

# Grüner Wasserstoff als Schlüsseltechnologie für die europäische Energiewende



**ZSW**  
Maïke Schmidt  
maïke.schmidt@zsw-bw.de

**DBFZ**  
Dr. Franziska Müller-Langer  
franziska.mueller-langer@dbfz.de

Dr. Jörg Kretschmar  
joerg.kretschmar@dbfz.de

**DLR**  
Prof. Dr. Carsten Agert  
carsten.agert@dlr.de

**Fraunhofer IEE**  
Jochen Bard  
jochen.bard@iee.fraunhofer.de

**Fraunhofer ISE**  
Prof. Dr. Christopher Hebling  
christopher.hebling@ise.fraunhofer.de

**FZ Jülich**  
Dr. Heidi Heinrichs  
h.heinrichs@fz-juelich.de

Dr. Martin Robinius  
m.robinius@fz-juelich.de

**ISFH**  
Dr. Raphael Niebelt  
niebelt@isfh.de

**KIT**  
Prof. Dr. Roland Dittmeyer  
roland.dittmeyer@kit.edu

Dr. Frank Graf  
frank.graf@kit.edu

## Einleitung

Wasserstoff als Energieträger der Zukunft ist kein neues Thema in der angewandten Energieforschung: Bereits 1986 erlebte Wasserstoff im Kontext des HYSolar-Projekts, einer deutsch-saudi-arabischen Kooperation zur Technologieentwicklung für solaren Wasserstoff, eine erste Hochphase, die u. a. durch die Auswirkungen der Ölkrise und die offensichtliche Vulnerabilität des Wirtschaftssystems durch Schwankungen und Versorgungsengpässe im Energiemarkt, insbesondere in der Versorgung mit Mineralöl getragen wurde.

Etwa 10 Jahre später im Jahr 1997 kündigte der Automobilkonzern Daimler öffentlichkeitswirksam das erste Brennstoffzellenfahrzeug in Serie für das Jahr 2002 an, ohne jedoch in die entsprechende Umsetzungsphase einzutreten.

Wiederum etwa 10 Jahre später startete die Bundesregierung im Jahr 2007 mit dem Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie eine hochbudgetierte Forschungs- und Entwicklungsinitiative, um die mit einer Wasserstoffindustrie für Deutschland verbundenen Chancen erschließbar zu machen. Im Juni 2020 verabschiedete die Bundesregierung die Nationale Wasserstoffstrategie, kurz darauf folgte die europäische Wasserstoffstrategie.

Was ist heute anders als vor 30 Jahren? Warum wird diese neue Hochphase für grünen Wasserstoff von Dauer sein und was macht Wasserstoff im Jahr 2020 zur Schlüsseltechnologie für die europäische Energiewende?

Mit dem Klimaschutzabkommen von Paris im Jahr 2015 hat die Weltgemeinschaft beschlossen, die globale Erwärmung auf unter 2°C bzw. möglichst unter 1,5°C seit Beginn der Industrialisierung zu begrenzen. Aufgrund mangelnder Fortschritte hinsichtlich der Reduktion der weltweiten Treibhausgasemissionen, der spürbar zunehmenden Bedrohung durch den Klimawandel und den wachsenden öffentlichen Druck, stärkere Klimaschutzmaßnahmen zu ergreifen hat die EU-Kommission im Herbst 2019 als neues Leitbild für Europa das Erreichen der Klimaneutralität bis spätestens 2050 formuliert, verbunden mit der

ehrgeizigen Zielsetzung, weltweit der erste klimaneutrale Kontinent zu werden. Das europäische Klimaschutzgesetz und der europäische „Green Deal“ sind die ersten Schritte zur Umsetzung.

Bisher gingen die europäischen ebenso wie die nationalen Szenarien zwar von einer Verringerung der Treibhausgasemissionen um –80% bis –95% gegenüber 1990 aus, die Maßnahmen ebenso wie die formulierten Zwischenziele zielten jedoch jeweils nur auf eine Minderung von –80%. Der Green Deal hebt nun klar die Handlungsfelder hervor und verdeutlicht, dass die neue Anforderung der Klimaneutralität jetzt auch die Sektoren in den Fokus rücken, die bei einer –80%-Strategie außer den üblichen Effizienzanstrengungen keine größeren strukturellen Änderungen erfahren hätten. Dies ist neben der energieintensiven Grundstoffindustrie (Stahlindustrie, Chemieindustrie, Mineralölwirtschaft, Zementindustrie) auch ein großer Teil des Verkehrssektors, da nunmehr auch der Luftverkehr, die internationale Seeschifffahrt und die nicht elektrifizierbaren Teile des Güterverkehrs adressiert werden müssen. Nur mit grünem Wasserstoff und seinen Folgeprodukten wie synthetischen Kraftstoffen werden die Klimaziele im Verkehrssektor und das Ziel der klimaneutralen Produktion in der Industrie erreichbar sein. Zudem kann grüner Wasserstoff als Speicher eine Beschleunigung der Transformation im Stromsektor unterstützen.

Die rasante Entwicklung und Verbreitung der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien, insbesondere der Photovoltaik und der Windenergie an Land, haben es zudem ermöglicht, dass heute Strom aus erneuerbaren Energien gerade im internationalen Kontext häufig die kostengünstigste Option der Stromerzeugung darstellt (u. a. BloombergNEF, 2020). Dies bildet die Basis für eine zukünftig zur heutigen fossil basierten Wasserstoffproduktion mit Erzeugungskosten zwischen 2,00 EUR/kg H<sub>2</sub> und 3,00 EUR/kg H<sub>2</sub> wettbewerbsfähige Erzeugung von grünem Wasserstoff (► **Abbildung 1**), was neben den Klimaschutzanforderungen ein zweites gewichtiges Argument für ein dauerhaftes Interesse an Wasserstofftechnologien ist.

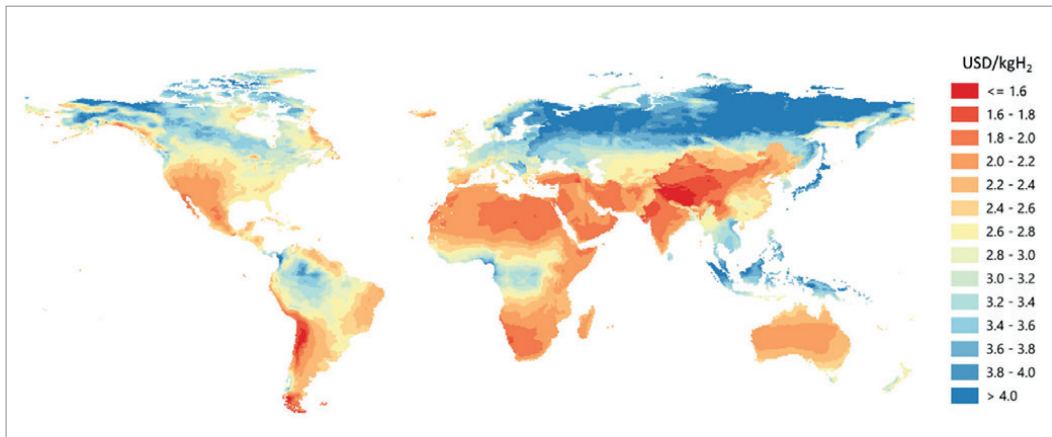


Abbildung 1:  
**Zukünftige Wasserstoff-  
 erzeugungskosten**  
 aus Elektrolyse auf  
 Basis von erneuerbarem  
 Strom aus Photovoltaik  
 und Windenergie an  
 Land  
 (Quelle: IEA 2019)

Als dritter Aspekt kommt hinzu, dass zunehmend auch institutionelle Anleger auf der Suche nach zukunftssicheren Investitionsmöglichkeiten den Bereich der erneuerbaren Energietechnologien, zu denen auch grüner Wasserstoff zählt, entdecken, so dass ausreichend Kapital auch für den Einstieg in eine grüne Wasserstoffwirtschaft vorhanden sein dürfte, sofern die politischen Rahmensetzungen dies entsprechend unterstützen (IIGCC, 2019).

Dass für die Bereitstellung und den Einsatz von Wasserstoff in Deutschland und der EU bereits zeitnah eine entsprechende Entwicklungsdynamik erreicht werden muss, gibt die EU-Kommission mit ihrer angestrebten „Ambitionierung“ des europäischen Klimaschutzziels für 2030 vor, da nunmehr eine Minderung der Treibhausgasemissionen um –55 % gegenüber 1990 statt der bisher angestrebten –40 % erreicht werden soll.

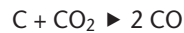
### Wasserstoff – Türöffner für die klimaneutrale industrielle Produktion

Das hohe Interesse der Industrie an Wasserstoff, erklärt sich aus der Tatsache, dass viele Industrieprozesse gerade in der Grundstoffindustrie ohne den Einsatz von klimaneutralem Wasserstoff nicht klimaneutral gestaltet werden können.

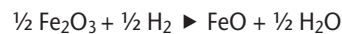
#### Beispiel Stahlproduktion

Im herkömmlichen Hochofenprozess mit Koks als Kohlenstoffquelle und Kohlenmonoxid als Reduktionsmittel entsteht zwangsläufig CO<sub>2</sub>, während bei der Direktreduktion mit Wasserstoff eine kohlenstofffreie Reaktion abläuft:

Hochofenprozess:



Direktreduktionsverfahren mit Wasserstoff:

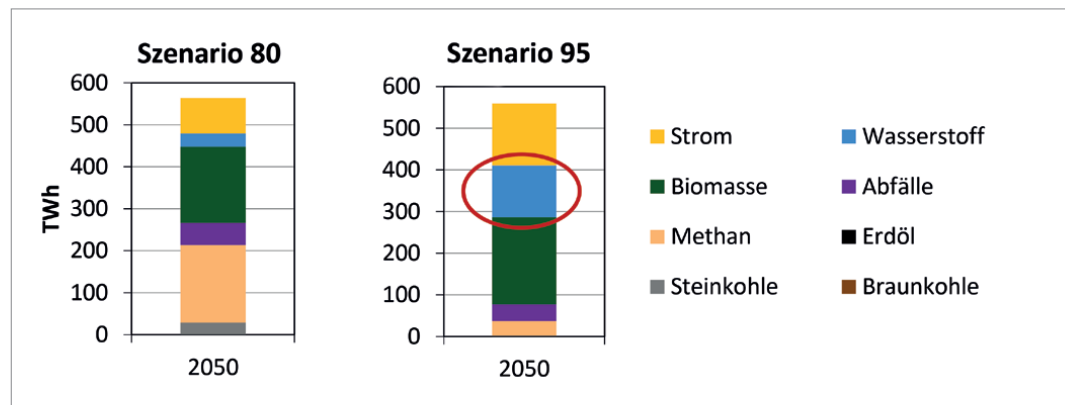


Bei der Direktreduktion fallen keine prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen an. Der entstehende Eisenschwamm, kann anschließend in einem Elektrolichtbogenofen (bei Bedarf gemeinsam mit Schrott) zu Rohstahl geschmolzen werden. Bei einer Bereitstellung des Wasserstoffs basierend auf 100 % erneuerbaren Energien ist diese Route nahezu CO<sub>2</sub>-neutral (Minderungspotenzial 97 %) (Agora Energiewende und Wuppertal Institut, 2019).

Eine derartige Prozessumgestaltung ist mit entsprechend hohen Investitionsanforderungen verbunden, die nur getätigt werden, wenn der politische und regulatorische Rahmen entsprechend gestaltet wird – beispielsweise über Carbon-Contracts-for-Difference oder Carbon Border Adjustments, die die Mehrkosten für klimaneutralen Stahl im internationalen Wettbewerb ausgleichen bzw. gleiche Wettbewerbsbedingungen für alle Marktteilnehmer schaffen. Wenn dies zeitnah erfolgt, könnte sich ein „Window-of-opportunity“ öffnen, um die Stahlerzeugung zeitnah in Richtung Klimaneutralität zu entwickeln, da in den nächsten Jahren umfangreiche Neu- bzw. Ersatzinvestitionen anstehen.

Gelingt diese Transformation, werden in kurzer Zeit sehr große Mengen klimaneutralen Wasserstoffs benötigt. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass eine Investitionsentscheidung seitens der Industrie nur dann getroffen werden wird, wenn die Versorgung mit klimaneutralem Wasserstoff entsprechend gesichert erscheint.

Abbildung 2:  
**Wasserstoffeinsatz  
in der Prozesswärme-  
bereitstellung  
in der Industrie im  
Jahr 2050  
in Deutschland  
im Vergleich eines  
80%-THG-Minderungs-  
szenarios mit einem  
95%-THG-Minderungs-  
szenario**  
(Quelle: Robinius  
et al., 2020)



### Beispiel Mineralölwirtschaft

Ein weiterer Industriesektor, der ohne grünen Wasserstoff keine Möglichkeit hat, klimaneutral zu werden, ist die Mineralölwirtschaft. Bei den Raffinerien wird dies besonders deutlich: Raffinerien stoßen weltweit jährlich ca. 1 Mrd. t CO<sub>2</sub> aus (Stand 2015). Davon entfallen etwa 128 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr (Stand 2014) auf Raffineriestandorte innerhalb Europas. Hier ist Deutschland mit 24 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr (Stand 2018) der größte Emittent. Um die Zahlen in Relation zu setzen sei darauf hingewiesen, dass die deutschen Raffinerien damit für 19% der Gesamtemissionen des ETS-pflichtigen Industriesektors in Deutschland verantwortlich sind.

Für eine klimaneutrale Raffinerie müssen die Strom- und Prozesswärmebereitstellung und die in der Raffinerie ablaufenden Prozesse zukünftig klimaneutral gestaltet werden. Dies ist aber nur möglich, wenn auch der verarbeitete Rohstoff – das Rohöl – bereits klimaneutral – d. h. frei von fossilem Kohlenstoff – ist, da nicht nur im Veredelungsprozess prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen anfallen, sondern gerade die anfallenden Neben- und Abfallprodukte wie Purge Gas zur Energieversorgung (Strom- und Prozesswärmebereitstellung) genutzt werden. Ohne einen Umstieg von fossilem Rohöl auf einen synthetischen Vorprodukt-Mix auf regenerativer Basis („Green Crude“), haben Raffinerien somit in einer klimaneutralen Welt im Jahr 2050 keinen Platz mehr. Das „Green Crude“ kann dabei auf Basis von grünem Wasserstoff mit CO<sub>2</sub> entweder über ein Fischer-Tropsch-Verfahren oder über die Methanol-Route synthetisiert werden. Dies kann an Standorten mit sehr guten Erzeugungsbedingungen für grünen Wasserstoff erfolgen. „Green Crude“ kann wie heute Rohöl importiert und über die vorhandene Rohöl-Transportinfrastruktur zur Raffinerie gelangen.

Dies ist jedoch nicht der einzige Wasserstoffbedarf, den eine Raffinerie aufweist: Raffinerien konsumieren heute weltweit für die Prozessschritte Hydrocracking und Hydrotreating etwa 25% der globalen Wasser-

stoffproduktion, die bei etwa 70 Mio. t/a liegt. In Deutschland gehen sogar etwa 40% der 1,6 Mio. t Wasserstoff pro Jahr in die Mineralölverarbeitung. Der Wasserstoff wird dabei überwiegend am Ort des Bedarfs via Dampfreformierung aus fossilem Erdgas gewonnen. Das entstehende CO<sub>2</sub> (ca. 10 kg CO<sub>2</sub> pro kg Wasserstoff) wird freigesetzt und trägt seinen Teil zu den heutigen Gesamtemissionen der Raffinerie bei. Diese könnten über den Einsatz von klimaneutralem Wasserstoff bereits kurzfristig vermieden werden.

### Beispiel Prozesswärmebereitstellung

Zu diesen unmittelbaren und speziellen Anwendungen von Wasserstoff in der Industrie kommt ein weiterer Bereich hinzu – die Prozesswärmebereitstellung. Gerade der Bedarf an Hochtemperaturprozesswärme (> 500°C) lässt sich mit erneuerbaren Wärmeträgern (Solarthermie, Geothermie, Biomasse) nur in begrenztem Umfang bedienen. Hier kann klimaneutraler Wasserstoff eine wichtige Lücke schließen, wie ► *Abbildung 2* zeigt.

### Wasserstoff-Roadmaps – potenzielle Absatzmärkte/Lieferländer von morgen

Betrachtet man exemplarisch die Markthochlaufszenarien der „Hydrogen Roadmap Europe“ und der „Roadmap to a US Hydrogen Economy“ wird deutlich, dass im Jahr 2030 die Unterschiede zwischen dem jeweiligen Basisszenario und dem ambitionierten Szenario noch nicht sehr groß sind. Dies zeigt, dass sich die Anwendungstechnologien wie die genannten Industrieprozesse aber auch neue Konzepte wie Brennstoffzellenantriebe im Verkehr erst etablieren müssen und die Marktdiffusion bis 2030 noch überschaubar sein wird. Entscheidend wird auf der Nachfrageseite sein, die notwendige Dynamik in der Marktdurchdringung zu erreichen, die langfristig den Weg in eine Wasserstoffwirtschaft sichert.

Parallel zur Nachfrageseite muss die Anwendungsseite entwickelt werden, denn auch die Produktionskapazitäten für klimaneutralen Wasserstoff insbesondere für die Wasserelektrolyse müssen erst entwickelt, errichtet und in Betrieb genommen werden, zumal diesbezüglich noch wichtige Hürden im Rahmen der Skalierung der Technologien in den Multi-Megawatt-Maßstab zu nehmen sind.

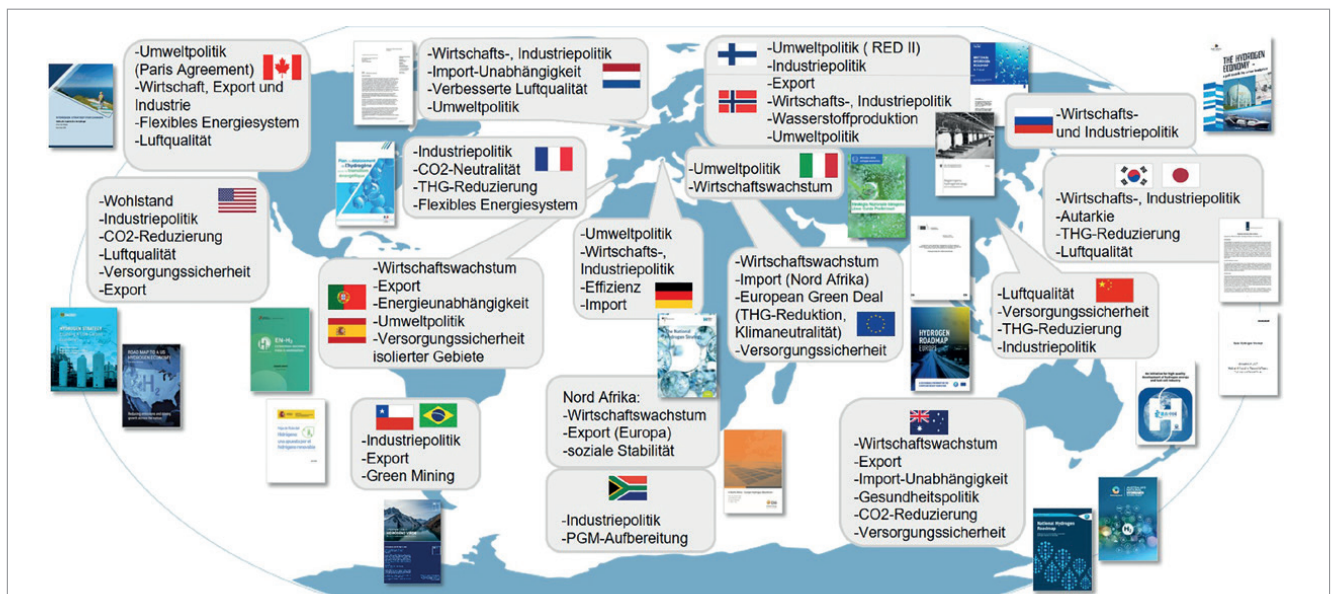
Für Deutschland stellt sich in diesem Kontext die Frage, wie langfristig eine deutlich steigende Nachfrage nach klimaneutralem Wasserstoff gedeckt werden kann und sollte. Mehrere Optionen werden diskutiert, auch wenn bereits klar ist, dass Deutschland in einer klimaneutralen Wasserstoffzukunft Energieimportland bleiben wird. Offen ist jedoch noch, was und wieviel importiert werden wird.

In einer dezentral ausgelegten Power-to-X-Versorgungsstruktur müssten die Anlagen lastflexibel sein, könnten die lokale Sektorenkopplung und damit die Netzintegration unterstützen. Eine Kopplung mit bestehenden Bioenergie- und Industrieprozessen wäre vielfältig möglich (z. B. Biogas, Bioethanol, BTL) und würde somit die Nutzung lokaler erneuerbarer Kohlenstoffquellen erlauben und im Sinne von SynBioPTx Synergien von biomasse- und strombasierten Technologien erschließen. Die Anlagengrößen wären eher klein bis mittelgroß (1 – 100 MW Elektrolyseleistung). Hierfür wäre ggf. der Import von erneuerbarem Strom aus dem europäischen Ausland erforderlich, wenn in Deutschland kein weiterer Zubau realisiert wird.

Dagegen würden in einer zentral ausgelegten Power-to-X-Struktur Anlagen ausschließlich für eine möglichst konstante Erzeugung von chemischen Energieträgern konzipiert. Die Produktion findet dann vorzugsweise an optimalen Standorten für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien statt (auch im inner- oder außereuropäischen Ausland oder offshore). Die Anlagengrößen sind groß bis sehr groß (100 – 5.000 MW Elektrolyseleistung). Aus diesen Anlagen kann entweder Wasserstoff nach Deutschland importiert werden, sofern die entsprechenden Transportinfrastrukturen aufgebaut werden können, oder der Wasserstoff wird zu Syntheseprodukten wie „Green Crude“, Methanol oder Ammoniak weiterverarbeitet und über bestehende Transportrouten und Infrastrukturen nach Deutschland gebracht.

Auch wenn Deutschland nennenswerte Erzeugungspotenziale für Wasserstoff aufweist (DVGW-Forschungsvorhaben, 2019), nehmen die meisten Szenarien langfristig erhebliche Wasserstoffimportmengen an. Dies zeigt auch ein 100%-EE-Szenario für Niedersachsen, das im Jahr 2019 bereits einen Anteil von 88,6% erneuerbarer Energie am Stromsektor vorweisen konnte. Mit aus heutiger Sicht gesellschaftlich akzeptablen Ausbauzielen (30 GW Wind an Land, 15 GW Freiflächen-PV, vollständige Nutzung des Offshore-Potenzials) reichen die angestrebten Kapazitäten nicht aus, um den gesamten Energiebedarf in Niedersachsen selbst decken zu können, so dass ein Viertel der Primärenergie als grüner Energieträger (Fokus Wasserstoff) importiert werden muss. Im Vergleich zu heute sinkt damit die Importquote von rund 300 TWh auf ca. 100 TWh deutlich.

Abbildung 3:  
**Weltweite Wasserstoff-Roadmaps und -Strategien**  
(Quelle: Fraunhofer ISE)



Die entstehenden Importbedarfe werden die Energieimportsysteme und -strukturen deutlich verändern. Neue Energiepartnerschaften und Lieferbeziehungen müssen angebahnt und etabliert werden. Dies gilt gerade vor dem Hintergrund der rasanten internationalen Entwicklung, die Wasserstoff erfährt.

Wie ► *Abbildung 3* zeigt, ist weltweit eine Vielzahl an Ländern aktiv und hat bereits eine Wasserstoffstrategie entwickelt oder ist auf dem Weg dorthin. Wasserstoff wird also weltweit als Schlüsseltechnologie für die Klimaneutralität und den Wandel von Industriestrukturen wahrgenommen und man will die damit verbundenen Chancen nutzen. Deutschland hat eine sehr gute Ausgangsposition – insbesondere auch im Bereich Forschung und Entwicklung – und sollte daher aktiv die mit einer Wasserstoffzukunft verbundenen Chancen nutzen und die damit verbundenen Wertschöpfungspotenziale insbesondere auch im Maschinen- und Anlagenbau und im Technologieexport heben.

## Referenzen

- Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019.
- BloombergNEF (2020): Sweden, Spain the Cheapest European Markets for Wind and Solar Corporate PPAs, BNEF Survey Finds; London, 02. April 2020.
- DVGW-Forschungsvorhaben (2019): Ermittlung des Gesamtpotentials erneuerbarer Gase zur Einspeisung ins deutsche Erdgasnetz.
- IEA (2019): The Future of Hydrogen; Technology report – June 2019.
- IIGCC (2019): The Institutional Investors Group on Climate Change; Open letter to EU leaders, 6th December 2019.
- Robinius et al. (2020) Wege für die Energiewende, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Energie & Umwelt Bd. 499.