetz-h2-netz/> [letzter Zugriff am 15.07.2020]

FNB Gas, 2020: Netzentwicklungsplan Gas 2020–2030. Konsultation. Stand 01.07.2020. Online abrufbar unter: https://www.fnb-gas.de/media/2020_04_30_fnb_gas_2020_nep_konsultation_de.pdf [letzter Zugriff am 16.07.2020]

Fraunhofer ISE (Hrsg.) 2019: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Online abrufbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf [letzter Zugriff am 16.11.2020]

Fraunhofer ISE (u.a.), 2019: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. S. 41, 47. Online abrufbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-> [letzter Zugriff am 29.09.2020]

Frontier Economics, 2018: International Aspects of a Power-to-X Roadmap. Online abrufbar unter: <https://www.frontier-economics.com/media/2642/frontier-int-ptx-roadmap-stc-12-10-18-final-report.pdf> [letzter Zugriff am 22.07.2020]

Industriekreis CNG, 2020: Anrechenbarkeit nachhaltiger Kraftstoffe auf Flottengrenzwerte. Online abrufbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/aktuelles/presse/2020-06-17-Gemeinsame-Pressemitteilung-CNG-Industriekreis-Flottengrenzwerte.pdf> [letzter Zugriff am 09.11.2020]

Initiative Erdgasspeicher (INES), 2020: Gasspeicherkapazitäten. Online abrufbar unter: <https://erdgasspeicher.de/erdgasspeicher/gasspeicherkapazitaeten/> [letzter Zugriff am 08.12.2020]

International Energy Agency, 2019: World Energy Outlook 2019. Druckfassung beziehbar unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019> [letzter Zugriff am 22.07.2020]

Norwegische Botschaft in Deutschland. Online abrufbar unter: <https://www.norway.no/de/germany/norwegen-germany/aktuelles-veranstaltungen/aktuelles/weltweit-erste-co2-lagerstatte-feiert-jubilaum--und-weist-in-die-zukunft/> [letzter Zugriff am 05.10.2020]

NOW, 2016: Ergebnisbericht Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene. Online abrufbar unter: https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20160701-bmvi-studie-untersucht-wirtschaftliche-rechtliche-und-technische-voraussetzungen-fuer-den-einsatz-von-brennstoffzellentriebwagen-im-zugverkehr/h2-schiene_ergebnisbericht_online.pdf [letzter Zugriff am 29.07.2020]

Northern Lights Projects: About the project. Online abrufbar unter: <https://northernlightscs.com/en/about> [letzter Zugriff am 05.10.2020]

OGE (u.a.), 2020: Fernleitungsnetzbetreiber stellen Plan für Europäischen Wasserstoff Backbone vor. Pressemitteilung vom 17.07.2020. Online abrufbar unter: <https://oge.net/de/pressemitteilungen/2020/fernleitungsnetzbetreiber-stellen-plan-fuer-europaeischen-wasserstoff-backbone-vor> [letzter Zugriff am 22.07.2020]

Prognos, 2020: Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Online abrufbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/klimagutachten.pdf?__blob=publicationFile&v=8 [letzter Zugriff am 30.07.2020]

PÖYRY management consulting, 2019: Hydrogen from natural gas –The key to deep decarbonization. Online abrufbar unter: https://www.poyry.com/sites/default/files/zukunft_erdgas_key_to_deep_decarbonisation_0.pdf [letzter Zugriff am 01.10.2020]

Schneider et.al., 2020: Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse. Online abrufbar unter: https://www.dvgw-ebi.de/download/2020_Schneider_CIT_Erdgaspolyolyse_Open_Access.pdf [letzter Zugriff am 29.09.2020]

Umweltbundesamt Deutschland, 2020: Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. Online abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung-1990-bis-2018> [letzter Zugriff am 01.10.2020]

Umweltbundesamt 2020: Wasserressourcen und ihre Nutzung. Online abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung#wassernachfrage> [letzter Zugriff am 10.11.2020]

Umweltbundesamt, 2020: Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 Prozent zurück. Pressemitteilung vom 16.03.2020. Online abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-gingen-2019-um-63-prozent> [letzter Zugriff am 29.07.2020]

