

Wietschel, Martin et al.

Research Report

Chancen und Herausforderungen beim Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten

Perspektiven - Policy Brief, No. 03 / 2020 (DE)

Provided in Cooperation with:

Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI

Suggested Citation: Wietschel, Martin et al. (2020) : Chancen und Herausforderungen beim Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten, Perspektiven - Policy Brief, No. 03 / 2020 (DE), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0011-n-6182552>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/233465>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

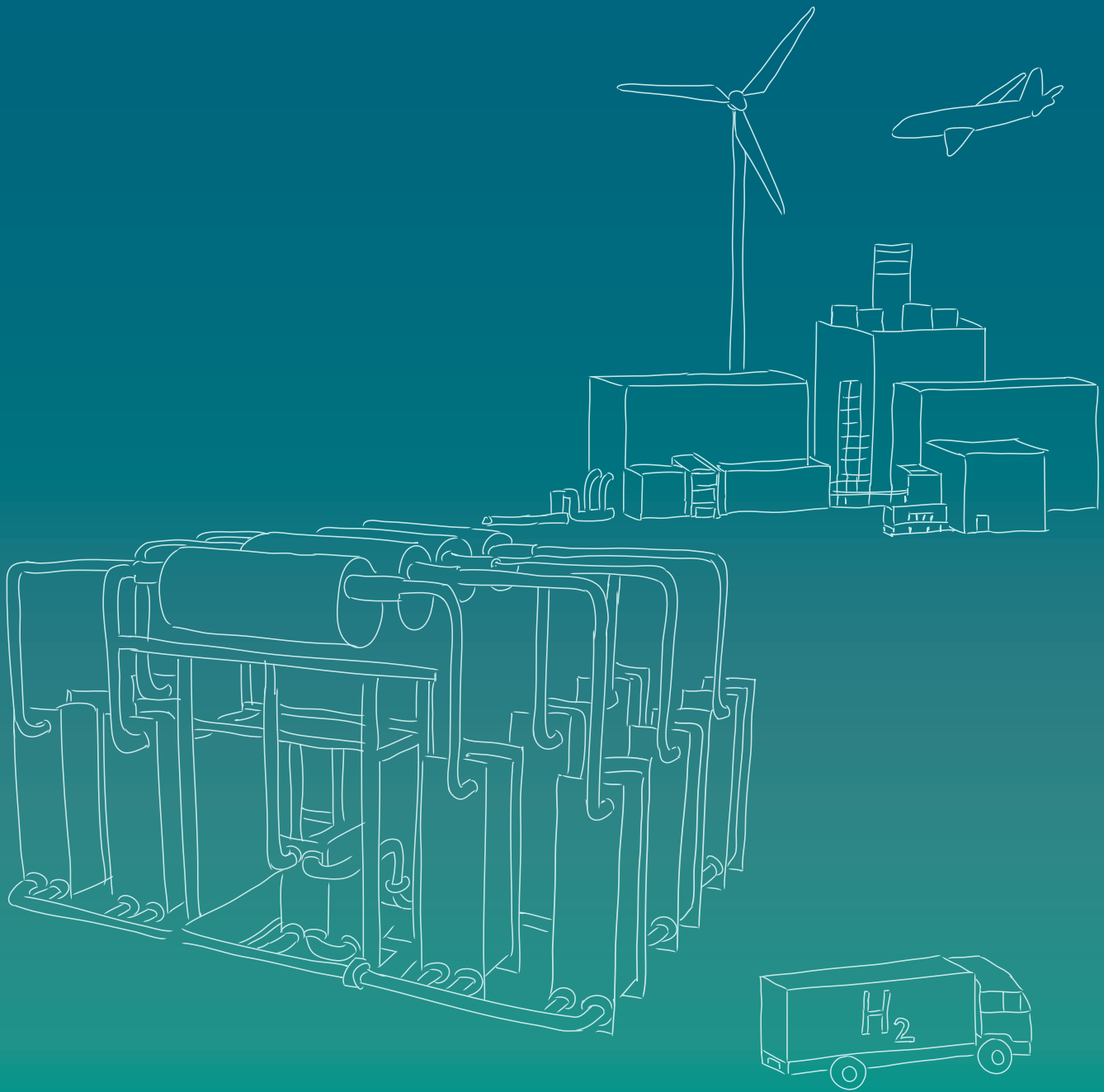
Chancen und Herausforderungen beim Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten



Chancen und Herausforderungen beim Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten

Autoren

Martin Wietschel, Anke Bekk, Barbara Breitschopf, Inga Boie, Jakob Edler,
Wolfgang Eichhammer, Marian Klobasa, Frank Marscheider-Weidemann, Patrick Plötz,
Frank Sensfuß, Daniel Thorpe, Rainer Walz



Zusammenfassung

In der nationalen sowie der europäischen Wasserstoffstrategie werden grüner Wasserstoff und seine Syntheseprodukte als wichtige Bausteine der Energie- und Klimawende angesehen. Der Import dieser Produkte wird dabei als ein wichtiger Strategiebaustein eingestuft. Neben vielen Aspekten, die nach heutigem Wissensstand als relativ gesichert eingestuft werden können, gibt es noch eine Reihe an offenen Fragen, die im vorliegenden Policy Brief behandelt werden und zu folgenden Schlussfolgerungen führen:

01

Klimaneutralität

Für eine Treibhausgasneutralität werden grüner Wasserstoff und Syntheseprodukte künftig benötigt, insbesondere in bestimmten Industriebereichen, wie der Grundstoffchemie, dem Eisen- und Stahlsektor und in Raffinerien, sowie im internationalen Flug- und Schiffsverkehr. Der Bedarf in anderen Anwendungsfeldern wird allerdings noch kontrovers diskutiert.

→ [Mehr Info auf Seite 13](#)

02

Markt

Der Markt für den Import wird nach heutigem Kenntnisstand langfristig wahrscheinlich zwischen 100 Milliarden Euro und 700 Milliarden Euro pro Jahr liegen. Die Spannbreite wird dadurch bestimmt, in welche Anwendungsbereiche Wasserstoff und abgeleitete Energieträger eindringen können. Dadurch entstehen neue Importabhängigkeiten und Risiken.

→ [Mehr Info auf Seite 14](#)

03

Erneuerbare Potenziale

Die Potenziale für erneuerbare Energien in Deutschland und der EU reichen unter den Aspekten der Verfügbarkeit, der Wirtschaftlichkeit und der Akzeptanz sehr wahrscheinlich nicht aus, diesen Bedarf kosteneffizient zu decken. Importe von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten werden deshalb als notwendig erachtet.

→ [Mehr Info auf Seite 14](#)

04

Importpotenziale

Techno-ökonomisch ist der Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten aus Regionen mit entsprechenden klimatischen und geographischen Voraussetzungen bereits recht umfassend analysiert worden und wird als realisierbar erachtet. Dabei ist allerdings zu beachten, dass der Aufbau von entsprechenden Produktions- und Transportkapazitäten zeit- und kapitalintensiv ist.

→ [Mehr Info auf Seite 15](#)

05

Importrisiko

Das Importrisiko reduziert sich, wenn partnerschaftliche und langfristige Beziehungen zu demokratisch, politisch und wirtschaftlich stabilen Produktionsländern für Wasserstoff aufgebaut werden können.

→ [Mehr Info auf Seite 16](#)

06

Importpreis

Welcher Wasserstoffimportpreis sich in einem internationalen Markt herausbilden wird, ist noch offen. Bestehende Analysen unterschätzen den sich herausbildenden Marktpreis wohl deutlich, weil sie sich üblicherweise nur an Herstellkosten orientieren und dabei wichtige andere Preisbestandteile vernachlässigen.

→ [Mehr Info auf Seite 17](#)

Zusammenfassung

07

Nachhaltigkeit

Der Aufbau der erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten, der Elektrolyseure zur Wasserstoffherstellung und der Syntheseanlagen benötigt Ressourcen wie Bauflächen, Wasser, Energie und CO₂, und ist mit entsprechenden Umweltfolgen behaftet. Weiterhin basiert die Stromproduktion in potenziellen Produktionsländern oftmals noch auf fossilen Quellen. Deshalb ist es wichtig, Nachhaltigkeitskriterien möglichst auf internationaler Ebene zu entwickeln und anzuwenden. Dabei ist darauf zu achten, dass diese Länder auch ihre eigenen energie- und klimapolitischen Ziele erreichen können. In den Produktionsländern sind deshalb eine Einbettung der Wasserstoffstrategie in die nationale Energiestrategie sowie eine enge Koordination mit industriepolitischen Instrumenten zentral, um nationale Ziel- und Ressourcenkonflikte zu vermeiden.

→ [Mehr Info auf Seite 19](#)

08

Kapitalgeber

Kapitalgeber werden nur dann ausreichend und günstiges Kapital zur Verfügung stellen, wenn eine stabile, langfristige und sichere Nachfrage nach Wasserstoff gegeben ist sowie bi- und multilaterale Abkommen länderspezifische Risiken adressieren.

→ [Mehr Info auf Seite 20](#)

09

Anreizsysteme

Bisher fehlen Anreizsysteme, um für die Exportländer attraktive Marktbedingungen für die Wasserstoffproduktion und den Transport zu schaffen. Hierzu zählen Investitionsförderinstrumente, Maßnahmen zur Schaffung einer gesicherten Wasserstoffnachfrage (beispielsweise Quoten) und Instrumente zum Ausgleich der höheren Kosten (beispielsweise Einspeisetarife oder Contracts for Difference).

→ [Mehr Info auf Seite 21](#)

10

Governance

Die Umweltauswirkungen einer Wasserstoffwirtschaft – verbunden mit den geringen Effizienzen von Erzeugung bis Nutzung – erfordern deren Einbindung in die Governance-Strukturen der Transformation des Energiesystems über ein hierarchisches Prinzip. Dies beinhaltet vier Stufen: (1) Das „Energy-Efficiency-First“-Prinzip zur Minimierung der Nachfrage, (2) Vorrang der Dekarbonisierung des Stromsektors, (3) prioritäre Nutzung von Alternativen auf Grundlage erneuerbarer Energiequellen mit ähnlichen Dienstleistungen, aber weniger Umweltauswirkungen (zum Beispiel direkte elektrische Nutzung, nachhaltige Biomasse/Biokraftstoffe/Biogas unter Berücksichtigung ihrer begrenzten Verfügbarkeit), (4) Nutzung von Wasserstoff und Syntheseprodukten, wenn die ersten drei Stufen (soweit sinnvoll) ausgeschöpft wurden. Dieses vierstufige Prinzip, welches als eine Erweiterung des „Energy-Efficiency-First“-Prinzips gesehen werden kann, sollte in die Governance-Strukturen der Transformation des Energiesystems implementiert werden, sowohl für nachfragende wie erzeugende Länder von Wasserstoff.

→ [Mehr Info auf Seite 23](#)

11

Internationale Zusammenarbeit

Den komplexen gesellschaftlichen Herausforderungen in potenziellen Produktionsländern des globalen Südens – einschließlich der Folgen des Klimawandels – kann durch eine geordnete Integration der Importstrategie in die internationale Zusammenarbeit begegnet werden. Dieses erfordert den gezielten Aufbau von Vertrauen, um entgegenzuwirken, dass Länder im Bereich technologischen und wissenschaftlichen Wissens trotz lokaler Produktion und Export international weiterhin und langfristig abgehängt werden könnten.

→ [Mehr Info auf Seite 24](#)

12

Lokale Kompetenzen

Dabei sollten lokale Wissensträger identifiziert werden, die an der Schnittstelle zur Gesellschaft und geographischen wie infrastrukturellen Fragestellungen agieren. Lokale Forschungseinrichtungen können beispielsweise als Intermediäre zwischen Politik und Gesellschaft integrierend gefördert werden. Dieses sollte im Zusammenspiel mit bestehenden Energiepartnerschaften, NGOs und zwischenstaatlichen Akteuren geschehen. Capacity building und die geordnete Integration der notwendigen Infrastruktur in einen regionalen sozialen und ökonomischen Kontext, kann die notwendige multilaterale Zuverlässigkeit, lokale Energieversorgung sowie ökonomische Marktattraktivität begünstigen. Neben dem Beitrag zur globalen Energiewende sind die Schaffung von Arbeitsplätzen und der Ausbau lokaler Wertschöpfung in den Produktionsländern zentrale Treiber für den Aufbau einer global vernetzten Wasserstoffwirtschaft. Dies erfordert zielgerichtete Strategien für den Aufbau wettbewerbsfähiger Industrie- und Dienstleistungssektoren entlang der Wertschöpfungskette.

→ [Mehr Info auf Seite 25](#)

13

Technologiesouveränität

Bisher stehen umfassende Bewertungen der Technologiesouveränität bei Wasserstofftechnologien noch aus. Erste Hinweise deuten allerdings darauf hin, dass aus deutscher und europäischer Sicht eine Gefährdung der Technologiesouveränität vermutlich eher hinsichtlich der Verlässlichkeit der Exportländer von grünem Wasserstoff als hinsichtlich des Zugangs zu bestehenden Technologien auftreten könnte. Um zu belastbaren Aussagen zu kommen, sind hier aber aktualisierte und technologisch ausdifferenziertere Analysen erforderlich. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Perspektive, grünen Wasserstoff zu importieren, auch eine Erweiterung der Technologiesouveränität um die Perspektive der Entwicklungsländer erfordert. Denn für viele Exportländer von grünem Wasserstoff liegen sowohl das verfügbare Technologiewissen als auch die Hersteller der Technologien im Ausland.

→ [Mehr Info auf Seite 26](#)

Abschließend ist zu bilanzieren, dass aus Sicht der Autorinnen und Autoren das Thema des Importes von grünem Wasserstoff in seiner Komplexität noch zu wenig verstanden wird und die Herausforderungen sowie die künftig noch zu lösenden Aufgaben deshalb teilweise unterschätzt werden.

Inhalt

Einleitung	9
Thesen	13
01 Klimaneutralität	13
02 Markt	14
03 Erneuerbare Potenziale	14
04 Importpotenziale	15
05 Importrisiko	16
06 Importpreis	17
07 Nachhaltigkeit	19
08 Kapitalgeber	20
09 Anreizsysteme	21
10 Governance	23
11 Internationale Zusammenarbeit	24
12 Lokale Kompetenzen	25
13 Technologiesouveränität	26
Literatur und Kommentare	31
Impressum	37



Einleitung

Das Thema Import von grünem Wasserstoff und die Zielsetzung des Policy Briefs

Die politische Zielsetzung der Klimaneutralität in Deutschland und der EU bis 2050 verlangt eine völlige Abkehr von fossilen Brenn- und Kraftstoffen bis 2050. Da für die Auswirkungen auf den Klimawandel ebenfalls der Pfad der Treibhausgasreduzierung von heute bis 2050 relevant ist, heißt dies, dass man frühzeitig alle Treibhausgasemissionen signifikant reduzieren muss.

Die fossilen Brenn- und Kraftstoffe müssen hierfür zum einen durch Maßnahmen der Energieeffizienz eingespart werden und zum anderen sehr weitgehend durch erneuerbare Energien substituiert werden. Da das Potenzial nachhaltiger Biomasse beschränkt ist und in Nutzungskonkurrenz zu Nahrungsmittelanbau steht, kommt für die Substitution überwiegend erneuerbarer Strom und darauf aufbauende Energieträger in Frage. Soweit es technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist, wird erneuerbarer Strom direkt genutzt, beispielsweise in Elektrofahrzeugen, Wärmepumpen, Wärmenetzen oder für Prozesswärmeerzeugung in der Industrie. Es gibt aber eine Reihe von Anwendungen wie die Luft- oder Schifffahrt sowie in der Grundstoffchemie oder in Raffinerien, in denen dies aufgrund der notwendigen Energiedichten oder verfahrenstechnisch derzeit nicht möglich erscheint. Hier kommen grüner Wasserstoff oder daraus erstellte grüne Syntheseprodukte wie Methanol oder Methan ins Spiel. Daher wird der grüne Wasserstoff derzeit als weiterer wichtiger Bestandteil der Energiewende angesehen und rückt derzeit in den Mittelpunkt der deutschen und europäischen Klimapolitik. Im Prinzip können fossile Brennstoffe in Verbindung mit Carbon Capture, Use oder Storage (CCUS) weiterhin auch bei Klimaneutralität eingesetzt werden. Dies wird besonders intensiv bei „blauem“ Wasserstoff diskutiert, also Wasserstoff, der aus Erdgas in Verbindung mit Carbon Capture Storage (CCS) hergestellt werden soll. Generell trifft CCS in Europa aber auf Akzeptanzfragen. Weiterhin entstehen vorgelagerte THG-Emissionen aus der Produktion und dem Transport von Erdgas in der vorgelagerten Kette.

Um Wasserstoff aus erneuerbarem Strom für den langfristigen deutschen Wasserstoffbedarf ausschließlich in Deutschland oder der EU zu produzieren, steht, den meisten Szenarien zufolge, nicht ausreichend erneuerbarer Strom in Deutschland zur Verfügung und der Wasserstoff wäre vergleichsweise teuer. In [1] wird gezeigt, dass genügend Potenziale für eine Wasserstoffwirtschaft in Deutschland wie in Europa zur Verfügung stehen bei Kosten bis 100 Euro/MWh Strom und diese insbesondere in Verbindung mit starken Energieeffizienzmaßnahmen ausreichen, um die Nachfrage zu decken. Dies führt zu höheren Kosten der Transformation des Energiesystems, die gegen Fragen der Versorgungssicherheit abgewogen werden müssen. Deshalb wird derzeit der Import von nachhaltig produzierten Energieträgern wie grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten diskutiert. Die Idee ist, dass Regionen mit vorteilhaften Bedingungen für erneuerbare Energien (zum Beispiel hoher Sonneneinstrahlung und günstigen Windbedingungen) kostengünstig nachhaltige Energieträger produzieren könnten. Diese sogenannten grünen synthetischen Brenn- und Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Stromproduktion werden dann nach Deutschland oder in andere Länder exportiert. In Abbildung 1 sind die einzelnen Umwandlungsschritte von der Quelle bis zu Anwendungsbereichen dargestellt.

Auf der politischen Agenda ist das Thema des Imports ebenfalls deutlich verankert. In der Wasserstoffstrategie der Europäischen Kommission (siehe [2]) wird die Frage des Importes von grünem Wasserstoff angesprochen. Die Zusammenarbeit im Bereich sauberen Wasserstoffs mit Nachbarländern und

Einleitung

-regionen der EU, um zu deren Übergang zu sauberer Energie beizutragen und nachhaltiges Wachstum und nachhaltige Entwicklung zu fördern, ist eines der Ziele. In der aktuellen nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) Deutschlands (siehe [3]) wird ebenfalls davon ausgegangen, dass voraussichtlich relevante Mengen an grünem Wasserstoff nicht nur in Deutschland produziert werden können. Aus dieser Sicht wird Deutschland auch in Zukunft ein großer Energieimporteur bleiben, mit allen damit verbundenen Konsequenzen. Ein wichtiges Strategieelement der NWS ist deshalb, den Import von Wasserstoff vorzubereiten.

Die Deckung der Nachfrage nach grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten aus Ländern mit günstigen klimatischen und geographischen Voraussetzungen wird in abgeschlossenen und laufenden Analysen überwiegend aus einer technisch-ökonomischen Perspektive behandelt. Lediglich am Rande betrachtet werden in den Studien Belange der Exportländer (siehe unter anderem [5], [6], [7], [4]). Dies ist ein Defizit. Die NWS, die Wasserstoffstrategie der EU, die internationalen Übereinkommen zum Klimaschutz und den Sustainable Development Goals (SDG) erfordern eine deutlich verbreiterte Analyse und Bewertung. In diesem Zusammenhang weisen verschiedene Studien (siehe zum Beispiel [8]) sowie die NWS auf die Notwendigkeit der Entwicklung und Anwendung eines internationalen Nachhaltigkeitsstandards für die Wasserstoffherzeugung hin.

Die Bedürfnisse der Partnerländer müssen in künftigen Strategien stärker berücksichtigt werden. Letztere umfassen die nachhaltige Deckung der eigenen Energienachfrage, das Erreichen eigener Klimaziele unter Nutzung der ökonomischen Entwicklungsmöglichkeiten einer Wasserstoffwirtschaft und das Einhalten spezifischer Nachhaltigkeitskriterien für die

Wasserstoffwirtschaft in den Partnerländern. Weiterhin müssen die Fähigkeiten der Länder, solche kapital- und technologieintensiven Anlagen zu errichten, analysiert werden (zum Beispiel Governancestrukturen, Kapitalzugang, geopolitische Stabilität). Ebenso fehlen Kenntnisse über die sich für diese Länder ergebenden Chancen (zum Beispiel Auswirkungen auf die lokale Wertschöpfung, Möglichkeiten des Capacity Building) sowie Akzeptanz- und Stakeholderanalysen.

Ein integrativer Blick auf die weltweite Nachfrage nach Wasserstoff und deren langfristige Entwicklung im Rahmen von Klimaneutralität, aber auch von ökonomischen Bedürfnissen, ist bis heute ebenfalls nicht erfolgt. Somit fehlt bisher ein Verständnis dafür, in welchem Umfang die Potenziale künftig ausgeschöpft werden müssen und mit welchem Preisniveau von grünem Wasserstoff entsprechend zu rechnen ist. Dies sind aber wesentlich notwendige Informationen für die Entwicklung einer Importstrategie.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieses Policy Briefes, die über techno-ökonomische Fragen hinausgehenden Aspekte eines zukünftigen Wasserstoffimportes aufzuzeigen und zu diskutieren. Dieser Policy Brief soll damit dazu beitragen, den gesamten Weg zu einem Import von grünem Wasserstoff für die Energiewende in Deutschland zu skizzieren. Die Themen der Klimaneutralität, der technischen und ökonomischen Potenziale, der Nachhaltigkeit, aber auch Kapitalverfügbarkeit, Governance und lokale Auswirkungen werden im Folgenden einzeln behandelt. Der Stand des Wissens und die noch anstehenden Herausforderungen werden herausgearbeitet und Empfehlungen für künftige Arbeiten gegeben.

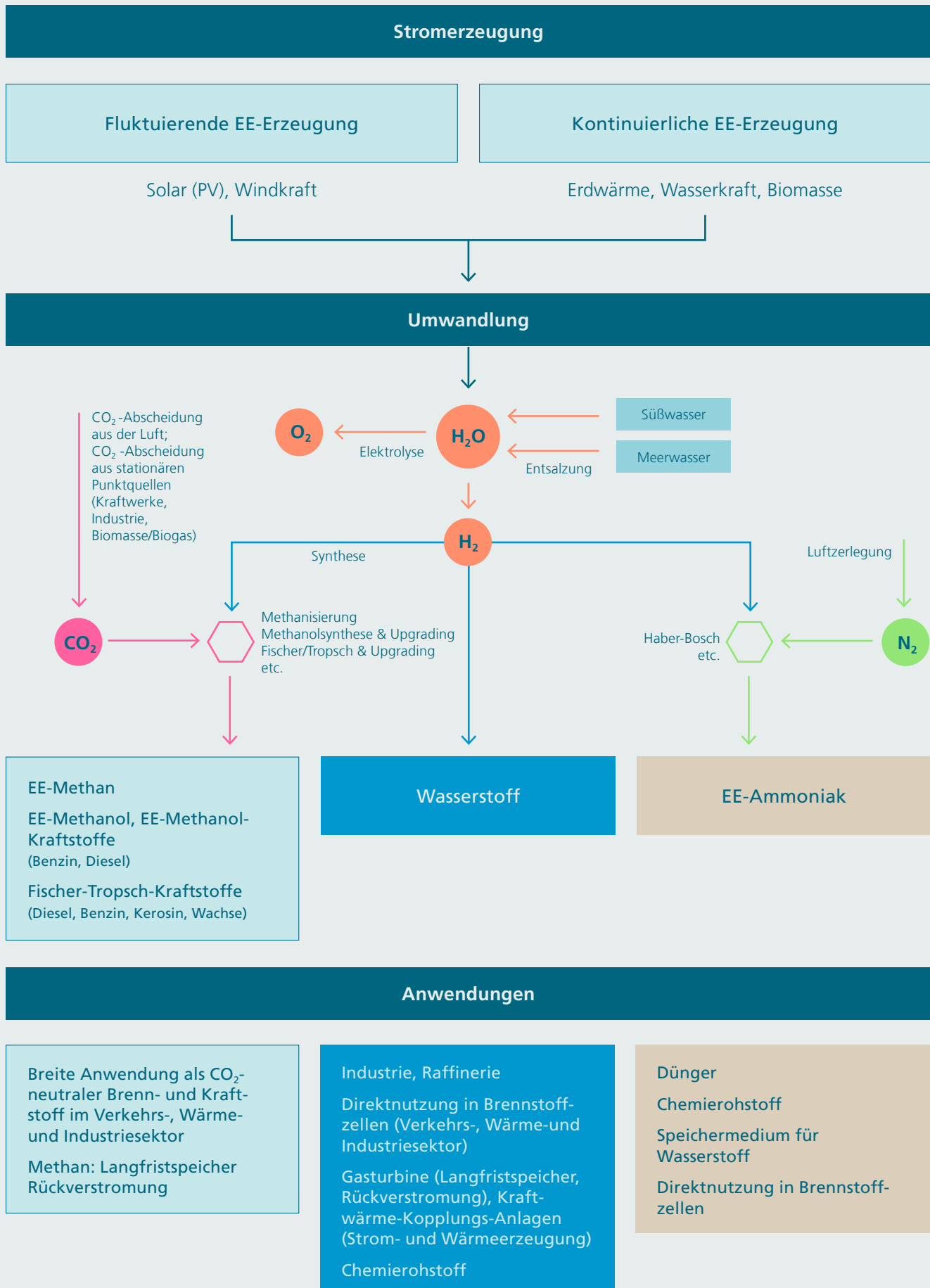


Abbildung 1: Ausgewählte Umwandlungspfade von grünen Wasserstoff und Syntheseprodukten auf Basis erneuerbaren Stroms (in Erweiterung von [4])



Thesen

01

Klimaneutralität erfordert den Einsatz von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten in Deutschland

In den Studien mit Zielsetzung einer Klimaneutralität wird der Einsatz von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten in Teilen der energieintensiven Industrie und des Fernverkehrs als zentrales Element gesehen neben der Energieeffizienz und Suffizienzstrategien, einer CO₂-Abscheidung und Speicherung sowie dem Einsatz von fortschrittlichen Biokraftstoffen. Technische Anforderungen in der jeweiligen Anwendung sind der Hauptgrund für diese Einschätzung. Industrielle Prozesswärme benötigt häufig über die reine Wärmebereitstellung hinaus die Einstellung bestimmter chemischer Verfahrensbedingungen, zum Beispiel eine reduktive oder oxidative Atmosphäre, wie beim Brennen von keramischen Werkstoffen (siehe [15]). Eine Eigenschaft, die durch direkte Elektrifizierung nicht bereitgestellt werden kann und den Einsatz eines stofflichen Energieträgers wie Wasserstoff, Kohle oder Methan bedingt. Chemische Grundstoffe haben von Natur aus eine stoffliche Dimension, häufig auf Basis von Kohlenstoff. Dieser kann nicht durch einen nicht-stofflichen Energieträger wie Elektrizität ersetzt werden. Der internationale Flug- und Schiffsverkehr benötigt Energieträger mit einer Energiedichte, die aktuell nur durch flüssige Kohlenwasserstoffe bereitgestellt werden kann und nicht durch Wasserstoff oder Batterien. In anderen Anwendungsbereichen, wie bei Lkw oder der Prozesswärmeerstellung in der Industrie, ist die künftige Rolle von Wasserstoff aufgrund verfügbarer, oft direkt elektrischer Alternativen noch unsicher. Bei Pkw wird der Elektromobilität eine dominante Rolle eingeräumt. Eher kontrovers diskutiert wird auch die künftige Rolle von Wasserstoff und seiner Syntheseprodukte in der Wärmeversorgung von Gebäuden oder bei Speichern für die Stromerzeugung. Hier sind andere Treibhausgasminderungsoptionen in der Regel günstiger.

Der Einsatz von Wasserstoff in Prozessen der energieintensiven Industriebranche muss differenziert betrachtet werden. Einmal spielt Wasserstoff als Rohstoff (Feedstock) bereits heute in Raffinerien und der Chemieindustrie eine bedeutende Rolle, die auf grünen Wasserstoff umgestellt werden könnten. Andererseits könnte er künftig auch in der Eisen- und

Stahlindustrie wichtig werden, die aufgrund ihres sehr hohen Energieverbrauchs ein Schlüsselsektor auf dem Weg hin zu einer klimaneutralen Welt ist. In den Bereichen Raffinerien, Chemie sowie Eisen- und Stahlindustrie gibt es bereits eine Reihe an Ankündigungen, Demo- und Pilotprojekten sowie erste Umsetzungsvorhaben im groß-industriellen Maßstab.

Weiterhin ist der Einsatz zur Erzeugung nötiger Prozesswärme in verschiedenen Industrieenanwendungen, wie der Glas- oder Papierindustrie, für eine Umstellung auf eine CO₂-neutrale Produktion eine mögliche Zukunftsoption für grünen Wasserstoff. Allerdings wird diese Option häufig aufgrund der fehlenden Wirtschaftlichkeit eher als langfristige Option gesehen.

Grüner Wasserstoff kann für eine Reihe an Anwendungen im Verkehr eingesetzt werden. Brennstoffzellen-Fahrzeuge sind heute schon bei Pkw in ersten Kleinserien kommerziell verfügbar. Im Bereich des Materialtransports, beispielsweise bei Gabelstaplern, sind sie teilweise im Regelbetrieb zu finden. Weiterhin existieren Flottenversuche in Deutschland im Nah- und Fernverkehr von Bussen. Im Lkw-Segment, besonderes bei mittleren und schweren Lkw, gibt es einige Aktivitäten und einzelne Hersteller haben die Produktion von Kleinserien in den nächsten Jahren angekündigt. Ebenfalls im Schienenverkehr gibt es erste Flottenversuche beziehungsweise Ankündigungen für nichtelektrifizierte Streckenteile.

Einschränkungen für Wasserstoff im Verkehr existieren bei Anwendungen, wo eine sehr hohe Energiedichte gefordert wird, wie im internationalen Flug- und Seeverkehr. Hier ist man in der Regel auf die Syntheseprodukte von Wasserstoff für eine Treibhausgasminderung angewiesen. Da das Verkehrsaufkommen vor allem im Luftverkehr stark wächst (zumindest vor der Covid-Krise), kommt Syntheseprodukten von Wasserstoff hier eine zunehmende Rolle zu. Weiterhin gibt es Bereiche wie den schweren Straßengüterverkehr auf der Langstrecke, bei denen heute noch nicht klar ist, welche Rolle Syntheseprodukte spielen werden.

Festzuhalten bleibt, dass eine relevante Menge an grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten in Deutschland zur

Thesen

Erreichung der Klimaneutralität benötigt wird, die Höhe derzeit aber noch unterschiedlich gesehen wird. Weitere Forschungsarbeiten sind notwendig, um den wirtschaftlich sinnvollen Anteil an grünem Wasserstoff und Synthesepro-

dukten im Energiesystem der Zukunft zu bestimmen. Technologische Innovationen können diesen Anteil auch in Zukunft stark beeinflussen.

02

Der Markt für grünen Wasserstoff und Syntheseprodukten kann groß werden

Wie vorab gezeigt, können bei ambitionierten Klimazielen wie Treibhausgasneutralität grüner Wasserstoff und dessen Syntheseprodukte besonders im Verkehr und der Industrie eine wichtige Rolle einnehmen. Verschiedene Studien haben sich mit dem weltweiten Potenzial von Wasserstoff und Syntheseprodukten auseinandergesetzt. In [9] werden die weltweiten Power-to-X (PtX)-Marktpotenziale im Bereich von 320 bis 726 TWh für 2030 und 972 bis 6.180 TWh bis 2050 gesehen (vergleiche auch [10]). Dies entspricht einer Marktgröße von 45 bis 102 Milliarden Euro jährlich ab 2030 und 107 bis 680 Milliarden Euro jährlich ab Jahr 2050. Zum Ver-

gleich: Die Größe der Ölmärkte beträgt zu heutigen Preisen etwa 2.000 Milliarden Euro jährlich (vergleiche [9]). In [11] werden 2030 für europäische Unternehmen Umsätze von bis zu 65 Milliarden Euro in Europa und weitere circa 65 Milliarden Euro auf den weltweiten Märkten im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen gesehen.

Für Deutschland wird in ambitionierten Klimaschutzszenarien je nach Studie und Szenario ein Bedarf nur an synthetischen Brenn- und Kraftstoffen im Jahre 2050 von 530 TWh bis 910 TWh gesehen (siehe [12], [13], [14]). Zum Vergleich: In 2018 betrug die gesamte Stromnachfrage in Deutschland 560 TWh (siehe [66]) und der gesamte Endenergieverbrauch 2.500 TWh (siehe [67]). Dies zeigt, welche Anstrengungen in diesem Bereich künftig notwendig werden.

03

Erneuerbare Ausbaupotenziale in Deutschland limitieren die heimischen Herstellungspotenziale für Wasserstoff

Die Dekarbonisierung des Energiesystems wird letztlich in großen Teilen über die Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien erfolgen, welche die fossilen Energieträger substituieren. Dieser Strom kann entweder direkt oder indirekt über Wasserstoff beziehungsweise aus Wasserstoff erzeugten synthetischen Kohlenwasserstoffen im Energiesystem eingesetzt werden. Die Anteile dieser Energieträger fallen in

verschiedenen Szenarien allerdings recht unterschiedlich aus. Wasserstoff und abgeleitete synthetische Brennstoffe zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität im Einsatz, aber aufgrund der Effizienz der Prozesskette auch durch einen höheren Strombedarf aus. Der resultierende Strombedarf in Szenarien mit starker Nutzung von Wasserstoff und auf Wasserstoff basierenden synthetischen Brennstoffen erreicht in Studien Werte bis knapp unterhalb von 3.000 TWh (siehe [16]). Dies erfordert einen erheblichen Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland, die 2019 einen Umfang von 243 TWh hatte (siehe [17]). Das Ausbaupotenzial an erneuer-

barer Stromerzeugung wird in Deutschland aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz nach internen Berechnungen des Fraunhofer ISI bei 700 bis 1.100 TWh gesehen. Somit reichen die heimischen Potenziale erneuerbarer Energien vermutlich nicht aus, um den gesamten Strombedarf inklusive der Erzeugung von Wasserstoff zu decken. Bei Szenarien mit besonderer Betonung direkter Stromanwendungen können jedoch nicht unerhebliche Mengen des benötigten Stroms durch heimische Potenziale abgedeckt werden (siehe [1]). Das Ausbaupotenzial für erneuerbare Stromerzeugung in den europäischen Nachbarstaaten fällt nach eigenen Berechnungen mit mehr als 15.000 TWh deutlich höher aus (siehe [1]). Bei sehr hoher Ausnutzung dieses Potenzials ist jedoch mit höheren Kosten und schwindender Akzeptanz in der Bevölkerung zu rechnen. Als Alternative bietet sich deshalb eine Produktion des Wasserstoffs in den Regionen der Welt an, die aufgrund ihrer geographischen und klimatischen Gegebenheiten ein natürlich hohes Angebot an (kostengünstigen) erneuerbaren Energien und weniger intensiv genutzten Flächen

haben. So konkurrieren zum Beispiel solare Technologien in Deutschland immer auch mit anderen Landnutzungen. In den unbesiedelten Flächen Nordafrikas entfällt diese Nutzungskonkurrenz oftmals und der potenzielle Ertrag der PV fällt teilweise doppelt so hoch aus.

Bei aller Unsicherheit über zukünftige Entwicklungen erscheint es wahrscheinlich, dass aufgrund geringerer Kosten im Ausland und Grenzen in der Akzeptanz der heimischen Bevölkerung bedeutende Wasserstoffmengen außerhalb Deutschlands und auch außerhalb Europas erzeugt werden. In der nationalen und der europäischen Wasserstoffstrategie wird dies ebenfalls betont. Allerdings weiß man noch zu wenig über die Akzeptanz und die Voraussetzungen dafür, dass die Importe tatsächlich in dem als erforderlich angesehen Maße stattfinden werden. Auf die einzelnen Problempunkte und offenen Forschungsfragen wird deshalb in den folgenden Kapiteln eingegangen.

04

Der Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten ist technisch und ökonomisch attraktiv

Einige Studien haben sich mit den Herstellungskosten von importierten synthetischen Brenn- und Kraftstoffen auf der Basis von erneuerbarer Stromerzeugung auseinandergesetzt (siehe [4], [18], [4], [19], [20], [21]). Strompreise, Effizienz und Volllaststunden der Elektrolyseure sowie die Investitionen in die Elektrolyseure haben den größten Einfluss auf die Herstellungskosten. Die Stromkosten aus erneuerbaren Anlagen in Ländern mit entsprechend günstigen klimatischen Voraussetzungen, wie beispielsweise in Nordafrika, sind deutlich niedriger als in Deutschland – mit Stromgestehungskosten durch PV- und Windanlagen bei unter 3 €/kWh. Sie liegen dabei um mehr als die Hälfte niedriger als die Kosten von deutschen Standorten. Auch weisen sie höhere Volllast-

stunden mit über 4.000 Stunden im Jahr aus. Somit sind die Erzeugungskosten von Wasserstoff und Syntheseprodukten in Ländern mit günstigen klimatischen Voraussetzungen deutlich günstiger als eine Erzeugung in Deutschland. Weiterhin sind die Transportkosten der synthetischen Brenn- und Kraftstoffe aus diesen Ländern im Vergleich zu den Herstellungskosten eher gering. Damit ist es aus der Perspektive der Versorgungskosten sinnvoll, synthetische Brenn- und Kraftstoffe nach Deutschland zu importieren.

Technische Hindernisse stehen dem nicht entgegen beziehungsweise treten nur in besonderen Fällen auf. Sie existieren beispielsweise noch beim Transport von kryogenem Wasserstoff, das heißt flüssigem Wasserstoff bei -253 °C , für den entsprechende Schiffe noch weiterentwickelt und zur Serienreife gebracht werden müssen, oder beim Transport von synthetischem Methan, für das man umgerüstete Erdgas-

Thesen

pipelines verwenden kann. Eine weitere, derzeit bestehende technische Anforderung ist, dass in den Produktionsländern Wasser benötigt wird, was in manchen Gegenden herausfordernd ist und man hier evtl. mit Meerwasserentsalzungsanlagen arbeiten muss. Die Herstellung der Syntheseprodukte benötigt zudem CO₂. Die CO₂-Quellen können aus biogenen Quellen oder stationären Ursprungs sein, zum Beispiel aus fossilen Kraftwerken oder der Industrie. Da diese nicht immer zur Verfügung stehen, wird derzeit an Technologien gearbeitet, die CO₂ direkt aus der Luft gewinnen. Dies ist jedoch energieintensiv, hat einen hohen Platzbedarf und verursacht zusätzliche Kosten.

Die wirtschaftliche Bewertung zeigt, dass Wasserstoff und seine Syntheseprodukte auf Basis von erneuerbarem Strom derzeit noch zwei- bis dreimal so teuer sind wie Wasserstoff auf der Basis fossiler Energieträger (siehe [7]). Das heißt,

Kostensenkungspotenziale sind zu heben und für die Markteinführung und den Markthochlauf finanzielle Anreize zu setzen. Nach derzeitigem Stand werden die Kosten für synthetische Kraftstoffe aber klar über den Kosten heutiger fossiler Kraftstoffe liegen, selbst bei Import aus besonders attraktiven Regionen. Zudem ist volkswirtschaftlich zu bedenken, dass Deutschland durch den Import von Wasserstoff die Chance auf zusätzliche einheimische Wertschöpfung verliert und weiterhin in erheblichem Maße von Energieimporten abhängig bleibt. Der letzte Punkt wird im folgenden Kapitel thematisiert.

Zuletzt soll an dieser Stelle noch erwähnt werden, dass sich der Aufbau von entsprechenden Produktionsanlagen und Transportinfrastrukturen über einige Jahre hinweg ziehen wird und mit nennenswerten Importmengen wohl erst ab 2030 zu rechnen ist.

05

Strategien für die neuen Importabhängigkeiten einer Wasserstoffwirtschaft müssen entwickelt werden

Wenn künftig von relevanten Importmengen an grünem Wasserstoff ausgegangen wird, stellt sich die Frage, was dies für die Versorgungssicherheit Deutschlands bedeutet. Deutschland ist heute hochgradig abhängig vom Import fossiler Energien, überwiegend aus dem nicht-europäischen Ausland. In 2019 wurden 60 Prozent des Primärenergieverbrauchs in Deutschland über Mineralöl und Gas abgedeckt (siehe [22]). Deutschland bezieht sein Erdgas dabei überwiegend aus Russland, den Niederlanden und Norwegen (siehe [23]). Erdöl wird überwiegend aus Russland, Norwegen, Großbritannien, Libyen und weiteren Drittländern bezogen (siehe [24]). Auch Steinkohle wird weitgehend importiert aus Ländern wie Australien. Teilweise wird die Produktion einiger Lieferländer (Niederlande, UK) in den nächsten 10 bis 20 Jahren stark zurückgehen.

Der Umbau des Energiesystems zielt nicht nur auf eine nachhaltige, wettbewerbsfähige und effiziente Energiebereitstellung ab, sondern auch auf eine bezahlbare und sichere Energieversorgung (siehe [25]). Bei der Betrachtung der Energieversorgungssicherheit beschränkt sich die EU Energy Union deshalb nicht auf die Abhängigkeit von Importen, sondern bezieht Systemstabilität, kritische Infrastrukturen und Cybersicherheit mit ein. So wird im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energien die Wirkung volatiler erneuerbarer Energien auf die Stabilität des Netzes analysiert (siehe [26], [27]). Dennoch spielt die Importabhängigkeit in der Diskussion um die Versorgungssicherheit eine wesentliche Rolle. Die Risikobewertung von Importen bezieht sich auf verschiedene Faktoren (siehe [28], [23]) wie Importanteil, Stabilität des Exportlandes, Ersetzbarkeit des Exportlandes, Anzahl (potenzieller) Exportländer, Risiko beim Transport (Transitstrecke, Infrastrukturen), Ersetzbarkeit des importierten Energieträgers, Diversifizierung der Bezugsquellen.

Wie oben ausführlich thematisiert, ersetzen in verschiedenen Klimaschutzszenarien bis 2050 grüner Wasserstoff und Syntheseprodukte fossile Energieträger in allen Sektoren, jedoch mit unterschiedlicher Funktion und in unterschiedlichem Umfang. So bietet Wasserstoff für das deutsche Stromnetz eine neue Flexibilitätsoption und leistet damit einen Beitrag zur Systemstabilität, während in der Industrie grüner Wasserstoff für die stoffliche Nutzung an Bedeutung gewinnen wird (siehe [29] und Kapitel 01). Im Verkehrssektor werden in Abhängigkeit des zugrunde gelegten Szenarios bis zu circa 50 Prozent des Energiebedarfs in 2050 durch Wasserstoffbasierte Kraftstoffe gedeckt (siehe [13]). Diese könnten die gegenwärtige Importquote im Verkehrssektor von beinahe 100 Prozent deutlich reduzieren. Da sich die Länder, aus denen Deutschland zukünftig Wasserstoff-basierte Energieträger importieren wird, erst noch herausbilden müssen, sind sowohl Risiken in Verbindung mit Transport beziehungsweise

Transitrisiken sowie politische Stabilität als auch Diversität der Lieferländer nicht einschätzbar. Dennoch bieten sich für Deutschland und die EU schon jetzt verschiedene Möglichkeiten, eine solide Basis für eine zuverlässige Energieversorgung zu entwickeln. Zum einen kann eine Integration und Vernetzung der Energiemärkte in der EU regionale Engpässe und Instabilitäten auffangen. Zum anderen kann über Berücksichtigung sozio-ökonomischer und nachhaltiger Kriterien bei der Auswahl von Produktionsländern sowie über die Stärkung der internationalen Zusammenarbeit (siehe Kapitel 11) mit ausgewählten Ländern eine langfristige und partnerschaftliche Beziehung aufgebaut werden, die zur Versorgungssicherheit beitragen kann. Diese Politikansätze weiter auszuarbeiten und eine neue nachhaltige Politik zur Zusammenarbeit mit künftigen Produktionsländern zu entwickeln, ist eine anstehende politische Aufgabe.

06

Die zukünftige Entwicklung von globaler Nachfrage und Angebot sowie eines internationalen Preises für Wasserstoff ist noch offen

Wie in Kapitel 04 dargestellt, gibt es eine Reihe von Studien, die die ökonomische Attraktivität des Importes gegenüber der einheimischen Produktion von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten analysiert haben. Allerdings werden dabei immer einzelne Länder wie Australien, Marokko, Argentinien oder Länderregionen (wie Nordafrika) untersucht (siehe [18], [30], [7], [31]). Der potenzielle Import wird dann für ausgewählte Länder wie Deutschland oder Regionen wie der EU analysiert. Was allerdings fehlt, ist eine weltweite Übersicht über das Angebotspotenzial sowie auch eine weltweite Übersicht über das Nachfragepotenzial und inwieweit diese zusammenpassen. Für eine umfassende Analyse müssten weltweit mögliche Produktionsländer identifiziert und ana-

lysiert werden. Dabei sind in einem ersten Schritt natürliche Potenziale, wie Ressourcenverfügbarkeit (Wind, solare Strahlung, Wasser), sowie technische Machbarkeit und Kosten für Anlagen und Infrastrukturen wie Strom- oder Gasleitungen zu berücksichtigen. In einem zweiten Schritt sind dann die wirtschaftlichen, sozialen, energie- und entwicklungspolitischen Ziele und Restriktionen in die Analyse zu integrieren. Dies umfasst die Sicherung der eigenen Energieversorgung des Produzentenlandes sowie das Erreichen eigener energie- und klimapolitischer Ziele. Weitere Aspekte wie industrielle Strukturen, Know-how für Aufbau von Produktionskapazitäten, Kapitalverfügbarkeit für die Anlageninvestitionen, Ausbildungsstrukturen und -kapazitäten sowie Umweltaspekte sind ebenfalls aufzunehmen. Auch haben die Interessen der Akteure vor Ort sowie globaler Akteure und Stakeholder Einfluss auf die potenzielle Produktion. All diese Aspekte bestimmen letztlich das Potenzial des Exportes von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten. Viele der genannten Aspekte gelten auch für die potenziellen Importländer. Energie-

Thesen

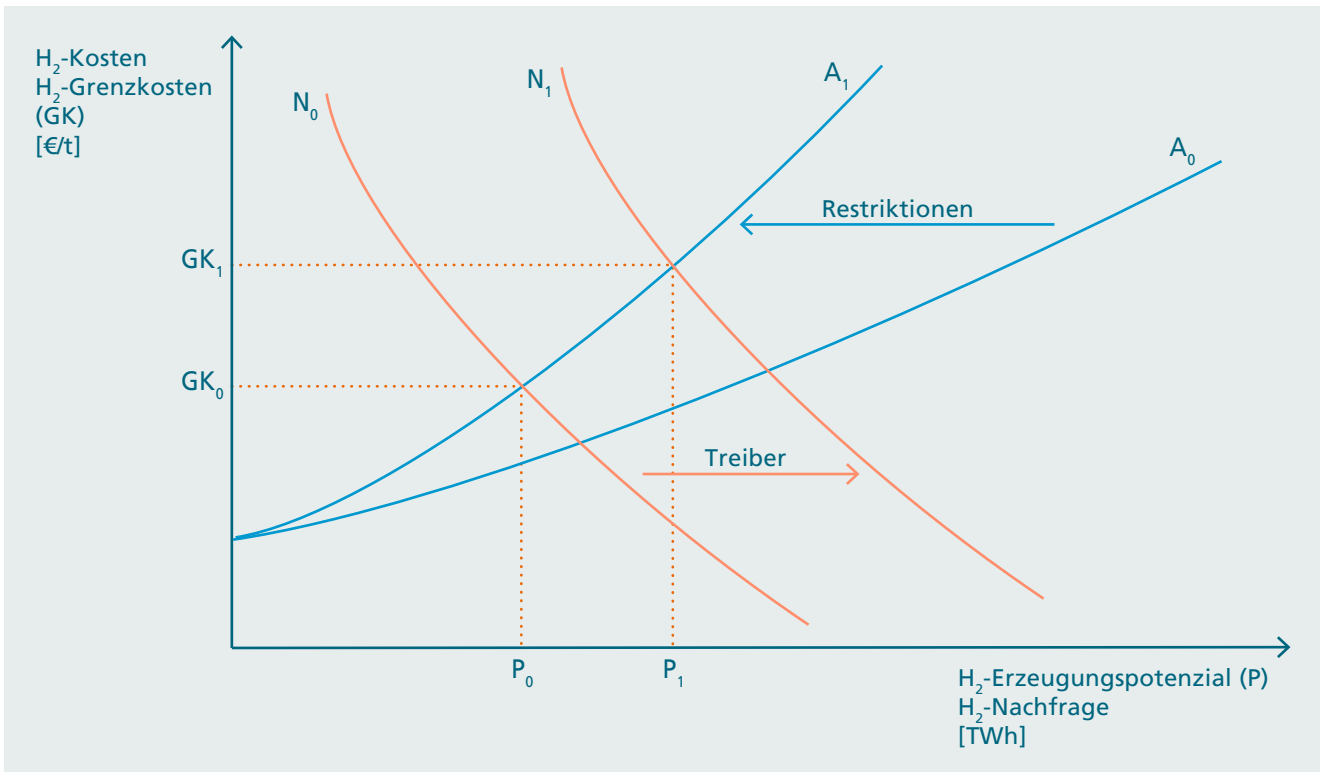


Abbildung 2: Methodik zur Ermittlung der Wasserstoffnachfrage und des -angebots sowie einer auf Grenzkosten abgeleiteten möglichen Preisbildung (Index 0 ohne Treiber und Hemmnisse, Index 1 mit diesen)

und klimapolitische Ziele, Nachhaltigkeitsanforderungen, Akteurs- und Stakeholderinteressen etc. sind Treiber der Nachfrage nach Importen. Die wichtigsten Aspekte werden in den Kapiteln 05 bis 13 deshalb ausführlicher diskutiert.

Eine rein mengenmäßige Gegenüberstellung hilft, eine Vorstellung davon zu gewinnen, ob Angebot und Nachfrage in Deckung zu bringen sind. Allerdings schließt sich daran noch eine weitere, schwierig zu beantwortende Frage an. Wie werden sich die Preise für grünen Wasserstoff und Syntheseprodukte künftig entwickeln? Die bisherigen ökonomischen Analysen basieren fast ausnahmslos auf der Betrachtung von Kosten für die Herstellung und den Transport. Hieraus lassen sich aber keine Marktpreise direkt ableiten. Diese basieren auf Grenzkosten plus Aufschlägen für Steuern, Gewinn, Risikoaufschläge, Vertrieb, Gewährleistung, F&E-Aufwendungen etc. oder sogar Knappheitspreisen (siehe Erdöl)

beziehungsweise an andere Energieträger angelehnte Preise (wie Erdgas). In Kapitel 08 wird der Zusammenhang von Marktattraktivität, Risiken und Kosten für Kapital ausführlich aufgegriffen.

Abbildung 2 stellt die Zusammenhänge beispielhaft dar. Es wird Restriktionen geben, die das Angebot an grünem Wasserstoff verringern, und Treiber, die die gesamte weltweite Nachfrage nach grünem Wasserstoff erhöhen. Die heute überwiegend vorliegenden Herstellkostenbetrachtungen führen zu der Gefahr, dass man den tatsächlichen Marktpreis deutlich unterschätzt und daraus falsche Politikempfehlungen ableitet. Daher werden Analysen zu den Gestehungskosten für eine realistische Zukunftsperspektive notwendig, um die Ableitung von möglichen Marktpreisen, dem heutigen Handel von Energieträgern und Rohstoffen vergleichbar, zu ergänzen.

07

Nachhaltigkeitskriterien in den potenziellen Produktionsländern müssen entwickelt und eingehalten werden

Wie in der nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) der Bundesregierung (siehe [3]) zu lesen ist, sei aus Sicht der Bundesregierung nur Wasserstoff auf Dauer nachhaltig, der auf Basis erneuerbarer Energien hergestellt wurde: sogenannter „grüner“ Wasserstoff. Daher sei es das Ziel der Bundesregierung, grünen Wasserstoff zu nutzen, für diesen einen zügigen Markthochlauf zu unterstützen sowie entsprechende Wertschöpfungsketten zu etablieren. Daneben wird auch darüber diskutiert, ob zumindest in einer Übergangszeit aus Gründen der Wirtschaftlichkeit CO₂-neutraler Wasserstoff eingesetzt werden sollte (zum Beispiel „blauen“ (siehe [68]) oder „türkisen“ (siehe [69]) Wasserstoff) der aufgrund der engen Einbindung von Deutschland in die europäische Energieversorgungsinfrastruktur auch in Deutschland übergangsweise genutzt werden kann.

Global gibt es sehr unterschiedliche Definitionen für „grünen Wasserstoff“, auch solche, die die Nutzung von Kernenergie als CO₂-frei mit einbeziehen (siehe [32]). Andere Definitionen, wie beispielsweise der Standard „Green Hydrogen“ vom TÜV SÜD, legen Grenzwerte bei der Verringerung der CO₂-Emissionen zugrunde (siehe [33]).

In der nationalen Wasserstoffstrategie findet sich als eine der Politikmaßnahmen der folgende Hinweis zu Pilotvorhaben in Partnerländern:

„[...] dabei wird darauf geachtet, dass ein Import von grünem Wasserstoff oder darauf basierenden Energieträgern nach Deutschland zusätzlich zur einheimischen Energieproduktion in den jeweiligen Partnerländern erfolgt und nicht zu Lasten der häufig unzureichenden erneuerbaren Energieversorgung in den Entwicklungsländern geht. Zudem darf die nachhaltige Wasserversorgung in teilweise ariden Regionen dieser Länder nicht durch die Erzeugung von Wasserstoff beeinträchtigt werden. Es wird eine nachhaltige Erzeugung entlang der gesamten Lieferkette angestrebt.“

Der Bedarf an Strom für die Wasserstoffherstellung ist groß, folglich auch die Flächen zur Herstellung von regenerativem Strom. So geht der Verband der Chemischen Industrie (VCI) in seiner 2019 erschienen Roadmap in seinem Pfad „Treibhausgasneutralität“ davon aus, dass bis 2030 jährlich 628 TWh Elektrizität nur für die Chemische Industrie benötigt werden (siehe [34]). Die derzeit größte PV-Anlage der Welt, der Bhadla (siehe [70]), hat seit Dezember 2019 eine Leistung von 2,2 Gigawatt. Die Anlage hat eine Fläche von 45 Quadratkilometern. Bei einer unterstellten Produktion von 5,5 kWh pro Quadratkilometer pro Tag würde man nur für die deutsche Chemie etwa sieben dieser Anlagen mit einer Fläche von über 300 Quadratkilometer benötigen. Abhängig von Abstandsregelungen wäre die Fläche bei Windkraftanlagen noch größer. Hinzu kommen noch Flächen für die Elektrolyseanlagen, Transportinfrastruktur und anderes. Wenn man aus Wasserstoff noch vor Ort grüne Syntheseprodukte herstellt, fehlen in den Gebieten mit günstigen klimatischen Voraussetzungen oftmals stationäre Punktquellen oder Biomassequellen, die den notwendigen Bedarf an Kohlenstoff abdecken können. Hier muss dann das CO₂ aus der Luft gewonnen werden (Direct Air Capture), was aufgrund der niedrigen Anlageneffizienz ebenfalls zu einem relevanten Flächen- und Energiebedarf führt. Diese Dimensionen zeigen, dass man den Zubau an erneuerbaren Energiequellen hier nur zusammen mit dem Ausbau einer Stromversorgung für die regionale Bevölkerung durchführen kann.

In vielen der potenziellen Wasserstoff-Produktionsländern, wie beispielsweise Ländern aus der MENA-Region oder Australien, basiert die Stromerzeugung oft noch auf fossilen Quellen. Ein Aufbau von erneuerbarer Stromproduktion zum Export von grünem Wasserstoff darf nicht dazu führen, dass fossile Quellen weiter aufrechterhalten werden und die Länder eigene energie- und klimapolitische Ziele nicht erreichen können.

Viele der möglichen Erzeugerländer für Wasserstoff haben ausgebaute Kapazitäten im Bereich der großen Wasserkraft (zum Beispiel Ägypten, Türkei). Allerdings ist die Nachhaltigkeit von Großwasserkraftwerken umstritten. Aber auch der Wasserverbrauch stellt ein Problem dar. Die Elektrolyseure

Thesen

zur Wasserstoffherstellung benötigen Wasser, das je nach lokaler Situation knapp ist und wo es zu Verteilungsfragen, beispielsweise zur Versorgung der heimischen Bevölkerung mit Trinkwasser oder der Nahrungsmittelproduktion kommen kann. Häufig werden zur Wassergewinnung Meerwasserentsalzungsanlagen eingesetzt, die neben einem hohen Energieaufwand und CO₂-Emissionen auch große Mengen an Rückstände erzeugen, vor allem große Mengen an Salzlake mit hochkonzentrierten Salzen, Bioziden, Antikalkmitteln, Antischaumbildnern und Metallen (siehe [35]).

Künftig wichtig wird deshalb ein Herkunftsnachweis des benötigten Stroms für die Elektrolyse, aber auch des benötigten Wassers und gegebenenfalls der Kohlenstoffquellen. Aus Sicht der Akzeptanz des Importes von grünem Wasserstoff in Deutschland sind Nachhaltigkeitsfragen in der gesamten Wertschöpfungskette von hoher Bedeutung, um Fehler zu vermeiden, die beispielsweise bei den Biokraftstoffen gemacht wurden. Bereits vor mehr als einem Jahrzehnt stoppte die Diskussion um die Nachhaltigkeit von Biotreibstoffen (Palmöl) aus Malaysia oder Brasilien und indirekte Veränderungen der Landnutzung die Ausbreitung einer weltweiten

Biotreibstoffwirtschaft. Im Sinne einer ausgeweiteten Nachhaltigkeitsdiskussion sind die sozialen Folgen in den Produktionsländern zu beachten, vergleiche auch Abschnitt 12 zu den möglichen positiven Aspekten durch Schaffung von lokaler Wertschöpfung.

Die Entwicklung eines möglichst internationalen Nachhaltigkeitsstandards sollte folgerichtig in den nächsten Jahren eine wichtige politische Priorität bilden und in die weltweiten Klimaverhandlungen integriert werden. Deutschland und die EU könnten hier eine Vorreiterrolle einnehmen. Starke staatliche Institutionen in den künftigen Produktionsländern sind dabei ein sehr wichtiger Faktor für die Verbesserung der Umwelt und der Sozialstandards und dieser Aspekt sollte in eine Strategieentwicklung einfließen. Ein umfassender Nachhaltigkeitsstandard muss sich dabei positiv auf mindestens sechs der globalen Nachhaltigkeitsziele beziehen, konkret: SDG 6 (sauberes Wasser), SDG 7 (bezahlbare und saubere Energie), SDG 8 (menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum), SDG 9 (Industrie, Innovation und Infrastruktur), SDG 12 (verantwortungsvoller Konsum und Produktion) und SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz).

08

Eine ökonomische Marktattraktivität für Kapitalgeber muss geschaffen werden

Die Erzeugung sowie energetische und stoffliche Nutzung von Wasserstoff erfordern umfassende Investitionen in Anlagen zur Bereitstellung von Elektrizität und Wasser, in Umwandlungsanlagen sowie in Anwendungstechnologien. Hierfür ist die Mobilisierung von großen Kapitalmengen erforderlich. Für private Investoren ist dabei die erwartete Rendite ausschlaggebend, während für Fremdkapitalgeber (Finanzintermediäre) insbesondere die Minimierung des Ausfallrisikos eine große Rolle spielt (siehe [36]). Ein hohes Risiko treibt Finanzierungskosten in die Höhe (siehe [37]),

die sich wiederum in den spezifischen Herstellungskosten niederschlagen (siehe Kapitel 06 zur Herausforderung der Preisfindung bei grünem Wasserstoff). Darüber hinaus ist die Verfügbarkeit für Risikokapital begrenzt. Ziel ist es daher, die Marktbedingungen derart zu gestalten, dass sie für eine große Anzahl von Kapitalgebern attraktiv sind und ausreichend günstiges Kapital zur Verfügung steht.

Mit Blick auf die Risiken sind gewisse Analogien zum Ausbau erneuerbarer Energien zu ziehen, aber auch Unterschiede zu erwarten. Unterschiede ergeben sich beispielsweise durch die Länderrisiken, die sich teils über Kontrahentenverträge auf die Kapitalkosten externer Kapitalgeber niederschlagen. So ist mit Blick auf die Produktion von Wasserstoff

zu beachten, dass ein Teil davon in Ländern mit hohen Länderrisiken stattfinden wird. Die Finanzierungskosten in Entwicklungsländern sind jedoch teils doppelt so hoch wie in Industrieländern, wobei diese Diskrepanz insbesondere bei Projekten mit hohen Anfangsinvestitionen deutlich zu Tage treten (Derisking Renewable Energy Investment, siehe [38]). Analogien lassen sich bezüglich der langfristigen Entwicklung des Marktes und der Kapitalgeber ziehen. So sind über den Zeitverlauf die Finanzierungskosten für erneuerbare Energien deutlich gesunken (vergleiche [71], [72]). Wesentliche Gründe hierfür sind abnehmende Risiken auf Länderebene und Entwicklungen am Kapitalmarkt insbesondere im Euro-Raum. Darüber hinaus spielen abnehmende Technologierisiken und Lerneffekte bei den Kapitalgebern (siehe [39]) eine Rolle. Ebenfalls haben effektive Politikmaßnahmen zur Förderung des Ausbaus erneuerbarer Energien deutlich zur Senkung des Investitionsrisikos beigetragen (siehe [40], [41]). Global betrachtet tragen inzwischen insbesondere private Kapitalgeber wie Haushalte, Unternehmen und Projektentwickler mit zwei Dritteln sowie private Finanzintermediäre und Entwicklungsbanken mit rund einem Drittel zur Finanzierung erneuerbarer Energien bei, wobei die Bedeutung von institutionellen Investoren (geringe Renditeerwartung, da Risikoavers) mit fünf Prozent noch gering ist. Entwicklungsbanken wird in der frühen Ausbauphase eine bedeutende

Rolle als „enabler“ zugemessen (siehe [41]), da sie über Zuschüsse und günstige Darlehen das Ausmaß eines potenziellen Kreditausfalls reduzieren und somit die Attraktivität für andere Investoren erhöhen (Leverage Effekt).

Ausschlaggebend für den Ausbau erneuerbarer Energien und damit auch für Investitionen und Finanzierung war die Schaffung einer sicheren Nachfrage (garantierte Abnahme des Stroms) durch verschiedene Politikmaßnahmenbündel, die Einfluss auf Risiken und somit auf die Finanzierungskosten hatten (siehe [42]). Wenn Politikmaßnahmen in den Importländern wie beispielsweise Prämien, Quoten oder Zertifikate in den Wasserstoff importierenden Ländern eine ähnlich zuverlässige Nachfrage generieren, wie dies zum Teil beim Ausbau erneuerbarer Energien gelungen ist (Verlagerung der Nachfrage nach rechts in Abbildung 2), reduziert sich das Marktrisiko und erhöht somit die Marktattraktivität für Investoren und Kapitalanleger. Können zudem entsprechende Garantien der Importländer das bestehende Länder- oder Kontrahentenrisiko in den Exportländern verringern und Entwicklungsbanken als „enabler“ den Kapitalmarkt bedienen, vermindern sich die Investitionsrisiken und das Angebot an Wasserstoff (Verschiebung des Angebots nach rechts in Abbildung 2) erhöht sich, sodass insgesamt der Markt deutlich wächst.

09

Anreizsysteme für die Produktion von Wasserstoff fehlen weitgehend und müssen eingeführt werden

Unter den aktuellen Rahmenbedingungen ist die Produktion von Wasserstoff im Ausland und damit verbunden auch der Import von Wasserstoff nicht wettbewerbsfähig (vergleiche Kapitel 04). Zudem behindern fehlende Absatzmärkte und unklare rechtliche Rahmenbedingungen, beispielsweise hinsichtlich der Anerkennung als grünen Wasserstoff, die Wettbewerbsfähigkeit. Daher werden verschiedene Anreiz-

systeme diskutiert, um die Produktion von Wasserstoff im Ausland und dessen Import attraktiv zu machen.

- *Investitionsförderung:* In der nationalen Wasserstoffstrategie ist der Aufbau von Wasserstoffproduktionsanlagen in Deutschland mit einer Leistung von 5 Gigawatt bis 2030 und weiterer 5 Gigawatt bis 2035 vorgesehen (siehe [3]). Auf europäischer Ebene wird im Rahmen der EU Hydrogen Strategy eine Elektrolysekapazität von mehr als 40 Gigawatt bis 2030 angestrebt, die im Rahmen von sogenannten IPCEI-Projekten gefördert werden sollen (siehe [2]).

Thesen

- *Regulatorische Rahmenbedingungen im Produktionsland:* Die regulatorischen Rahmenbedingungen im Produktionsland müssen so gestaltet sein, dass die Produktion von grünem Wasserstoff nicht behindert wird. Dies betrifft beispielsweise die Belastung des Strombezugs mit staatlich veranlassten Preisbestandteilen, aber auch Regularien zum Anlagenbetrieb.
- *CO₂-Bepreisung:* Eine kostenreflexivere Gestaltung der CO₂-Bepreisung sowie eine Ausweitung des Emissionshandels beziehungsweise der CO₂-Bepreisung auf andere Sektoren und Länder setzt Anreize für Strom aus erneuerbaren Energien (beziehungsweise belastet fossile Konkurrenten) und damit auch für grünen Wasserstoff.
- *Einspeisetarife:* Auf EU-Ebene werden Einspeisetarife als ein zentrales Förderinstrument angesehen, um eine Wasserstoffproduktion zu unterstützen. Auf diese Weise können Hersteller von grünem Wasserstoff bereits frühzeitig wettbewerbsfähig gegenüber bestehenden Herstellern von grauem Wasserstoff werden. Inwieweit auch Herstellern in Ländern außerhalb der EU für den in die EU exportierten grünen Wasserstoff Einspeisetarife gezahlt werden können oder sollen, ist unklar.
- *Contract for Differences:* Neben den Erzeugern von Wasserstoff sind darüber hinaus Anreize für die potenziellen Nachfrager von Wasserstoff zur Schaffung eines (globalen) Wasserstoffmarktes notwendig. Hier werden „Contract for Differences“ als Anreiz diskutiert. Deren Ziel für Nachfrager ist die Kompensation der Kostenunterschiede zwischen bisherigen Produktionsverfahren und auf die an Nutzung von Wasserstoff angepassten Verfahren, solange die CO₂-Bepreisung nicht ausreicht.
- *Quoten:* Ein Instrument um den Einsatz von Wasserstoff im Verkehrsbereich und zum Teil im Wärmesektor zu erhöhen, sind Quoten. Diese werden durch die Anbieter von Brennstoffen erfüllt. Sie eignen sich in Bereichen, die nicht im internationalen Wettbewerb stehen. Die Kosten für die Erfüllung der Quote werden über höhere Brennstoffkosten weitergegeben. Aufgrund von Flexibilität bei der Quoten-erfüllung ist die Unsicherheit hinsichtlich der Entwicklung der Marktnachfrage für Erzeuger von Wasserstoff deutlich höher als bei „Contracts for Difference“.
- *Herkunftsnachweise für grünen Wasserstoff:* Für den Import von grünem Wasserstoff ist die Qualität und die Herkunft von zentraler Bedeutung, damit die Nutzung von Wasserstoff einen Beitrag zur Nachhaltigkeit leistet (siehe die Diskussionen in Kapitel 07 zur Nachhaltigkeit). In Herkunftsländern für Wasserstoff kann durch eine Zertifizierung ein Anreiz geschaffen werden, um aufgrund des Wasserstoffexports zusätzliche Investition in erneuerbare Energien auszulösen. Dabei ist darauf zu achten, dass dies nicht zu Lasten der lokalen Energieversorgung geschieht oder Anreize in zusätzliche fossile Energieerzeugung erzeugt.

Aufgrund der fehlenden Wirtschaftlichkeit für die Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff als Dekarbonisierungsoption sind zusätzliche Anreize sowie eine Anpassung der derzeitigen Rahmenbedingungen notwendig. Dies ist auch für die in Kapitel 08 geführte Diskussion über Anreize von Kapitalgebern sehr bedeutsam. Dabei ist eine Einbindung in bestehende Instrumente insbesondere den EU-Emissionshandel zu beachten, um einen effizienten und effektiven Klimaschutz zu gewährleisten. Forschungsbedarf besteht dabei in der Abstimmung und Koordination der geeigneten Instrumente, um einerseits einen Klimabeitrag zu leisten und andererseits die geeignetsten Optionen anzureizen.

10

Die Wasserstoffwirtschaft muss in die übergreifenden Governance-Strukturen der Transformation des Energiesystems eingebunden werden

Wie in Kapitel 07 thematisiert, ist die Stromerzeugung für die Wasserstoffproduktion in Europa wie auch in Entwicklungsländern mit Umweltauswirkungen verbunden, welche durch die niedrigen Wirkungsgrade in der gesamten Kette von Erzeugung bis zur Nutzung von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern verstärkt werden. Obwohl diese Auswirkungen nicht leicht zu quantifizieren und in die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zu internalisieren sind, liefern sie Argumente für ein Hierarchieprinzip, das die notwendigen EE-Kapazitäten - selbst bei weiter sinkenden Kosten - minimiert. Dies impliziert, dass die Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft über ein *hierarchisches Prinzip* in die generellen Governance-Strukturen der Transformation des Energiesystems eingebunden sein muss. Dieses hierarchische Prinzip sollte – in Analogie zum „Energy-Efficiency-First“-Prinzip – den Aufwand für die Wasserstofferzeugung minimieren, auch bei weiter fallenden Kosten für Erneuerbare, Elektrolyse und Herstellung synthetischer Energieträger. Dieses Prinzip bezieht sich auf das gesamte System der Energiebereitstellung und des -verbrauchs, das heißt es umfasst die Produktions- und Nachfrageländer und besteht aus den folgenden vier Stufen:

- Ein „*Energy-Efficiency-First*“-Prinzip, wie es kürzlich in die europäische Politik eingeführt wurde, muss ein starkes Leitprinzip für den Ausbau der Energieversorgung und damit der EE-Kapazitäten in einem Land sein. Gemeint sind hier sowohl PtX-Import- als auch Exportregionen. Weiterhin gilt dies sowohl für den direkten Einsatz von erneuerbaren Energien zur Dekarbonisierung des Stromsektors und der Nachfragesektoren, als auch für EE-Kapazitäten zur Wasserstofferzeugung selbst.

- Die zweite Stufe im hierarchischen Prinzip ist der *Vorrang für erneuerbare Energien beim weiteren Ausbau des Stromsektors* (oder wenn der Ersatz fossiler Stromkapazitäten notwendig ist). Fossile Brennstoffe sollten so bald wie möglich auslaufen, um Raum für saubere Stromerzeugung zu schaffen. Diese zweite Stufe ist insbesondere relevant für potenzielle Produzentenländer für Wasserstoff, welche den eigenen Stromsektor bisher nicht dekarbonisiert haben.
- Auf der dritten Stufe des hierarchischen Prinzips sollten, wenn es *Alternativen auf der Grundlage erneuerbarer Energiequellen mit ähnlichen Dienstleistungen, aber weniger Umweltauswirkungen* gibt, diese vorrangig eingesetzt werden. Dazu gehören insbesondere die direkte elektrische Nutzung sowie nachhaltige Biomasse/Biokraftstoffe/Biogas unter Berücksichtigung ihrer begrenzten Verfügbarkeit in den Wasserstoffnachfrage- und auch Produktionsländern.
- Für Anwendungen, bei denen keine der ersten drei genannten Anwendungen in Frage kommen, müssen *Wasserstoff und Syntheseprodukte* zum Einsatz kommen. Wie in Kapitel 02 erwähnt, eröffnet dies immer noch einen Weltmarkt von 100 bis 700 Milliarden Euro weltweit für die Wasserstoffwirtschaft.

Dieses vierstufige Prinzip, welches als eine Erweiterung des „Energy-Efficiency-First“-Prinzips gesehen werden kann, muss in die Governance-Strukturen der Transformation des Energiesystems implementiert werden, und zwar sowohl für nachfragende wie erzeugende Länder von Wasserstoff. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für deren nachhaltige Entwicklung.

Eine Integration in die internationale Zusammenarbeit sollte erfolgen

Die Auswahl von Produktionsländern wird unter anderem afrikanische Staaten, nördlich und südlich der Sahara, betreffen (siehe Kapitel 04). Beispielhaft für viele Regionen des globalen Südens, geraten diese Staaten zunehmend in eine Spirale schwer kontrollierbarer Konsequenzen des Klimawandels, wie beispielsweise der unkontrollierten Verstädterung durch schwindende Lebensgrundlagen im ländlichen Raum (siehe [46]). Der daraus resultierende steigende Energiebedarf in urbanen Zentren wird seit mehreren Jahrzehnten diskutiert. Gleichzeitig wird er bis heute kaum bedient, wie beispielsweise in Nigeria (siehe [47], [48], siehe auch Kapitel 07). Das liegt unter anderem daran, dass sich viele Staaten seit ihrer Unabhängigkeit in den 1950er und 1960er Jahren tiefgreifenden (entwicklungs-) politischen und sozialen Herausforderungen gegenübersehen (vor allem im Bereich Staats- und Nationenbildung) (siehe [49], [50]).

Die angestrebte Versorgungssicherheit (siehe Kapitel 05) beginnt folglich in einem großen Spannungsfeld aus unterschiedlichen Interessen. Deutschland kann jedoch auf Basis einer behutsam geplanten internationalen Zusammenarbeit darauf hinwirken, die eigene Abhängigkeit (Import von Wasserstoff, siehe Kapitel 05) in die notwendige bi- und multilaterale Zuverlässigkeit und infrastrukturelle Resilienz (Produktion und Instandhaltung) zu übersetzen. Den Auftrag zur internationalen Zusammenarbeit im Klimaschutz und für die globale Energieversorgung hat Deutschland im Rahmen internationaler Abkommen mitformuliert (siehe Diskussion in Kapitel 07). Im relevanten Pariser Abkommen von 2015 wird die Unterstützung von Entwicklungsländern durch Technologietransfer und gemeinsame Technologieentwicklung explizit benannt:

„Taking full account of the specific needs and special situations of the least developed countries with regard to funding and transfer of technology, [...]“ (siehe [51]).

Auf der Diskussion zur lokalen Wertschöpfung aufbauend (siehe Kapitel 12), hat die Bundesrepublik Deutschland die

Möglichkeit in den Partnerländern strukturelles und „systemisches“ Vertrauen (siehe [52]) für den Wasserstoffexport zu schaffen. Mit Blick auf Vertrauensmerkmale, wie Interaktion und Reziprozität (ebd.), sollte dem aus Diskursen ableitbarem lokalen Gefühl einer Peripherieverankerung im Bereich technologischen und wissenschaftlichen Wissens und eines ressourcenbezogenen Neokolonialismus konstruktiv entgegen gewirkt werden (siehe [53], [54], [55]). So sind verwandte großangelegte Infrastrukturprojekte im Bereich erneuerbarer Energien, wie beispielsweise *Desertec*, unter anderem an diesem Spannungsfeld der „Nord-Süd Beziehungen“ gescheitert (siehe [56]).

Der Import von Wasserstoff sollte sich hier unter anderem an empirisch-fundierten Erkenntnissen zur Entwicklungszusammenarbeit orientieren. Im Falle von Infrastrukturprojekten sollten Teilbereiche, wie die lokale Entwicklung und Adaption kleinerer Alltagstechnologien (siehe [57], [58], [59]), auch in Bezug zu nationalen Innovationssystemen gesetzt werden (siehe [60], [61]). Es wäre fahrlässig, diese Komplexität aus Technologien, Institutionen und Stakeholdern beim Thema Wasserstoff außen vor zu lassen und die gegenseitig abhängigen Import-/Exportbeziehungen erst dann zu reflektieren, wenn daraus resultierende Probleme eskalieren.

Lokale Akteure, die Vertrauen in die Implementierung von notwendigen technologischen und sozioökonomischen Infrastrukturen schaffen können (siehe Kapitel 12), sollten mittels einer Situations- und Stakeholderanalyse identifiziert werden. Die entschiedene Einbindung der lokalen Träger von Wissen zu historisch-geographischen, klimatologischen, ökonomischen, soziokulturellen und technologischen Aspekten ist zentral, um die Partnerländer reziprok auf dem Weg zu den SDGs mitzunehmen. Sie ist ferner notwendig, um durch vertrauensvolles capacity building (siehe Kapitel 12) kostspielige Bottlenecks präventiv zu verhindern sowie die ökonomische Marktattraktivität für Kapitalgeber zu erhöhen (siehe Kapitel 06 und 08). Lokale Forschungseinrichtungen können hier eine Rolle als *Intermediäre* zwischen der Gesellschaft und Politik spielen. So verfügen lokale Universitäten über relevantes Wissen, dessen Transfer aufgrund fehlender Infrastrukturen und entsprechender alltäglicher Anstrengungen im capacity

building mitunter in den Hintergrund gedrängt wird (siehe [62]). Durch die Unterstützung lokaler Forschung zu Energiethemata kann nicht nur Vertrauen geschaffen werden, sondern die H₂-Infrastruktur geordnet in einen regionalen sozialen und ökonomischen Kontext integriert werden (siehe Kapitel 07, 10 und 12).

Gleichzeitig sollten bei einer Strategieentwicklung bereits laufende internationale Aktivitäten im Rahmen der Energiepartnerschaften und der multilateralen Zusammenarbeit beachtet werden; wie beispielsweise „International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE)“. Ferner sollten komplexe politische, ökonomische und kulturelle Zusammenhänge beachtet werden. Marokko

beispielsweise handelt als „afrikanischer“, „maghrebinischer“, „arabischer“ und internationaler Akteur. Bezogen auf die Energiewende gilt es somit, auch Zielkonflikte und unnötige Redundanzen frühzeitig in den Blick zu nehmen. Dabei können durch die systemische Berücksichtigung von NGOs, zwischenstaatlichen Organisationen und transnationalen Partnerschaften noch zu identifizierende Stakeholder integriert werden, da diese sowohl unterstützend als auch hindernd wirken können (siehe [63]). Neben bi- und multilateralen Dialogen zwischen Marokko und anderen Staaten (zum Beispiel PAREMA), gehören dazu unter anderem die Afrikanische Union (AU, siehe [64]), UNECA und die Liga der Arabischen Staaten (LAS in Bezug auf IRENA & RCREEE) (siehe unter anderem 3.4. in [65]).

12

Lokale wirtschaftliche Kompetenzen werden für eine erfolgreiche Umsetzung benötigt

Eine weltweite Wasserstoffwirtschaft, welche in Kooperation zwischen Nutzern und Produzenten von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern beziehungsweise Chemikalien entwickelt wird, erfordert den Aufbau neuer und die Stärkung vorhandener lokaler wirtschaftlicher Kompetenzen. Nur so kann erreicht werden, dass eine global vernetzte grüne Wasserstoffwirtschaft neben dem Beitrag zur globalen Energiewende auch einen Beitrag zu einer nachhaltigen und innovativen wirtschaftlichen Entwicklung in den Produktionsländern liefert. Dies ist insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern ein zentraler Treiber für die Etablierung neuer Energietechnologien, da die Schaffung von Arbeitsplätzen und der Ausbau lokaler Wertschöpfungspotenziale in zukunftsfähigen Sektoren zentrale Elemente der nationalen Entwicklungsstrategien sind.

Lokale Wertschöpfung im Kontext des Aufbaus einer international vernetzten Wasserstoffökonomie kann hierbei die

direkte Erzeugung von Wasserstoff und die damit verbundene Bereitstellung von Materialien und Dienstleistungen betreffen. Sie schließt aber auch vor- und nachgelagerte Komponenten der Wertschöpfungskette ein, wie etwa den Aus- und Aufbau von Zulieferindustrien und vor Ort benötigte Transport- oder Speicherinfrastruktur. Hinzu kommen Komponenten für die Energieerzeugung (das heißt erneuerbare Energietechnologien) und etwaige nachgelagerte chemische Synthese- und Umwandlungsprozesse oder Anwendungstechnologien.

Eine aktuelle Studie von E4tech (siehe [43]) schätzt beispielsweise die möglichen wirtschaftlichen Effekte der Entwicklung einer Wasserstoff- und Brennstoffzellenökonomie innerhalb Europas unter Annahme eines ambitionierten Szenarios für die Entwicklung einer europäischen Wasserstoffindustrie auf eine Wertschöpfung von bis zu 3,5 Milliarden Euro und die Schaffung von 38.500 direkten und über 70.000 indirekten Arbeitsplätzen (das heißt Vollzeitäquivalenten) in Europa bis zum Jahr 2030. Bis 2050 könnte die Wasserstoffwirtschaft weltweit ein Volumen von 100 Milliarden Euro, was der Größe des heutigen Stahlmarkts entspricht, bis knapp 700 Milli-

Thesen

arden Euro, einem Drittel des heutigen Ölmarkts, erreichen. Die Marktgröße hängt davon ab, für welche Bereiche Alternativen in Form von direktem Stromeinsatz bereitstehen, wie beispielsweise im Gütertransport (siehe [9]).

Der Aufbau globaler Wertschöpfungsketten für Wasserstoff befindet sich allerdings noch in den Anfängen mit bisher nur wenigen aktiven Akteuren. Vor diesem Hintergrund bietet sich weltweit in potenziellen Produktionsländern ein signifikantes Entwicklungspotenzial für lokale Wertschöpfung. Auch zahlreiche Schwellen- und Entwicklungsländer entwickeln derzeit nicht nur Strategien für den Einsatz verschiedener Anwendungstechnologien für Wasserstoff, etwa im Transportsektor oder in der Industrie, sondern prüfen auch aktiv Möglichkeiten für die lokale Wertschöpfung durch den Aufbau einer lokalen Wasserstoffökonomie (siehe [44], [45]).

Zur Realisierung eines internationalen Handelssystems im Rahmen einer Wasserstoffwirtschaft sind insbesondere die folgenden lokalen Kompetenzen relevant und müssen bei einer Strategieentwicklung berücksichtigt werden:

- Bereits vorhandene lokale industrielle Wertschöpfungsketten begünstigen das Entstehen von Wertschöpfungsketten der Wasserstoffwirtschaft.
- In den Produzentenländern müssen bereits erfolgreiche Politiken zur Entwicklung von erneuerbaren Energien im-

plementiert sein, mit dem Ziel, auch hier eine lokale wirtschaftliche Basis zu entwickeln, parallel zu einer grünen Wasserstoffwirtschaft. Nicht alle Technologien für die Produktion von Wasserstoff müssen in Produzentenländern hergestellt werden, es liegt aber im Interesse der Produzentenländer, möglichst viel von der Wertschöpfungskette bis zum Endprodukt im eigenen Land zu halten.

- Da in Forschung investiert werden muss, um die Kosten von Wasserstoff zu reduzieren und die Langlebigkeit der Produkte weiter zu erhöhen, müssen die lokalen Forschungsnetze wettbewerbsfähig sein und gegebenenfalls durch internationale Forschungsk Kooperationen und Energiepartnerschaften weiterentwickelt werden, um im globalen Wettbewerb mithalten zu können.
- Die weltweite Weiterentwicklung und Implementierung von Qualitäts- und Sicherheitsstandards für die Produktion von grünem Wasserstoff ist ein zentrales Element, das intensive internationale Zusammenarbeit erfordert.
- Eine Einbettung der Wasserstoffstrategie in die nationale Energiestrategie sowie eine enge Koordination mit industriepolitischen Instrumenten in den Produktionsländern sind zentral, um Ziel- und Ressourcenkonflikte zu vermeiden (vergleiche Kapitel 07).

13

Technologiesouveränität muss für Import- und Exportland kritisch analysiert und sichergestellt werden

Nicht erst seit der aktuellen Corona-Krise werden die Rufe nach Technologiesouveränität in Europa lauter. Wachsende geopolitische Unsicherheiten und drohende globale Handelskonflikte stellen den Verflechtungsoptimismus der letzten

Jahrzehnte in Frage. Dies löst eine Diskussion darüber aus, wie unabhängig ein Staat oder ein Staatenbund in Bezug auf kritische Technologien sein muss und sein kann. Eine Begriffsbestimmung von Technologiesouveränität sowie Vorgehensweisen zur Bestimmung der Kritikalität von Technologien wurden jüngst vom Fraunhofer ISI vorgelegt (vergleiche [73]). Danach bezeichnet Technologiesouveränität die Fähigkeit eines Staates oder Staatenbundes, die Technologien, die er

für sich als kritisch für Wohlfahrt, Wettbewerbsfähigkeit und staatliche Handlungsfähigkeit definiert, selbst vorzuhalten und weiterentwickeln zu können, oder ohne einseitige strukturelle Abhängigkeit von anderen Wirtschaftsräumen beziehen zu können. Technologiesouveränität sollte besonders für die Technologien und ihre Wertschöpfungskette thematisiert werden, die zur wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit und zur Befriedigung zentraler gesellschaftlicher Bedürfnisse wie zum Beispiel der Energieversorgung und hoheitlicher Aufgaben besonders bedeutsam sind. Kapitel 02 und 03 verdeutlichen, dass für Wasserstofftechnologien diese Kriterien erfüllt sind. Absehbar ist daher, dass Wasserstoffstrategien künftig auch zunehmend aus Sicht der Technologiesouveränität (TS) beurteilt werden.

Bei den Faktoren, die zur Herstellung von Technologiesouveränität erforderlich sind, wird in [73] unterschieden zwischen bereits bestehenden eigenen Kompetenzen und Ressourcen beziehungsweise der Möglichkeit, für den Bedarfsfall notwendige Kompetenzen und Ressourcen selbst aufzubauen sowie dem Zugriff auf Ressourcen, Kompetenzen und Vorleistungen Dritter. Einschränkungen der Technologiesouveränität sind dann zu befürchten, wenn für kritische Ressourcen oder Kompetenzen, die ein Land oder eine Staatengruppe nicht selbst vorhalten oder aufbauen kann, keine Versorgungssicherheit durch Dritte besteht.

Technologiesouveränität wird in der bisherigen Diskussion hauptsächlich aus Sicht wichtiger Industrieländer und -regionen thematisiert. Aus deutscher und europäischer Sicht stellt sich daher erstens die Frage, wie die Verfügbarkeit der zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft erforderlichen Technologien zu beurteilen ist. Speziell für den Import von grünem Wasserstoff erweitert sich die Fragestellung. Zweitens stellt sich hier dann auch die Frage nach der Verlässlichkeit der Importe aus den Exportländern, die auch bereits in Kapitel 05 aufgeworfen wurde. Drittens kommt aber auch aus der Perspektive der Passfähigkeit einer Wasserstoffstrategie mit den Entwicklungsperspektiven der den grünen Wasserstoff produzierenden Ländern die Frage auf, wie diese Länder für sich selbst die Technologiesouveränität einer entsprechenden

Wasserstoffstrategie beurteilen, und welche Konsequenzen hieraus folgen.

Bisher stehen umfassende Bewertungen der Technologiesouveränität bei Wasserstofftechnologien noch aus. In [73] wird verweisen auf Patentanalysen als Anknüpfungspunkt, um den Verfügbarkeit von Technologiewissen beurteilen zu können. Erste Hinweise lassen sich aus früheren Patentanalysen gewinnen, bei denen Wasserstoffgewinnungs-, speicher- und -verteiltechnologien ein Subset der untersuchten grünen Technologien bildeten (vergleiche [76] und [82]). Diese Daten weisen für die Mitte der 2010er Jahre auf eine doch sichtbare Stellung Deutschlands (gut 10 Prozent weltweiter Patentanteil) und der EU insgesamt hin (in etwa 40 Prozent Patentanteil). Weitere wichtige Player waren vor allem Japan und die USA, während China insgesamt weniger prominent aufscheint und auch eine negative Patentspezialisierung in diesem Bereich aufwies. Es bleibt abzuwarten, welches Bild sich bei einer Aktualisierung dieser Daten ergibt. Auch ein Blick zum Beispiel auf die Mitgliedsfirmen des Hydrogen Council zeigt auf, dass hier deutsche und europäische Firmen durchaus eine wichtige Rolle spielen (vergleiche [74]). Aus deutscher und europäischer Sicht dürfte daher die Ausgangslage bezüglich der eigenen Verfügbarkeit von Wasserstofftechnologien nicht ungünstig sein. Allerdings sind für eine belastbarere Aussage noch aktualisierte und zugleich stärker technologiedifferenzierende Analysen erforderlich.

Für die Beurteilung der Technologiesouveränität in Bezug auf die Wasserstofftechnologien, die nicht im eigenen Land verfügbar sind, ist das Risiko einer Abhängigkeit von den Auswahlmöglichkeiten unter unterschiedlichen Ländern, aber auch ihrer Verlässlichkeit, von Bedeutung. Hinweise auf die Konzentration der Patentanmeldungen bei Technologien zur Erzeugung, Speicherung und dem Transport von Wasserstoff lassen sich mit den genannten Einschränkungen aus oben genannten Angaben ableiten, mit Japan und den USA als die beiden Länder, in denen zusätzlich zur EU das meiste Wissen vorliegen dürfte. Eine für diese Fragestellung ebenfalls wichtige differenzierte Analyse von Handelsbeziehungen bei den Technologien steht allerdings noch aus.

Thesen

Hinsichtlich der Beurteilung der oben als zweite Frage aufgeführten Verlässlichkeit der Länder, aus denen grüner Wasserstoff nach Deutschland beziehungsweise der EU importiert werden soll, sind eine Reihe von Dimensionen mit zu berücksichtigen (siehe Kapitel 05). Zudem wird in [73] auf die Bedeutung von Compliance der Länder mit dem WTO-Regime sowie allgemeine Länderindikatoren wie die World-wide Governance Indicators der Weltbank (vergleiche [75]) verwiesen. Der darauf beruhende Index wird auch von der EU bei der Beurteilung kritischer Rohstoffe herangezogen. Hier weist zum Beispiel Deutschland bei den betrachteten Indikatoren im Jahr 2019 einen Indexwert von 1,46 auf und liegt damit etwas besser als Japan (1,32) und die USA (1,13). Dieser Index lässt sich auch für erste Hinweise bezüglich der Verlässlichkeit möglicher Exportländer von grünem Wasserstoff heranziehen. Wendet man ihn zum Beispiel für die Länder an, die als Startpunkte einer Wasserstoffstrategie in Afrika in die Diskussion gebracht werden, zeigen sich für die neun betrachteten Länder deutlich schlechtere Indexwerte, die zwischen $-0,89$ bis $0,16$ streuen (vergleiche [75]).

Aus Sicht der oben skizzierten dritten Frage liegen für viele Exportländer von grünem Wasserstoff sowohl das verfügbare Technologiewissen als auch die Hersteller der Technologien im Ausland. Die Verteilung der Patente auf unterschiedliche Länder, vor allem aus der EU, Japan und den USA deutet zwar auf eine gewisse Heterogenität der Herkunft des Wissens hin. Andererseits ist zu bedenken, dass Einschränkungen in der Technologieverfügbarkeit gegebenenfalls auch aus der Kopplung mit der Finanzierung erfolgen können. Dies könnte vor allem dann auftreten, wenn finanzierende Länder ihre Finanzaussagen an Erwartungen über die Wahl des Landes des Technologiegebers knüpfen. Hier sind einerseits sowohl vertiefende empirische Untersuchungen, aber auch konzeptionelle Weiterentwicklungen des Konzeptes der Technologiesouveränität in seiner Anwendung auf Entwicklungsländer erforderlich.

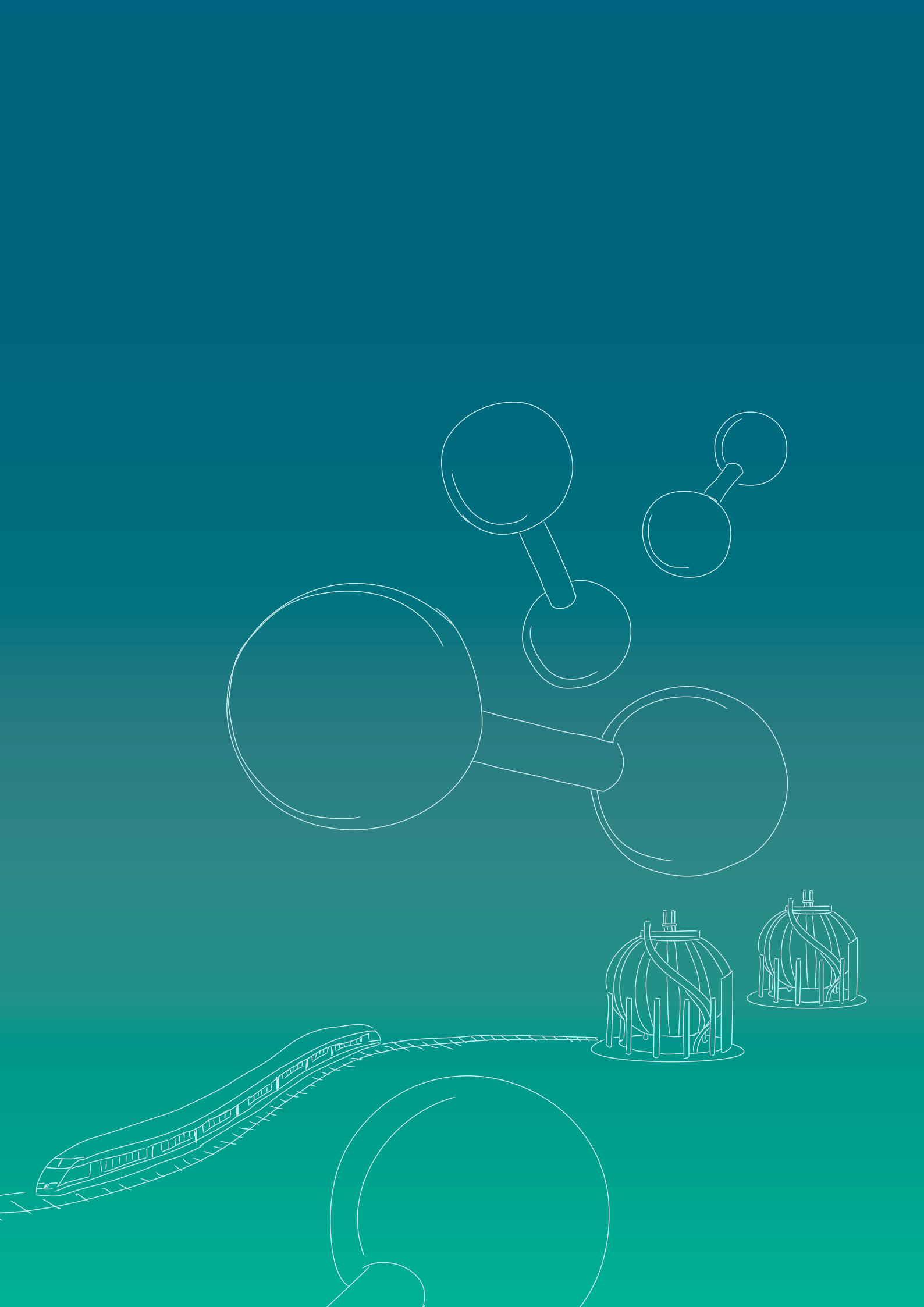
Insgesamt wird aus den Ausführungen deutlich, dass aus deutscher und europäischer Sicht eine Gefährdung der Technologiesouveränität vermutlich eher hinsichtlich der Verlässlichkeit der Exportländer von grünem Wasserstoff

als hinsichtlich des Zugangs zu bestehenden Technologien auftreten könnte. Um zu belastbaren Aussagen zu kommen, sind hier aber aktualisierte und technologisch ausdifferenziertere Analysen erforderlich. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Perspektive, grünen Wasserstoff zu importieren, auch eine Erweiterung der Technologiesouveränität um die Perspektive der Entwicklungsländer erfordert. Dass eine Abhängigkeit dieser Länder von fremden Technologien und Finanzierungen zu erwarten ist, verdeutlicht die Dringlichkeit der auch in den Kapiteln 10 und 12 dieses Arbeitspapiers angesprochenen Thematik, eine Importstrategie von grünem Wasserstoff um eine Strategie der technologischen und wirtschaftlichen Zusammenarbeit mit grünen Wasserstoff produzierenden Entwicklungsländern zu verknüpfen. Eine erfolgreiche Steigerung der sozialen und politischen Stabilität möglicher Lieferländer wäre nicht nur im Hinblick internationaler Nachhaltigkeitsziele zentral, sondern würde zugleich auch die Technologiesouveränität einer Wasserstoffstrategie aus deutscher Sicht erhöhen. Allerdings greift ein Verweis zu kurz, dass ja Investitionen in den Aufbau einer Wasserstoffherzeugungskapazität und entsprechende Exporte in die EU automatisch auch eine positive Entwicklung in den entsprechenden Exportländern stärken würde. Denn die Resource Curse, die das durchaus problematische Verhältnis zwischen Ressourcenreichtum und positiver Entwicklung beschreibt (vergleiche [79], [80], [78]), wird inzwischen auch im Kontext erneuerbarer Energien thematisiert (vergleiche [81]). Wichtig wäre in diesem Zusammenhang deshalb, bei der Diskussion über verstärkte internationale FuE Kooperationen mit den Produzentenländern und dem Aufbau von zukunftsorientierten Kompetenzen auch explizit zu bedenken, inwiefern von diesen Wissens- und Produktionsverflechtungen zwischen Abnehmer- und Produzentenland auch stabilisierende Wirkungen auf die Governance in den Produzentenländern ausgehen.

Schließlich erfordert die Analyse der Technologiesouveränität im Kontext der Importe von grünem Wasserstoff auch eine Anpassung des Analysekonzeptes selbst. Denn gerade im Hinblick mit der angesprochenen Verknüpfung mit der Finanzierung von Entwicklungsstrategien wird deutlich, dass hier auch außenpolitische Aspekte eine Rolle spielen. So

könnte in Zukunft eine Herausforderung für die Technologiesouveränität Deutschlands und Europas beim Import grünen Wasserstoffs auch aus Aktivitäten von Playern wie zum Beispiel China resultieren, wenn dadurch grüne Wasserstoffproduzenten in Afrika nicht nur über Technologielieferungen, sondern auch über Integrationsstrategien wie die Belt&Road-Initiative in ihrer Technologiesouveränität beeinflusst wür-

den. Ähnlich wie bei der Diskussion um die Kritikalität von Rohstoffen (vergleiche [82]) ist daher auch bei der künftigen Bestimmung der Technologiesouveränität bei grünen Wasserstoffimporten verstärkt zu erwarten, dass sich technologische und marktbezogene Dimensionen mit entwicklungs- und außenpolitischen vermengen.



Literatur und Kommentare

- [1] **Sensfuß et al. (2019)**: Summary report energy systems: supply perspective. Project report European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement no. 691843. Online verfügbar unter: https://www.set-nav.eu/sites/default/files/common_files/deliverables/WP7/D7.8_SET-Nav_SummaryReport_WP7_final.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [2] **European Commission (2020)**: A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brüssel: European Commission.
- [3] **Bundesregierung (2020)**: Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.). Online verfügbar unter: https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [4] **Deutsch, M.; Maier, U.; Perner, J.; Unteutsch, M.; Lövenich, A. (2018)**: Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Berlin, Köln: Agora Energiewende/Frontier Economics.
- [5] **Lux, B.; Pfluger, B. (2020)**: A supply curve of electricity-based hydrogen in a decarbonized European energy system in 2050. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115011>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [6] **Hydrogen Council – Studies**: <https://hydrogencouncil.com/en/category/studies/>
- [7] **IEA (2019)**: The future of hydrogen – seizing today's opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan, Seizing today's opportunities. Online verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [8] **Hobohm, J.; auf der Maur, A.; Dambeck, H.; Kemmler, A.; Koziel S.; Krei-Delmeyer, S. et al. (2018)**: Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende. Endbericht. Eine Studie der Prognos AG, des Fraunhofer-Instituts UMSICHT und des Deutschen Biomasseforschungszentrums DBFZ. Berlin: Prognos. Online verfügbar unter: https://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/2020_Bericht_Fluessige_Energietraeger_RZ01.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [9] **Eichhammer, W.; Oberle, S.; Händel, M.; Gnann, T.; Wietschel, M.; Lux, B. (2019)**: Etude sur les Opportunités et Priorités du „Power-to-X“ au Maroc. Studie gefördert von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Durchgeführt vom Fraunhofer ISI im Rahmen der Deutsch-Marokkanischen Energiepartnerschaft (<https://www.giz.de/de/weltweit/57157.html>). Online verfügbar unter: https://www.energypartnership.ma/fileadmin/user_upload/morocco/PtX_Morocco_PresentationFraunhoferISI_Rabat_11Feb2019_Francais.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [10] **Viebahn, P.; Zelt, O.; Fishedick, M.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J. (2018)**: Technologien für die Energiewende – Technologiebericht – Band 2. Studie im Auftrag des BMWI. Wuppertal Insitut, Fraunhofer ISI, IZES. Wuppertal-Institut: Wuppertal.
- [11] **Roland Berger (2020)**: Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen- Industrie in Baden-Württemberg. Studie im Auftrag des Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg. Roland Berger: München.
- [12] **NOW (2018)**: Studie IndWEDe. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. Hg. v. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Berlin.
- [13] **BDI (2018)**: Klimapfade für Deutschland. Studie im Auftrag des BDI, durchgeführt von BCG und Prognos. Berlin: BCG.
- [14] **Dena (2018)**: dena-Leitstudie – Integrierte Energiewende. Deutsche Energie-Agentur: Berlin.
- [15] **Ausfelder, F.; Dura, H.E. (Hrsg.) (2018)**: Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X-Technologien. Herausforderungen – Potenziale – Methoden – Auswirkungen. 1. Roadmap des Kopernikus-Projektes „Power-to-X“: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X). Frankfurt a.M.: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

- [16] **UBA (2014)**: Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Climate Change 07/2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07_2014_climate_change_dt.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [17] **UBA (2020a)**: Bilanz 2019: Erstmals mehr Strom aus erneuerbaren Energien als aus Kohle. Pressemitteilung. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-erstmals-mehr-strom-aus-erneuerbaren>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [18] **Pfennig, M.; Gerhardt, N.; Pape, C.; Böttger, D. (2017)**: Mittel- und langfristige Potenziale von PtL- und H₂-Importen aus internationalen Vorzugsregionen. Teilbericht im Rahmen des Projektes: Klimawirksamkeit Elektromobilität – Entwicklungsoptionen des Straßenverkehrs unter Berücksichtigung der Rückkopplung des Energieversorgungssystems in Hinblick auf mittel- und langfristige Klimaziele. Teilbericht. Kassel: Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES.
- [19] **Kramer, U.; Ortloff, F.; Stollenwerk, S.; Thee, R. (2018)**: Defossilisierung des Transportsektors – Optionen und Voraussetzungen in Deutschland. Studie der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e.V. Frankfurt a.M.
- [20] **Timmerberg, S.; Kaltschmitt, M. (2019)**: Hydrogen from renewables: Supply from North Africa to Central Europe as blend in existing pipelines – Potentials and costs. In *Applied Energy* 237 (2019) 798–809.
- [21] **Prognos (2020)**: Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Online verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Studien/transformationsspfade-fuer-strombasierte-energietraeger.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 11.10.2020.
- [22] **UBA (2020b)**: Primärenergieverbrauch. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#definition-und-einflussfaktoren>, zuletzt geprüft am 21.11.2020.
- [23] **BMWi (2019)**: Versorgungssicherheit bei Erdgas. Monitoring-Bericht nach §51 EnWG. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/monitoringbericht-versorgungssicherheit-2017.pdf?__blob=publicationFile&v=20, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [24] **Statista (2020)**: Deutsche Rohölimporte nach ausgewählten Exportländern. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2473/umfrage/rohoelexport-hauptlieferanten-von-deutschland/> (Account Fraunhofer ISI), zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [25] **COM/2015/080 final**: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, the Committee of the Regions and the European Investment Bank. A framework strategy for a resilient energy union with a forward-looking climate change policy.
- [26] **Breitschopf, B.; Bäumann A. (2018)**: Do variable renewable energies endanger the power system? An approach to measure flexibility. Conference paper of the 15th International conference on the European Energy Market, Lodz, June 2018. Online verfügbar unter: <https://www.researchgate.net/deref/httpProzent3AProzent2FProzent2Fdx.doi.orgProzent2F10.1109Prozent2FEEM.2018.8469983>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [27] **19th EuObserv'ER Report 2019, The State of Renewable Energies in Europe (2019)**: <https://www.isi.fraunhofer.de/en/competence-center/energiepolitik-energiemaerkte/projekte/eu-res-monitoring.html#3>
- [28] **Breitschopf B.; Schlotz, A. (2014)**: Wirkung erneuerbarer Energien auf die Versorgungssicherheit. Untersuchung im Rahmen des Projekts ImpRES (Impacts of Renewable Energy Sources. Karlsruhe: Fraunhofer ISI (Hrsg.). Online verfügbar unter: www.impres-projekt.de/impres-wAssets/docs/ImpRES_Energiesicherheit_Uebersicht-und-Vorgehensweise_v18.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [29] **Hebling, C. et al. (2019)**: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Karlsruhe und Freiburg: Fraunhofer ISI und Fraunhofer ISE. Online verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2020.

- [30] Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.) (2020): H₂ Atlas Africa – Atlas of green hydrogen generation potentials in Africa. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH. Online verfügbar unter: <https://www.sasscal.org/atlas-of-green-hydrogen-generation-potentials-in-africa/>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [31] World Energy Council (2018): International Aspects of a Power-to-X Roadmap. Studie durchgeführt von Frontier Economics, beauftragt vom World Energy Council (Weltenergieinstitut – Deutschland). World Energy Council.
- [32] Abad, A.V.; Dodds, P.E. (2020): Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy* 138.
- [33] TÜV SÜD (2020): Standard CMS 70. Erzeugung von Grünem Wasserstoff (GreenHydrogen). Version 01/2020. München: TÜV SÜD. Online verfügbar unter: https://docplayer.org/73293340-Tuev-sued-standard-cms-70-erzeugung-von-gruenem-wasserstoff-greenhydrogen-kurz-erzeugung-gh.html#download_tab_content, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [34] DECHEMA; FutureCamp (2019) : Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Studie für den VCI. München: FutureCamp Climate GmbH. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [35] Latemann, S. (2011): Meerwasserentsalzung. Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? S. 452–458., 3. Auflage. Hrsg. Lozán, J. L. H., Graßl, P. Hupfer, L. Karbe & C.-D. Schönwiese.
- [36] Gerhard, M.; Rüschen, T.; Sandhövel, A. (Eds.) (2015): Finanzierung Erneuerbarer Energien. 2nd edition, Frankfurt a.M.: Frankfurt-School-Verlag.
- [37] Agora Energiewende (Hrsg.) (2018): A clean-energy transition in Southeast Europe. Challenges, options and policy priorities. Impulse 11.2018. Berlin: Agora Energiewende. Online verfügbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Energiewendedialog_Suedosteuropa/Agora-Energiewende_Impulse_SEE_energy_transition_priorities.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [38] Weissbein, O.; Glemarec, Y.; Bayraktar, H.; Schmidt, T.S.) (2013): Derisking renewable energy investment. A framework to support policymakers in selecting public instruments to promote renewable energy investment in developing countries. New York, US: UNDP. Online verfügbar unter: [https://www.undp.org/content/dam/undp/library/EnvironmentProzent20andProzent20Energy/ClimateProzent20Strategies/DeriskingProzent20RenewableProzent20EnergyProzent20InvestmentProzent20-Prozent20FullProzent20ReportProzent20\(MayProzent202013\)Prozent20ENGLISHProzent20\(1\).pdf](https://www.undp.org/content/dam/undp/library/EnvironmentProzent20andProzent20Energy/ClimateProzent20Strategies/DeriskingProzent20RenewableProzent20EnergyProzent20InvestmentProzent20-Prozent20FullProzent20ReportProzent20(MayProzent202013)Prozent20ENGLISHProzent20(1).pdf), zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [39] Egli, F.; Steffen, B.; Schmidt, T.S. (2018): A dynamic analysis of financing conditions for renewable energy technologies. *Nat Energy* 77, 525. Online verfügbar unter: <https://www.nature.com/articles/s41560-018-0277-y.pdf>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [40] Egli, F. (2020): Renewable energy investment risk: An investigation of changes over time and the underlying drivers. *Energy Policy* 140, 111428. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111428>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [41] IRENA; CPI (2018): Global landscape of renewable energy finance. Online verfügbar unter: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_Global_Landscape_RE_finance_2018.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [42] Polzin, F.; Migendt, M.; Täube, F.A.; von Flotow, P. (2015): Public policy influence on renewable energy investments – a panel data study across OECD countries. *Energy Policy* 80, 98–111. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.01.026>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [43] E4tech (2019): Value added of the hydrogen and fuel cell sector in Europe – supporting European growth and competitiveness – study on value chain and manufacturing competitiveness analysis for hydrogen and fuel cells technologies. Study by E4tech on behalf of the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH). Online verfügbar unter: <https://www.fch.europa.eu/page/FCH-value-chain>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [44] ESMAP (2020): Green Hydrogen in Developing Countries. Washington, DC: World Bank. Online verfügbar unter:

<http://documents1.worldbank.org/curated/en/953571597951239276/pdf/Green-Hydrogen-in-Developing-Countries.pdf>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.

- [45] **AHP (2020)**: African Hydrogen Partnership. Online verfügbar unter: <https://www.afr-h2-p.com/>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [46] **Sayne, A. (2011)**: Special report: climate change adaptation and conflict in Nigeria. Washington: United States Institute of Peace.
- [47] **Sathaye, J.; Meyers, S. (1987)**: Transport and home energy use in cities of the developing countries: a review. *The Energy Journal* 8: 85–102.
- [48] **Barros, C.P.; Ibiowie, A.; Managi, S. (2014)**: Nigeria's power sector: analysis of productivity. *Economic Analysis and Policy* (44): 65–73.
- [49] **Fawole, A.W. (2018)**: The illusion of the post-colonial state: governance and security challenges in Africa. Lanham, Boulder, New York, London: Lexington Books.
- [50] **Pieterse, J.N. (2001)**: Development theory: deconstructions/reconstructions. London, Thousand Oaks, New Delhi: Sage.
- [51] **United Nations (2015)**: Paris Agreement. Edited by United Nations, Paris. Online verfügbar unter: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [52] **Schweer, M.K.W. (2003)**: Vertrauen als Organisationsprinzip: Vertrauensförderung im Spannungsfeld personalen und systemischen Vertrauens. *Erwägen Wissen Ethik* 14 (2): 323–32.
- [53] **Ya'u, Y.Z. (2004)**: The new imperialism & Africa in the global electronic village. *Review of African Political Economy* 31 (99): 11–29. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.1080/0305624042000258397>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [54] **Hwang, K. (2008)**: International collaboration in multilayered center-periphery in the globalization of science and technology. *Science, Technology & Human Values* 33 (1): 101–133.
- [55] **Bassey, N. (2013)**: To cook a continent: destructive extraction and climate crisis in Africa. Ibadan: Kraft Books Limited.
- [56] **Schmitt, T.M. 2018**: (Why) did desertec fail? An interim analysis of a large-scale renewable energy infrastructure project from a social studies of technology perspective. *Local Environment* 23 (7): 747–76.
- [57] **Dibua, J.I. (2006)**: Modernization and the crisis of development in Africa: the Nigerian experience. Hampshire: Ashgate.
- [58] **Mavhunga, C.C. (2017)**: Introduction: What do science, technology, and innovation mean from Africa? In: *What do science, technology, and innovation mean from Africa?* pp. 1–28. Cambridge, MA, London: MIT Press. Online verfügbar unter: <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/31335/631166.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, zuletzt geprüft am 12.11.2020.
- [59] **Gewald, J.-B.; Leliveld, A.; Pesa, I. (eds.) (2012)**: Transforming innovations in Africa: explorative studies on appropriation in African societies. Leiden, Boston: Brill.
- [60] **Altenburg, T. (2009)**: Building inclusive innovation systems in developing countries: challenges for IS research. In: Lundvall, B.-Å.; Joseph, K.J.; Chaminade, C.; Vang, J. (eds.): *Handbook of Innovation Systems and Developing Countries*. Chapter 2. Cheltenham/UK: Edward Elgar Publishing.
- [61] **Lundvall, B.-Å.; Vang, J.; Joseph, K.J., Chaminade, C. (2009)**: Innovation system research and developing countries. In: *Handbook of Innovation Systems and Developing Countries: Building Domestic Capabilities in a Global Setting*. pp. 1-30. Cheltenham and Northampton, MA: Edward Elgar.
- [62] **Thorpe, D. (2019)**: Unbundling „indigenous space capability“: actors, policy positions and agency in geospatial information science in Southwest Nigeria. (Dissertation, Science, Technology and Innovation Studies). University of Edinburgh.
- [63] **Savage, G.T.; Nix, T.W.; Whitehead, C.J.; Blair, J.D. (1991)**: Strategies for assessing and managing organizational stakeholders. *Academy of Management Perspectives* 5 (2): 61–75.
- [64] **AFREC (2019)**: Designing the African energy transition – an approach for social and economic transformation in a climate compatible manner. African Energy Commission (AFREC). Algiers: AFREC.

- [65] **UNECA (2013)**: Regional cooperation policy for the development of renewable energy in North Africa Framework document. Economic Commission for Africa (ECA) – Office for North Africa UNECA. Available online: https://www.uneca.org/sites/default/files/PublicationFiles/regional_cooperation_policy_for_the_development_of_renewable_energy_in_north_africa.pdf, last checked on 12.11.2020
- [66] **bdew (2019)**: Zahl der Woche/Gesamtstromverbrauch. Online verfügbar unter: <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/zahl-der-woche-gesamtstromverbrauch-deutschland/>, zuletzt geprüft am 13.11.2020.
- [67] **UBA (2020)**: Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren>, zuletzt geprüft am 13.11.2020.
- [68] Beim sogenannten „blauen Wasserstoff“ werden die CO₂-Mengen aus der Herstellung durch CCS (CO₂-Abscheidung und Speicherung) gespeichert, sodass er CO₂-neutral produziert wird.
- [69] „Türkiser Wasserstoff“ wird über die Methanpyrolyse hergestellt, als weiteres Produkt neben Wasserstoff entsteht fester Kohlenstoff.
- [70] **Mercom India (2020)**: With 2,245 MW of commissioned solar projects, world's largest solar park is now at Bhadla. Online verfügbar unter: <https://mercomindia.com/world-largest-solar-park-bhadla/>, zuletzt geprüft am 13.11.2020.
- [71] **DiaCore**: Policy dialogue on the assessment and convergence of RES policy in EU Member States. Online verfügbar unter: <http://www.diacore.eu/>, zuletzt geprüft am 13.11.2020.
- [72] **AURES II**: Auctions for Renewable Energy Support II. Online verfügbar unter: <http://aures2project.eu/deliverables/>, zuletzt geprüft am 13.11.2020.
- [73] **Edler, J.; Blind, K.; Frietsch, R.; Kimpeler, S.; Kroll, H.; Lerch, C.; Reiss, T.; Roth, F.; Schubert, T.; Schuler, J.; Walz, R. (2020)**: Technologiesouveränität – Von der Forderung zum Konzept. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- [74] **Nellesen, P. (2020)**: Hydrogen Council – Who we are. Presentation auf der 1st AHP Conference, Addis Abba, 19th–20th February 2020, Online verfügbar unter: https://899bf48d-9609-4296-ac4c-db03c22bc639.filesusr.com/ugd/6a6d83_41887d06674b4884bb6f0f9331a7cc67.pdf, zuletzt geprüft am 15.11.2020.
- [75] **Weltbank 2020**: Worldwide Governance Indicators. Online verfügbar unter: <http://info.worldbank.org/governance/wgi/>, zuletzt geprüft am 15.11.2020.
- [76] **Gehrke, B.; Schasse, U.; Ostertag, K.; Marscheider-Weidemann, F. (2015)**: Innovationsmotor Umweltschutz. Forschung und Patente in Deutschland und im internationalen Vergleich. Reihe Umwelt, Innovation, Beschäftigung 05/2015, Berlin: BMU/UBA.
- [77] **Walz, R.; Pfaff, M.; Marscheider-Weidemann, F.; Glöser-Chahoud, S. (2017)**: Innovations for reaching the green sustainable development goals – Where will they come from? *International Economics and Economic Policy* 14 (3), S. 684–695.
- [78] **Boschini A, Petersson J, Roine J (2013)**: The resource curse and its potential reversal. *World Development* 43: 19–41.
- [79] **Mehlum H, Moene K, Torvik R (2006)**: Institutions and the resource curse. *The Economic Journal* 116: 1–20.
- [80] **Ploeg F van der (2011)**: Natural resources: curse or blessing? *Journal of Economic Literature* 49: 366–420.
- [81] **Mansson, A. (2015)**: A resource curse for renewables? Conflict and cooperation in the renewable energy sector. *Energy Research & Social Science* 10: 1–9
- [82] **Walz, R., Bodenheimer, M., Gandenberger, C. (2016)**: Kritikalität und Positionalität. Was ist kritisch für wen – und weshalb? In: Exner, A.; Held, M.; Kümmerer, K. (Hrsg.): *Kritische Rohstoffe in der Großen Transformation*, Heidelberg: Springer, S. 19–38.

Impressum

Kontakt

Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung ISI
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe

Prof. Dr. Martin Wietschel
Leitung Competence Center
Energietechnologien und Energiesysteme
Telefon 0721 6809-254
E-Mail martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Prof. Dr. Wolfgang Eichhammer
Leitung Competence Center
Energiepolitik und Energiemärkte
Telefon 0721 6809-158
E-Mail wolfgang.eichhammer@isi.fraunhofer.de

Autorinnen und Autoren

Martin Wietschel
Anke Bekk
Barbara Breitschopf
Inga Boie
Jakob Edler
Wolfgang Eichhammer
Marian Klobasa
Frank Marscheider-Weidemann
Patrick Plötz
Frank Sensfuß
Daniel Thorpe
Rainer Walz

Grafische Gestaltung

Sabine Wurst

www.isi.fraunhofer.de

