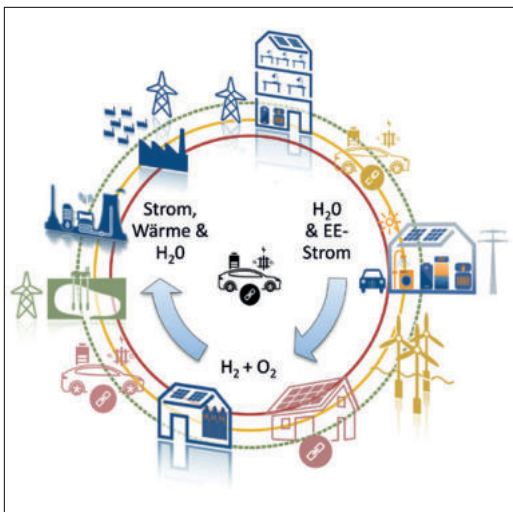


Wasserstoff als Fundament der Energiewende für den Brückenschlag zwischen den Sektoren

Durch fossile Brennstoffe werden derzeit etwa 80% des Weltenergiebedarfes gedeckt. [1] Es ist wissenschaftlicher Konsens, dass die Auswirkungen der resultierenden Treibhausgas-(THG)-Emissionen drastische Folgen für das Klima und das Leben haben werden. [2] Um die globale Erwärmung gemäß Pariser Klimaabkommen auf weniger als 1,5°C zu begrenzen, ist es zwingend notwendig, die Emissionen von fossilem Kohlendioxid (CO₂) stark zu begrenzen bzw. in vielen Bereich vollständig zu vermeiden. [3] In der Konsequenz ist die internationale Gemeinschaft gefordert, einen fundamentalen Wandel in der globalen Energieversorgung zu vollziehen. Dazu ist die Identifizierung von alternativen Energieträgern, die nachhaltig genutzt werden können, eine Kernkomponente. Wasserstoff gilt hier als ein Schlüsselbaustein. Durch den hohen Energiegehalt und die saubere Verbrennung von Wasserstoff, bei der Wasser als Verbrennungsprodukt entsteht, kann man ihn als einen Energievektor betrachten, einen Energie- und Materieträger, der als Speicher und Reaktant genutzt werden kann. [3,4,5,6]

Bislang konnten Primärenergiebedarfe nahezu jederzeit gedeckt werden. Dies ist der Auslegung der derzeitigen Infrastruktur des Energiesystems mit ihren guten Speichereigenschaften für konventionelle, fossile Energieträger und den bisherigen Betriebsweisen geschuldet. Dabei waren die Speicher- und Versorgungspfade bisher eher sektorenisoliert ausgelegt. [7]



Die Umstellung des Energieversorgungssystems auf erneuerbare Energiequellen (EE) stellt das Gesamtsystem vor die Herausforderung, primär die bereitgestellten, fluktuierenden Energiequellen als elektrische Energie zu nutzen, um fossile Ausgangsstoffe zu ersetzen. Dies erfordert eine hohe Effizienz und Flexibilität für ein volkswirtschaftlich attraktives und auf EE basierendes Versorgungssystem. Durch die Kopplung der einzelnen Sektoren (► *Abbildung 1*) lässt sich ein solches System realisieren. Die Kopplung benötigt dazu einen chemischen Energieträger als Zwischenspeicher. Dieser muss in großem Maßstab aus Strom synthetisch herstellbar sein. Wasserstoff ist hierfür eine ideale Option.

Produktion

Auf der Erde kommt Wasserstoff praktisch nicht elementar vor, so dass er durch geeignete Verfahren zunächst aus chemischen Verbindungen gewonnen werden muss.

Dafür steht eine Reihe von Verfahren zur Verfügung. Diese sind in sehr unterschiedlichem Grad nachhaltig, was mit einer Einteilung in unterschiedliche Farbkategorien verdeutlicht werden soll:

- „Grauer Wasserstoff“ wird aus fossilen Rohstoffen gewonnen, die zu erheblichen CO₂-Emissionen führen. Daher ist er für eine nachhaltige Wasserstoffgewinnung nicht geeignet, weil sich so keine Treibhausgas-Emissionen vermeiden lassen. Derzeit werden aber noch etwa 95% des weltweit produzierten Wasserstoffs so gewonnen.
- „Blauer Wasserstoff“ ist grauer Wasserstoff, bei dessen Herstellung jedoch das freigesetzte CO₂ abgetrennt und dauerhaft sicher gespeichert werden muss (engl. Carbon Capture and Storage, CCS).

Abbildung 1

Sektorkopplung in einer wasserstoffbasierten Energiewirtschaft:

Verflechtung von Erzeugern, Verbrauchern und Infrastrukturen

(Quelle: DLR)



DLR
Nadine Jacobs
nadine.jacobs@dlr.de



Dr. Alexander Dyck
alexander.dyck@dlr.de

Fraunhofer IEE
Dr. Tanja Kneiske
tanja.kneiske@iee.fraunhofer.de

Daniel Then
daniel.then@iee.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE
Dr. Tom Smolinka
tom.smolinka@ise.fraunhofer.de

FZ Jülich
Dr. Martin Robinus
martin.robinus@umlaut.com

GFZ
Dr. Peter Pilz
peter.pilz@gfz-potsdam.de

Dr. Conny Schmidt-Hattenberger
cornelia.schmidt-hattenberger@gfz-potsdam.de

IZES
Eva Hauser
hauser@izes.de

KIT
Dr. Frank Graf
frank.graf@kit.edu

Prof. Dr. Thomas Wetzel
thomas.wetzel@kit.edu

ZSW
Markus Jenne
markus.jenne@zsw-bw.de

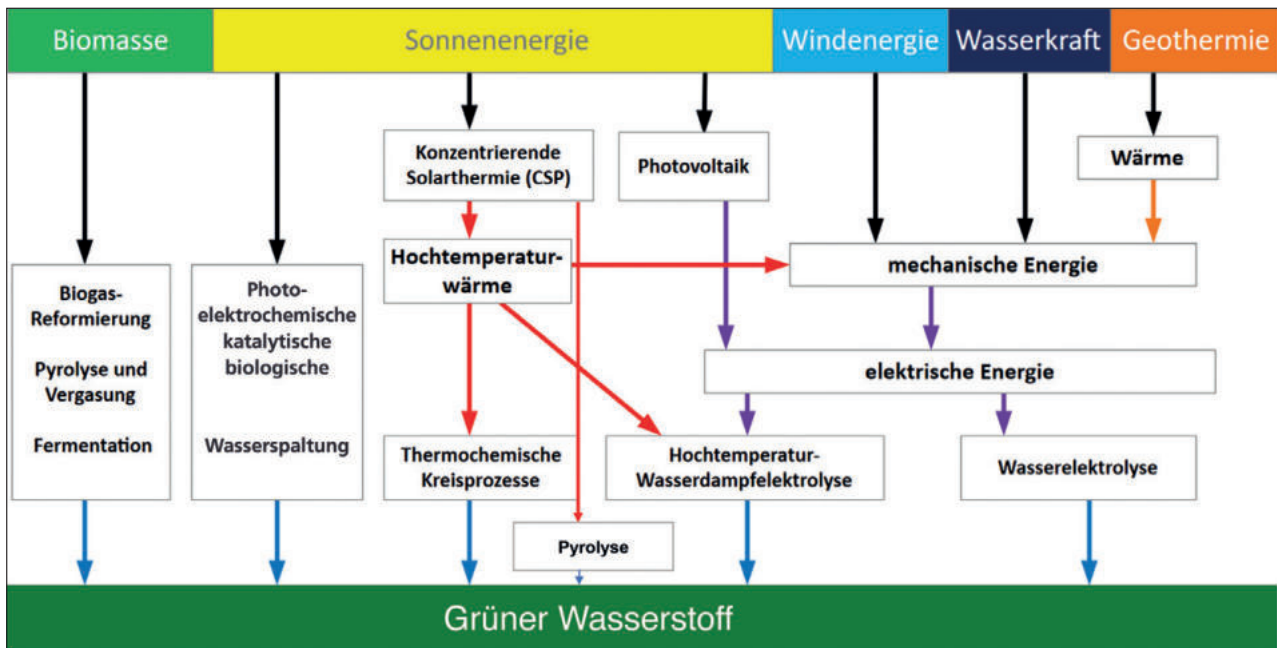


Abbildung 2
Grüner Wasserstoff:
 Verschiedene Pfade für die Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren Energien [8]
 (Quelle: DLR)

- „Türkiser Wasserstoff“ entsteht bei der thermischen Spaltung von Methan, wobei sich fester Kohlenstoff anstatt gasförmigem CO₂ bildet.
 - „Grüner Wasserstoff“ wird nahezu CO₂-neutral aus Biomasse oder CO₂-frei durch Wasserspaltung aus regenerativen Energiequellen hergestellt.
- **Abbildung 2** zeigt die Vielfalt der Wasserstoffproduktionsverfahren aus den verschiedenen erneuerbaren Energien.

Die großskalige und zentrale Produktion von Wasserstoff scheint in Ländern attraktiv zu sein, die ein großes Angebot an EE aufweisen sowie über geeignete Flächen verfügen. Daher sind geopolitische Aspekte für die Versorgungssicherheit von morgen ein wichtiger Gesichtspunkt. Der Import von Wasserstoff als ein Baustein der Wasserstoffwirtschaft scheint technologisch für die Speicherung und den Transport kein Hindernis zu sein (► **Abbildung 3**).

Blauer und türkiser Wasserstoff, bei dem die anfallenden Treibhausgase bzw. fester Kohlenstoff zwar vollständig abgetrennt werden könnten, wären dennoch nicht vollständig CO₂-neutral, da bei der Förderung fossiler Energieträger bereits Treibhausgase freigesetzt werden. [9]

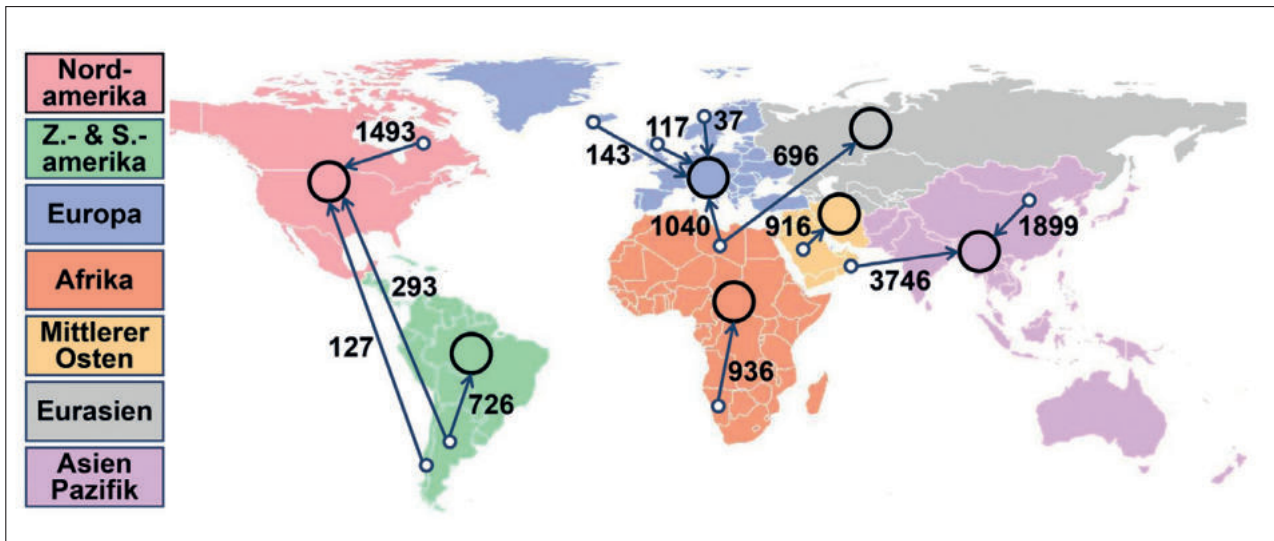
In einigen Ländern wird auch die Wasserstoffherzeugung mithilfe von Kernenergie in Betracht gezogen. Allerdings ergibt sich hier neben Akzeptanzproblemen und der Frage der Endlagerung der radioaktiven Abfälle auch ein Ressourcenproblem, da auch radioaktives Spaltmaterial eine endliche Ressource ist.

Ausschließlich mit grünem Wasserstoff lässt sich eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft aufbauen. Bei der Produktion von grünem Wasserstoff werden lediglich Wasser, nachwachsende Biomasse und EE eingesetzt. Das Potenzial in Deutschland ist allerdings u. a. durch das verfügbare Flächenangebot beschränkt. Bei einem massiven weiteren Ausbau insbesondere der Windenergieanlagen wird voraussichtlich mit abnehmender Akzeptanz zu rechnen sein. Dies belegt bereits die derzeitige Krise in der Windkraft. [10]

Speicherung

Die Speicherung von Wasserstoff über längere Zeiträume stellt keine Herausforderung dar. Bereits Mitte des 20. Jahrhunderts bewährte sich die untertägige Speicherung von Stadtgas (bis zu 60% Wasserstoffgehalt) zur Energieversorgung für Heiz- und Beleuchtungszwecke. In porösen Lagerstätten und künstlich angelegten Salzkavernen sind heute Erdgasreserven gespeichert [13,14].

Ein begrenzender Faktor ist dabei die Verfügbarkeit von geeigneten geologischen Formationen, idealerweise in der Nähe zur EE-Erzeugung [15]. Als geeignet gilt eine Formation, wenn die Dichtigkeit gewährleistet ist und die Belastung durch Verunreinigungen, wie z. B. organischem Material, minimal ist. Dabei muss sich die Entwicklung des Kavernenspeichers (inkl. Planung, Aussolung, Verbringung der Sole und Verwahrung) in einem wirtschaftlich vertretbaren Kostenrahmen befinden. Neben Salzkavernen eignen sich auch erschöpfte Öl- und Gasfelder für die industrielle Speicherung von Wasserstoff [16].



Transport

Für den Transport bieten sich mittelfristig auf lokaler/ regionaler Ebene drei Optionen an [17]:

- hoch komprimierter gasförmiger Wasserstoff mittels Lkw, Bahn und Schiff
- verflüssigter Wasserstoff mittels Lkw, Bahn und Schiff
- leicht komprimierter gasförmiger Wasserstoff durch Pipelines

Die Wahl der Transportform ist abhängig von der Entfernung zwischen Produktions- und Nutzungsstandort, dem Wasserstoffbedarf, standortspezifischen Bedingungen und wirtschaftlichen Kriterien:

- Komprimierter, gasförmiger Wasserstoff (GH₂) erzeugt die geringsten Kosten für kürzere Entfernungen; für größere Mengen sind Pipelines vorteilhaft.
- Bei größeren Entfernungen von mehr als 300 km kann der Flüssiggas-Transport (LH₂) eine wirtschaftliche Alternative sein. Ist der Wasserstoff bereits am Produktionsort flüssig verfügbar, ist diese Transportform auch für kürzere Entfernungen wirtschaftlich.
- Bei der Produktion von Ammoniak oder auch in Raffinerien wird Wasserstoff zentral und großmaßstäblich in der Regel vor Ort oder aber in der Nähe zu weiteren Verbrauchern produziert und dann über Pipelines verteilt. Diese Infrastruktur für die Großindustrie ist heute bereits vorhanden, so dass ihr Beitrag zu den gesamten H₂-Bereitstellungskosten gering ist.

Die dezentrale Nutzung von Wasserstoff erfordert im Gegensatz dazu oft mehr als 50% der gesamten Wasserstoffbereitstellungskosten auf der letzten Meile. [5]

Verbrauch

Die klassischen Verbrauchergruppen in der Energiewirtschaft sind die Bereiche Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD), Industrie, Verkehr und die privaten Haushalte.

Die Energieformen der Verbräuche sind Wärme, Elektrizität und chemische Energieträger.

Die verbraucherspezifischen Verteilstrukturen der unterschiedlichen Energieträger für die verschiedenen Sektoren sind größtenteils voneinander getrennt und auf die hauptsächlich fossilen Primär- und nachgelagert Sekundärenergieträger und deren Lager-eigenschaften ausgelegt. (► *Abbildung 4a*)

Durch die Gegenüberstellung der immensen Bedarfe aus derzeit noch unterschiedlichen Primärenergieträgern und den installierten Kapazitäten und Erzeugungsmengen werden die technischen Herausforderungen eines auf EE basierenden Energiesystems ersichtlich. So lieferten die im Jahr 2018 in Deutschland installierten 118 Gigawatt Leistung aller EE-Erzeuger 432 TWh Energie [18,19]. Dem gegenüber stehen aufsummierte Endenergieverbräuche von 2.500 TWh (► *Abbildung 4b*) [20]. Anhand der Kennzahlen wird der bedeutende Anteil am Gesamtverbrauch durch Verkehr und Haushalte deutlich. Gleichfalls erkennbar sind die Herausforderungen, wenn sektorenübergreifend die erforderlichen Energiemengen bereitgestellt werden müssen [17].

Abbildung 3

Globale Transportwege für Grünen Wasserstoff [11,12]:
Die Pfeile geben die Wasserstoffströme in MtH₂/a (Megatonnen) an.

(Quelle: FZ Jülich)

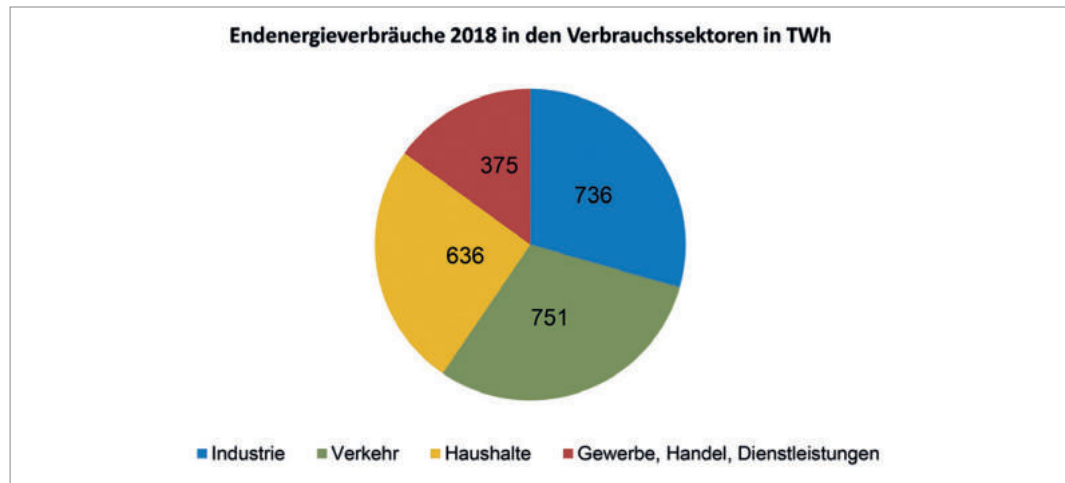
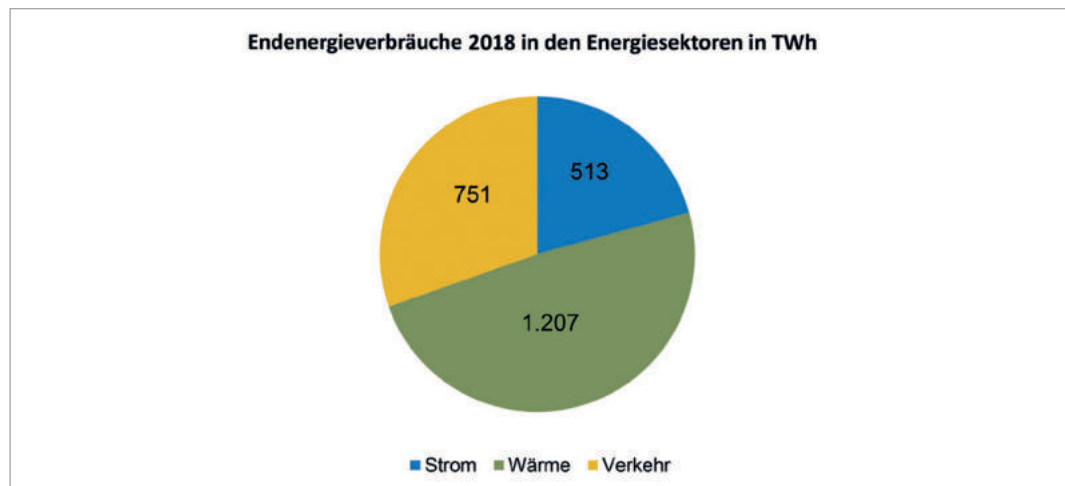


Abbildung 4
**Endenergiebedarfe
 2018 in Deutschland
 (in TWh):**
 oben: nach
 Verbrauchssektoren



unten:
 nach Energiesektoren
 (Quelle: DLR)

Infrastruktur

Perspektivisch kann die bereits existierende Erdgasinfrastruktur (47 Erdgasspeicher mit einer Gesamtkapazität von 232TWh [22] zuzüglich des Erdgasnetzes mit einer Speicherkapazität von 130TWh) die Transport- und Speicheraufgabe für Wasserstoff übernehmen (► *Abbildung 5*).

Sollte Erdgas vollständig durch Wasserstoff substituiert werden, würde die Speicherkapazität ohne weitere Anpassungen etwa 120TWh betragen [23].

Der Neubau und die Umwidmung von bestehender Infrastruktur bieten das Potenzial, die Erzeugung, Speicherung und Nachfrage miteinander zu verbinden.

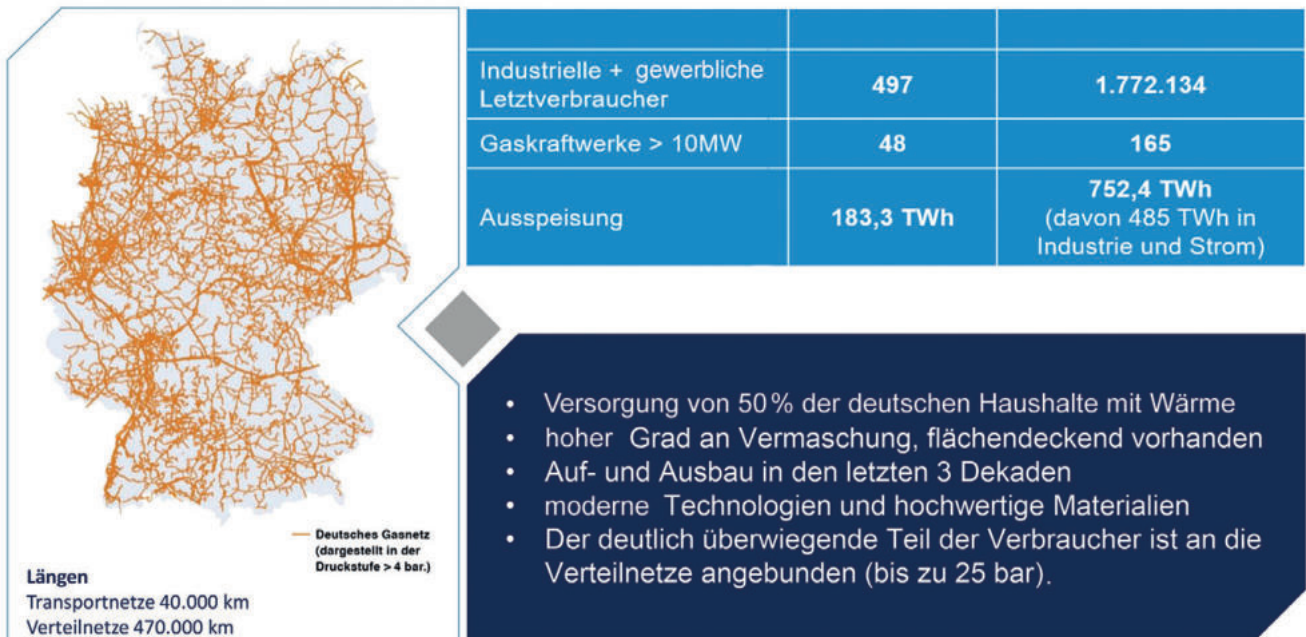
Eine weitere Option ergibt sich durch die Methanisierung von Wasserstoff mittels CO₂ aus der Atmosphäre und die Rückverwandlung in Wasserstoff durch die bereits oben genannten Herstelloptionen zur weiteren Nutzung und Flexibilisierung. Wobei mit jedem Wandlungsschritt auch energetische und stoffliche Verluste einhergehen, so dass ein gesunder

Mix der verschiedenen Pfade je nach Anforderungen und Möglichkeiten zu finden sein wird.

Eine Herausforderung zur sinnvollen und wirtschaftlichen Nutzung ergibt sich auch durch die jeweilige Verwendung des Wasserstoffs und den damit verbundenen geforderten Reinheiten. In ehemaligen Erdgasspeichern gelagerter Wasserstoff könnte mittelfristig durch eingelagerte Fremdstoffe verunreinigt werden. Dies wäre für die Nutzung in der Stahlherstellung unproblematisch, aber der Mobilitätssektor stellt hohe Ansprüche an die Reinheit des Wasserstoffs.

Fazit

Zum Gelingen der Energiewende über alle Sektoren ist es notwendig, die EE in Deutschland massiv auszubauen. Parallel müssen Infrastruktur und Speicher auf die Integration von Wasserstoff als Energieträger und Speichermedium vorbereitet werden. Damit ist ein erfolgreicher Wechsel zu einem sektorengekoppelten Energiesystem auf der Basis von Wasserstoff möglich.



Literaturverzeichnis

[1] J. O. Abe, A. P. I. Popoola, E. Ajenifuja, O. M. Popoola, Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation, International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44, 15072–15086.

[2] Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.

[3] Paris Agreement, United Nations, 2015.

[4] M. Balat, Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems, International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33, 4013–4029.

[5] J. Adolf, C. H. Balzer, J. Louis, U. Schabla, M. Fishedick, K. Arnold, A. Pastowski, D. Schüwer, Energy of the future?: Sustainable mobility through fuel cells and H₂; Shell hydrogen study, Shell Deutschland Oil GmbH, 2017.

[6] P. P. Edwards, V. L. Kuznetsov, W. I. F. David, N. P. Brandon, Hydrogen and fuel cells: Towards a sustainable energy future, Energy Policy, 2008, 36, 4356–4362.

[7] J. Michalski, Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen, Innovation Ministerium für Wirtschaft, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2019

[8] H₂-Studie des DLR: Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende; Teil 1: Technologien und Perspektiven für eine nachhaltige und ökonomische Wasserstoffversorgung; <https://www.dlr.de/content/de/dossiers/2020/wasserstoff.html>

[9] U. R. Fritsche, K. Schmidt, Kurzbericht: Endenergiebezogene Gesamtemissionen für Treibhausgase aus fossilen Energieträgern unter Einbeziehung der Bereitstellungsvorketten, Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e. V. (BGW), Öko-Institut: Darmstadt, 2007

[10] Der Windkraft-Ausbau kann nicht beliebig weitergehen, Handelsblatt GmbH, <https://www.handelsblatt.com/meinung/kommentare/kommentar-der-windkraft-ausbau-kann-nicht-beliebig-weitergehen/24980170.html> (26.03.2020).

[11] Heuser, P.; Grube, T.; Heinrichs, H.; Robinius, M.; Stolten, D. Worldwide Hydrogen Provision Scheme Based on Renewable Energy. Preprints 2020, 2020020100.

[12] Robinius et al. (2020) Wege für die Energiewende, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Energie&Umwelt Bd. 499.

[13] NRW_EnergieAgentur, Hydrogen – the Key to the Overall Energy Turnaround. Production and Application Examples in North Rhine-Westphalia, Dusseldorf, Germany 2014

[14] Stolten, D. and B. Emonts, Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology. 2nd ed. Berlin: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2016.

Abbildung 5
Gastransport und -verteilnetze
spielen eine wichtige Rolle bei der Energieversorgung [21]
(Quelle: DVGW)

- [15] D. Caglayan, N. Weber, H. U. Heinrichs, J. Linßen, M. Robinius, P. A. Kukla, D. Stolten, Technical Potential of Salt Caverns for Hydrogen Storage in Europe, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 45, 6793-6805
- [16] Path to Hydrogen competitiveness. A cost perspective, The Hydrogen Council, 2020
- [17] Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2018, AG Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2020
- [18] Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2018, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2019.
- [19] Energieeffizienz in Zahlen – Entwicklungen und Trends in Deutschland 2019, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2019.
- [20] Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2018, AG Energiebilanzen e. V. (AGEB), 2020.
- [21] <https://www.dvgw.de/themen/energiewende/wasserstoff-und-energiewende/h2vorort/>; 30.11.2020
- [22] Die Marktsituation für Erdgasspeicher in Deutschland, DVGW energie | wasserpraxis, <https://www.energie-wasser-praxis.de/sectorenkopplung/artikel/die-marktsituation-fuer-erdgasspeicher-in-deutschland/> (27.03.2018)
- [23] H₂-Studie des DLR: Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende; Teil 2: Sektorenkopplung und Wasserstoff: Zwei Seiten der gleichen Medaille; <https://www.dlr.de/content/de/dossiers/2020/wasserstoff.html>