
HYPAT

H₂ Potential



Globaler H₂-Potentialatlas

Nachhaltige Standorte in der Welt für die grüne Wasserstoffwirtschaft von morgen:
Technische, ökonomische und soziale Analysen zur Entwicklung eines nachhaltigen
globalen Wasserstoffatlases

Impulspapier

Krieg in der Ukraine: Auswirkungen auf die europäische und deutsche Importstrategie von Wasserstoff und Syntheseprodukten



HYPAT-Impulspapier

Krieg in der Ukraine: Auswirkungen auf die europäische und deutsche Importstrategie von Wasserstoff und Syntheseprodukten

Förderung

Das Projekt HYPAT – H₂-POTENTIALATLAS – wird im Rahmen des Ideenwettbewerbs »Wasserstoffrepublik Deutschland« im Modul Grundlagenforschung Grüner Wasserstoff vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF gefördert. Die Projektlaufzeit läuft über einen Zeitraum von drei Jahren, März 2021 bis Februar 2024.



Kontakt

Prof. Dr. Martin Wietschel
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Str. 48, 76139 Karlsruhe
martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Projekt-Webseite

www.hypat.de

Autoren und Autorinnen

Martin Wietschel, Florian Roth, Joshua Fragoso Garcia, Andrea Herbst, Christoph Kleinschmitt, Florian Wittmann, Barbara Breitschopf, Lin Zheng, Johannes Eckstein, Marius Neuwirth (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI)

Benjamin Pfluger, Mario Ragwitz (Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG)

Andreas Löschel, Lars Biesewig, Zarah Thiel (Ruhr-Universität Bochum)

Christopher Voglstätter (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE)

Almudena Nunez, Rainer Quitzow (Institute for Advanced Sustainability Studies, IASS Potsdam)

Robert Kunze (Energy Systems Analysis Associates – ESA² GmbH)

Andreas Stamm, Rita Strohmaier (Deutsches Institut für Entwicklungspolitik)

Ludger Lorych (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GIZ GmbH)

Veröffentlicht

Datum	Version	Änderung
März 2022	01	
April 2023	02	neuer Disclaimer

Disclaimer

Das vorliegende Diskussionspapier wurde von den genannten Autorinnen und Autoren des HyPat-Konsortiums ausgearbeitet. Die Analyse spiegelt nicht zwangsläufig die Meinung des HyPat-Konsortiums oder des Fördermittelgebers wider. Die Inhalte werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.

Die Publikation einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.

Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung der Impulsbeiträge.....	5
2	Motivation	6
3	Impulsbeiträge.....	7
3.1	Die Bewertung potenzieller Lieferländer sollte von klaren Kriterien geleitet sein und politische Risiken stärker gewichten	7
3.2	Eine Neubewertung von potenziellen Lieferländern steht an	9
3.3	Eine Diversifikation von Lieferländern für Wasserstoff führt potenziell zu höheren Kosten des Imports und benötigt Zeit, schützt aber vor wirtschaftlichen Risiken durch Abhängigkeiten.....	10
3.4	Die hohen Potenziale für die Erzeugung und den Transport von Wasserstoff bilden eine gute Grundlage für eine mögliche wirtschaftliche Entwicklung der Ukraine	11
3.5	Die Nutzung eigener Potenziale zu Wasserstoffherstellung innerhalb der EU wird wichtiger.....	12
3.6	Syntheseprodukte können aus wirtschaftlichen Gründen sowie unter dem Aspekt der Versorgungssicherheit kurz- und mittelfristig attraktiver werden	13
3.7	Hohe Erdgaspreise und eine ungewisse Versorgungslage erschweren oder bremsen den Aufbau eines großen Wasserstoffsystems in Deutschland und der EU	14
3.8	Ein harmonisiertes Vorgehen innerhalb der EU ist unumgänglich	15
4	Quellen	17

1 Zusammenfassung der Impulsbeiträge

- 1. Die Bewertung potenzieller Lieferländer sollte von klaren Kriterien geleitet und politische Risiken stärker gewichtet sein:** Neben der technischen Verfügbarkeit und dem Preis sollte auch die Versorgungssouveränität stärker beachtet und Partnerländer mehr auf ihre systemische und politische Resilienz sowie Zuverlässigkeit hin bewertet werden. Zudem sollten geopolitische Überlegungen und wertegeleitete Handelsbeziehungen in der Wasserstoffstrategie eine wichtigere Rolle spielen.
- 2. Neubewertung von Lieferländern: Zu einer diversifizierten Wasserstoffversorgung könnte ein breites Netzwerk an Partnerländern in unterschiedlichen Weltregionen beitragen:** In Frage kämen etwa die USA und Kanada, Chile, Brasilien, Argentinien oder Südafrika, Marokko, Ägypten und Namibia. Offen bleibt, wie große Mengen Wasserstoff in Zukunft über größere Distanzen transportiert bezahlbar nach Europa gelangen können.
- 3. Eine Diversifizierung von Lieferländern für Wasserstoff führt zu höheren Importkosten und benötigt Zeit, schützt aber vor wirtschaftlichen Risiken durch Abhängigkeiten:** Verflüssigung und Schiffstransport führen zwar zu ca. 25% höheren Gesamtkosten im Vergleich zum Pipelinetransport und der Aufbau der Produktions- und Transportkapazitäten benötigt Zeit – all dies trägt aber zur Diversifizierung und zum Schutz vor zu viel Marktmacht weniger Anbieter bei.
- 4. Die hohen Potenziale für die Erzeugung und den Transport von Wasserstoff bilden eine gute Grundlage für eine mögliche wirtschaftliche Entwicklung der Ukraine:** Das Land besitzt langfristig viel Potenzial zur erneuerbaren Herstellung von grünem Wasserstoff – potenziell bis 1400 TWh bis 2050 – und könnte damit zu einem verlässlichen Partner in einer freien Nach-Kriegs Ukraine werden.
- 5. Die Nutzung eigener Potenziale zu Wasserstoffherstellung innerhalb der EU wird wichtiger:** Für 2030 rechnet die EU mit einer Gesamtwasserstoffnachfrage in Höhe von 670 TWh bzw. 2250 TWh für 2050 – dem steht ein erschließbares Potenzial zur Wasserstoffherzeugung von 5.000 bis 6.000 TWh gegenüber, insbesondere durch Photovoltaik und solarthermische Anlagen im Süden und Windkraftanlagen im Norden – damit könnte die EU ihre Wasserstoffnachfrage weitgehend selbst decken. Versorgungssicherheit ist gegenüber möglichen geringeren Importkosten abzuwägen.
- 6. Syntheseprodukte können aus wirtschaftlichen Gründen sowie unter dem Aspekt der Versorgungssicherheit kurz- und mittelfristig attraktiver werden:** Die Transportkosten von Methanol oder Ammoniak fallen wegen ihrer hohen Transportdichte und dem geringeren Energieaufwand beim Transport niedriger aus als bei Wasserstoff. Syntheseprodukte können tendenziell schneller in die EU und nach Deutschland transportiert werden und dort zur Versorgungssicherheit beitragen.
- 7. Hohe Erdgaspreise und ungewisse Versorgungslage erhöhen die Unsicherheiten für den Aufbau eines großen Wasserstoffsystems in Deutschland und der EU:** Im Umbauprozess des Energiesystems kommt Erdgas und grauem Wasserstoff – also aus Erdgas erzeugtem Wasserstoff – bislang eine wichtige Rolle zu. Angesichts der ungewissen Preisentwicklung und Versorgungssicherheit kann dies auch den geplanten Ausbau des Wasserstoffsystems erschweren.
- 8. Ein harmonisiertes Vorgehen innerhalb der EU ist notwendig:** Um in Europa auch beim Wasserstoff eine ähnlich starke Vernetzung wie schon bei Strom oder Erdgas.

2 Motivation

Der Import von Wasserstoff sowie Syntheseprodukten von Wasserstoff wie Methanol und Ammoniak bildet eine wesentliche Säule der nationalen und der EU-Wasserstoffstrategie. Die meisten Studien gehen von künftigen Importanteilen nach Deutschland und in die EU von über 50% aus (siehe Wietschel et al. 2021b). Politische Maßnahmen wie eine staatliche Förderung in Milliardenhöhe in Deutschland sind hierauf ausgerichtet. Unter anderem aufgrund guter ökonomischer Bedingungen für die Herstellung und die Lieferung sind neben Russland auch Staaten wie Kasachstan, Marokko, Saudi-Arabien und die Ukraine in der deutschen und europäischen Wasserstoffstrategie relevante Ansprechpartner. Der Krieg von Russland mit der Ukraine hat auf vielen Seiten zur Erkenntnis geführt, dass die bisher geltende Gewissheit, dass enge Handelsbeziehungen zu einer stabilen Energieversorgung führen, zu hinterfragen ist. Um unsere Resilienz zu erhöhen, müssen zentrale strategische Annahmen auf den Prüfstand gestellt werden. Das Zukunftsthema Wasserstoff ist davon in besonderem Maße betroffen. Hier stehen strategische Entscheidungen an, die langfristige ökonomische und politische Auswirkungen haben. In diesem Impulspapier wird auf einzelne Aspekte eingegangen, es werden Ansätze für eine mögliche Neubewertung diskutiert und offene Fragen aufgeworfen. Der Impulsbeitrag soll zur weiteren Diskussion zu dem Thema anregen.

3 Impulsbeiträge

3.1 Die Bewertung potenzieller Lieferländer sollte von klaren Kriterien geleitet sein und politische Risiken stärker gewichtet

Wasserstoff und Wasserstoff-Syntheseprodukte bieten die Chance, einen zunehmend wichtigen Teil unserer Energieversorgung strategisch und kriteriengeleitet neu auszurichten und aktiv zu gestalten. Die Bewertung von potenziellen Partnerländern sollte dabei eine langfristige Perspektive umfassen, zumal durch Vereinbarungen und Infrastrukturinvestitionen heute Pfadabhängigkeiten entstehen. Die Gewichtung der einzelnen Aspekte muss im Rahmen eines politischen Abwägungs- und Aushandlungsprozesses stattfinden, der die Kosten und mögliche Trade-offs zwischen verschiedenen Zielen wie Versorgungssicherheit, geostrategischen Erwägungen und normativen Ansprüchen berücksichtigt.

Erstes zentrales Kriterium bei der Auswahl von Handelspartnern ist die technische **Verfügbarkeit** des gewünschten Produkts oder Rohstoffs zu einem möglichst niedrigen Preis sowie günstige Transportbedingungen. Zudem sollte bei der Bewertung potenzieller Lieferländer der gestiegenen Abhängigkeit immer komplexerer globaler Wertschöpfungssysteme von der kontinuierlichen Verfügbarkeit unterschiedlichster Rohstoffe und Zwischenprodukte Rechnung getragen werden. Dies bedeutet nicht, eine kaum realistische Rohstoff-Autarkie für Europa oder gar Deutschland anzustreben. Um Europas Verwundbarkeit gegenüber kurzfristigen Störungen mit potenziell gravierenden Auswirkungen zu minimieren und unsere **Versorgungssouveränität** zu stärken, sollte stattdessen die Kritikalität von Handelsbeziehungen bewertet werden: Welche Auswirkungen hätte ein kurzfristiger Ausfall des Partners für die heimische Wirtschaft? Wie schnell ließe sich ein Ausfall auf anderen Wegen kompensieren? Sind Abhängigkeiten einseitig oder wechselseitig? (siehe Edler et al. 2020). Etablierte Geschäftsbeziehungen sowie gemeinsame Investitionsprojekte sind hier positiv zu bewerten. Um die potenziellen Schäden beim Ausfall eines Partners zu reduzieren, sollte eine verstärkte Diversifizierung bei den Lieferländern angestrebt werden. Dieser Aspekt wurde in der Vergangenheit nicht in dem Maße gewichtet, wie es aktuell notwendig erscheint. Die fehlenden direkten Importmöglichkeiten von Flüssiggas in Deutschland sind hierfür ein Beispiel.

Direkt damit zusammen hängt das Kriterium der **politischen Zuverlässigkeit** der Partnerländer. Um die ökonomischen Kosten zu optimieren, wurde in der Vergangenheit mit wenigen Ausnahmen (bspw. Sanktionen gegenüber dem südafrikanischen Apartheits-Regime) dort eingekauft, wo es am billigsten war. Dies führte zu engen Handelsbeziehungen mit zahlreichen autokratisch regierten Staaten, u. a. im Nahen Osten und Afrika, die als weitgehend berechenbar galten. Dies war vor allem in der Annahme begründet, dass Handel stets eine gegenseitige Abhängigkeit erzeugt, die im Zweifelsfall für den ökonomisch potenten Westen geringer war als für seine Partner, für die der Devisenzufluss aus Rohstoffgeschäften essenziell war. Nicht zuletzt hatte auch die UdSSR selbst in der Hochphase des Kalten Krieges weiter zuverlässig Rohstoffe in den Westen geliefert. Je länger solche Handelsbeziehungen liefen, desto mehr wurden die Partnerländer als verlässlich eingestuft.

Nicht erst im Lichte der russischen Invasion in der Ukraine erscheint es kurzsichtig, potenzielle Risiken auszublenden, nur weil sie sich in der Vergangenheit nicht materialisiert haben. Im Sinne eines vorausschauenden Risikomanagements sollte zum einen die Exponiertheit von

Partnerländern gegenüber unterschiedlichen Gefährdungstypen berücksichtigt werden, u.a. ob sich ein Land in einer politisch instabilen Region befindet und ob es von Naturgefahren bedroht ist. Zudem sollte die systemische Resilienz des Landes bewertet werden. Hierzu muss dessen Fähigkeit analysiert werden, unterschiedliche Schocks und Störungen zu absorbieren, aber auch auf längerfristige Herausforderungen (bspw. demografische Veränderungen, Auswirkungen des Klimawandels, soziale Spannungen) zu reagieren und sich anzupassen. Indizien, um die Resilienz eines potenziellen Partnerlandes im Sinne einer systemischen Anpassungs- und Transformationsfähigkeit *ex ante* zu bewerten, sind unter anderem die Verfügbarkeit von Finanz- und Humankapital sowie ein nachhaltiger Umgang mit natürlichen Ressourcen. Für die politische Resilienz ist insbesondere die Beschaffenheit rechtsstaatlicher Institutionen, die Leistungsfähigkeit der Sozialsysteme sowie der Zustand der Zivilgesellschaft von Bedeutung (Alessi et al. 2020). Es sollte eine intensive Diskussion darüber geführt werden, ob im Lichte der aktuellen Entwicklung der Aspekt der politischen Zuverlässigkeit eine höhere Gewichtung bekommen sollte.

Ein weiterer Aspekt umfasst die geopolitische Bedeutung von Handelspartnerschaften. Insbesondere China versucht seit einigen Jahren, seine geopolitischen Interessen verstärkt durch die Intensivierung seiner Handelsbeziehungen durchzusetzen, wobei der Rohstoff- und Energiesektor stets eine wichtige Rolle einnimmt. Hierzu gehören insbesondere Partnerschaften mit afrikanischen Staaten sowie die Belt and Road Initiative. Deshalb erscheint es unumgänglich, unsere Energiepolitik stärker in eine politische Gesamtstrategie zu integrieren, die auch **geopolitische Interessen** miteinschließt. Hierzu gehört unter anderem die Stärkung der politischen und gesellschaftlichen Resilienz der östlichen und südlichen Nachbarländer (Europäische Union 2016). Gegenwärtig werden sowohl die nationale als die europäische sicherheitspolitische Strategie überarbeitet. Die Bewertung potenzieller Partnerländer für den Wasserstoffimport sollten eng mit diesen Strategieprozessen abgestimmt werden (s. Impuls 8).

Schließlich sollte bewertet werden, welche Implikationen eine Rohstoffpartnerschaft für die Förderung von Rechtsstaatlichkeit und Demokratie, nachhaltige Entwicklung sowie für die Friedensförderung und den Schutz von Menschenrechten hat. In der Vergangenheit profitierten von Rohstoffpartnerschaften mit autokratischen Ländern häufig vor allem kleine Eliten rund um die Machthaber, die ihren Status durch den Devisenzufluss zementieren konnten. Die breite Bevölkerung partizipierte hingegen oft nur in geringem Maße an den Handelseinnahmen und musste in manchen Fällen sogar negative Auswirkungen fürchten, bspw. Umweltzerstörung und Verteilungskonflikte. In der Entwicklungszusammenarbeit gibt es bereits zahlreiche anerkannte Kriterien für die Bewertung, ob ein Staat ein zuverlässiger und unterstützenswerter Partner ist. Diese Aspekte sollten auch bei der Suche nach geeigneten Kooperationen im Energiesektor mit einbezogen werden. Auf diese Weise bietet das Zukunftsthema Wasserstoff eine große Chance, unsere Handelsbeziehungen auf eine neue strategische Basis zu stellen, die sowohl nationale Interessen berücksichtigt als auch **wertgeleitet** ist. Dass es dabei unweigerlich zu Zielkonflikten und Widersprüchen kommt, sollte bewusst sein. Eine systematische und ehrliche Bewertung kann hier jedoch eine wertvolle Grundlage für den politischen Abwägungsprozess bieten.

3.2 Eine Neubewertung von potenziellen Lieferländern steht an

Die in Impuls 1 dargestellten Aspekte ermöglichen eine nachvollziehbare Bewertung der potenziellen Lieferländer für Wasserstoff. Unter dem Aspekt der technischen Verfügbarkeit und Kosteneffektivität spielte bislang Russland als ein potenzielles Partnerland eine wichtige Rolle, auch vor dem Hintergrund, als Übergangslösung günstigen blauen Wasserstoff liefern zu können. Das Land hat große Potenziale zur Wasserstoff- und Syntheseerzeugung sowie gute Möglichkeiten, über bestehende Transportinfrastrukturen und die räumliche Nähe Wasserstoff und dessen Syntheseprodukte nach Deutschland und in die EU zu exportieren. Das Kriterium der Versorgungssouveränität lässt Russland derzeit jedoch als wenig attraktiven Partner im Bereich der Wasserstoffversorgung erscheinen.

Andere Länder, u. a. in Nordafrika, zeichnen sich durch eine große Verfügbarkeit aus und könnten rein technisch ebenfalls einen relevanten Teil des Wasserstoffbedarfs in Europa abdecken. Jedoch müssten die notwendigen Transportinfrastrukturen teilweise erst aufgebaut werden. Daneben gibt es aber wenige strukturell stabile Hochpotential-Länder wie Norwegen in "Pipelinedistanz", d. h. Wasserstoff müsste voraussichtlich auf dem Seeweg transportiert werden, was mit höheren Kosten verbunden ist (siehe Impuls 3).

Zu einer diversifizierten Wasserstoffversorgung könnte ein breites Netzwerk mit Partnern in unterschiedlichen Weltregionen beitragen. In Frage kämen unter anderem nordamerikanische Staaten, z.B. die USA, Kanada, einige südamerikanische Staaten wie Chile, Brasilien, Argentinien, oder einige afrikanische Staaten wie Südafrika, Marokko, Ägypten und Namibia sowie auch bestimmte asiatische Länder. Allerdings ist im Moment nur schwer absehbar, wie sehr große Mengen an Wasserstoff über größere Entfernung bezahlbar nach Europa gebracht werden können (siehe Impuls 3).

In Hinblick auf die politische Zuverlässigkeit der Partnerländer erscheinen insbesondere entwickelte Demokratien wie die USA, Kanada oder Australien vorteilhaft. Deren politische Systeme gelten auch in Zeiten von Krisen und Transformationsprozessen als widerstands- und anpassungsfähig. Hingegen haben einige autokratisch regierte Staaten, beispielsweise aus den Nahen und Mittleren Osten, zwar in der Vergangenheit eine vergleichsweise hohe Stabilität aufgewiesen; es ist jedoch fraglich, wie anpassungsfähig diese Systeme sind, u. a. in Hinblick auf gesellschaftliche Veränderungen oder Transformationsprozesse im Zuge der Dekarbonisierung. Übermäßig starre politische Ordnungen bergen hier ein nicht zu unterschätzendes Fragilitätsrisiko.

Gleichzeitig wächst mit dem Konflikt in der Ukraine die Bedeutung geopolitischer Gesichtspunkte für die Entwicklung von Energie- und Wasserstoffpartnerschaften. Es wird zunehmend deutlich, dass auch die EU gezielt ihre geopolitischen Einflusszonen durch wirtschaftliche Zusammenarbeit stärken und weiterentwickeln sollte. Das gilt vor allem für die europäische Nachbarschaft, aber auch in entfernteren Regionen, in denen geopolitische Wettbewerber schon seit längerer Zeit versuchen, Einfluss aufzubauen. Marokko hat sich beispielsweise aufgrund des Westsaharakonfliktes in jüngster Vergangenheit zwar als herausfordernder Partner für deutsche Wasserstoffinvestitionen gezeigt, könnte aber trotzdem bedeutsam werden, um die nordafrikanischen Länder an Europa zu binden. Auch Partnerschaften mit weiteren afrikanischen Staaten erscheinen wichtig, um den Einfluss Europas in einer Region zu stärken, in der China seit einiger Zeit versucht, über Handelsbeziehungen einseitige Abhängigkeiten zu schaffen. Darüber hinaus könnte - abhängig von der weiteren politischen Entwicklung - auch ein verstärktes europäisches Engagement in der Ukraine wichtig sein (siehe Impuls 4).

Aus einer wertegeleiteten Perspektive erscheinen generell Partnerschaften mit Schwellen- und Entwicklungsländern prüfenswert. Der Aufbau von Kooperationen im Wasserstoffsektor kann für diese Länder einen wertvollen Beitrag zu Wachstum und Verbesserung der Lebenssituation leisten sowie Wissensträger unterstützen und dies kann wiederum auch zur Stabilität beitragen. Jedoch sollte darauf geachtet werden, inwieweit solche Partnerschaften auch einen eindeutigen entwicklungs- und klimapolitischen Mehrwert im Partnerland erzeugen. Ein besonderes Ziel sollte in diesem Zusammenhang sein, Partnerländer bei der Akzeleration von Dekarbonisierungsprozessen zu unterstützen. Weiterhin könnte OPEC-Ländern durch Wasserstoff und damit verbundener grüner Industrieentwicklung eine Alternative zur Exploration ihrer Öl- und Gasvorkommen geboten und damit ein wichtiger Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung geleistet werden.

Vereinbarungen mit adäquaten Lieferländern zu treffen ist somit ein wichtiger Baustein einer Resilienzstrategie für die EU und Deutschland. Die Resilienz hängt aber von einer Reihe weiterer Faktoren wie der wettbewerblichen Marktorganisation in den Importländern ab (siehe Löschel et al. 2010). Auf eine ausführliche Diskussion dieser Aspekte kann in dem vorliegenden Impulspapier nicht eingegangen werden.

3.3 Eine Diversifikation von Lieferländern für Wasserstoff führt potenziell zu höheren Kosten des Imports und benötigt Zeit, schützt aber vor wirtschaftlichen Risiken durch Abhängigkeiten

Diversifizierung erhöht Sicherheit und Wasserstoff mit seinem Diversifizierungspotenzial kann zu einem Schlüsselement für die Stärkung der Energiesicherheit Deutschlands werden. Bald könnte Deutschland auf eine breite Palette von Partnerländern zählen, aus denen es Wasserstoff importieren könnte. Die Diversifizierung der Importländer und internationaler Partnerschaften ist in der nationalen Wasserstoffstrategie und im wachsenden Rahmen der Wasserstoffkooperation fest verankert: Deutschland hat bereits Vereinbarungen für Wasserstoff-Forschungs- und Entwicklungsprojekte im asiatisch-pazifischen Raum, in Afrika, in Nordamerika, und in Südamerika abgeschlossen. Wasserstoffpartnerschaften in Afrika sowie ein außenpolitischer Dialog über grünen Wasserstoff mit verschiedenen Ländern sind angestoßen. Auf diese Weise baut Deutschland bereits einen starken Kooperationsrahmen mit potenziellen Wasserstoffexporteuren auf, der eine stärkere Diversifizierung gewährleisten soll. Dennoch ist der Übergang zu einer verstärkt wasserstoffbasierten Energiewirtschaft keine leichte Aufgabe.

Die Wasserstoffwirtschaft ist aktuell noch ein Sektor ohne größere Handelsaktivitäten. Nur fünf Prozent des weltweit erzeugten Wasserstoffs werden momentan transportiert und gehandelt (siehe Monopolkommission 2021). Die günstigste Bereitstellung von Wasserstoff erfolgt über möglichst kurze Distanzen per Pipeline. Für einen Schifftransport von Wasserstoff müssen Verflüssigungsanlagen und Anlandeterminals gebaut und unter hohem Energieaufwand betrieben werden. Nach SCI4climate.NRW (2021) werden große (und klimaneutral betriebene) Schiffe in größerem Umfang erst nach 2035 zur Verfügung stehen. Weiterhin sind bisher kaum Verflüssigungsanlagen für Wasserstoff vorhanden. Bei Syntheseprodukten sieht die Situation etwas anders aus (siehe Impuls 6).

Weiterhin ist zu beachten, dass allein die Konversionsverluste zur Verflüssigung von Wasserstoff den Transport per Schiff gegenüber einem Pipelinetransport deutlich verteuern. Allerdings wird auch ein Pipelinetransport in Abhängigkeit der Transportlänge immer teurer. Diese

Transportkosten sind davon abhängig, ob neue Pipelines gebaut oder bestehende Gaspipelines umgerüstet werden. Eine Studienauswertung (siehe Wietschel et al. 2021) lässt die Schlussfolgerung zu, dass neue Pipelines bei einer Transportdistanz von 3.000 km zu Wasserstofftransportkosten von ca. 20 €/MWh führen, während ein Transport in umgewidmeten Pipelines für ca. die Hälfte der Kosten möglich sein sollte. Bei dieser Distanz verünftlichen sich die Transportkosten, wenn der Transport per Schiff inkl. Verflüssigung anstatt in einer umgerüsteten Pipeline erfolgen würde. Die gesamten Kosten eines Imports von Wasserstoff liegen durch die Verflüssigung und den Schiffstransport dann ca. 25% über den Gesamtkosten eines Pipelinetransports. Den höheren Kosten stehen aber evtl. hohe wirtschaftliche Vorteile der Risikoabsicherung durch Diversifizierung gegenüber der Marktmacht von wenigen Anbietern gegenüber, wie derzeit auf dem Gasmarkt in Europa zu beobachten ist. Generell ist die Frage einer künftigen Preisbildung von Wasserstoff auf Märkten ein bisher ungelöstes Problem (siehe Wietschel et al. 2021a).

Eine spannende Frage dabei ist, wie ein ökonomisch vernünftiges Verhältnis von Pipeline- und Schiffstransport aussieht und wie viele und welche Lieferländer bzw. Handelsbeziehungen für eine Diversifizierung notwendig sind. Weiterhin sollte beim geplanten Aufbau von LNG-Terminals direkt die Option geprüft werden, sie für den Import von flüssigem Wasserstoff oder Syntheseprodukten, insbesondere Ammoniak, vorzubereiten (siehe Impuls 6).

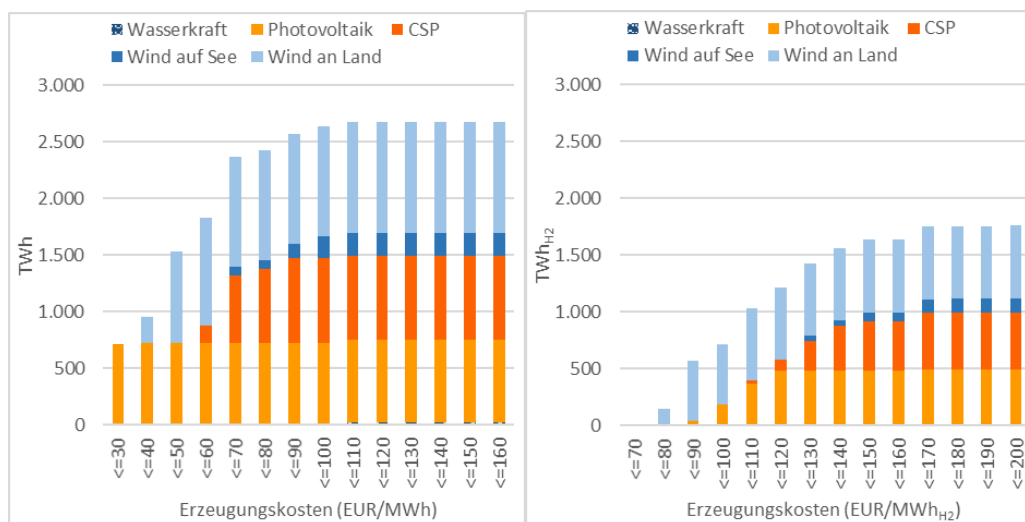
3.4 Die hohen Potenziale für die Erzeugung und den Transport von Wasserstoff bilden eine gute Grundlage für eine mögliche wirtschaftliche Entwicklung der Ukraine

Wenn die Ukraine ein freier, selbständiger Staat bleibt, könnte eine Wasserstoffpartnerschaft zum gegenseitigen Nutzen aufgebaut werden. Die Ukraine könnte ein guter und verlässlicher Partner werden, um Wasserstoff günstig herzustellen und über die Nutzung der gut ausgebauten, bestehenden Gasinfrastrukturen den Wasserstoff zu niedrigen Transportkosten in die EU und nach Deutschland zu exportieren. Der Nutzen für die Ukraine wäre neben Deviseneinnahmen auch ein Know-how-Transfer und die Modernisierung der ukrainischen Energiewirtschaft. Dies könnte eine wichtige Aufbauhilfe für die Ukraine sein. Die Ukraine steht aktuell auch schon im Fokus der nationalen sowie der EU-Wasserstoffstrategie.

Die Ukraine weist langfristig günstige Erneuerbare Potenziale mit Stromerzeugungskosten von unter 80 €/MWh in Höhe von rund .2400 TWh¹ auf, überwiegend durch Wind an Land und Freiflächen-Photovoltaik (siehe Abbildung 1). Zur Einordnung: Deutschland hat aktuell eine Stromnachfrage von 565 TWh und hat längerfristig ein Potenzial an wirtschaftlich erschließbaren Erneuerbaren von rund 1.100 TWh unter 80 €/MWh (siehe Fraunhofer ISI et al. 2021). Aus den ukrainischen Erneuerbaren Potenzialen lassen sich damit potenziell rund 1.400 TWh an grünem Wasserstoff zu Kosten von unter 130 €/MWh herstellen (eigene, überschlägige Berechnungen auf der Grundlage von Lux et al. 2021).

¹ Auf Basis von Technologie- und Kostenannahmen für das Jahr 2050.

Abbildung 1: Kostenpotenzialkurven für EE-Strom (links) und für die Herstellung von grünem Wasserstoff (rechts) in der Ukraine im Jahr 2050 auf der Basis verschiedener EE-Technologien.



Für den Transport könnte nach einer Umrüstung die derzeitige Gaspipeline-Infrastruktur in Betracht gezogen werden. Wenn der Wasserstoff durch wiederverwendete Pipelines transportiert wird, sind zusätzliche Kosten von rund 5 €/MWh zu veranschlagen. Wenn neue Pipelines erforderlich sind, steigen die Kosten auf ca. 8 €/MWh (siehe Wietschel et al. 2021a und Wang et al. 2021). Die Gesamtkosten sind im Vergleich zu den Kosten der Herstellung in Deutschland damit durchaus konkurrenzfähig. Zu betonen ist hier aber, dass auch andere Staaten z.B. aus der MENA-Region ähnlich günstige wirtschaftliche Voraussetzungen für die Wasserstoffherzeugung und den Transport in der EU haben (siehe Lux et al. 2021).

Selbst unter Berücksichtigung des Eigenbedarfes der Ukraine (der gesamte Primärenergiebedarf über alle Energieträger lag laut Enerdata 2021 in der Ukraine im Jahr 2019 bei 1040 TWh) verbleiben damit noch sehr relevante Exportmengen für vergleichsweise günstigen Wasserstoff. Wenn die Ukraine nur 100 TWh an Wasserstoff im Jahr herstellen und verkaufen würde, kann man überschlägig von jährlichen Einnahmen in Höhe von rund 15 Mrd. € ausgehen, was ca. 10% des Bruttosozialproduktes der Ukraine des Jahres 2021 entspricht.

3.5 Die Nutzung eigener Potenziale zu Wasserstoffherstellung innerhalb der EU wird wichtiger

Zur Risikominderung sollte überlegt werden, die bestehenden Potenziale zur Erzeugung von grünem Wasserstoff innerhalb der EU stärker zu nutzen als bisher geplant. Eine aktuelle Studie kommt zu dem Ergebnis, dass innerhalb der EU langfristig ein erschließbares Potenzial zur Wasserstoffherzeugung von 5.000 bis 6.000 TWh besteht, insbesondere durch Photovoltaik und solarthermische Anlagen im Süden und Windkraftanlagen im Norden (siehe Fraunhofer ISI et al. 2021). Dabei muss allerdings beachtet werden, dass ein Teil der dafür notwendigen erneuerbaren Stromproduktion aus wirtschaftlichen und aus Effizienzgründen direkt genutzt werden sollte.

Die Hydrogen Roadmap der EU sieht im ambitionierten Szenario für eine Treibhausgasminde- rung eine Gesamtnachfrage nach Wasserstoff in der EU von 670 TWh in 2030 bzw. 2250 TWh

in 2050. Damit kann die EU die Wasserstoffnachfrage in treibhausgasneutralen Szenarien weitgehend selbst decken. Flächenkonkurrenz in der EU, eine schnellere THG-Minderung durch eine Direktelektrifizierung der Energiewirtschaft innerhalb der EU, Akzeptanzfragen und wirtschaftliche Aspekte können für einen Import aus Ländern außerhalb der EU sprechen. Jedoch ist unter Berücksichtigung von höheren Transportkosten sowie Risikoaufschlägen und der notwendigen Diversifizierung (siehe Impuls 3) der wirtschaftliche Vorteil eines Importes nur gering bzw. nicht vorhanden und gegen die Versorgungssicherheit abzuwägen. Deutschland allein gesehen wird wegen der hohen Wasserstoffnachfrage und begrenzter günstiger Erneuerbaren Potenziale auf Importe von Wasserstoff und Syntheseprodukten aus der EU oder Nicht-EU-Ländern künftig in der Höhe von 200 bis 500 TWh im Jahr 2050, abhängig vom Szenario angewiesen sein (siehe Fraunhofer ISI et al. 2021 und Wietschel et al. 2021b).

Der Ausbau einer grünen Wasserstofferzeugung sowie die Entwicklung eines europäischen Transportnetzes für Wasserstoff sind deshalb ein zentrales Anliegen und sollten mit Nachdruck verfolgt werden. Lösungen für kritische Infrastrukturthemen wie die derzeit begrenzten Transportkapazitäten von Spanien, welches hervorragende Potenziale zur Wasserstoffherstellung hat, nach Frankreich, sind zu entwickeln. Allerdings benötigt der Aufbau einige Jahre Zeit.

3.6 Syntheseprodukte können aus wirtschaftlichen Gründen sowie unter dem Aspekt der Versorgungssicherheit kurz- und mittelfristig attraktiver werden

Wichtige Wasserstoff-Syntheseprodukte wie Methanol oder Ammoniak können an Bedeutung gewinnen. Sie werden heute schon auf fossiler Basis hergestellt und international gehandelt. Ihr Vorteil sind somit bereits etablierte Bereitstellungsketten sowie eine Kombination aus hoher Transportdichte bei gleichzeitig relativ geringem Energieaufwand des Transports. Sie weisen bei längeren Distanzen geringere Transportkosten gegenüber Wasserstoff auf (Wietschel et al. 2021a). Hierdurch kommen interessante Länder fernab von Deutschland als potenzielle Lieferländer in Betracht, was die Diversifikationsmöglichkeiten erhöht (siehe Impuls 2). Dass üblicherweise ein Schiffstransport erfolgt, ist unter Flexibilitätsgesichtspunkten vorteilhaft. Auch wenn die heutigen Produktionsstandorte und Transportrouten heute vielleicht schon gut ausgelastet sind, so können sie wahrscheinlich recht schnell hochskaliert werden. Hier sind entsprechende Analysen durchzuführen.

Auch die Distributionslogistik zum Endverbraucher - ein vielfach unterschätzter Kostenfaktor - gestaltet sich deutlich kostengünstiger als bei Wasserstoff. Die Herausforderung wird vielmehr darin liegen, ob die Produktionsstandorte Zugang zu relativ kostengünstigen CO₂-Quellen haben werden (im Falle der kohlestoffhaltigen Produkte) und wie hoch die Kosten der zusätzlichen Syntheseschritte sind. Die Ausdifferenzierung dieser Kosten von kohlenstoffhaltigen und kohlenstofffreien H₂-Syntheseprodukten wird letztendlich die Attraktivität ihres Einsatzes in unterschiedlichen Märkten bestimmen. Gleichfalls wird die globale Nachfrageentwicklung der unterschiedlichen Verbrauchssektoren entscheidend dazu beitragen, ob und welcher Menge H₂-Syntheseprodukte in der EU-Einsatz finden.

Syntheseprodukte können somit tendenziell schneller in die EU und nach Deutschland transportiert werden und dort zur Versorgungssicherheit beitragen. So könnte der Import von Ammoniak ca. 22 TWh an Erdgas substituieren (eigene Berechnung basierend auf VCI 2022, Neuwirth et al. 2022 und Dechema 2017), die derzeit energetisch und stofflich in Deutschland für

die Ammoniakherstellung verwendet werden. Aktuell führen die hohen Erdgaspreise zu einer Reduktion der Ammoniakproduktion in Europa bzw. zu Importen aus Regionen mit niedrigerem Gaspreis (z. B. den USA) (siehe Yara 2022, Reuters 2021 und BASF 2021). Ob dies die Reaktion auf einen kurzfristigen Preisschock bleibt oder bereits der erste Schritt zu einer langfristigen strukturellen Veränderung der Wertschöpfungskette ist, bleibt schwer abzusehen und hängt maßgeblich von der langfristigen Preisentwicklung und den geschaffenen Rahmenbedingungen ab. Allerdings sind die Importoptionen von Ammoniak zu prüfen. Neben der Substitution von heimischem Ammoniak könnte Ammoniak auch als Transportträger für Wasserstoff dienen. Dies ist jedoch aktuell noch Thema von diversen Forschungsarbeiten. Bei der konventionellen Produktion von Methanol mittels katalytischer Verfahren basierend auf der Dampfreformierung von Erdgas zu Synthesegas entsteht ein Erdgasbedarf (energetisch und stofflich) von rund 9,7 MWh/t Methanol (siehe Neuwirth et al. 2022 und Pérez-Fortes et al. 2016). In Deutschland erfolgt die Methanol Herstellung derzeit an 3 von 4 Standorten integriert in der Raffinerieproduktion. Dort wird Methanol häufig aus Erdöl-Rückständen (z.B. durch partielle Oxidation) hergestellt, weshalb auch bei Methanol zu prüfen ist, was davon sinnvoll durch einen Import substituiert werden kann. Im Kontext der Systemtransformation hin zur Klimaneutralität könnte der Bedarf an Methanol in Deutschland und Europa steigen. Denn neben dem Einsatz von grünem Naphtha und Biomasse ist eine CO₂-neutrale Herstellung von Olefinen mit Wasserstoff als Rohstoff auch über Methanol als Zwischenprodukt möglich (Methanol-to-Olefins, MtO) (siehe VCI 2019).

Eine Diversifikation der Lieferländer wird daher zukünftig auch zu unterschiedlichen Bereitstellungsoptionen von H₂-Syntheseprodukten führen. Dies kann, muss jedoch nicht, zu insgesamt höheren Importkosten führen. Abhängig wird dies sein von einem Mix aus Einflussfaktoren zur Produktion, der Bereitstellungskette sowie dem spezifischen Nachfragemarkt. Ob sich die Vorteile der Syntheseprodukte gegenüber Wasserstoff auch langfristig ergeben, wird sich noch zeigen müssen.

Zu erwähnen ist, dass der Import von Syntheseprodukten auch zu einer Verlagerung von Wertschöpfungsketten führen kann und damit auch ein industriepolitisches Thema ist. Hier ist eine Diskussion der Bewertung der verschiedenen Aspekte zu führen.

3.7 Hohe Erdgaspreise und eine ungewisse Versorgungslage erschweren oder bremsen den Aufbau eines großen Wasserstoffsystems in Deutschland und der EU

Auf den ersten Blick verbessern die derzeit hohen Preise für fossile Energieträger, insbesondere Erdgas, die Wettbewerbssituation von Wasserstoff. Dennoch könnten paradoxerweise gerade diese hohen Preise und die unsichere Versorgung in den nächsten Jahren das zügige Hochfahren des Wasserstoffeinsatzes in Deutschland gefährden. Dies liegt darin begründet, dass Erdgas und grauem Wasserstoff – also Wasserstoff erzeugt aus Erdgas – in dem Transformationsprozess eine wichtige Rolle angedacht war und dies angesichts der aktuellen ungewissen Preisentwicklung und ungewissen Versorgungssicherheit den Ausbau erschweren und bremsen kann.

Ein Betrieb großer Anlagen allein mit grünem Wasserstoff direkt von Anfang an ist aufgrund der praktisch nichtexistenten Wasserstoffinfrastrukturen sowie aus wirtschaftlichen Überlegun-

gen kaum darstellbar: Dies würde letzten Endes erfordern, dass bereits ein vollständig ausgebautes, großes und sicheres Wasserstoffsystem aus Erzeugung, Netzen und großen saisonalen Kavernenspeichern verfügbar ist, wenn die ersten Nachfrager angeschlossen werden.

Um dies zu umgehen, wurde der Ansatz verfolgt, kurz- bis mittelfristig in fast allen bisher als prioritär angesehenen Wasserstoffeinsatzgebieten die Versorgungssicherheit zu einem großen Teil durch Erdgas zu stellen. Vereinfacht ausgedrückt sollte grüner Wasserstoff in den Stunden genutzt werden, in denen er verfügbar ist, und diese Nutzung dann über den Ausbau der grünen Produktionskapazität über Jahre hinweg sukzessive hochgefahren werden. In den übrigen Stunden sollten die Anlagen aber über grauen (also fossilen) Wasserstoff oder - je nach Prozess - direkt über Erdgas versorgt werden. Erdgas als Brückentechnologie ist darüber hinaus wichtig, um Gelegenheitsfenster bei anstehenden Re-Investitionen (z.B. in der Stahlindustrie und der Grundstoffchemie) zu nutzen und bereits frühzeitig in Transformationstechniken zu investieren bzw. gleichzeitig erste Emissionsminderungen zu erzielen. Ob oder wie die Strategie, den Wasserstoffmarkthochlauf durch Erdgas zu stützen, angepasst werden muss, ist noch nicht abzusehen.

Als weitere Herausforderung bringen auch die aktuell steigenden Gaspreise und die unsichere Versorgungslage die energieintensiven Industrien, die als ersten Ankerkunden im Wasserstoffsystem geplant sind, in eine zunehmend schwierige Situation. Angesichts hoher Erdgas- und Strompreise reduzieren erste Unternehmen bereits ihre Produktion (siehe: Chemietechnik 2022). Im Bereich der Ammoniakproduktion, aber auch anderer derzeit stark auf Erdgas angewiesene Branchen, erscheint ein dauerhafter Rückgang der Produktion in Europa zugunsten von Importen möglich; in welchem Ausmaß, lässt sich derzeit kaum vorhersehen (siehe auch Impuls 6). Im Bereich Stahl erscheint es fraglich, dass Unternehmen in der gegenwärtigen unsicheren Kosten- und Versorgungssituation ohne weitere Anreize kurzfristig in die Errichtung von innovativen Direktreduktionsanlagen investieren können; diese werden zumindest über einige Jahre zwar teilweise mit Wasserstoff, aber eben auch mit Erdgas betrieben werden müssen (siehe ZeitOnline 2022 und Handelsblatt 2022).

Ein Wasserstoff-Backbone-Netz, welches die großen Industriestandorte verbindet, schien bisher ein robuster erster Schritt für den H₂-Infrastrukturaufbau zu sein. Nun entstehen sowohl bei Stahl als auch bei Ammoniak, also genau denjenigen Bereichen, die oft als prioritäre, erste Wasserstoffeinsatzgebiete und damit als „Keimzellen“ des Wasserstoffsystems angesehen wurden, neue, nicht zu vernachlässigende Risiken für strukturelle Veränderungen. Diese Unsicherheiten übertragen sich auf die Planung der entsprechenden Transportinfrastrukturen für Wasserstoff und können damit den Aufbau des Wasserstoffsystems in Deutschland und der EU erschweren.

3.8 Ein harmonisiertes Vorgehen innerhalb der EU ist unumgänglich

Das europäische Energiesystem ist bereits stark vernetzt und die Vernetzungen nehmen immer weiter zu. Dies gilt insbesondere für Strom, aber auch für Erdgas und muss zukünftig auch für Wasserstoff und seine Syntheseprodukte gelten. Dies erfordert eine gemeinsame Strategie zur Entwicklung einer Transport- und Speicherinfrastruktur, mit der eine resiliente Versorgung mit Wasserstoff in ganz Europa gewährleistet werden kann. Dazu gehört überdies, dass die Entwicklung von Partnerschaften für den Import von Wasserstoff in eine gemeinsame Energie-

und Wasserstoffaußenpolitik im Einklang mit den Leitlinien der gemeinsamen Außen- und Sicherheitspolitik (EC, 2016) und der Global Gateway Strategie (EC, 2021) eingebettet ist. Nur so kann die EU ihre gemeinsame Stärke im Rahmen einer wertegeleiteten und gleichzeitig bewusst geostrategischen Energie- und Wasserstoffaußenpolitik, wie sie im Impuls 1 dargestellt wurde, einsetzen. Andernfalls besteht die Gefahr, dass die verschiedenen Mitgliedsstaaten aufgrund unterschiedlicher Ausgangs- und Interessenlagen im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit widersprüchliche Signale an die entsprechenden Partnerländer senden. Die neuen geopolitischen Herausforderungen, die sich aus der Krise in der Ukraine ergeben, sollten daher auch als Impuls für die Schaffung einer gemeinsamen Energie- und Wasserstoffaußenpolitik dienen.

4 Quellen

- Alessi, L., Benczur, P., Campolongo, F. *et al.* (2020): The Resilience of EU Member States to the Financial and Economic Crisis. *Soc Indic Res* **148**, 569–598 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11205-019-02200-1>
- Chemietechnik (2022): Gaspreis schockt die Chemie: Gründe und Folgen der hohen Gaspreise für die Industrie. 20.01.2022. <https://www.chemietechnik.de/markt/gruende-und-folgen-der-hohen-gaspreise-fuer-die-industrie-296.html>
- DECHEMA (2017): Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. DECHEMA e.V. Frankfurt.
- Edler, J., Blind, K., Frietsch, R., Kimpeler, S., Kroll, H., Lerch, C., ... & Walz, R. (2020). *Technologiesouveränität: Von der Forderung zum Konzept [Technology sovereignty: From demand to concept]* (No. 02/2020 (DE)). Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI).
- Enerdata (2021): Global Energy and CO₂ Data, <https://www.enerdata.net/research/energy-market-data-co2-emissions-database.html>, zuletzt abgerufen am 14.09.2021.
- Europäische Union (2016). A global Strategy for the European Union's Foreign and Security Policy. EU: Brussels [.https://eeas.europa.eu/headquarters/headquarters-homepage_en/17304/A%20Global%20Strategy%20for%20the%20European%20Union's%20Foreign%20and%20Security%20Policy](https://eeas.europa.eu/headquarters/headquarters-homepage_en/17304/A%20Global%20Strategy%20for%20the%20European%20Union's%20Foreign%20and%20Security%20Policy)
- Fraunhofer ISI *et al.* (2021): Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; consentec GmbH; ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; Lehrstuhl für Energie- und Ressourcenmanagement der TU Berlin (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; consentec GmbH; ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; Lehrstuhl für Energie- und Ressourcenmanagement der TU Berlin. Online verfügbar unter <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>, zuletzt aktualisiert am 17.06.2021, zuletzt geprüft am 17.06.2021.
- Handelsblatt (2022): Thyssen-Krupp ringt mit Folgen des Ukrainekriegs – Kurzarbeit möglich. 16.03.2022. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/stahl-und-industriekonzern-thyssen-krupp-ringt-mit-folgen-des-ukrainekriegs-kurzarbeit-moeglich/28171224.html>
- Löschel, A.; Moslener, U.; Rübhelke, D. (2010): Indicators of Energy Security in Industrialised Countries. *Energy Policy*, 38(4), 1665-1671.
- Lux, B.; Gegenheimer, J.; Franke, K.; Sensfuß, F.; Pfluger, B. (2021): Supply curves of electricity-based gaseous fuels in the MENA region. *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 162, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107647>
- Monopolkommission (2021): Energie 2021: Wettbewerbschancen bei Strombörsen, E-Ladesäulen und Wasserstoff nutzen 8. Sektorgutachten der Monopolkommission gemäß § 62 EnWG 2021.
- Neuwirth, M.; Fleiter, T.; Manz, P.; Hofmann, R. (2022): The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries - a site-specific approach applied to Germany. In: *Energy Conversion and Management*. Volume 252, 19 pp. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115052>
- Pérez-Fortes, M.; Schöneberger, J.C.; Boulamanti, A.; Tzimas, E. (2016): Methanol synthesis using captured CO₂ as raw material: Techno-economic and environmental assessment, *Applied Energy*, Volume 161, 2016, Pages 718-732, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.067>.
- SCI4climate.NRW (2021): Wasserstoffimporte, Bewertung der Realisierbarkeit von Wasserstoffimporten gemäß den Zielvorgaben der Nationalen Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030, Gelsenkirchen
- VCI (2019): Roadmap Chemie 2050. Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI, München. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>
- VCI (2022): Chemiewirtschaft in Zahlen 2021.
- Wang, A.; Jens, J.; Mavins, D.; Moultak, M.; Schimmel, M.; van der Leun, K. (2021): European Hydrogen Backbone. Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen. Creos, DESFA, Elering, Enagás, Energinet,

Eustream, FGSZ, Fluxys Belgium, Gas Connect. June 2021. Online verfügbar unter https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2021/06/EHB_Analysing-the-future-demand-supplyand-transport-of-hydrogen_June-2021_v3.pdf, zuletzt geprüft am 02.10.2021

Wietschel, M., Eckstein, J.; Riemer, M.; Zheng, L.; Lux, B.; Neuner, F.; Breitschopf, B.; Pieton, N.; Nolden, C.; Pfluger, B.; Thiel, Z.; Löschel, A. (2021a): Import von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten: von Kosten zu Preisen. HYPAT Working Paper 01/2021. Karlsruhe: Fraunhofer ISI (Hrsg.).

Wietschel, M.; Zheng, L.; Arens, M.; Hebling, C.; Ranzmeyer, O.; Schaadt, A.; Hank, C.; Sternberg, A.; Herkel, S.; Kost, C.; Ragwitz, M.; Herrmann, U.; Pfluger, B. (2021b): Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Karlsruhe, Freiburg, Cottbus: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEG (Hrsg.).

ZeitOnline (2022): Energiekosten: Stahlindustrie fordert politische Lösungen. 16. Februar 2022. https://www.zeit.de/news/2022-02/16/energiekosten-stahlindustrie-fordert-politische-loesungen?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F