

Ariadne-Analyse

Wasserstoffimportsicherheit für Deutschland: Zeitliche Entwicklung, Risiken und Strategien auf dem Weg zur Klimaneutralität

GEFÖRDERT VOM



Autorinnen und Autoren



» Raffaele Piria
adelphi



» Jens Honnen
adelphi



» Dr. Benjamin Pflüger
Fraunhofer-Einrichtung für Energiein-
frastrukturen und Geothermie IEG



» Dr. Falko Ueckerdt
Potsdam-Institut für Klimafolgen-
forschung



» Adrian Odenweller
Potsdam-Institut für Klimafolgen-
forschung

Herausgegeben von
Kopernikus-Projekt Ariadne
Potsdam-Institut für Klimafolgen-
forschung (PIK)
Telegrafenberg A 31
14473 Potsdam

Dezember 2021

Wir danken Prof. Dr. Michèle Knodt für ihre gründliche Revision und ihre hilfreichen Kommentare und Verbesserungsvorschläge zu dieser Analyse.

Die vorliegende Ariadne-Analyse wurde von den oben genannten Autorinnen und Autoren des Ariadne-Konsortiums ausgearbeitet. Sie spiegelt nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Ariadne-Konsortiums oder des Fördermittelgebers wider. Die Inhalte der Ariadne-Publikationen werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.

Inhalt

Zusammenfassung	1
Abkürzungsverzeichnis.....	4
Einführung und Fragestellung	5
Entwicklung des Wasserstoffimportbedarfs	7
Risiken für den Wasserstoffimport	15
Übergeordnete Risiken	15
Risiken in Bezug auf die Exportländer.....	18
Risiken für den Transport	19
Risiken in Deutschland bzw. der EU.....	20
Strategien zur Wasserstoffimportsicherung.....	21
Begrenzung des Wasserstoffimportbedarfs	21
Sicherung von Wasserstoffimporten	22
Minderung der Vulnerabilität gegenüber Importengpässen.....	26
Abwägung zwischen Kooperation und Wettbewerb in der Importsicherung.....	29
Literaturangaben.....	32

Zusammenfassung

Ziel dieser Analyse ist es, die zeitliche Entwicklung des Importbedarfs für Wasserstoff (H₂) für Deutschland abzuschätzen, die verschiedenen Risiken für den H₂-Import zu beschreiben und Strategieansätze zur Sicherung des künftigen H₂-Importbedarfs zu entwickeln. Mit H₂ werden im Folgenden auch seine Folgeprodukte gemeint.

Mithilfe vier einfacher Szenarien wird ein Ausblick auf die **Entwicklung des Wasserstoffimportbedarfs** gegeben. Im Gesamtbild zeigt sich, dass der Energieimportbedarf Deutschlands auf dem Weg zur Klimaneutralität sowohl absolut als auch anteilig stark abnehmen wird. Anstatt der bisherigen, sehr großen Mengen an fossilen Energien und Uran, wird Deutschland in Zukunft deutlich kleinere Mengen an klimaneutraler Energie, überwiegend H₂, importieren müssen. Dabei wird die Höhe des Importbedarfs im Wesentlichen von Deutschlands Erfolg bei der Reduktion des Energieverbrauchs, der direkten Elektrifizierung und dem Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) abhängen.

Im Laufe der Zeit wird sich der Kontext für die H₂-Importsicherung stark verändern. In den nächsten Jahren geht es vor allem darum, die H₂-Option aus klimapolitischer Perspektive zu entwickeln. Erste Versorgungswege werden wahrscheinlich überwiegend über bilaterale Verträge etabliert. Gleichzeitig werden erste H₂-Infrastrukturen aufgebaut und die Entwicklung eines H₂-Marktes vorbereitet.

Wenn nach 2030 die Nachfrage nach H₂ zunimmt und die Anwendungsbereiche breiter werden, werden Wirtschaft und Gesellschaft vulnerabler gegenüber möglichen H₂-Importschocks. Gleichzeitig sinkt die stärker ausgeprägte Vulnerabilität gegenüber Erdöl-, Erdgas-, und Steinkohleimporten. Mit dem sukzessiven Abbau der fossilen Energieinfrastruktur verliert diese aber auch ihre Funktion als Back-up bei H₂-Importstörungen. Gleichzeitig entstehen mit dem Hochlauf der internationalen H₂-Wirtschaft eine diversifizierte Importinfrastruktur sowie liquidere Märkte, wodurch H₂-Importrisiken besser steuerbar werden.

Die H₂-Importsicherheit kann durch eine Reihe von **Risiken** gefährdet werden. Neben den übergeordneten Feldern der *Verfügbarkeit*, *Bezahlbarkeit* und *Nachhaltigkeit* der H₂-Importe entstehen weitere Risiken entlang der Importkette. In Bezug auf die Exportländer bestehen die Risiken einer zu geringen *Anzahl an H₂-exportierenden Ländern und Unternehmen*, der

politischen Instabilität im Exportland sowie der Unersetzbarkeit eines Exporteurs aufgrund einer unzureichend diversifizierten Transportinfrastruktur oder eines unflexiblen H₂-Marktes. Auf der Transportroute kommen *Transitrisiken*, die sich aus außenpolitischen oder innerstaatlichen Konflikten entlang der Lieferstrecke ergeben, sowie technisch oder physisch bedingte *Transportrisiken* hinzu. Auch innerhalb Deutschlands wächst das Risiko, *fehlende H₂-Importe* nicht vollständig ausgleichen zu können. Drei Faktoren bestimmen die Ersetzbarkeit von H₂ bei Engpässen: die Verfügbarkeit von Lagerbeständen, die Möglichkeiten zum kurzfristigen Energieträgerwechsel und die kurzfristige Skalierbarkeit inländischer H₂-Produktion.

Es werden **Strategieelemente zur Importsicherung** in drei Bereichen vorgestellt. Erstens können Importrisiken durch die *Begrenzung des H₂-Importbedarfs* reduziert werden. Dafür bedarf es der Reduktion des Energieverbrauchs durch Energiesuffizienz (z. B. Reduktion des motorisierten Individualverkehrs), Energieeffizienz (z. B. Sanierung von Gebäuden) und direkter Elektrifizierung (z. B. Umstieg auf Elektromobilität). Zudem kann die inländische Grün-H₂-Produktion gesteigert und damit verbunden der EE-Ausbau forciert werden. Zweitens muss zur *Sicherung der Verfügbarkeit, Bezahlbarkeit und Nachhaltigkeit der H₂-Importe* der H₂-Markthochlauf durch ambitionierte und verlässliche Klima- und Energieziele, Investitionsanreize, F&E-Programme sowie adäquate Investitionen in die H₂-Infrastruktur unterstützt werden. Des Weiteren müssen Voraussetzungen für eine Diversifizierung der H₂-Importquellen und -wege, sowohl hinsichtlich der Infrastruktur (Pipelines, Importhäfen) als auch der Marktstrukturen und Handelsbeziehungen, geschaffen werden. Zur Sicherung der Nachhaltigkeit der Importe müssen angemessene Standards und Zertifizierungsverfahren entwickelt werden. Drittens können für den Umgang mit Importengpässen, Preisschocks und Krisensituationen präventive Maßnahmen ergriffen werden, darunter die Früherkennung von Importrisiken, der Aufbau einer strategischen H₂-Reserve sowie die Bereithaltung von inländischen H₂-Produktionskapazitäten. Für schwerwiegende Versorgungsengpässe müssen Notfallpläne entwickelt werden.

Schließlich wird eine **Abwägung zwischen Kooperation und energiepolitischem Wettbewerb verschiedener Länder bei der H₂-Importsicherung** getroffen. Wenn alle künftigen H₂-Importländer die entworfene Strategie umsetzen, würden beim Markthochlauf, in der Krisenvorbereitung und auch bei vielen Aspekten der Importsicherung positive Synergien entstehen. Allerdings könnte die Umsetzung anderer Strategieelemente auch zu einem

Wettbewerb zwischen H₂-Importländern um die günstigsten H₂-Quellen führen. Ein H₂-Importland, das einen größeren Anteil der knappen Ressourcen für sich sichert und dabei anderen den Zugang erschwert, würde aber im Kontext der dringend gebotenen weltweiten Dekarbonisierung einen zweifelhaften Erfolg erzielen, wenn andere Länder dadurch weiterhin auf emissionsreiche Energien zurückgreifen müssen. Im Sinne des Klimaschutzes sollte Deutschland daher nicht auf außenenergiepolitische Ansätze aus dem Ölzeitalter setzen, sondern stattdessen einen kooperativen, mit anderen Importländern und insbesondere den EU-Mitgliedsstaaten abgestimmten Ansatz zur H₂-Importsicherung verfolgen.

Abkürzungsverzeichnis

BECCS	Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung (engl.: <i>bioenergy with carbon capture and storage</i>)
CCS	CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung (engl.: <i>carbon capture and storage</i>)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DAC	Abscheidung von CO ₂ aus der Atmosphäre (engl.: <i>direct air capture</i>)
DACCS	Abscheidung und Speicherung von CO ₂ aus der Atmosphäre (engl.: <i>direct air carbon capture and storage</i>)
EE	Erneuerbare Energien
F&E	Forschung und Entwicklung
H ₂	Wasserstoff
IEA	Internationale Energieagentur
LOHC	Flüssige organische Wasserstoffträger (engl.: <i>liquid organic hydrogen carriers</i>)
PEV	Primärenergieverbrauch
PtX	Power-to-X
TWh	Terawattstunden
THG	Treibhausgase

Einführung und Fragestellung

Um Deutschland auf den Weg zur Klimaneutralität bis 2045 zu bringen, hat die eintretende Ampel-Regierung in ihrem Koalitionsvertrag ein umfassendes Maßnahmenpaket für eine Beschleunigung der Energiewende vorgestellt. Damit wird die Bedeutung von CO₂-armem Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff noch schneller zunehmen als bislang anvisiert. Im Folgenden werden mit Wasserstoff (H₂) generell auch seine Folgeprodukte wie synthetische Energieträger oder Ammoniak gemeint.

In der öffentlichen Debatte wird H₂ manchmal als das „Erdöl des 21. Jahrhunderts“ bezeichnet. Diese Analogie kann den Eindruck erwecken, dass die Geopolitik in einer klimaneutralen Welt der des 20. Jahrhunderts ähneln wird, die stark von Risiken und Konflikten um Zugang zu und Verteilung von Erdöl- und Erdgasressourcen geprägt war. Das ist nur teilweise zu erwarten.

Zwar wird H₂ zu einem zentralen Energieträger und Grundstoff¹, der einen großen Teil der international gehandelten Energie ausmacht. Jenseits dieser Parallele ist die Erdöl-Analogie jedoch irreführend: Erdöl eroberte im 20. Jahrhundert als neuer Primärenergieträger die globalen Energiemärkte, weil es technisch derart überlegen war, dass es praktisch alternativlos wurde. Das gilt für H₂ nicht direkt, da seine Entwicklung in erster Linie *klimapolitisch* erwünscht und getrieben ist. Im Gegensatz zu Erdöl hängt der zukünftige H₂-Importbedarf von der Stabilität des klimapolitischen Rahmens ab und Länder können zur Not noch lange Zeit auf fossile Alternativen zurückgreifen. Die Grundsätze und Strategien zur Importsicherung verändern sich demnach in einer nach Klimaneutralität strebenden Welt.

Ein weiterer markanter geopolitischer Unterschied ist die Möglichkeit, dass der internationale Handel mit H₂ in einer klimaneutralen Welt weniger asymmetrisch sein kann als es bisher bei Erdöl und Erdgas der Fall ist. Dafür spricht, dass eine größere Anzahl an Ländern ihren Energiebedarf mit inländischen (erneuerbaren) Energien decken können.² Andere Länder werden ihr einheimisches EE-Potenzial aufgrund ihrer hohen Besiedlungs-

¹ In den meisten Fällen verwenden wir „Energieträger“ unter Einbeziehung auch der stofflichen Nutzung von Wasserstoff und Kohlenwasserstoffen als Grundstoffe.

² Van de Graaf et al. (2020). Siehe zu dieser Debatte auch Pflugmann und De Blasio (2020).

dichte und ihres hohen Energiebedarfs mit H₂-Importen ergänzen müssen; zu diesen gehören Deutschland, viele EU-Mitgliedstaaten sowie China, Japan, Korea, vermutlich Indien und andere. Dieser Energieimportbedarf kann durch Energieeffizienz und den Ausbau der inländischen erneuerbaren Energien (EE) jedoch reduziert werden. Zudem sind die potenziell H₂-exportierenden Länder geographisch gleichmäßiger verteilt als heutige Energieexportländer. Dadurch könnte die Vulnerabilität der europäischen und globalen Wirtschaft gegenüber Störungen auf einzelnen Transitstrecken abnehmen. Durch die Verringerung der Zugangs- und Verteilungsrisiken um fossile Energien und der durch den Klimawandel verursachten Konflikte kann die Energiewende so eine „globale Sicherheitsdividende“ schaffen.³

Im Zusammenhang mit Importen wird oft von einer „Importabhängigkeit“ gesprochen. Dieser negativ besetzte Begriff suggeriert, dass die Tatsache, dass ein Land in bestimmten Bereichen auf Importe angewiesen ist, an sich problematisch ist. Die logische Folge dieser Denkweise wäre das Postulat, dass der ideale Zustand einer Volkswirtschaft eine vollständige Autarkie wäre. Dagegen sprechen viele wirtschaftliche, politische, gesellschaftliche und geographische Argumente, die an dieser Stelle nicht vertieft werden können. Es sei nur angemerkt, dass ein Bestreben nach Energieautarkie für Deutschland als großes Handelsland, das vergleichsweise arm an eigenen Energiequellen und Rohstoffen ist, und dessen Wohlstand weitgehend auf Exporten hochwertiger Industrieprodukte und Dienstleistungen beruht, wenig nutzbringend wäre. Aus diesen Gründen sprechen wir in der vorliegenden Analyse von Importbedarf statt von Importabhängigkeit.

Auf dem Weg zur Klimaneutralität verändern sich die Anforderungen an die Energieimportssicherheit. H₂-Importe werden insbesondere für Deutschland zu einer notwendigen Bedingung für eine erfolgreiche Energiewende. Das Ziel der vorliegenden Analyse ist es, die zeitliche Entwicklung des H₂-Importbedarfs für Deutschland abzuschätzen, die verschiedenen Risiken für den H₂-Import zu beschreiben und Strategieansätze zur Sicherung des künftigen H₂-Importbedarfs zu entwickeln. Abschließend werden Argumente für internationale Kooperation und Wettbewerb bei der H₂-Importsicherung abgewogen.

³ Goldthau et al. (2018).

Entwicklung des Wasserstoffimportbedarfs

Im Folgenden diskutieren wir die Rahmenbedingungen, unter denen in Zukunft Energieimporte gesichert werden müssen. Dazu gehören die Entwicklung des H₂-Importbedarfs sowie der Stand des Infrastrukturausbaus und die Verfügbarkeit von alternativen Energieversorgungsoptionen.

Abbildung 1 zeigt vier exemplarische Szenarien für die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs (PEV) Deutschlands auf dem Weg zur Klimaneutralität, unterteilt in inländisch produzierte Energie und Netto-Energieimporte. Diese Entwicklung orientiert sich an den vorliegenden Szenarien des Ariadne-Szenarienberichts, wurde jedoch hier vereinfacht und generalisiert.⁴ Insgesamt nehmen hinsichtlich der hier relevanten Parameter die meisten aktuellen Studien mit ambitionierten Klimaschutzzielen einen ähnlichen Verlauf, da der Spielraum der Transformationspfade durch den Status Quo und die ambitionierten Ziele beschränkt ist. Das Ariadne-Kurzdossier „Eckpunkte einer adaptiven Wasserstoffstrategie“ synthetisiert Bandbreiten der Nutzung von H₂ und Folgeprodukten aus fünf Szenarienstudien für Deutschland und beschreibt die techno-ökonomischen Unsicherheiten, die die Realisierbarkeit der verschiedenen Pfade bestimmen.⁵ Die konkreten Annahmen hinter den einzelnen Szenarien in Abbildung 1 werden in dieser Fußnote⁶ dargelegt.

⁴ Siehe: Ariadne (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Ariadne-Report.

⁵ Siehe: Ariadne (2021b): Eckpunkte einer adaptiven Wasserstoffstrategie. Ariadne-Kurzdossier.

⁶ Nach der vereinfachten Logik dieser Abbildungen ergibt sich der Importbedarf aus der Differenz zwischen Energieverbrauch und Erzeugung aus heimischen EE-Ressourcen. In Wirklichkeit ist diese einseitige Wirkungskette nicht realistisch, da sich diese drei Größen gegenseitig beeinflussen werden.

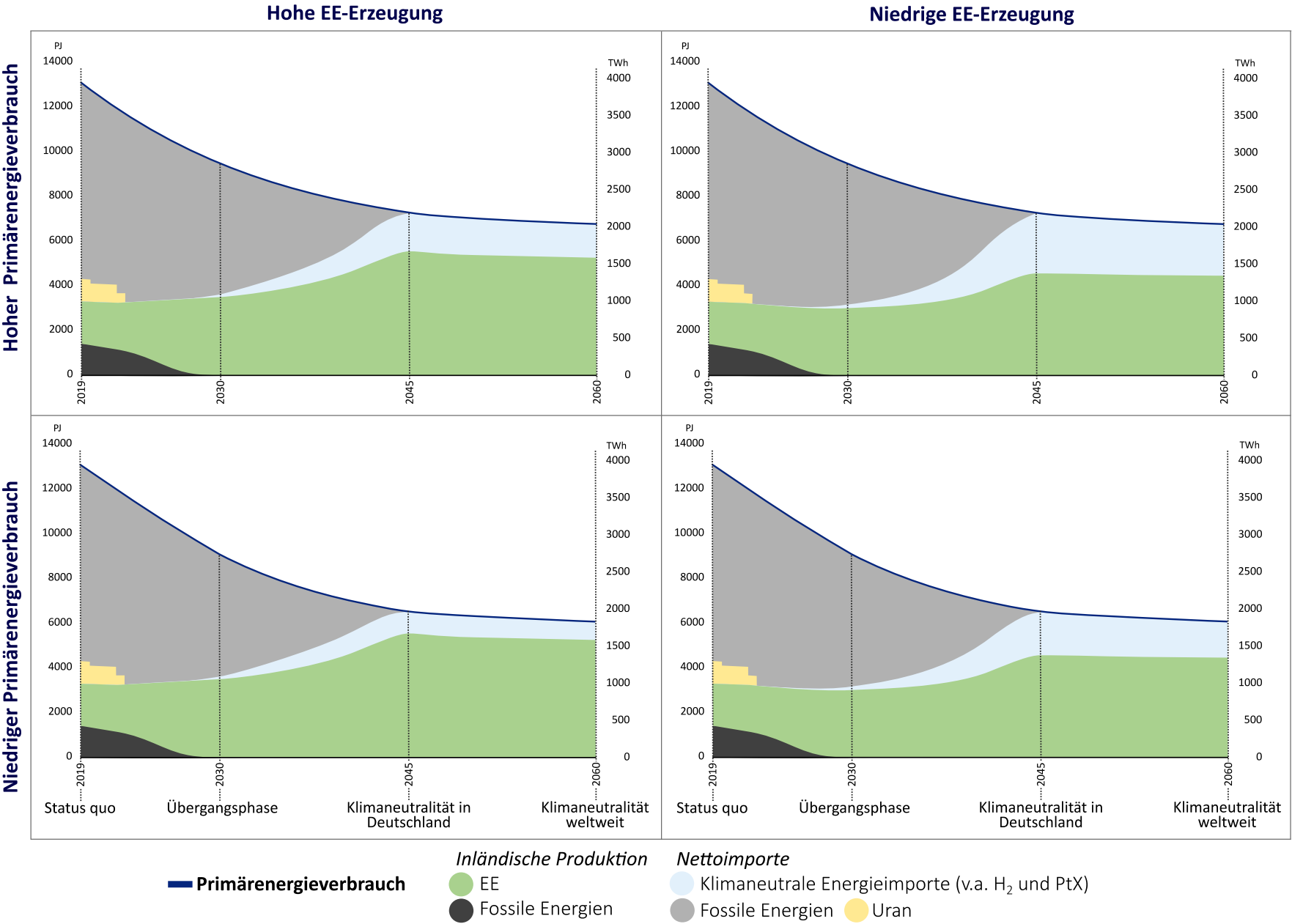
Die Nettostromexporte (ca. 35 TWh bzw. 126 PJ in 2019) werden in dieser Grafik nicht gezeigt. 2020 sanken sie zirka um die Hälfte. Es wird generell davon ausgegangen, dass sie in naher Zukunft auf null sinken werden und Deutschland sich mittelfristig zum Nettostromimporteur entwickeln wird.

Energieverbrauch: In den Szenarien 1 und 2 wird angenommen, dass der PEV von 12.800 PJ in 2019 auf 7.200 PJ in 2045 sinkt. Das entspricht dem Ziel, das sich die Bundesregierung im Jahr 2010 für 2050 gesetzt hatte, als noch das 80 %-Emissionsreduktionsziel bis 2050 galt. Die Szenarien 3 und 4 orientieren sich an Studien, die bei Erreichung der Klimaneutralität von einer stärkeren Reduktion des PEV ausgehen und nehmen an, dass der PEV bis 2030 auf 9.000 PJ und bis 2045 auf 6.500 PJ sinkt. In allen vier Szenarien sinkt der PEV zwischen 2045 und 2060 nur noch leicht auf 7.000 bzw. 6.300 PJ.

Inländische EE-Erzeugung: In den Szenarien 1 und 3 wird angenommen, dass 2045 in Deutschland 1.500 TWh (5.400 PJ) aus heimischen EE-Ressourcen, einschließlich regenerativer Wärme erzeugt werden. Dieser Wert orientiert sich an Agora Energiewende et al. (2021). In den Szenarien 2 und 4 wird angenommen, dass der EE-Ausbau bis 2045 nur 1.200 TWh (4.320 PJ) erreicht. Diese grobe Annahme bildet die denkbaren Restriktionen aufgrund konkurrierender Flächennutzungsansprüche, fehlender Akzeptanz oder fehlender Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu EE-Importen ab. In allen Szenarien wird der EE-Ausbau vor 2045 linear interpoliert, nach 2045 sinkt er leicht, da der Energiebedarf auch weiter sinkt.

Inländische fossile Förderung: angenommen wird, dass sie bis 2030 auf null sinkt. Dies könnte auch etwas früher oder später erfolgen, je nachdem wie schnell der Ausstieg aus der Braunkohle und das Ende der ohnehin sehr geringen inländischen Erdgas- und Erdölförderung zustande kommen. Selbst ohne inländische fossile Förderung und trotz der Vollendung des Atomausstiegs sinken die fossilen Energieimporte von 2019 bis 2030 dank der Verbrauchsreduktion und dem EE-Ausbau je nach Szenario bereits um 15 % bis 38 %.

Abbildung 1: Entwicklung des deutschen Energieimportbedarfs je nach Energieverbrauch und inländischer Erneuerbaren-Energie Erzeugung



Für den Importbedarf Deutschlands sind vor allem zwei Größen der Szenarien maßgeblich: Der Primärenergieverbrauch und die inländische EE-Erzeugung. Der Importbedarf ist umso geringer, je weniger Energie verbraucht wird und je mehr davon inländisch erzeugt werden kann. Energieeffizienz und EE-Ausbau können daher auch als Maßnahmen zur Minderung von Importrisiken begriffen werden.

Im Folgenden diskutieren wir die Gemeinsamkeiten aller Szenarien im Hinblick auf H₂-Importrisiken und Strategien anhand von vier Phasen der Transformation.

1. Status Quo (2019)
2. Übergangsphase (2030):
3. Klimaneutralität Deutschland (2045)
4. Klimaneutralität Welt (2060)

Die konkreten Jahresangaben sind dabei nicht ausschlaggebend. Obwohl wir in den Szenarien annehmen, dass Deutschland seine Klimaschutzziele erfüllt, würde eine Verzögerung die Phasen nicht grundlegend verändern. Des Weiteren nehmen wir an, dass fossile Energieimporte mit der Klimaneutralität langfristig höchstens in vernachlässigbaren Mengen vereinbar sind, da CCS zumindest für die Weiternutzung fossiler Rohstoffe nicht sicher zu Verfügung steht.⁷

Ein klimaneutrales Deutschland kann Energie in drei Formen importieren: Strom, Biomasse und H₂ bzw. seine Folgeprodukte, vorausgesetzt dass alle drei klimaneutral produziert werden. Da diese teilweise substituierbar und unterschiedliche „Importmixe“ denkbar sind, werden all diese potenziellen Importe in der hellblauen Fläche der Grafiken als „klimaneutrale Energieimporte“ subsumiert.

Stromimporte⁸ aus europäischen Ländern sind durch die auch dort begrenzten Flächen und begrenzte Akzeptanz für EE-Anlagen sowie durch den Netzausbaubedarf beschränkt. Bei Biomasseimporten in großem Umfang bestehen erhebliche Bedenken hinsichtlich ihrer tatsächlichen THG-Emissionsintensität sowie der Zielkonflikte zwischen Bioenergie, Biodiversität, Ernährungssicherheit und anderen Landnutzungen. Langfristig gehen wir

⁷ Diese Annahme beruht vor allem auf der Unsicherheit, ob geeignete Lagerstätten nicht zum Großteil oder vollständig für die Erzeugung negativer Emissionen vorgehalten werden müssen. In zukünftigen Ariadne-Arbeiten und -Szenarien wird die potenzielle Rolle von CCS für unterschiedliche Einsatzzwecke detailliert untersucht und diskutiert werden.

⁸ Aktuelle Studien schätzen den langfristigen Stromimportbedarf unterschiedlich ein: Agora (2021) geht von etwa 10 TWh Stromimporten, die Langfristszenarien des BMWi von bis zu 130 TWh aus (siehe: www.langfristszenarien.de).

daher davon aus, dass ein Großteil der klimaneutralen Importe aus Elektrolyse-H₂ bestehen wird.

Status Quo (2019)

Das derzeitige Energiesystem Deutschlands ist immer noch stark durch fossile Importe geprägt. 2019 importierte Deutschland 75 % seines Primärenergieverbrauchs. Die Nettoimporte von Erdöl (35 %) machen den größten Anteil am PEV aus, gefolgt von Erdgas (25 %), Steinkohle (9 %) und Uran (6 %)⁹. Die inländische Förderung fossiler Energieträger ist rückläufig, klimaneutraler Wasserstoff spielt noch keine signifikante Rolle.

Zwischenetappe 2030

2030 ist ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zur Klimaneutralität. Aufgrund steigender CO₂-Preise wird mindestens die Braunkohleverstromung stark gesunken oder vollständig beendet sein – auch ohne ein explizites Vorziehen des Kohleausstiegs. Wegen des insbesondere durch Energieeffizienzmaßnahmen und Elektrifizierung gesunkenen Energieverbrauchs und des EE-Ausbaus sinken die fossilen Energieimporte in den exemplarischen Szenarien von 2019 bis 2030 bereits um 15 % bis 38 %.¹⁰

Bis 2030 fallen die H₂-Importe im Verhältnis zum gesamten Energieverbrauch noch gering aus. In allen vier Szenarien von Abbildung 1 wird angenommen, dass Deutschland im Jahr 2030 100 PJ (28 TWh) klimaneutrale Energieimporte bezieht, die im Wesentlichen aus H₂ bestehen werden. Wesentliche limitierende Faktoren für die Importe in dieser Phase sind das noch knappe H₂-Angebot aus dem Ausland sowie die bis 2030 geringe Verfügbarkeit von H₂-Pipelines aus Ländern, in denen grüner oder blauer H₂ günstig und in großen Mengen produziert werden kann. Ohne Pipelines muss H₂ per Schiff, Lkw oder Zug nach Deutschland transportiert werden, was mit hohen Kosten verbunden ist.

Für diese Übergangsphase ist zu erwarten, dass der Ausbau der H₂-Infrastruktur intensiv im Gang ist. Voraussichtlich wird es erste H₂-Cluster in einzelnen Regionen Deutschlands (z. B. im Ruhrgebiet) geben, deren Bedarf auch durch erste Importpipelines, z. B. aus den

⁹ AGEB (2020a)

¹⁰ In den Szenarien des REMIND-Modells im Ariadne-Szenarienbericht (Ariadne, 2021) sinken die fossilen Primärenergieimporte zwischen 2020 und 2030 um 25-32 %, je nach Szenario.

Niederlanden, sowie erste Importanlagen an deutschen Häfen gedeckt wird. Parallel dazu wird auch der Aufbau großskaliger geologischer H₂-Speicher in Deutschland stattfinden.

In dieser Phase wird der H₂-Handel wahrscheinlich überwiegend über bilaterale Verträge laufen, da die Entstehung eines dynamischen und liquiden H₂-Marktes in dieser kurzen Zeit nicht abzusehen ist. Da die fossile Energieinfrastruktur voraussichtlich noch weitgehend in Betrieb sein wird, können fossile Energien im Fall von H₂-Importstörungen noch als Back-up dienen. Bei vielen der ersten industriellen Nutzer (Raffinerien, chemische Industrie, Stahlwerke) sind alternative, fossile Produktionsanlagen für H₂ vor Ort vorhanden oder können einfach integriert werden.

Die H₂-Versorgungssicherheit wird in dieser Phase unter anderem über H₂-Kavernenspeicher, primär jedoch über fossile Alternativproduktion von H₂ sichergestellt. Dies ist zwar unter Klimagesichtspunkten nicht optimal, lässt sich technisch und ökonomisch aber kaum vermeiden: Ein schon in dieser frühen Phase rein auf grünem H₂ basiertes System würde sehr große Speichervolumina und eine so schnell kaum erreichbare Elektrolyseleistung erfordern. Dies ist jedoch auch nicht erforderlich: Das Ziel der ersten Phase muss die Diffusion von klimapolitisch sinnvollen H₂-Anwendungen und der dafür notwendigen Erzeugungsmenge an grünem H₂ sein. Eine rein erneuerbare Versorgungssicherheit kann und muss zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, wenn das H₂-System eine dafür angemessene Größe erreicht hat.

Zweite Etappe: Klimaneutralität in Deutschland und EU (2045)

Der zentrale Meilenstein von Abbildung 1 ist das Erreichen der Klimaneutralität in Deutschland in 2045. Ab spätestens diesem Zeitpunkt wird der gesamte Energiebedarf Deutschlands aus heimischer oder importierter klimaneutraler Energie gedeckt. Die Höhe der inländischen EE-Erzeugung unterliegt allerdings Restriktionen. Der voraussichtlich entscheidende Engpass ist die Verfügbarkeit geeigneter Flächen, die unter anderem durch konkurrierende Nutzungsansprüche, fehlende gesellschaftliche Akzeptanz und Naturschutzbestimmungen eingeschränkt ist. Aufgrund dieser Hindernisse ist das realisierbare EE-Potenzial schwer abzuschätzen. Da die meisten Szenario-Analysen davon ausgehen, dass Deutschland nicht über ausreichende EE-Potenziale verfügt, um seinen gesamten Energiebedarf heimisch zu decken, muss von einem substantiellen Importbedarf aus-

gegangen werden.¹¹ Als Importquellen kommen besonders Länder in Frage, die ein deutlich besseres Verhältnis von EE-Potenzial zu Bevölkerung und Energiebedarf aufweisen, also dünn besiedelte Regionen mit besseren EE-Ressourcen.

In allen Szenarien in Abbildung 1 sowie in allen kürzlich veröffentlichten Szenario-Analysen zur Klimaneutralität in 2045 ist der langfristige Importbedarf Deutschlands von klimaneutraler Energie substanziell. H₂ dient dabei als Grundstoff und Wärmequelle für viele Industrieprozesse und wird in der Energiewirtschaft in Zeiten niedriger EE-Erzeugung genutzt. Welche Rolle H₂ darüber hinaus im Transportsektor spielen wird, ist derzeit noch Gegenstand intensiver Diskussionen. Im Laufe des Anstiegs der H₂-Importe ab 2030 ist davon auszugehen, dass bis 2045 eine robuste H₂-Infrastruktur existieren wird, sowohl innerhalb Deutschlands und der EU als auch für Importe. Dazu gehören voraussichtlich neben Pipelines zwischen der EU, dem Nordseeraum, Osteuropa inkl. Russland und eventuell dem Mittleren Osten auch großskalige geologische H₂-Speicher in Deutschland sowie die notwendigen Anlagen in den Importhäfen.

Anders als in 2030 würden sich langfristige H₂-Importstörungen aber nicht nur auf einzelne Verbraucher, sondern auf die gesamte Volkswirtschaft und auf sensible gesellschaftliche Bereiche auswirken. Eine anhaltende H₂-Knappheit in einem Ausmaß, das die H₂-Speicherkapazitäten sowie die kurzfristigen Wechsellmöglichkeiten übersteigt, würde neben den auf H₂ angewiesenen Industrie- und Transportsektoren auch die Sicherung der Strom- und Fernwärmeversorgung gefährden.

Es ist möglich, dass sich bis 2045 internationale, liquide Märkte für klimaneutralen H₂ und seine Folgeprodukte gebildet haben werden. Auf diesen können Produktionssaufälle einzelner Länder oder Regionen besser aufgefangen werden als in einer Situation, in der Importe durch wenige bilaterale Verträge dominiert werden. Dabei können Importe über den Seeweg eine wichtige Rolle spielen, da sie die Importquellen und -routen diversifizieren und somit die Bildung weniger fragmentierter oder gar globaler Märkte für H₂-basierte, klimaneutrale Energieträger ermöglichen.

Bis zum Erreichen der Klimaneutralität in Deutschland wird die fossile Infrastruktur in Deutschland und in der EU möglicherweise noch nicht vollständig zurückgebaut oder

¹¹ Siehe z. B.: Ariadne (2021); dena (2021); Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021).

umgewidmet sein, aber bereits deutlich weniger leistungsfähig als noch in 2030. Viele Gasverteilnetze und Leitungen des Gastransportnetzes werden voraussichtlich bereits stillgelegt worden sein. Tankstellen werden keine fossilen Treibstoffe mehr führen, alle fossilen Kraftwerke werden mindestens stillgelegt und teilweise bereits zurückgebaut oder auf H₂ umgestellt worden sein. Andere Teile der Infrastruktur werden noch vorhanden, aber angesichts der bereits in den vorigen Jahren stark eingeschränkten Nachfrage vermutlich nur mit zunehmend hohen Kapazitätsszahlungen noch betriebsbereit zu halten sein. Beim Erreichen der Klimaneutralität ist auch davon auszugehen, dass nur noch wenige Verbraucher Anlagen zur Verfügung haben werden, die bei H₂-Importstörungen ein Umschalten auf etwa Erdgas oder Öl ermöglichen würden.

Der mit dem Fortschritt in Richtung Klimaneutralität verbundene schnelle Abbau der fossilen Versorgungsinfrastruktur ab 2030 würde bedeuten, dass diese in immer weniger Bereichen als Back-up dienen kann. Die Sicherung der Energieversorgung, nicht nur im Stromsystem sondern auch in den nicht zu elektrifizierenden Sektoren, muss daher durch klimaneutrale Energieträger gewährleistet werden.

Dritte Etappe: Klimaneutralität weltweit (2060)

Abbildung 1 zeigt als finale Etappe die Erreichung der Klimaneutralität auf globaler Ebene in 2060. Das spezifische Jahr der Erreichung dieses Meilensteins ist für die Argumentation nicht entscheidend. Im deutschen Energiemix ändert sich in der Abbildung zwischen 2045 und 2060 wenig, aber der globale Kontext für Deutschlands H₂-Importsicherheit würde sich in diesem Zeitraum deutlich verändern. Um global Klimaneutralität zu erreichen, müssten auch große Energieverbraucher wie China, Indien, Russland und Saudi-Arabien ihre Energiesektoren ähnlich massiv umbauen wie Deutschland und die EU in den Jahrzehnten zuvor. Eine fossile Energieinfrastruktur ist dann auch global weitgehend nicht mehr verfügbar und damit auch ein „Rückfall“ in die fossile Energieversorgung weitgehend ausgeschlossen. Damit ginge aber auch die potenzielle Back-up-Funktion zur Sicherung der Energieversorgung verloren, die die in 2045 in Deutschland und der EU noch teils vorhandene physische fossile Infrastruktur im Notfall haben mag. In einer solchen global klimaneutralen Welt wird die Energieversorgungssicherheit im Wesentlichen durch EE gewährleistet. Im Vergleich zu 2045, in dem weltweit nur wenige Länder klimaneutral sind, wird der Druck auf die zwar insgesamt reichlich vorhandenen,

aber dennoch nicht uneingeschränkten EE-Ressourcen und auf die ebenfalls beschränkten CO₂-Speicherkapazitäten zum Ausgleich unvermeidlicher Prozessemissionen und zur Realisierung negativer Emissionen vermutlich wachsen. Das könnte die Abwägung zwischen internationaler Kooperation und Wettbewerb verändern, die im letzten Kapitel dieser Analyse diskutiert wird.

Zwischenfazit

Wichtige Nebenwirkung einer konsequenten Klimapolitik ist für Deutschland insgesamt ein sinkender Energieimportbedarf und so eine generelle Abnahme der mit Energieimporten verbundenen Vulnerabilitäten. Dem in Zukunft schnell anwachsenden Bedarf an klimaneutralen Energieimporten steht ein noch schneller abnehmender Bedarf an fossilen Energieimporten gegenüber. Je nach Szenario sinkt der verbleibende Energieimportbedarf bis 2045 auf 17 % bis 40 % des Primärenergieverbrauchs im Vergleich zu 75 % in 2019.

Risiken für den Wasserstoffimport

Deutschlands zukünftige H₂-Importsicherheit kann durch eine Reihe von Risiken gefährdet werden. Basierend auf einer Recherche der allgemeinen Fachliteratur zu Energiesicherheit und Energieimportabhängigkeit¹² und insbesondere einer Studie des Fraunhofer ISI zu den Chancen und Herausforderungen beim H₂-Import¹³ werden in dieser Analyse mehrere Risiken vorgestellt. Nach Betrachtung drei übergeordneter Risiken (Verfügbarkeit, Bezahlbarkeit und Nachhaltigkeit der H₂-Importe) werden in diesem Kapitel Risiken in Bezug auf die H₂-Exportländer, Risiken für den H₂-Transport sowie Risiken analysiert, die weitgehend innerhalb der Kontrolle Deutschlands bzw. der EU liegen.

Was bedeutet Wasserstoffimportsicherheit?

In der umfangreichen Fachliteratur zur Energiesicherheit wird der Begriff sehr unterschiedlich definiert. Wir orientieren uns hier an einer breiten Definition, nach der die Energiesicherheit einen Zustand beschreibt, in dem das gesamte Energiesystem eines Landes, von Erzeugung über Verteilung bis in die Endanwendungen, eine auf mehreren Ebenen (Ressourcen, Wirtschaft, Geopolitik, Gesellschaft) niedrige Vulnerabilität aufweist¹⁴. Diese Definition von Sicherheit bezieht sich also vor allem auf das Verhindern und Mindern von Risiken. Energieimportsicherheit kann dabei als Unterkategorie der Energiesicherheit verstanden werden. In Bezug auf Wasserstoff beschreibt sie einen Zustand, in dem der Wasserstoffimportbedarf eines Landes oder einer Region durch eine verlässliche, bezahlbare und nachhaltige Wasserstoffversorgung aus dem Ausland sichergestellt wird.

Übergeordnete Risiken

Bis zirka 2030 ist davon auszugehen, dass die **Verfügbarkeit von Wasserstoffimporten** für Deutschland vor allem oder ausschließlich durch bilaterale Lieferverträge gesichert wird, die wie im Fall des Förderprogramms H2Global¹⁵ auch über Intermediäre abgeschlossen werden können. Da in dieser Phase weder großskalige inländische H₂-Speicher noch ein liquider internationaler Markt für H₂ zu erwarten sind, kann ein eventueller Importausfall im Wesentlichen nur durch fossile Alternativen ausgeglichen werden, sei es

¹² u. a. Elbassoussy (2019); Vivoda (2009); Energy Charter Secretariat (2015); Ikenberry (1986)

¹³ Wietschel et al. (2020)

¹⁴ Angelehnt an Cherp und Jewell (2014). Für andere Definitionen siehe Gracceva und Zenjewski (2014); Azzuni und Breyer (2018); Anget al. (2015).

¹⁵ <https://h2-global.de/>

auf der Verbraucherseite (z. B. duale Anlagen, die auch mit Erdgas betrieben werden können) oder durch eventuelle Reservekapazitäten für die Produktion von grauem H₂ in Deutschland. Ab zirka 2030 kann erwartet werden, dass sich graduell internationale Märkte für klimaneutralen H₂ bilden. Das setzt unter anderem eine hinreichende Anzahl an Anbietern und Abnehmern sowie eine physische Infrastruktur voraus, die deutschen Verbrauchern bzw. Importeuren mehr Flexibilität ermöglichen.

Durch multilateralen H₂-Handel sinkt die Wahrscheinlichkeit von Ausfällen und Engpässen, es ergeben sich allerdings Preisrisiken. Gerade in der Anfangsphase wären Verbraucher potenziell schwankenden Marktpreisen ausgesetzt, wodurch die **Bezahlbarkeit der Wasserstoffimporte** beeinträchtigt werden könnte. Mit zunehmenden Marktvolumen wird der Markt liquider und die Preisvolatilität nimmt ab. Wie bei anderen Gütern ist auch bei H₂ vorstellbar, dass Deutschlands Importbedarf durch einen Mix an langfristigen Verträgen mit stabilen Preisen und kurzfristigem Handel auf Spotmärkten gedeckt wird. Auf dem Weg zur Klimaneutralität ist es gut vorstellbar, dass das Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage zeitweise ins Wanken geraten könnte. Je stärker das internationale klimapolitische Engagement, desto wahrscheinlicher die schnelle Entwicklung eines liquiden und wettbewerbsfähigen Weltmarktes für H₂. Mit dem Ausbau der Infrastruktur wird H₂ zunehmend verfügbarer und bezahlbarer werden. Insbesondere nach Abschluss von Pipeline-Projekten (voraussichtlich nach 2030) ist mit einer Stabilisierung des H₂-Angebots zu rechnen.

Zum Risiko einer strukturellen Unterversorgung mit H₂ können aus heutiger Sicht nur Vermutungen angestellt werden. Ein relevanter Unterschied zur Dynamik an den fossilen Energiemärkten ist aber bereits absehbar. Die globale Erdöl- und Erdgasförderung kann auch kurzfristig, je nach Konjunkturphase oder auch infolge strategischer Erwägungen der Produzenten erheblich schwanken. Bei hohen Marktpreisen springen auch die teuersten Förderanlagen ein. Bei niedrigen Preisen wird weniger produziert, teilweise drosseln die Produzenten ihre Förderung strategisch. Dabei verzichten sie zwar auf Einnahmen, aber ihre Reserven bleiben im Boden und können später womöglich teurer verkauft werden. Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive ist dieses Verhalten rational, denn bei niedrigen Preisen müssen die Produzenten nicht nur die Grenzkosten der Förderung (u. a. den dafür nötigen Energieaufwand) tragen, sondern auch die Opportunitätskosten, die infolge des Verkaufs zum niedrigen Marktpreis entstehen. Ähnlich dürfte künftig die Lage

für Blau-H₂-Exporteure sein – mit der Einschränkung, dass zusätzlich notwendige CCS-Infrastruktur und -Anlagen die Flexibilität der Angebotsregulierung reduzieren.

Bei Grün-H₂ aus Wind- und Solarenergie dürfte diese Dynamik anders aussehen. Denn nicht nur die Grenzkosten der EE-Erzeugung liegen nahe null, sondern es gibt auch keine Opportunitätskosten: Der Wind, der heute nicht in nutzbare Energie umgewandelt wird, steht morgen nicht mehr zur Verfügung. Was das für Importeure bedeuten wird, ist schwer einzuschätzen. Einerseits können Preisschwankungen durch H₂-Speicher abgefedert werden, wodurch Importeure (aber auch Produzenten) H₂ zu Zeiten niedriger Preise bunkern und dann zu Zeiten höherer Preise nutzen können. Deutschland, mit guten geologischen Bedingungen für eine großskalige H₂-Speicherung¹⁶, wird hier im Vorteil sein. Andererseits werden H₂-Speicher vermutlich immer teurer bleiben, als die „natürliche Speicherung“ der fossilen Energie in der Erde. Im Vergleich zum fossilen Zeitalter könnte es deshalb in einer klimaneutralen Welt stärkeren politisch-regulatorischen Anreizen bedürfen, um die Reservekapazitäten aufzubauen, die nur selten zur Deckung von unerwartet hohen Nachfragespitzen oder zum Ausgleich plötzlicher Angebotsausfälle wichtiger Produktionsstätten oder Transportstrecken benötigt würden. Umso wichtiger dürften langfristig großskalige H₂-Speicher werden.

Da die Grün-H₂-Produktion sowie die dafür benötigten EE-Anlagen weltweit noch aufgebaut werden müssen und in den nächsten zwei Dekaden voraussichtlich knapp sein werden, stellt sich die Frage, inwieweit Länder mit günstigen Bedingungen diese für den Export nutzen werden. Für Länder wie die USA, mit sehr hohem EE-Potenzial und hohem Energiebedarf, ist es denkbar, dass heimische EE-Ressourcen prioritär für die Deckung des Eigenbedarfs (inkl. von Grün-H₂) genutzt werden. Andere Länder könnten sich entschließen, ihre günstigen EE-Ressourcen für den Aufbau heimischer energieintensiver Industrien statt für den H₂-Export zu nutzen. So könnten potenzielle H₂-Exportländer darauf hinarbeiten, statt H₂ grünen Stahl zu exportieren.¹⁷

Auch eine unzureichende **Nachhaltigkeit der H₂-Importe** kann als ein übergeordnetes Risiko für die Importsicherung betrachtet werden. Denn H₂-Importe können in Deutschland nur als sinnvoll gesichert gelten, wenn sie tatsächlich zur Erreichung der Klimaneutralität

¹⁶ Caglayan et al. (2020).

¹⁷ Westphal et al. (2020)

und insgesamt zu einer nachhaltigen Energieversorgung beitragen. Welche Kriterien dabei anzulegen sind und wie sich nachhaltiger H₂ zertifizieren lässt, wird ausgiebig diskutiert und erarbeitet werden müssen. Voraussichtlich werden diese Kriterien graduell strenger: Anfänglich werden wohl weniger strenge Nachhaltigkeitskriterien angesetzt, um bewusst Pilotanlagen zu fördern (z. B. um hohe Volllaststunden der Elektrolyse zu ermöglichen). Mittelfristig werden Brückentechnologien, die das knappe Angebot an grünem H₂ ergänzen, in Frage kommen, um beim Aufbau von H₂-Märkten Zeit zu Gewinnen. Solche Brücken (blauer H₂, H₂ aus Graustrom oder Erdgas bei der Stahlproduktion) verursachen höhere Emissionen als grüner H₂. Schrittweise werden höhere Nachhaltigkeitsansprüche anzulegen sein, sowohl für die H₂-Produktion in Deutschland als auch für H₂-Importe einschließlich des Transportes. Mit der Entwicklung eines globalen H₂-Markts wird der Fokus auf weitere Nachhaltigkeitsaspekte zunehmen, wie z. B. die Frischwasserverfügbarkeit im Exportland.

Risiken in Bezug auf die Exportländer

Wenn die **Anzahl an Wasserstoff exportierenden Ländern und Unternehmen** anfänglich noch niedrig ist, ist das Risiko von H₂-Importausfällen tendenziell höher. Diesem in der ersten Phase unvermeidlich höheren Risiko wirkt die insgesamt geringere Vulnerabilität gegenüber H₂-Importschocks entgegen (siehe oben). Ein Risikofaktor für Deutschland wäre auch, wenn besonders günstige und/oder ergiebige Quellen von klimaneutralem H₂ in den Händen weniger Unternehmen konzentriert wären oder sich unter der Kontrolle von Regierungen rivalisierender Länder befänden. Längerfristig dürfte die Zahl der H₂-Exporteure deutlich steigen. Wenn sich liquide internationale Märkte mit einem lebhaften Wettbewerb unter Exporteuren bilden, hätte Deutschland die Möglichkeit auf ein diversifiziertes H₂-Angebot zuzugreifen und zu starke Abhängigkeiten von einzelnen Exporteuren zu minimieren. Sollte sich nur ein schwacher internationaler Wettbewerb oder gar ein Oligopol von wenigen H₂-Exporteuren entwickeln, wäre die Importsicherheit bei Preisschwankungen oder Förderunterbrechungen stärker gefährdet.

Kommt es zu kurzfristigen Versorgungsunterbrechungen oder auch zu längerfristigen Lieferstopps eines wichtigen exportierenden Landes oder Unternehmens, ist die **Ersetzbarkeit der H₂-Exporteure** entscheidend. Hierfür ist nicht nur eine Vielzahl an H₂-Bezugs-

quellen wichtig, sondern auch eine diversifizierte Transportinfrastruktur – z. B. eine Kombination aus multilateralen Pipelinenetzen und Schifffahrtswegen – sowie eine anpassungsfähige internationale H₂-Marktstruktur, die Anbieter und Abnehmer von H₂ flexibel miteinander verbindet. Unflexible Transportrouten (z. B. starke Abhängigkeit von einigen wenigen bilateralen Pipelines) und rigide Marktstrukturen (z. B. Mangel an liquiden Kurzfristmärkten) könnten dazu führen, dass Importausfälle nicht rechtzeitig ersetzt werden können. In der Hochlaufphase, wo bilaterale Lieferverträge wahrscheinlich eine wesentliche Rolle spielen und die Transportinfrastruktur noch wenig ausgebaut ist, ist diese kurzfristige Ersetzbarkeit beeinträchtigt. Langfristig sollte dieses Risiko durch zunehmend diversifizierte Transportrouten und flexible Marktmodelle aber einfacher zu steuern sein.

Ein weiteres Risiko ist die **politische Stabilität der Exportländer**. Infolge von innerstaatlichen oder außenpolitischen Konflikten kann der internationale Handel mit Energieträgern wesentlich gestört werden. Insgesamt sollte sich dieses Risiko mit zunehmenden H₂-Importen und heimischen EE-Ausbau graduell verringern. Dafür spricht nicht nur die zunehmende Diversifizierung von Deutschlands Energieimportländern, sondern auch die aus heutiger Sicht verhältnismäßig – im Vergleich zu manchen Ländern, aus denen Deutschland fossile Brennstoffe importiert – höhere Stabilität in und geringere außenpolitische Spannung mit potenziellen H₂-Exportländern wie Island, Argentinien, Chile, Kanada oder Australien. Auch längerfristig dürfte Deutschland diesem Risiko eher weniger stark ausgesetzt sein als bisher in Bezug auf Erdöl- und Erdgasimporte. Einerseits weil Grün-H₂ in deutlich mehr Ländern erzeugt werden kann als fossile Energien, und sich H₂ daher weniger als geopolitische Waffe eignen wird als Erdöl¹⁸. Andererseits auch weil der Energieimportbedarf zukünftig abnehmen wird (siehe oben).

Risiken für den Transport

Die H₂-Lieferkette kann durch **Transitrisiken** gefährdet werden. Dazu zählen außen- und innenpolitische Konflikte entlang der Transitstrecke. Ein Beispiel für eine mit geopolitischen Risiken behaftete Transitstrecke ist die Ukraine. Im Gegensatz zu Transitrisiken sind **Transportrisiken** hauptsächlich technisch und nicht politisch bedingt. Beispiele sind das Ausfallen einer Pipeline oder einer Wiederverdampfungsanlage in einem Hafen durch

¹⁸ Van de Graaf et al. (2020)

technisches Versagen oder infolge einer Naturkatastrophe. Diese Risiken sind besonders ausgeprägt, wenn nur wenige Transportrouten (z. B. einzelne Pipelines) und Importstandorte (z. B. nur ein H₂-Importhafen) existieren, große Importmengen von einzelnen Routen abhängen, die Importinfrastruktur veraltet oder fehler- bzw. klimawandelanfällig ist und alternative Importwege bei Ausfällen nur schwer zu mobilisieren sind.

Risiken in Deutschland bzw. der EU

Je niedriger Deutschlands Kapazitäten zur **Ersetzbarkeit fehlender H₂-Importe** im Inland, desto höher die Vulnerabilität gegenüber möglichen Importausfällen. Die Ersetzbarkeit der H₂-Importe wird im Wesentlichen von drei Faktoren bestimmt, die weitgehend innerhalb der Kontrolle Deutschlands bzw. der EU liegen:

1. Geringe oder unzureichende Speicherkapazitäten,
2. Geringe Möglichkeiten zum kurzfristigen Energieträgerwechsel und
3. Unzureichende Skalierbarkeit inländischer H₂-Produktion.

Strategien zur Wasserstoffimportsicherung

Wie im vorigen Kapitel beschrieben ist der H₂-Import mit gewissen Risiken behaftet. Allerdings sind H₂-Importe perspektivisch auch mit sehr großen Vorteilen verbunden, denn ohne sie ist ein klimaneutrales Deutschland kaum und nur unter Hinnahme sehr hoher Kosten und anderer Nachteile vorstellbar. Deshalb ist Risikomanagement ein Schlüsselbegriff jeder Importsicherungsstrategie. Risikomanagement bedeutet dabei in der Regel nicht, dass alle Risiken zu vermeiden sind. Selbst in den Fällen, wo das möglich wäre, wäre es meist viel zu teuer und wenig praktikabel. Dieses allgemeine Prinzip gilt auch für die Energieimporte Deutschlands und der EU auf dem Weg zur Klimaneutralität.

Im Folgenden werden verschiedene Strategien zum Risikomanagement und zur Stärkung der H₂-Importsicherheit Deutschlands vorgestellt, die in drei Bereiche aufgeteilt werden: Die Begrenzung des H₂-Importbedarfs, die Sicherung verfügbarer, bezahlbarer und nachhaltiger H₂-Importe sowie Maßnahmen zur Minderung der Vulnerabilität gegenüber Importengpässen.

Begrenzung des Wasserstoffimportbedarfs

Der Importanteil am Energieverbrauch eines Landes wird in internationalen Rankings der Energiesicherheit regelmäßig als ein risikosteigernder Faktor eingestuft.¹⁹ Auch in dieser Analyse gehen wir davon aus, dass die mit Energieimporten verbundenen Risiken hinsichtlich Verfügbarkeit und Zugänglichkeit höher sind als bei inländischen Lieferketten. So kann die Begrenzung des H₂-Importbedarfs als ein erstes Element einer Strategie zur H₂-Importsicherung gelten. Zur Begrenzung des H₂-Importbedarfs sind vor allem drei Ansätze denkbar: Die Reduktion des Energiebedarfs; die Steigerung der inländischen EE-Erzeugung und H₂-Produktion; und die Steigerung von anderen, nicht H₂-basierten Energieimporten (z. B. Strom, Biomasse).

Eine Reduktion der künftigen Energienachfrage kann durch Energiesuffizienz, Energieeffizienz und direkte Elektrifizierung erzielt werden – auch aus klimapolitischer Sicht eindeutige „No-regret-Strategien“. Damit hinreichend klimaneutraler, bezahlbarer H₂ in schwer zu dekarbonisierenden Sektoren zur Anwendung kommen kann, sollten sparsamere oder

¹⁹ World Energy Council (2020), Global Energy Institute (2020), Azzuni und Breyer (2020), Hughes and Shupe (2010).

effizientere Energienutzungen wo immer möglich und sinnvoll (z. B. Reduktion des motorisierten Individualverkehrs, Umstieg auf Elektromobilität) genutzt werden.

Ein zweiter Ansatz zur Reduktion des H₂-Importbedarfs ist die Steigerung der inländischen H₂-Produktion, die eines erhöhten EE-Ausbaus im Inland bedarf. Allerdings stößt diese Strategie in Deutschland mit Blick auf politische Akzeptanz, Naturschutz, alternative Landnutzungsanforderungen und Wirtschaftlichkeit an ihre Grenzen. Die inländische H₂-Produktion könnte prinzipiell auch durch H₂ aus fossilen Quellen mit CCS (Blau-H₂) gesteigert werden. Allerdings sind CO₂-Lagerstätten in Deutschland und Europa nur in beschränktem Umfang verfügbar. Zudem wird diese knappe Ressource für den Ausgleich von Emissionen aus nichtenergetischen Aktivitäten (z. B. Zementherstellung, Landwirtschaft) benötigt.

Der dritte Ansatz für die Begrenzung des H₂-Importbedarfs ist die Steigerung von anderen, nicht H₂-basierten Energieimporten (Strom oder Biomasse). Da die Potenziale für klimaneutrale Stromimporte nach Deutschland jedoch beschränkt sind und bei Biomasseimporten erhebliche Bedenken hinsichtlich Nachhaltigkeit und Flächenkonkurrenz bestehen, erscheinen die ersten zwei Ansätze deutlich vielversprechender.

Sicherung von Wasserstoffimporten

Eine Sicherungsstrategie für H₂-Importe lässt sich von den drei übergeordneten Risiken (Verfügbarkeit, Bezahlbarkeit und Nachhaltigkeit) ableiten. Verfügbarkeit und Bezahlbarkeit sind teilweise zwei Seiten derselben Medaille, sodass die darauf bezogenen Strategien eng miteinander verzahnt sind und hier gemeinsam betrachtet werden.

Sicherstellung der Verfügbarkeit und Bezahlbarkeit

Ein zentrales Strategieelement der ersten Phase, in der wir uns bereits befinden, ist die Unterstützung des nationalen und internationalen H₂-Markthochlaufs. Die gegenseitige Abhängigkeit von Angebot, Nachfrage, Infrastruktur und Wettbewerbsfähigkeit können durch unterschiedliche Strategien aufgelöst werden, die Markthochlauf, Skaleneffekte, technologischen Fortschritt und damit die Bezahlbarkeit begünstigen. Dazu gehören:

- Ambitionierte und glaubwürdige Klimaziele in Deutschland, auf EU-Ebene und global – erst dann wird H₂ wirklich relevant.

- Ein den Klimazielen angemessener regulativer Rahmen, mit klimapolitischen Instrumenten wie stark steigenden CO₂-Preisen, die alle H₂-Anwendungsbereiche abdecken – auch die internationale Luft- und Schifffahrt.
- Für einige H₂-Technologien bedarf es zudem technologiespezifischer Instrumente um Innovation und einen Markthochlauf anzustoßen. Dazu zählen gezielte Förderprogramme, sowohl auf internationaler (z. B. H2Global) als auch auf nationaler Ebene (z. B. Carbon Contracts for Difference oder EE-Umlagebefreiung der Elektrolyse).
- Die Integration und Vernetzung des europäischen und globalen Markts für H₂ und H₂-Technologien, etwa durch die Harmonisierung von Sicherheitsnormen und einen verlässlichen Regulierungsrahmen für den Infrastrukturbetrieb.
- Die Sicherung von günstigen langfristigen Konzessionen und/oder Lieferverträgen für das Gros der H₂-Importe, aber für einen Teil der Importe auch die gezielte Entwicklung liquider internationaler Märkte. Zwischen diesen zwei Zielen besteht prinzipiell ein Spannungsfeld, in dem sowohl die H₂-importierenden Unternehmen als auch die Politik, etwa bei Entscheidungen zum Infrastrukturausbau, eine gute Balance finden müssen.
- An die Klimaziele und H₂-Strategie angepasste, hinreichend ausgestattete F&E Programme, die die für die mittel- und langfristige Kostenreduktion und Ressourceneinsparungen notwendigen Lerneffekte unterstützen.

Ein weiteres wichtiges Strategieelement zur Sicherung der Verfügbarkeit und Bezahlbarkeit von H₂-Importen ist die Diversifizierung der Bezugsquellen und die Stärkung von Handelsbeziehungen. Je schneller und weitgehender die anfangs unvermeidliche Abhängigkeit von nur einem oder sehr wenigen Lieferanten und ggf. Transitrouten durch Lieferbeziehungen mit mehreren Exportländern und -unternehmen ergänzt wird, desto geringer tendenziell die H₂-Importrisiken. Dabei kann der H₂-Handel nicht isoliert betrachtet werden: Je stärker die wirtschaftlichen, politischen und kulturellen Beziehungen Deutschlands mit den wesentlichen Export- und Transitländern, desto geringer die Risiken von Importstörungen oder -schocks. Um diese Risiken zu mindern, bieten sich folgende Strategieelemente an:

- Die Schaffung eines Markts für den Schifftransport als Grundlage für multilaterale Handelsbeziehungen sowie als Ergänzung und im Notfall als Alternative zu künftigen H₂- oder Ammoniak-Pipelines.
- Bei der Planung internationaler Pipelines: Die Beachtung potenzieller außenpolitischer und -wirtschaftlicher Konflikte sowie Vereinbarungen, die solche Konflikte und somit das Risiko von Versorgungsstörungen mildern.
- Bei der Definition der Kriterien für die Verteilung von Fördergeldern sowie bei der Auswahl der Lieferanten durch Privatunternehmen: Neben anderen Kriterien, auch Wert auf die Vielfalt der Lieferanten und der Transportwege legen.
- Vorantreiben von bi- und multilateralen Kooperationen und Partnerschaften im H₂-Bereich (z. B. über die IEA, die IRENA und die Energiepartnerschaften der Bundesregierung) sowie internationalen Importketten mit eng kooperierenden Unternehmen aus Deutschland, Transitländern und Exportländern.
- Langfristige Kooperationen (auch außerhalb des Energiesektors) mit Export- und Transitländern sowie die Bemühung um (ausgeglichene) Interdependenzen zwischen Importländern und Export- bzw. Transitländern.
- Kooperation, Koordination und gemeinsames Vorgehen zur Sicherung der internationalen H₂-Nachfrage mit anderen künftigen H₂-Importeuren (Beispiel: Ursprung der IEA).

Ein weiteres Strategieelement stellt der Aufbau einer robusten, diversifizierten Importinfrastruktur für H₂ dar. Das beinhaltet die gesamte Infrastruktur entlang der Importkette, inkl. Pipelines, Export- und Importterminals für verflüssigten H₂ oder Ammoniak und H₂-Speicher. Folgende Strategieelemente eignen sich für diesen Aufbau:

- Die Sicherstellung adäquater, d. h. hinreichender und zeitlich angemessener Investitionen²⁰ in die H₂-Importinfrastruktur, die dem H₂-Importmarkthochlauf zuvorkommen.
- Bei der Planung des Infrastrukturausbaus, die Diversifizierung der Versorgungswege im Blick behalten.
- Fokus auf Robustheit und Klimaanpassung der Infrastruktur, um Widerstandfähigkeit der Infrastruktur bei zukünftigen Katastrophen sicherzustellen.

²⁰ Gracceva und Zeniewski (2014)

Sicherstellung der Nachhaltigkeit der H₂-Importe

Unter Beachtung des Klimaneutralitätsziels Deutschlands müssen ab 2045 alle Energieimporte Deutschlands klimaneutral sein.²¹ Auch andere Nachhaltigkeitsaspekte – etwa der Wasser- und Flächenverbrauch bei Grün-H₂ oder die Auswirkungen von Fracking auf das Grundwasser bei Blau-H₂ – sollten berücksichtigt werden.

Kurzfristig kann es jedoch sinnvoll sein, die Emissionsintensitätsgrenzen und Nachhaltigkeitskriterien für H₂-Importe weniger ehrgeizig zu definieren. Erstens, weil die Emissionsintensität des importierten H₂, der beispielsweise in 2030 in deutschen Stahlwerken benutzt wird, nicht mit einer noch nicht umsetzbaren, klimaneutralen Alternative, sondern mit der faktischen Alternative (z. B. unter Nutzung von Kohle hergestellter Stahl) verglichen werden sollte. Zweitens, weil der Markthochlauf von H₂-Produktion und -Anwendungen in Sektoren mit schwer vermeidbaren Emissionen für die Erreichung der Klimaneutralität langfristig essenziell ist. Aufgrund der langen Lebensdauer vieler Anlagen muss dieser Hochlauf jedoch früh beginnen, was durch anfänglich zu strenge Emissionsstandards deutlich erschwert würde. Je mehr sich Deutschland der Klimaneutralität nähert, desto strikter müssen die Emissionsstandards für den H₂-Verbrauch und daher auch für H₂-Importe werden.

Um die Nachhaltigkeit der H₂-Importe sicherzustellen, eignen sich folgende Strategieelemente:

- Analyse der Lebenszyklus-Emissionsintensität unterschiedlicher Importe von H₂ und seinen Folgeprodukten.
- Stärkung des (satellitengestützten) Monitoring von Methanleckagen entlang der gesamten Vorkette (Fördergebiete, Pipelines, LNG-Terminals, Verteilnetze) und den Standorten der (künftigen) Blau-H₂-Produktion.
- Entwicklung von Standards und Zertifizierungsverfahren für die THG-Emissionsintensität von Grün- und Blau-H₂ sowie für den Transport von H₂ und seinen Folgeprodukten.

²¹ Prinzipiell könnte die Klimaneutralität der Importe (und selbstverständlich auch der inländischen fossilen Energieförderung, falls es noch eine gäbe) auch mit dem Ausgleich der Emissionen durch BECCS oder DACCS gewährleistet werden. Allerdings ist BECCS flächenintensiv und daher bedenklich hinsichtlich der Nutzungskonkurrenz mit Naturschutz, Lebensmittelproduktion und anderen Land- und Forstwirtschaftlichen. DACCS ist in absehbarer Zeit energieintensiv und sehr teuer. Beide setzen Zugang zu begrenzten verwendbaren CO₂-Lagerstätten sowie gesellschaftliche Akzeptanz voraus. BECCS und DACCS werden nötig sein, um unvermeidliche Emissionen, etwa aus der Landwirtschaft oder aus der Zementherstellung auszugleichen. Solange die Kosten für DACCS nicht wesentlich sinken, ist aus Vorsicht anzunehmen, dass mit der Erreichung der Klimaneutralität in Deutschland alle Energieimporte klimaneutral sein müssen.

- Kooperation mit anderen klimapolitisch engagierten H₂-Importländern mit dem Ziel, gemeinsame Kriterien für die Überprüfung und die graduelle Verbesserung der Emissionsintensität von H₂-Importen zu etablieren und ein „race to the bottom“ in Exportländern zu vermeiden.
- Konsistente CO₂-Bepreisung der Vorkettenemissionen von Energieimporten, z. B. durch Integration in einen CO₂-Grenzausgleich an den EU-Außengrenzen oder multilaterale Allianzen mit koordiniertem CO₂-Preishochlauf.

Minderung der Vulnerabilität gegenüber Importengpässen

Weitere Strategieelemente können die Vulnerabilität Deutschlands gegenüber möglichen H₂-Importausfällen mildern. Dazu gehören strukturelle Maßnahmen zur **Stärkung der Ersetzbarkeit fehlender H₂-Importe** sowie **Notfallpläne** zur Minderung der Auswirkungen möglicher H₂-Importschocks, falls diese tatsächlich auftreten. Folgende Strategien können erwogen werden:

- Gezielte politische Förderung des Ausbaus der H₂-Speicherkapazitäten und entsprechende Investitionen in Deutschland. Geologisch lässt sich H₂ in großen Mengen relativ preiswert speichern. Dafür verfügen einige EU-Länder und insbesondere Deutschland über besonders gute Bedingungen. Wasserstoffspeicher werden in einem stark von Elektrolysewasserstoff dominierten Wasserstoffsystem ohnehin in sehr großem Umfang benötigt. Selbst bei vollständig gesicherten Importen sind sie erforderlich, um die saisonalen Schwankungen in Produktion und Nachfrage auszugleichen. Dies ähnelt in vielerlei Hinsicht der Funktion der heutigen Erdgasspeicher, jedoch unterliegt die Wasserstoffproduktion noch stärkeren Schwankung und kann kurzfristig weniger schnell hochgefahren werden. Jenseits dieser Absicherung gegen die normalen Schwankungen der dargebotsabhängigen Wasserstoffproduktion sollten die Speicher aber auch, wie Erdgasspeicher schon heute, als strategische Reserve dienen. Bei Importknappheit könnten Verbraucher kurzfristig auf H₂-Lagerbestände zugreifen, die dann in normalen Zeiten wieder aufgefüllt werden. Die Existenz großer Speicherkapazitäten reduziert die Vulnerabilität des Importlands und damit auch die Wahrscheinlichkeit, dass Export- oder Transitländer Importausfälle absichtlich herbeiführen. Die strategische Bevorratung stellt eines der wichtigsten Instrumente zur Absicherung gegen Importausfälle dar.

- Investitionen in die Skalierbarkeit inländischer H₂-Produktion: Im Notfall könnten inländische Elektrolyseure, die im Normalfall wohl nur in Teillast laufen werden, rund um die Uhr betrieben werden und damit ihre H₂-Produktion deutlich steigern. Zweitens könnten für den Notfall inländische Reservekapazitäten für die H₂-Produktion aus Erdgas bereitgehalten werden. Diese Ansätze setzen die Verfügbarkeit hinreichender (fossiler) Reservekapazitäten voraus, sei es in Bezug auf Kraftwerke, Pipelines oder Energieressourcen, die mit zusätzlichen THG-Emissionen einhergehen würden. Klimapolitisch bedenklich wären bei den fossil-basierten Lösungen für die strategische Reserve weniger die Emissionen durch den sehr seltenen Notfallbetrieb, die relativ einfach kompensiert werden könnten, sondern eher das Risiko eines Lock-In-Effekts für die fossile Infrastruktur. Kurzfristig wäre eine Reserve an fossil-basierten H₂-Produktionskapazitäten klimapolitisch eher vertretbar, während langfristig größere H₂-Speicher zu bevorzugen wären.

Sollten H₂-Importe langfristig ausfallen, könnte die Zeit reichen, um z. B. zusätzliche Produktionskapazitäten von grünem H₂ zu bauen. Dieser Ansatz käme für Deutschland im Vergleich zu Ländern mit großzügigeren EE-Ressourcen nur bedingt in Frage, da der EE-Ausbau hier ohnehin stark forciert werden muss und daher vermutlich wenige zusätzliche Flächen für Notfälle verfügbar wären.

- Soweit technisch und wirtschaftlich sinnvoll kann die Vulnerabilität gegenüber Importschocks auch durch die Möglichkeit eines Energieträgerwechsels gemildert werden. Auf der Ebene einzelner Verbraucher ist ein solcher Wechsel möglich, wenn diese über alternative, nicht H₂-basierte Anlagen verfügen. Bis auf eventuelle Einzelfälle ist die Praktikabilität und Wirtschaftlichkeit eines großskaligen Energieträgerwechsels jedoch fragwürdig, da hierfür parallele, im Normalfall überflüssige Anwendungsanlagen sowie die notwendige Energieinfrastruktur nötig wären. Im Fall von synthetischen Kohlenwasserstoffen ist ein kurzfristiger Wechsel zurück zu fossilen Energieträgern flexibel möglich. Systemisch ist ein Energieträgerwechsel möglich, solange nur ein relativer kleiner Teil einer Flotte (z. B. an Schiffen, Spitzenlastkraft- oder -heizwerken oder Stadtbussen) auf H₂ umgestiegen ist und genügend alternative elektrische oder fossile Kapazitäten verfügbar sind.
- Ähnlich wie bislang bei fossilen Energieträgern müssen für den Zeitpunkt, zu dem eine H₂-Versorgungskrise erhebliche Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft

hätte, vom Gesetzgeber vorgeschriebene Notfallpläne existieren, die dann schnell und unbürokratisch umgesetzt werden können (Beispiel: *Notfallplan Gas für Deutschland*).

Diese Art von Plänen definiert die Zuständigkeiten und Pflichten von Behörden und Unternehmen sowie die zu schützenden Verbraucher, die bei Ressourcenknappheit privilegiert versorgt werden müssen. Zu Letzteren würden in einem klimaneutralen Deutschland voraussichtlich in erster Linie H₂-basierte Spitzenlastkraft- und -heizwerke, die die Versorgungssicherheit im Stromsystem und in den Wärmenetzen garantieren, sowie eventuell strategisch wichtige Industriebereiche gehören. Solche Notfallpläne bestimmen auch die Sonderregeln, nach denen das gewöhnliche Marktgeschehen krisenbedingt durch hoheitliche Eingriffe ergänzt oder ersetzt werden kann.

- Schließlich kann die Früherkennung von sich anbahnenden Importrisiken oder Versorgungsengpässen durch eine ggf. staatliche Sicherstellung des Zugangs zu relevanten Markt- und geopolitischen Informationen (z. B. Entwicklung von Angebot, Nachfrage, Speicherständen, relevanten politischen Rahmenbedingungen, Preise) für am H₂-Import beteiligten Unternehmen unterstützt werden.

Abwägung zwischen Kooperation und Wettbewerb in der Import-sicherung

Obwohl diese Analyse eine deutsche Perspektive einnimmt, lassen sich viele Elemente auf weitere Länder, die nach Klimaneutralität streben und auf Energieimporte angewiesen sind, übertragen. Dazu gehören neben etlichen EU-Mitgliedstaaten unter anderem auch China, Japan, Korea sowie weitere Länder in Asien und auf anderen Kontinenten.

Falls alle künftigen H₂-Importländer die in dieser Analyse entworfenen Strategieelemente umsetzen würden, entstünden in vielerlei aber nicht jeder Hinsicht positive Synergien.

In den nächsten Jahren überwiegen voraussichtlich die Synergien. Die Maßnahmen unterschiedlicher Länder zur Unterstützung des H₂-Markthochlaufs verstärken sich gegenseitig, schaffen Investitionssicherheit für Produzenten und beschleunigen den technologischen Fortschritt und Skaleneffekte. Die strukturelle Knappheit an klimaneutralem H₂ ist vorwiegend aus klimapolitischer Sicht problematisch, aber noch nicht hinsichtlich der Energiesicherheit, da die noch vorhandene fossile Infrastruktur im Notfall eine konventionelle H₂-Produktion ermöglicht.

Wenn nach 2030 die Abhängigkeit von H₂ in vielen Ländern steigt, können Maßnahmen zur Begrenzung des H₂-Importbedarfs in Deutschland auch dazu beitragen, dass Importe verfügbarer und bezahlbarer für andere Importländer werden. Wenn eine gute Krisenvorsorge einen relativ reibungslosen Umgang mit Importengpässen in einem Importland ermöglicht, profitieren auch dessen direkte und indirekte Handelspartner. Für Deutschland ist das angesichts der wirtschaftlichen Verflechtungen insbesondere in Bezug auf die EU-Partner relevant. Auch mehrere Strategieelemente zur Sicherung von H₂-Importen weisen bei gleichzeitiger Umsetzung in mehreren H₂-Importländern positive Synergien auf. Das gilt unter anderem für die Verschärfung von Klimazielen und die Harmonisierung von Sicherheitsnormen.

Jedoch gibt es auch einzelne Bereiche, wo die Umsetzung der oben beschriebenen Importsicherungsstrategien zu einem politischen Wettbewerb zwischen H₂-Importländern führen könnte. Zum Beispiel könnte der Zugang zu besonders günstigen und ergiebigen Quellen von klimaneutralem H₂ als Nullsummenspiel betrachtet werden. Würde eine Re-

gierung dann versuchen, den eigenen H₂-Produzenten oder H₂-Abnehmern einen privilegierten Zugang zu solchen Quellen zu verschaffen, wären andere Länder im Nachteil. Ein privilegierter Zugang kann durch unterschiedliche staatliche Handlungen begünstigt werden, wie u. a. Garantien, Förderungen, privilegierte Genehmigungsverfahren oder handels- oder außenpolitische Tauschgeschäfte. Dadurch kann das Zustandekommen von Langfristlieferverträgen oder Konzessionen für die Nutzung bestimmter Ressourcen sowie für den Bau von Pipelines entlang bestimmter Routen erleichtert oder überhaupt erst ermöglicht werden.

Es ergibt sich, dass eine Mehrzahl der Strategieelemente positive Synergien zwischen Importländern aufweist, während eine geopolitische Wettbewerbsdynamik nur bei wenigen Strategieelementen entstehen könnte. Selbst wenn man diesen wenigen Elementen eine besonders hohe Bedeutung beimisst, muss angezweifelt werden, ob die entsprechenden Kategorien des Ölzeitalters in einer Welt, die nach Klimaneutralität strebt, noch anwendbar sind. Dieser Logik zufolge bestünde der Erfolg eines H₂-Importlands darin, einen vergleichsweise großen Anteil der knappen Ressource H₂ für sich zu sichern. Mit Blick auf den globalen Klimawandel wäre es jedoch ein Nachteil, wenn andere Länder dadurch dazu verleitet würden, weiterhin auf emissionsreiche Energien zurückzugreifen, weil sie keinen hinreichenden Zugang zu günstigem klimaneutralem H₂ hätten.²²

Würde unter anderen potenziellen H₂-Importländern die Wahrnehmung entstehen, dass Deutschland oder die EU die eigenen H₂-Importe sichern wollen, indem sie anderen Ländern den Zugang erschweren, könnte das das klimapolitische Engagement dieser Länder beeinträchtigen. Daher wären Ansätze zur H₂-Importsicherung, die auf harten internationalen Wettbewerb ausgelegt sind, im Rahmen der Bemühungen um die weltweite Klimaneutralität nicht zielführend. Für Deutschland ist eine enge Zusammenarbeit innerhalb der EU von besonders hoher Bedeutung. Eine rein oder überwiegend nationale Betrachtung der H₂-Importsicherheit wäre angesichts des synchronen Stromnetzverbunds, der teilweise bereits gemeinsamen Zuständigkeiten bei der Öl- und Erdgasversorgungssicherheit, der gemeinsamen Klimaziele sowie der hohen wirtschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Integration ohnehin realitätsfern. Wenn eine H₂-Importkrise andere EU-Länder schwer träfe, wäre Deutschland unweigerlich mitbetroffen, sei es durch die

²² Piria (2020).

Auswirkungen auf die Stromversorgungssicherheit, die Industrieproduktion oder die allgemeine volkswirtschaftliche Verflechtung.

Hinzu kommt, dass Deutschland für die Sicherung seiner künftigen H₂-Importe via Pipeline sowie seiner künftigen EE-Stromimporte auf das Wohlwollen etlicher EU-Staaten angewiesen sein wird, die als Bezugs- oder Transitländer fungieren werden. Als größter Energieverbraucher inmitten der EU, mit einer überdurchschnittlich hohen Bevölkerungsdichte, vergleichsweise ungünstigen EE-Ressourcen und einem starken Industriesektor, kann Deutschland wie kaum ein anderes Land von einer stärkeren Integration der Energiesysteme in der EU profitieren. Durch eine EU-weite Betrachtung der H₂-Importsicherheit können Redundanzen beim Aufbau der Import- und Speicherinfrastruktur vermieden und positive Synergieeffekte in der auswärtigen H₂-Politik erzielt werden, zum Beispiel bei der Entwicklung von internationalen Nachhaltigkeitsstandards und Zertifizierungsverfahren.

Es zeigt sich, dass jene H₂-Importsicherungsstrategien überwiegen, bei denen eher positive Synergien zwischen H₂-Importländern zu erwarten sind. Daher sollte sich die deutsche auswärtige H₂-Politik nicht nur auf (potenzielle) H₂-Exportländer konzentrieren, sondern auch andere (potenzielle) H₂-Importländer miteinbeziehen. Hierfür bieten sich Kooperationen bei der Entwicklung von Technologien für den Transport von H₂, der Etablierung von Lieferketten und beim Ausbau von klimapolitisch sinnvollen H₂-Anwendungen an.

Bei der Sicherstellung der Nachhaltigkeit von H₂-Importen könnten sich abweichende Präferenzen unter H₂-Importländern ergeben, die aus mehr oder weniger ambitionierten Klimazielen und Nachhaltigkeitskonzepten oder aus unterschiedlichen Einschätzungen bezüglich des Potenzials von CCS oder der Risiken der Kernkraft hervorgehen. In diesem Bereich könnte Deutschland daher insbesondere mit Importländern und Regionen mit ähnlichen energiepolitischen Zielsetzungen sowie mit den potenziellen Exportländern mit günstigen EE-Ressourcen zusammenarbeiten.

Literaturangaben

- AGEB (AG Energiebilanzen e.V.) (2020a): Auswertungstabellen 1990 - 2019 (Datenstand September 2020). https://ag-energiebilanzen.de/#awt_2019_d
- Ang, B.W., Choong, W.L., Ng, T.S. (2015): Energy security: Definitions, dimensions and indexes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1077-1093. <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v42y2015icp1077-1093.html>
- Ariadne (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Ariadne-Report. <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/>
- Ariadne (2021b): Eckpunkte einer adaptiven Wasserstoffstrategie. Ariadne-Kurzdossier
- Azzuni, A., Breyer, C. (2018), Definitions and dimensions of energy security: a literature review. *WIREs Energy Environ*, 7: e268. <https://doi.org/10.1002/wene.268>
- Azzuni, A., Breyer, C. (2020): Global Energy Security Index and Its Application on National Level, *Energies* 2020, 13(10), 2502. <https://doi.org/10.3390/en13102502>
- Caglayan, D.C., Weber, N., Heinrichs, H.U., Linßen, J., Robinius, M., Kukla, P., Solten, D. (2020): Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, Issue 11, 6793-6805. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.161>
- Cherp, A., Jewell, J. (2014): The concept of energy security: Beyond the four As. *Energy Policy*, 75, 415-421. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.09.005>
- dena (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet/>
- Elbassoussy, A. (2019): European energy security dilemma: major challenges and confrontation strategies, *Review of Economics and Political Science*, 4, 321-343. <https://doi.org/10.1108/REPS-02-2019-0019>
- Energy Charter Secretariat (2015): International Energy Security. Common Concept for Energy Producing, Consuming and Transit Countries. https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Thematic/International_Energy_Security_2015_en.pdf
- Global Energy Institute (2020): Energy Security Risk Index. <https://www.globalenergyinstitute.org/energy-security-risk-index>
- Goldthau, A., Keim, M., Westphal, K. (2018): Die Energiewende und ihre geopolitischen Konsequenzen, in: *Stiftung Wissenschaft und Politik, SWP-Aktuell 2018/A 51*, 22.09.2018.
- Gracceva, F., Zeniewski, P. (2014): A systemic approach to assessing energy security in a low-carbon EU energy system. *Applied Energy*, 123, 335-348. <https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v123y2014icp335-348.html>
- Hughes, L., Shupe, D. (2010): Applying the Four 'A's of Energy Security as Criteria in an Energy Security Ranking Method. *The Routledge Handbook of Energy Security*. <https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.4324/9780203834602.ch18>
- Ikenberry, G.J. (1986): The irony of state strength: comparative responses to the oil shocks in the 1970s. *International Organization*, 40 (1), 105-137. <http://www.jstor.org/stable/2706744>
- Pflugmann, F., De Blasio, N.D. (2020): The Geopolitics of Renewable Hydrogen in Low-Carbon Energy Markets. *Geopolitics History and International Relations* 12 (1): 2374-

4383. https://www.researchgate.net/publication/341251092_The_Geopolitics_of_Renewable_Hydrogen_in_Low-Carbon_Energy_Markets
- Piria, R. (2020): Wasserstoffstrategie: Auch mit Importländern ist eine Partnerschaft essenziell. Tagesspiegel Background Energie, 10.1.2020. <https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/wasserstoffstrategie-auch-mit-importlaendern-ist-eine-partnerschaft-essenziell>
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>
- Van de Graaf, T., Overland, I., Scholten, D., Westphal K. (2020): The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen. Energy Research & Social Science, 70. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629620302425>
- Vivoda, V. (2009): Diversification of oil import sources and energy security: A key strategy or an elusive objective? Energy Policy, 37 (11), 4615-4623. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.007>
- Westphal, K., Dröge, S., Geden, O. (2020): Die internationalen Dimensionen deutscher Wasserstoffpolitik. SWP-Aktuell 2020/A 37, 19.05.2020. <https://www.swp-berlin.org/10.18449/2020A37/>
- Wietschel, M., Bekk, A., Breitschopf, B., Boie, I., Edler, J., Eichhammer, W., Klobasa, M., Marscheider-Weidemann, F., Plötz, P., Sensfuß, F., Thorpe, D., Walz, R. (2020): Chancen und Herausforderungen beim Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten. Fraunhofer ISI. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/policy_brief_wasserstoff.pdf
- World Energy Council (2020): Energy Trilemma Index. <https://trilemma.worldenergy.org/>



Der rote Faden durch die Energiewende: Das Kopernikus-Projekt Ariadne führt durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, um Optionen zur Gestaltung der Energiewende zu erforschen und politischen Entscheidern wichtiges Orientierungswissen auf dem Weg zu einem klimaneutralen Deutschland bereitzustellen.

Folgen Sie dem Ariadnefaden:



@AriadneProjekt



ariadneprojekt.de

Mehr zu den Kopernikus-Projekten des BMBF auf kopernikus-projekte.de

Wer ist Ariadne? Durch den Faden der Ariadne gelang Theseus in der griechischen Mythologie die sichere Navigation durch das Labyrinth des Minotaurus. Dies ist die Leitidee für das Energiewende-Projekt Ariadne. Im Konsortium von mehr als 25 Forschungseinrichtungen führt Ariadne durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, erforscht Optionen zur Gestaltung der Energiewende und erarbeitet wichtiges Orientierungswissen für politische Entscheider. Wir sind Ariadne:

adelphi | Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg (BTU) | Deutsche Energie-Agentur (dena) | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | Ecologic Institute | Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems (CINES) | Guidehouse Germany | Helmholtz-Zentrum Hereon | Hertie School | Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU) | ifok | Institut der deutschen Wirtschaft Köln | Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität | Institute For Advanced Sustainability Studies (IASS) | Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) | Öko-Institut | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) | RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung | Stiftung 2° – Deutsche Unternehmer für Klimaschutz | Stiftung Umweltenergierecht | Technische Universität Darmstadt | Technische Universität München | Universität Greifswald | Universität Hamburg | Universität Münster | Universität Potsdam | Universität Stuttgart – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) | ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung