

DIGITALES ARCHIV

ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
ZBW – Leibniz Information Centre for Economics

Witt, Uwe

Book

Wasserstoff : zentrales Element für den Industrieumbau : eine Studie im Rahmen des Projekts "Sozial-ökologische Transformation der deutschen Industrie"

Provided in Cooperation with:

Rosa-Luxemburg-Stiftung, Berlin und Brüssel

Reference: Witt, Uwe (2022). Wasserstoff : zentrales Element für den Industrieumbau : eine Studie im Rahmen des Projekts "Sozial-ökologische Transformation der deutschen Industrie". Berlin : Rosa-Luxemburg-Stiftung.
https://www.rosalux.de/fileadmin/images/Dossiers/Industrieumbau/Onl-Studie_9_Industriepolitik-Wasserstoff_web.pdf.

This Version is available at:
<http://hdl.handle.net/11159/12742>

Kontakt/Contact

ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft/Leibniz Information Centre for Economics
Düsternbrooker Weg 120
24105 Kiel (Germany)
E-Mail: [rights\[at\]zbw.eu](mailto:rights[at]zbw.eu)
<https://www.zbw.eu/econis-archiv/>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Dieses Dokument darf zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen. Sofern für das Dokument eine Open-Content-Lizenz verwendet wurde, so gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

<https://zbw.eu/econis-archiv/termsfuse>

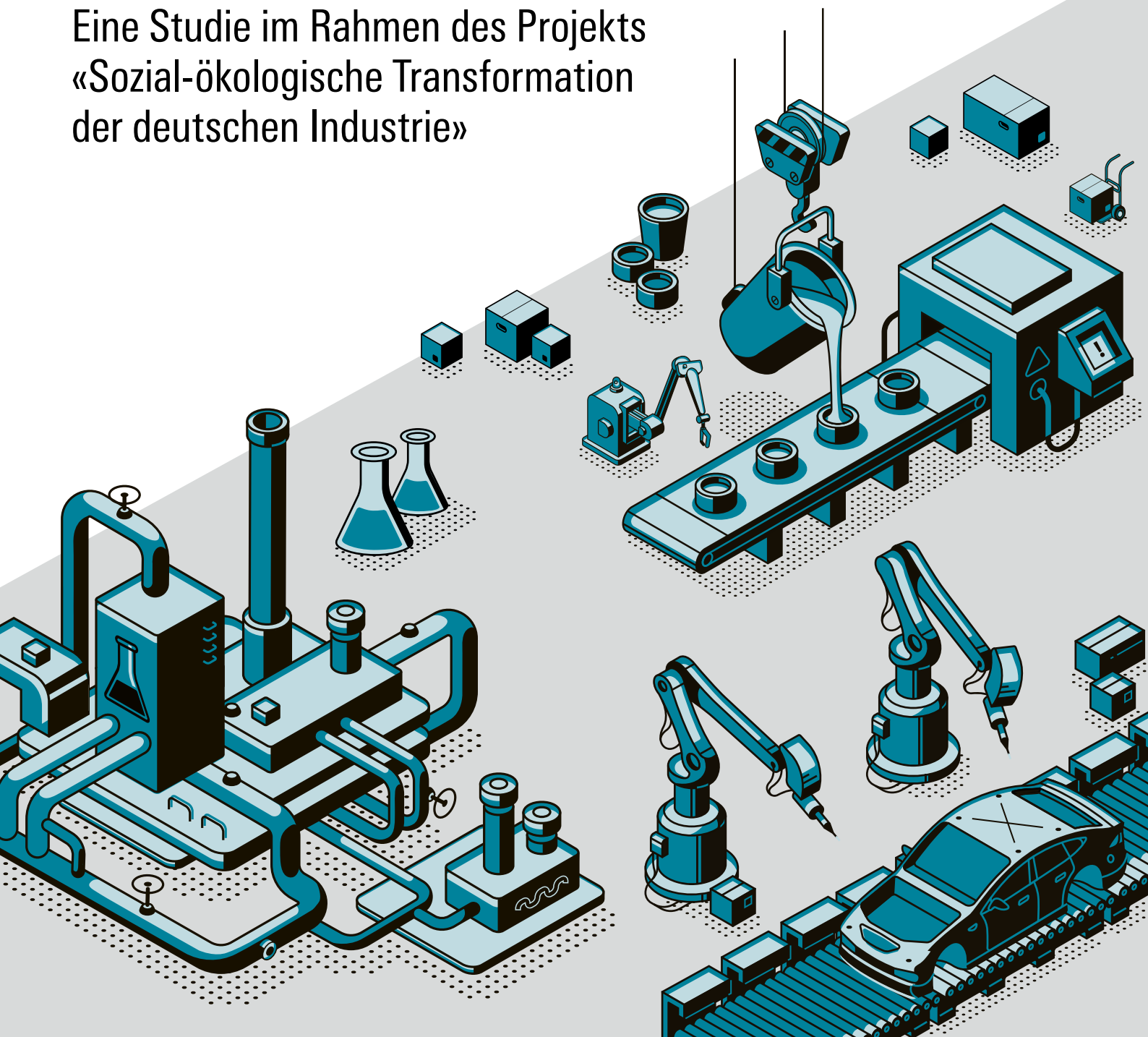
Terms of use:

This document may be saved and copied for your personal and scholarly purposes. You are not to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public. If the document is made available under a Creative Commons Licence you may exercise further usage rights as specified in the licence.

Uwe Witt

WASSERSTOFF: ZENTRALES ELEMENT FÜR DEN INDUSTRIEUMBAU

Eine Studie im Rahmen des Projekts
«Sozial-ökologische Transformation
der deutschen Industrie»



UWE WITT hat Volkswirtschaft studiert und ist Referent für Klimaschutz und Strukturwandel der Rosa-Luxemburg-Stiftung. Er arbeitete zuvor viele Jahre als Mitarbeiter einer Bundestagsabgeordneten bzw. als Referent für Klima und Energie in der Bundestagsfraktion DIE LINKE. Zudem war er längere Zeit als Journalist tätig. Er lebt in Berlin.

IMPRESSUM

ONLINE-Studie 9/2022

wird herausgegeben von der Rosa-Luxemburg-Stiftung in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Alternative Wirtschaftspolitik e. V.

V. i. S. d. P.: Ulrike Hempel

Straße der Pariser Kommune 8A · 10243 Berlin · www.rosalux.de

ISSN 2749-3156 · Redaktionsschluss: März 2022

Lektorat: Text-Arbeit, Berlin

Layout/Satz: MediaService GmbH Druck und Kommunikation

Diese Publikation ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit der Rosa-Luxemburg-Stiftung. Sie wird kostenlos abgegeben und darf nicht zu Wahlkampfzwecken verwendet werden.

INHALT

Zusammenfassung	4
1 Künftige Einsatzfelder	4
2 Effizienter Einsatz spielt Schlüsselrolle	5
3 Wasserstoffstrategie der Bundesregierung	6
4 Wasserstoffbedarf und Erzeugung	7
5 Importe von Wasserstoff und Folgeprodukten	8
5.1 Importe aus europäischen Ländern	9
5.2 Importe aus dem globalen Süden und damit verbundene Risiken	9
6 Kosten	11
7 Förderung	12
Literatur	13
Abkürzungsverzeichnis	15

ZUSAMMENFASSUNG

Wasserstoff (H₂) und seine Folgeprodukte werden fraglos eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung der Volkswirtschaften spielen. Diese Kurzstudie gibt zunächst einen Überblick über die Debatten um die Rolle von Wasserstoff und um jene Faktoren, die den Wasserstoffeinsatz unausweichlich machen. Im Weiteren wird nachgewiesen, dass sein Einsatz sehr gezielt und sparsam erfolgen muss, da die Erzeugung in Deutschland begrenzt ist und mit Importen von «grünem» Wasserstoff» in naher Zukunft kaum zu rechnen ist.

Engpässe an verfügbarem «grünem» Wasserstoff könnten zur Achillesferse des Klimaschutzes werden. Eine Verschwendung von Wasserstoff in ineffizienten Anwendungen (Automobile, Gebäudewärme etc.) könnte zulasten jener Anwendungen gehen, die im Zuge des Umbaus einen unabwendbaren Wasserstoffbedarf haben (Stahl, Chemie, später auch Luft- und Seefahrt). Beide Gruppen verhalten sich bezüglich des Wasserstoffbedarfs (bei beschränktem Angebot) wie kommunizierende Röhren.

Auf sehr lange Sicht spricht nichts grundsätzlich dagegen, zumindest einen Teil zukünftig benötigter Power-to-X-Brenn- und Kraftstoffe¹ auch aus Ländern wie Marokko, Tunesien, Saudi-Arabien oder Katar

zu importieren, sollten diese tatsächlich in die Technologie einsteigen und entsprechend zusätzliche Ökostromkapazitäten zur Verfügung stehen, die nicht zulasten der nationalen Dekarbonisierungsstrategien, der heimischen Bevölkerung oder der Umwelt gehen. Dafür bedarf es sozial-ökologischer Leitplanken.

Eine Energie- und Verkehrswende hier und heute jedoch, die auf solche Brennstoffe für einen Großteil der Häuser und den Straßenverkehr setzen würde, um einem Mehr an Gebäudeeffizienz oder einer tatsächlichen Mobilitätswende aus dem Weg zu gehen, dürfte auf tönernen Füßen stehen. Denn die Bezugsoption für die Unmengen von wasserstoffbasierten Brenn- und Kraftstoffen, die dann benötigt würden, wäre mehr als wacklig. Man wäre abhängig von riesigen Wirtschaftszweigen im Ausland, die heute noch nicht einmal im Ansatz existieren – und teilweise in äußerst sensiblen Regionen außerhalb Europas lägen.

Die Untersuchung ist Teil des von der Rosa-Luxemburg-Stiftung geförderten und von dem gemeinnützigen Verein «Arbeitsgruppe Alternative Wirtschaftspolitik» unterstützten Projekts «Sozial-ökologische Transformation der deutschen Industrie», in dessen Rahmen sieben weitere Studien entstanden sind.

1 KÜNFTIGE EINSATZFELDER

Wasserstoff (H₂) und seine Folgeprodukte werden künftig eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung der Volkswirtschaften spielen, und zwar vor allem in vier Einsatzgebieten:

1. Erstens kann dort, wo der deutlich effizientere direkte oder batteriegestützte Stromeinsatz nicht oder nur unter enormem Aufwand möglich wäre (etwa im Flug- und Seeverkehr, ggfs. in Teilen des Schwerlastverkehrs), Wasserstoff über Brennstoffzellen bzw. über flüssige oder gasförmige Brennstoffe in Form von sogenannten synthetischen Kraftstoffen (Synfuels) auf Wasserstoffbasis zum Einsatz kommen.
2. Wasserstoff wird auch als Langzeitspeichermedium dienen, vor allem, um die Energieversorgung über Wasserstoffgasturbinen in jenen Zeiten des Winters abzusichern, in denen kein Wind weht und keine Sonne scheint («Dunkelflaute»).
3. Wasserstoff wird benötigt, um Treibhausgase zu vermeiden, die in der Industrie nicht energiebedingt

entstehen, sondern aufgrund von stofflichen Prozessen, etwa in der Stahlproduktion. In der Industrie sind aber auch thermische Verwendungen von Wasserstoff und Folgeprodukten zur Ablösung von Erdgas bei Hochtemperaturprozessen möglich.

4. Aus Wasserstoff und Kohlenstoff erzeugte Kohlenwasserstoffverbindungen werden (neben biogenen Rohstoffen, die aber ein sehr begrenztes Potenzial haben) in der Chemischen Industrie Erdgas und Erdöl als Grundstoff ablösen.

Alle diese Anwendungen basieren – wenn sie nachhaltig erzeugt werden sollen – auf sogenanntem «grünem Wasserstoff», der mittels Ökostrom aus Elektrolyseuren gewonnen und gegebenenfalls mit Kohlenstoff verbunden wird. Letzterer kann klimaneutral nur aus der Atmosphäre gewonnen werden, da alle anderen denkbaren Quellen letztlich auf Kohlenstoff aus der Erdkruste basieren und Anwendungen diesen früher oder später in die Atmosphäre transportieren würden.

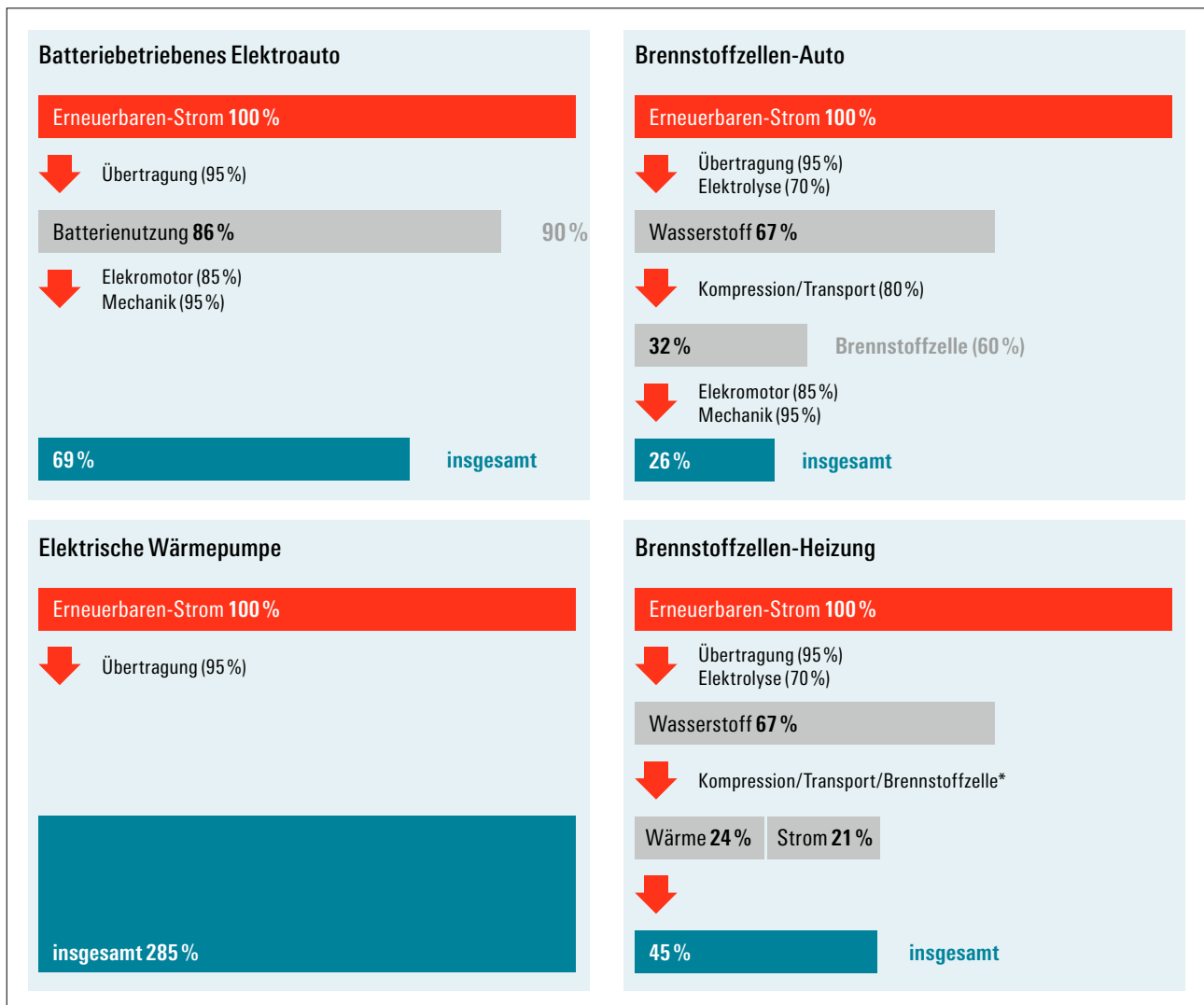
¹ Zu Power-to-X siehe «Farbenlehre des Wasserstoffs» am Ende des Beitrags.

2 EFFIZIENTER EINSATZ SPIELT SCHLÜSSELROLLE

Der Einsatz von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten wird zur vierten Säule des Klimaschutzes neben dem Ausstieg aus den fossilen Energien, dem Aufbau einer vollständig regenerativen Energieerzeugung sowie der Energieeinsparung. Ob Wasserstoff jedoch das «Öl der Zukunft» wird, wie häufig behauptet, ist zweifelhaft. Zwar weisen der Stoff und seine Folgeprodukte eine hohe Energiedichte auf und sind darum vielseitig und ausdauernd nutzbar. Sie haben aber zugleich einen gravierenden Nachteil: Die Herstellung von «grünem» Wasserstoff über einen Elektroly-

seprozess mittels Ökostrom ist enorm energie- und kostenintensiv, und dies wird absehbar auch so bleiben. Wird Wasserstoff nicht in reiner Form verwendet, sondern mit Kohlenstoff in flüssige oder gasförmige Stoffe eingebaut, so benötigen diese Prozesse noch einmal zusätzlich große Mengen an Energie. Ökostrom ist jedoch ein wertvolles Gut. Die hierfür zur Verfügung stehenden Flächen und Rohstoffe sind knapp und häufig konfliktbeladen – sowohl hierzu-lande als auch im Ausland.

Abbildung 1: Unterschiedliche Wirkungsgrade von eingesetztem Ökostrom bei der Direktnutzung einerseits und bei der Erzeugung und Verwendung von Wasserstoff und Power-to-Liquid im Verkehrs- und Wärmebereich andererseits



Quelle: Agora Verkehrswende u. a. 2018

Die Prozentzahlen stellen den jeweils verbleibenden Wirkungsgrad nach jeder Umwandlungsstufe dar. Infolge der Umwandlungsverluste sinkt er jeweils (von oben nach unten). Der mit 285 Prozent über 100 Prozent liegende Wert bei der Wärmepumpe ergibt sich daraus, dass mit dem für die Pumpe eingesetzten Ökostrom ein Mehrfaches an Umweltwärme aus dem Boden oder der Luft «geerntet» werden kann.

Falls künftig im großen Umfang Ökostrom nicht direkt verwendet oder mittels Batteriespeicher eingesetzt würde, sondern über den teuren und ineffizienten Wasserstoffumweg, könnte der Gesamtstromverbrauch auf ein Mehrfaches gegenüber heute ansteigen. So wäre etwa bei einer Eins-zu-eins-Umstellung des aktuell in Deutschland verbrauchten Otto- und Dieselkraftstoffs die notwendige Strommenge zur Erzeugung von Synfuels mehr als dreimal so groß wie die heute insgesamt verbrauchte Strommenge (Rudolph 2019). Die niedrigen Wirkungsgrade beim Wasserstoffeinsatz über Brennstoffzellen bei Pkw und Heizungen verdeutlicht auch Abbildung 1.

Zu diesem Extremszenario wird es nicht kommen, schon weil «der durch die Hersteller gelegte Schwerpunkt bei den Pkw auf der batterieelektrischen Mobilität liegt und diese ihre Investitionen wesentlich in dieser Technologie allokiert». So zumindest lautet die Einschätzung des von der Bundesregierung berufenen Nationalen Wasserstoffrats (NWR 2021a). Offensichtlich ist: Die Energiewende würde bei einem umfassenden ineffizienten Ökostromeinsatz deutlich teurer und auch an Akzeptanz verlieren – ja, vielleicht sogar scheitern. Denn zusätzlicher Stromverbrauch bedeutet auch immer zusätzliche Windkraftanlagen, Solarpaneele und Netze.

In der Wissenschaft herrscht große Einigkeit, dass Wasserstoff und darauf basierende synthetische Kraft- und Brennstoffe (Power-to-Liquid/PtL) darum nur dort eingesetzt werden sollten, wo absehbar nichts anderes möglich ist. Priorität müssen grundsätzlich die direkte Elektrifizierung und Energieeinsparung haben, also batterieelektrische Antriebe, Oberleitungen und Verkehrsverlagerungen auf die Schiene sowie Wärmepumpen und hohe Sanierungsstandards im Gebäudebereich. Das sieht im Grundsatz auch die neue Bundesregierung so, sie hält jedoch bislang in der Nationalen Wasserstoffstrategie (BMW 2020) ebenso wie im Koalitionsvertrag und in anderen Dokumenten die Möglichkeit des Einsatzes von Wasserstoff auch im Pkw-Bereich und im Gebäudesektor zumindest offen.

Letztlich muss aber der Grundsatz «Effizienz an erster Stelle» («Efficiency first») beim Ökostromeinsatz insgesamt deutlich stärker Maßstab jeder Technologiepolitik werden, weil dies Konflikte um Flächen und Rohstoffe vermindert – hierzulande und weltweit. Zudem steht absolute Energieeinsparung weiter auf dem Programm. Insbesondere muss der hohe Energieverbrauch im Gebäude- und Verkehrsbereich gesenkt werden.

3 WASSERSTOFFSTRATEGIE DER BUNDESREGIERUNG

Die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) der Bundesregierung wurde am 10. Juni 2020, also noch unter der Großen Koalition, verabschiedet. Die neue Ampelkoalition knüpft daran an. Rund um die Wasserstofftechnologien sollen die regulativen Voraussetzungen für den Markthochlauf geschaffen, Forschung und Entwicklung sowie der Technologieexport forciert sowie die zukünftige nationale Versorgung mit «CO₂-freiem Wasserstoff»² und dessen Folgeprodukte gesichert und gestaltet werden. Die Bundesregierung verbindet damit zukunftsfähige Arbeitsplätze, neue Wertschöpfungspotenziale und einen globalen Milliardenmarkt. Für erste Umsetzungsschritte ist in der Strategie ein Aktionsplan mit 38 kurz skizzierten

Maßnahmen enthalten. Der neue Bundesminister für Wirtschaft und Klimaschutz, Robert Habeck (Bündnis 90/Die Grünen), will die NWS weiterentwickeln und dabei das Tempo des Hochlaufs erhöhen. Nunmehr sollen, so ist es im Koalitionsvertrag vereinbart, bis 2030 nicht nur 5 Gigawatt (GW) inländische Elektrolysekapazität entstehen, sondern 10. Insbesondere durch die zügige Umsetzung der Wasserstoffprojekte im Rahmen der europäischen «Important Projects of Common European Interest», dem Aufbau weiterer Förderprogramme und durch «Carbon Contracts for Difference» (CCfD; siehe hierzu Witt 2022) will die Ampelkoalition Investitionen in Wasserstofftechnologien finanziell fördern (BMW 2022a).

² Zum Begriff CO₂-frei siehe «Farbenlehre des Wasserstoffs» am Ende des Beitrags.

4 WASSERSTOFFBEDARF UND ERZEUGUNG

Der nationale Verbrauch von Wasserstoff liegt nach Angaben der Bundesregierung momentan bei rund 55 Terawattstunden (TWh). Der Bedarf besteht hauptsächlich für stoffliche Herstellungsverfahren im Industriesektor und verteilt sich gleichmäßig zwischen der Grundstoffchemie (Herstellung von Ammoniak, Methanol usw.) und der Petrochemie (Herstellung konventioneller Kraftstoffe).

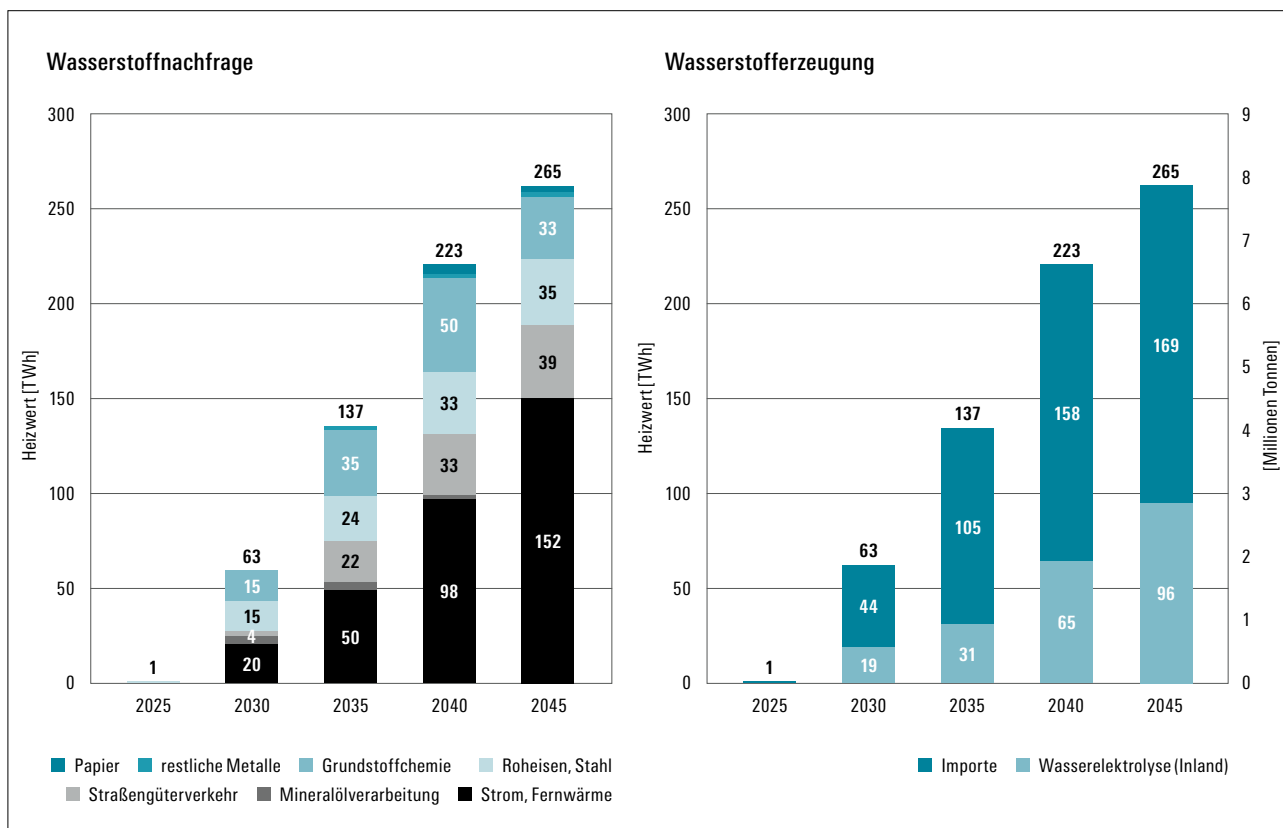
Die alte Bundesregierung rechnete aufgrund des Anstoßes des Markthochlaufs mit einem ersten Anstieg des Bedarfs an Wasserstoff bis 2030 (Deutscher Bundestag 2020a), insbesondere im Industriesektor (Chemie, Petrochemie und Stahl) und zu einem geringeren Maße im Verkehr. Weiterhin sei von einem wachsenden Bedarf für brennstoffzellenbetriebene Elektromobilität auszugehen. Weitere Verbraucher, zum Beispiel langfristig Teile der Wärmeversorgung, könnten der NWS zufolge hinzukommen.

Die NWS sieht bis 2030 einen Wasserstoffbedarf von circa 90 bis 110 TWh vor, was einem Bedarfszuwachs von rund 35 bis 55 TWh entspricht. Langfristig

werde der Wasserstoffbedarf jedoch stark ansteigen. Allein die deutsche Stahlindustrie werde für eine Transformation etwa 80 TWh «grünen» Wasserstoffs benötigen, die Umstellung der deutschen Raffinerie- und Ammoniakproduktion erfordere noch einmal 22 TWh.

Verschiedene Studien mit Szenarien, in denen die Treibhausgasemissionen um 95 Prozent gegenüber dem Basisjahr 1990 reduziert werden und die dabei das gesamte Energiesystem betrachten, lassen laut Bundesregierung bis 2050 einen Verbrauch von strombasierten Energieträgern in Größenordnungen zwischen 110 TWh (Öko-Institut 2015) und rund 380 TWh (The Boston Consulting Group/Prognos 2018) erwarten. Eine Studie von Agora Energiewende (Prognos u. a. 2021) zur Klimaneutralität 2045 rechnet mit einem zusätzlichen Wasserstoffbedarf im Jahr 2030 von 63 TWh und von 265 TWh im Jahr 2045. Davon müssten 44 bzw. 169 TWh importiert werden. Die entsprechenden Importquoten betragen in diesem Modell folglich 70 bzw. 74 Prozent.

Abbildung 2: Treibhausgasfreie Wasserstoffnachfrage und Wasserstofferzeugung



Zum Bedarf an reinem Wasserstoff kommt laut der genannten Agora-Studie der Bedarf an weiteren, auf erneuerbarem Strom basierenden Energieträger hinzu. So sollen (ab etwa 2030) im nationalen und internationalen Schiffs- und Flugverkehr CO₂-neutrale flüssige Kraftstoffe (PtL) Verwendung finden, deren Basis neben Wasserstoff auch CO₂ ist (der Klimaeffekt der Kondensstreifen von Flugzeugen bleibt auch dann weiter ein Problem). Dieser Bedarf wird auf 185 TWh geschätzt. Insgesamt ergibt sich danach für 2045 ein Bedarf an Wasserstoff und sonstigen synthetischen Brennstoffen in Höhe von 422 TWh, von denen 326 TWh (77 %) importiert werden müssen.

Laut Ampelkoalition sollen nun in Deutschland bis zum Jahr 2030 Wasserstoffherstellungskapazitäten (Elektrolyseleistung) von 10 GW entstehen. Dies entspricht einer «grünen» Wasserstoffproduktion von bis zu 28 TWh bzw. einer zur Wasserstoffherzeugung benötigten erneuerbaren Strommenge von bis zu 40 TWh. Gemessen an dem von Agora berechneten zusätzlichen Wasserstoffbedarf Deutschlands würde dies im Jahr 2030 zusätzliche «grüne» Wasserstoffimporte von rund 35 TWh erfordern. Dementsprechend müssten rechnerisch bis 2030 etwa 55 Prozent des zusätzlichen Bedarfs in Deutschland mit Importen

gedeckt werden. Wollte man bis dahin auch die jetzige fossile H₂-Produktion durch «grünen» Wasserstoff ersetzen, wären Importe über rund 90 TWh notwendig. Die Importquote (sofern ökostrombasierter Wasserstoff international verfügbar wäre) betrüge rund 75 Prozent.

Infolge des Überfalls Russlands auf die Ukraine versucht die Bundesregierung derzeit über verschiedene Maßnahmen, die Abhängigkeit der Bundesrepublik vom Energierohstoffbezug aus Russland zu reduzieren (BMWK 2022b). Deutschland bezieht momentan etwa 55 Prozent des Erdgases, ein Drittel des Erdöls und fast die Hälfte seiner Steinkohleimporte aus Russland. Um den Erdgasverbrauch zu senken, soll der Hochlauf der Wasserstofftechnologien und der Abschluss bzw. die Ausgestaltung von Energiepartnerschaften zum Import von Wasserstoff und seinen Derivaten beschleunigt werden. Welche Auswirkungen dies auf die dargestellten Mengengerüste haben wird, ist derzeit noch unklar. Auf jeden Fall sollte vermieden werden, dass im Zuge dieser Beschleunigung Wasserstoff in ineffizienten Anwendungen verschwendet wird (etwa im Niedrigtemperaturwärmebereich). Solcherart Investitionen könnten Pfadabhängigkeiten schaffen, die diesen Einsatz auf lange Zeit manifestieren.

5 IMPORTE VON WASSERSTOFF UND FOLGEPRODUKTEN

Aufgrund des Zahlengerüsts der Wasserstoffstrategie lässt sich abschätzen, dass die Bundesregierung auch langfristig 70 bis 80 Prozent des in Deutschland genutzten Wasserstoffs importieren will. Auf einem globalen Wasserstoffmarkt könnte dies jeglicher Wasserstoff sein, räumte die alte Bundesregierung selbst ein (Deutscher Bundestag 2020b). Es stellt sich hier zum einen die Frage, wie viel von dem auch von der Ampel kommunizierten Vorrang «grünen», also mittels Ökostroms hergestellten Wasserstoffs übrigbleiben wird.³ Zum anderen ist noch weitgehend unklar, wer genau den Wasserstoff liefern soll und wird. Dennoch gehen sowohl die verschiedensten Akteure der Wirtschaft als auch beinahe die gesamte relevante Studienlandschaft davon aus, dass der benötigte «grüne» Wasserstoff in all seinen chemischen Transformationsprodukten größtenteils aus dem Ausland kommen wird. Es gäbe in Deutschland schlicht zu wenig Platz und Akzeptanz für die hohe Zahl an hierfür benötigten großen Windparks und Photovoltaikanlagen, so häufig die Begründung.

Berechnungen im Auftrag der Stiftung Offshore-Windenergie zufolge ließen sich zwar theoretisch vor den deutschen Küsten mehr als 1,2 Millionen Tonnen bzw. bis zu 44,2 TWh «grüner» Wasserstoff jährlich erzeugen (SOWE 2021). Dafür würden 60 GW installierte Windkraftleistung auf See und eine entsprechende Transportinfrastruktur benötigt. Das ist allerdings das Eineinhalb- bis Dreifache jener Offshore-Leistung, die Umweltverbände gerade noch für naturverträglich halten.

Die Bundesregierung will den internationalen Markthochlauf von «grünem» Wasserstoff forcieren, wobei Lieferungen aus dem Ausland von Anfang an adressiert werden. Im Juni 2021 wurde beispielsweise die H₂Global-Stiftung gegründet, an der 16 Unternehmen beteiligt sind, berichtet der Informationsdienst IWR (IWR 2021). Vergabeverfahren für die Derivate aus «grünem» Wasserstoff sollten noch 2021 auf einer Handelsplattform starten, mit Lieferungen der «grünen» Wasserstoffprodukte sei ab 2024 zu rechnen. Auf der Plattform sollen dabei Unternehmen aus verschiedenen Ländern H₂-Produkte anbieten, der nied-

³ Siehe hierzu «Farbenlehre des Wasserstoffs» am Ende des Beitrags.

rigste Preis sei ausschlaggebend. Parallel würden auf der deutschen Nachfrageseite Gesuche nach Wasserstoff aufgerufen, hier gewinne der höchste Kaufpreis. Auftretende Differenzen zwischen Ankaufs- und Verkaufspreis im Inland sollen aus Steuermitteln gedeckt werden. Hierfür stelle das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz etwa 900 Millionen Euro zur Verfügung: Ein Intermediär gleicht die Differenz über einen an den oben genannten CCfD-Ansatz angelehnten Fördermechanismus aus.

Im Juni 2021 wurden mit deutscher Beteiligung weltweit mehrere Wasserstoffallianzen geschmiedet und Kooperationen vereinbart. Beim sechsten Mission-Innovation-Ministertreffen in Chile im Juni 2021 vereinbarten die EU-Kommission sowie Australien, Österreich, Kanada, Chile, China, Deutschland, Indien, Italien, Marokko, Norwegen, Saudi-Arabien, Südkorea, Großbritannien und die USA gemeinsam eine «Clean Hydrogen Mission», um die Entwicklung von sauberem Wasserstoff voranzubringen. Ziel sei es, bis 2030 die Kosten für sauberen Wasserstoff auf zwei US-Dollar (ca. 1,65 Euro) je Kilogramm zu senken. Parallel hätten Deutschland und Australien eine Absichtserklärung zur Gründung eines «Germany Australia Hydrogen Accord» unterzeichnet. Sie ziele darauf ab, die Zusammenarbeit auf dem Wasserstoffsektor in den Bereichen Forschung und Industriekooperation zu verstärken und perspektivisch auch den Handel von Wasserstoff und seinen Derivaten zwischen beiden Ländern zu befördern. Bereits Anfang März 2021 hätten Deutschland und Saudi-Arabien eine «Gemeinsame Absichtserklärung» zur Gründung einer Wasserstoffzusammenarbeit unterzeichnet (ebd.). Schon im Februar 2020 hatten sich die damalige Bundesforschungsministerin Anja Karliczek und ihr nigrischer Amtskollege Yahouza Sadissou auf ein Maßnahmenpaket zum Ausbau einer strategischen Wasserstoffpartnerschaft mit Westafrika geeinigt (BMBF 2020a).

5.1 IMPORTE AUS EUROPÄISCHEN LÄNDERN

Eine Studie des Öko-Instituts von Mai 2021 hat ein «erwartbares Importaufkommen» von Wasserstoff und dessen Derivaten «in Phasen» dargelegt (Matthes u. a. 2021). Demzufolge sind in Phase I bis zum Jahr 2030 nur geringe Mengen an «grünem Wasserstoff» aus den direkten Nachbarländern Deutschlands zu erwarten. Phase II (2030 bis 2035) der Wasserstoffimporte werde vermutlich über erste Langstrecken-Pipelineverbindungen auf dem europäischen Kontinent eingeleitet. Insbesondere eine Anbindung europäischer Bestandorte für die Wasserstoffproduktion (iberische Halbinsel, Nordsee) könne die Importmengen maßgeblich und auch sprunghaft erhöhen – hier zunächst mit der Anlandung von H₂-Derivaten und bei entsprechendem Infrastrukturausbau (z. B. Ammoniakweiter-

verteilung in Deutschland). Erst ab Phase III (ab 2035) würden auch Länder außerhalb der Europäischen Union in Pipeline-Distanz Wasserstoff nach Europa und Deutschland exportieren können (Marokko, Ukraine etc.). Dieses Importpotenzial sei derzeit jedoch nur mit sehr hohen Unsicherheiten bewertbar. Zudem werden – mit hohen Unsicherheiten bezüglich der Transportkosten – erste transkontinentale Importströme auf der Basis von neuen Schiffstransportoptionen (Trägerstoffe oder verflüssigter Wasserstoff) erwartet.

5.2 IMPORTE AUS DEM GLOBALEN SÜDEN UND DAMIT VERBUNDENE RISIKEN

Für die Bundesregierung stehen auf längere Sicht als Lieferanten für den «grünen» Wasserstoff unter anderem die nord- und westafrikanischen Staaten im Fokus. In den Wüsten des Maghreb könnten große Anlagen aus Sonnen- und Windstrom zu geringen Kosten Wasserstoff und synthetische Treibstoffe (Power-to-X, kurz PtX) herstellen, argumentiert auch die Industrie. Nach einem Potenzialatlas (Forschungszentrum Jülich 2021), den die alte Bundesregierung bereits für Westafrika erstellen lassen, könnten in dieser Region bis zu 165.000 TWh Wasserstoff produziert werden (BMBF 2020b). Die mit solchen Importen verbundenen Probleme werden wenig thematisiert. Laut einer Metastudie des Öko-Instituts kann die Herstellung strombasierter Stoffe zu höheren CO₂-Emissionen führen als die Nutzung fossiler Alternativen, solange noch fossile Erzeugungskapazitäten im Stromsystem sind (Heinemann u. a. 2019). Eine Umstellung der Wasserstoffherstellung auf Elektrolyse beispielsweise mache deshalb erst bei etwa 70 Prozent Ökostrom im Netz wirklich Sinn. Ein Klimavorteil von strombasierten Substituten für Diesel und Erdgas ergebe sich erst ab einem rund 80-prozentigen Ökostromanteil an der Stromerzeugung. Für Deutschland ist dies frühestens für das Jahr 2030 zu erwarten (Stand 2021: 42,6% des Bruttostromverbrauchs; BMWK 2022a).

Es stellt sich also bereits für Deutschland die Frage nach der Sinnhaftigkeit früher großskaliger Wasserstoffanwendungen jenseits von Pilotprojekten und einem klug gesteuerten Aufwuchspfad. So würde zum Beispiel eine PtX-Produktion für den Verkehrssektor mit der gegenwärtigen Ökostromquote Deutschlands mehr Treibhausgase produzieren als der Einsatz konventioneller Kraftstoffe. Erst recht würde eine Wasserstoffproduktion im Globalen Süden für Europa ohne weitere begleitende Maßnahmen die Dekarbonisierung in den südlichen Ländern behindern.

Dies gilt grundsätzlich auch, wenn die Investoren des Globalen Nordens nicht nur Elektrolyseanlagen, sondern auch die zu ihrem Betrieb benötigten Ökostromanlagen in den südlichen Ländern aufbauen und finanzieren würden. Schließlich würden mit hoher

Wahrscheinlichkeit vor allem die von der Naturlausstattung geeigneten und somit preiswertesten Standorte (gekennzeichnet durch eine besondere Windh6ufigkeit, Sonneneinstrahlung, Wasserverf6ugbarkeit, gute Wasserkraftstandorte etc.) daf6ur genutzt werden, die dann nicht mehr f6ur die heimische 6k6ostromproduktion zur Verf6ugung st6unden. Begleitende Ma6nahmen k6onnten etwa zus6atzliche Investitionen in 6k6ostromanlagen und entsprechender Infrastruktur vor Ort sein, und zwar in einem relevanten Ma66e zus6atzlich zu jenen Wind- oder Photovoltaikanlagen, die f6ur den Betrieb der Elektrolyseanlagen selbst ben6otigt werden. Ein solches Vorgehen schl6agt eine Studie unter dem Begriff «Zus6atzlichkeit 2.0» vor, die im Auftrag der Rosa-Luxemburg-Stiftung erarbeitet wurde (Arepo 2022). Dies w6urde eine entsprechend ausgedehnte Fl6achen- und Wasserverf6ugbarkeit sowie die Vermeidung von Nutzungskonflikten mit der heimischen Bev6olkerung und der Biodiversit6at voraussetzen.

Laut der Wasserstoffstrategie der Bundesregierung soll zwar darauf geachtet werden, dass ein Import von «gr6unem» Wasserstoff oder darauf basierenden Energietr6agern nach Deutschland «zus6atzlich» ist und nicht zulasten der h6ufig unzureichenden erneuerbaren Energieversorgung in den Entwicklungsl6andern geht. Doch alle der im Fokus der Bundesregierung stehenden L6ander haben real 6k6ostromquoten, die weit unterhalb der oben angef6uhrten Quoten liegen, ab denen die Wasserstoffelektrolyse zu Einsparungen bei den Treibhausgasen f6uhrt. Au6erdem ist der Anteil der Haushalte mit Zugang zur Stromversorgung mit Ausnahme Marokkos gegenw6artig vergleichsweise niedrig. So betragen beispielsweise die entsprechenden Werte f6ur Niger (6k6ostromquote) ein bzw. 13 Prozent (Anschlussgrad), f6ur Marokko 19,7 bzw. 99 Prozent, f6ur Tunesien drei Prozent bzw. ist der Wert unbekannt und f6ur Westafrika insgesamt 28,8 bzw. 54 Prozent (bp 2020).

In der Antwort der Bundesregierung auf eine Kleine Anfrage der Bundestagsfraktion DIE LINKE f6uhrt die alte Bundesregierung aus, im Rahmen der Energiepartnerschaften unterst6utze sie «integrierte Ans6atze, das hei66t, zun6achst die dekarbonisierte Eigenversorgung und zus6atzlich die F6orderung von Exportoptionen von 6k6ostrom und klimaneutralem Wasserstoff» (Deutscher Bundestag 2020a). Die Bundesregierung f6ordere «keinen Export von Wasserstoff, der auf Kosten der Eigenversorgung» produziert werde. Unklar bleibt jedoch angesichts der 6uberwiegend niedrigen 6k6ostrom- und Dekarbonisierungsquoten der fraglichen L6ander, welche Kriterien die Bundesregierung zur Beurteilung heranziehen will, etwa, ab wann eines der L6ander «wasserstoffexportf6ahig» w6are.

Bei den Importoptionen ist zu beachten, dass es sich bei einigen Gebieten um (semi-)aride Regionen handelt, die sich heute schon durch Wasserstress auszeichnen. Durch den Klimawandel k6onnte sich der

Wassermangel in diesen Regionen noch versch6arfen. Die Umstellung des Energiesystems in Deutschland und in der EU auf 6uberwiegend importierten «gr6unen» Wasserstoff w6urde in den potenziellen Lieferl6andern zudem Meerwasserentsalzungsanlagen in einer St6uckzahl erfordern, die die bisherige Zahl der Meerwasserentsalzungsanlagen wohl deutlich 6ubersteigen w6urde. Der Nationale Wasserstoffrat der Bundesregierung hat inzwischen Nachhaltigkeitskriterien formuliert (NWR 2021b). Ebenso problematisiert ein Arbeitspapier des 6ko-Instituts die sozialen und 6okologischen Probleme von Wasserstoffimporten und nennt f6ur diese acht Nachhaltigkeitskriterien (Heinemann/Mendelevitch 2021b).

Im August 2020 pr6ufte die Bundesregierung nach eigenen Angaben noch, welche L6ander in Afrika die erforderlichen Rahmenbedingungen und Voraussetzungen f6ur den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft erf6ullen (Deutscher Bundestag 2020b). Ihr l6agen, so die Antwort auf eine Anfrage der Bundestagsfraktion DIE LINKE, weder eine L6anderliste noch die konkreten Daten zu Strommix, 6k6ostromquote und Anschlussquote der Haushalte an die 6offentliche Elektrizit6atsversorgung vor. Die vom Bundesministerium f6ur Bildung und Forschung gef6orderte deutsch-afrikanische forschungsbasierte Potenzialanalyse «H₂-Atlas-Afrika» betrachte neben den Staaten der Economic Community of West African States (ECOWAS) auch die der Entwicklungsgemeinschaft des s6udlichen Afrikas (Southern African Development Community/SADC). Gro66es Potenzial f6ur Wasserstoffprojekte bestehe beispielsweise in Marokko, Tunesien, Brasilien, Chile und S6udafrika, aber auch in den Vereinigten Arabischen Emiraten oder in Saudi-Arabien, so die Bundesregierung (BMBF 2020b). Wie realistisch 6uberhaupt Wasserstoffimporte aus dem Globalen S6uden sind bzw. welche Rahmenbedingungen es daf6ur geben m6usste, um diese sozial und 6okologisch gerecht zu gestalten, untersuchte die oben genannte Arbeit von Arepo GmbH im Auftrag der Rosa-Luxemburg-Stiftung am Beispiel der drei Staaten Senegal, Niger und Marokko (Arepo 2022). Danach ist offensichtlich in absehbarer Zeit kaum mit Importen zumindest aus Senegal und Niger zu rechnen: Fr6uhere Importe seien nicht ausgeschlossen, so die Studie, aber sehr voraussetzungsvoll. Um erneute neokoloniale Verh6altnisse zwischen Erzeuger- und Importl6andern zu verhindern, m6ussten auch sp6atere Importe unter strikten Rahmenbedingungen stattfinden. Dazu geh6ore, auszuschl6ießen, dass Wasserstoffexporte in die Industriel6ander zulasten der Bem6uhungen in den potenziellen Lieferl6andern gingen, ihre eigene Dekarbonisierungspolitik zu betreiben und die in der Regel vorherrschende Energiearmut zu 6uberwinden. Neben der oben erl6auterten Idee einer «Zus6atzlichkeit 2.0» erweitert Arepo in seiner Studie die Nachhaltigkeitskriterien des 6ko-Instituts um (weitere) soziale Dimensionen.

Eine Forschergruppe im Umfeld des Kopernikus-Projekts Ariadne verwies darauf, dass Deutschlands H₂-Importsicherheit in Zukunft durch eine Reihe von Risiken gefährdet sein könne (Piria u. a. 2021). Die Wissenschaftler*innen verglichen dabei den künftigen Markt für «grünen» Wasserstoff mit dem jetzigen Öl- und Gasmarkt. Die von Wind und Sonne abhängige Produktion von «grünem» Wasserstoff werde sich im Vergleich zum fossilen Rohstoffmarkt nicht so dynamisch der Nachfrage anpassen können, heißt es in der Studie. Hinzu kämen hohe Kosten bei der H₂-Bevorratung in Deutschland.

Weitere Risiken seien die anfangs voraussichtlich nur geringe Zahl von Exportländern, mögliche politische Instabilitäten in den Exportländern, Konflikte entlang von Transitrouten, technische Ausfälle bei Erzeugungs- und Transportinfrastrukturen sowie Schäden durch Naturkatastrophen. Der Studie zufolge lägen zusätzliche Risiken in der unzureichenden Skalierbarkeit inländischer H₂-Produktion. Die wegfallenden Importe könnten somit nicht einfach kompensiert werden. Als Konsequenz empfiehlt die Studie, den Wasserstoffimportbedarf zu begrenzen, unter anderem, indem die künftige Energienachfrage «durch Energiesuffizienz, Energieeffizienz und direkte Elektrifizierung» reduziert wird – was aus klimapolitischer Sicht eindeutige «No-regret-Strategien» seien.

Entsprechende Engpässe bei dem verfügbaren «grünen» Wasserstoff könnten zur Achillesferse des Klimaschutzes werden. Insofern könnte eine Verschwendung von Wasserstoff durch ineffiziente Anwendungen (Automobile, Gebäudewärme usw.) zulasten jener Anwendungen gehen, die im Zuge des Umbaus einen unabwendbaren Wasserstoffbedarf

haben (Stahl, Chemie, später auch Luft- und Seefahrt). Beide Gruppen verhalten sich bezüglich des Wasserstoffbedarfs (bei beschränktem Angebot) wie kommunizierende Röhren.

Auf sehr lange Sicht spricht sicherlich nichts grundsätzlich dagegen, zumindest einen Teil zukünftig benötigter Power-to-X-Brenn- und Kraftstoffe auch aus Ländern wie Marokko, Tunesien, Saudi-Arabien oder Katar zu importieren, sollten diese tatsächlich in die Technologie einsteigen und entsprechend zusätzliche Ökostromkapazitäten zur Verfügung stehen, die nicht zulasten der nationalen Dekarbonisierungsstrategien, der heimischen Bevölkerung oder der Umwelt gehen. Die Importquote von fast ausschließlich fossilen Primärenergieträgern am Primärenergiebedarf beträgt in Deutschland gegenwärtig rund 66 Prozent. Sie würde bei einer vollständig regenerativen Wirtschaftsweise in Form von Importen von Wasserstoff und Folgeprodukten deutlich unter diesem Wert liegen.

Eine Energie- und Verkehrswende hier und heute jedoch, die auf solche Brennstoffe für einen Großteil der Gebäudewärme und den Umbau des Straßenverkehrs setzen würde, um einem Mehr an Gebäudeeffizienz, Wärmepumpen oder einer tatsächlichen Mobilitätswende aus dem Weg zu gehen, dürfte auf tönernen Füßen stehen. Denn die Bezugsoption für die Unmengen von wasserstoffbasierten Brenn- und Kraftstoffen, die dann benötigt würden, wäre mehr als wacklig. Sie würde auf riesige Wirtschaftszweige im Ausland setzen, die heute noch nicht einmal im Ansatz existieren und teilweise in äußerst sensiblen Regionen außerhalb Europas lägen. Hier nun Importe auf Biegen und Brechen zu forcieren, könnte neokolonialen Strukturen den Weg ebnen.

6 KOSTEN

Die Kosten zur Herstellung von Wasserstoff über die Elektrolyseroute sind maßgeblich bestimmt von den Stromkosten, von der Entwicklung der Investitionskosten für Elektrolyseanlagen und von der Anlagenauslastung. Im Fall von Importen kämen die Transportkosten als wesentliches Element hinzu. An dieser Stelle soll nicht auf die komplexen unterschiedlichen Szenarien zur Kostenschätzung eingegangen werden. Klar ist aber: Die Herstellung von «grünem» Wasserstoff und sein Einsatz sind gegenwärtig teuer, und dies wird auch für die nächsten Dekaden so bleiben. Auf dem Markt würden sich entsprechende Produkte ohne Unterstützung kaum absetzen lassen.

Nach der oben genannten Studie des Öko-Instituts werden in der Bundesrepublik zum Ausgleich der durch den Einsatz von Wasserstoff entstehenden

Betriebskosten bis zum Jahr 2035 zwischen 2,8 und fünf Milliarden Euro jährlich aufgebracht werden müssen (Matthes u. a. 2021). Für die Unterstützung der notwendigen Technologiewechselinvestitionen werden im Zeitraum bis 2030 sowie in den Jahren von 2031 bis 2035 noch einmal jeweils zwischen drei und fünf Milliarden Euro pro Periode anfallen. Diese Abschätzungen gelten aber für einen effizienten Einsatz von Wasserstoff und seinen Folgeprodukte, nicht jedoch für einen zügellosen. Für Letzteren ergab eine Studie des Umweltbundesamts, dass beispielsweise ein umfassender Brennstoffzelleneinsatz im Straßenverkehr gegenüber einer möglichst direkten Nutzung von Strom über batterieelektrische Fahrzeuge im Zeitraum 2020 bis 2050 rund 600 Milliarden Euro Mehrkosten verursachen würde (UBA 2019).

7 FÖRDERUNG

Als Teil des Konjunkturpakets 2020 sieht die Bundesregierung für die Nationale Wasserstoffstrategie Bundesmittel in Höhe von neun Milliarden Euro vor. Diese Mittel sollen die erste Etappe des Markthochlaufs der Wasserstoffwirtschaft bis 2023 finanzieren. Von den neun Milliarden Euro sind sieben Milliarden für den nationalen Hochlauf vorgesehen und zwei Milliarden für internationale Wasserstoffpartnerschaften. Dazu gehören der Aufbau einer Importinfrastruktur und die Erzeugung von Wasserstoff in Drittstaaten. Zwei Milliarden der sieben Milliarden Euro Inlandsmittel sind für Elektrolyseleistung vorgesehen, 1,5 Milliarden Euro für den Verkehr, 2,5 Milliarden Euro für die Stahl- und Chemieindustrie und eine Milliarde Euro für die Infrastruktur. Deutschland wird jedoch voraussichtlich keine Subventionen für «blauen Wasserstoff» zur

Verfügung stellen, erklärte Patrick Graichen, Staatssekretär im Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, am 11. Januar 2022 (Euractiv 2022).

Einen detaillierten Überblick über die Förderungen findet sich im Wasserstoff-Aktionsplan des Nationalen Wasserstoffrates (NWR 2021a). Der Rat beschreibt hier gesetzliche Grundlagen, erforderliche Rahmenbedingungen für den Markthochlauf, künftig wahrscheinliche Entwicklungen (nach Sektoren) sowie weiteren Handlungsbedarf für die Bereiche Forschung und Entwicklung, Technologieförderung und regulatorisches Umfeld. Weitere Informationen lassen sich ferner dem Sachstandsbericht der Bundesregierung zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie entnehmen (Bundesregierung 2021).

KLEINE FARBENLEHRE DES WASSERSTOFFS

Tatsächlich klimaschutztauglich ist nur «grüner» Wasserstoff: Elektrolyseanlagen spalten mithilfe von Ökostrom Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff.

Eine Wasserstoffelektrolyse mittels Graustrom (also mit einem Strommix aus dem Netz, der fossile Anteile enthält) nimmt hingegen CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung in Kauf, die umso höher sind, je höher der Anteil an Strom aus Kohle- oder Gaskraftwerken ist. Auch beim derzeit gängigsten Verfahren zur Wasserstoffherstellung – der Dampfreformierung von Erdgas (Methan) – wird CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt. Beide Methoden haben «grauen» Wasserstoff zum Ergebnis.

In den ersten Entwürfen der Wasserstoffstrategie des damaligen Bundesministeriums für Wirtschaft wurde neben «grünem» Wasserstoff auch «blauer» Wasserstoff als CO₂-frei definiert, obwohl diese Bezeichnung irreführend ist. «Blauer» Wasserstoff bezeichnet Wasserstoff, dessen Erzeugung mit einem CO₂-Abscheidungs- und -Speicherungsverfahren gekoppelt werden muss (engl. Carbon Capture and Storage/CCS), also auf fossilen Grundstoffen und CO₂ als «Abfall» beruht. Die Risikotechnologie CCS ist in Deutschland jedoch nicht ohne Grund hochumstritten. In der letztlich von der Bundesregierung verabschiedeten Wasserstoffstrategie wird «blauer» Wasserstoff als CO₂-neutral bezeichnet. Eine Studie der Cornell-Universität in New York kommt allerdings zu dem Schluss, dass «blauer» Wasserstoff nur minimale Vorteile gegenüber der reinen Dampfreformierung ohne CCS hat (Howarth/Jacobson 2021). Die CCS-Technologie sei nicht in der Lage, 100 Prozent der entstehenden

Kohlendioxidemissionen aufzufangen. Nach einer Studie der Universitäten Cornell und Stanford ist die Klimabilanz von «blauem» Wasserstoff beim Einsatz für Wärme sogar noch schlechter als die von Erdgas. Ursache seien der hohe Energieaufwand und die Methanemissionen der Vorkette (Burgess 2021). «Pinker» Wasserstoff entsteht auch im Elektrolyseprozess, allerdings mittels Atomstrom. Diese Variante wird gelegentlich auch «gelber» Wasserstoff genannt.

Als «türkiser» Wasserstoff (und ebenfalls CO₂-neutral im Sinne der verabschiedeten Wasserstoffstrategie) gilt Wasserstoff, der über die thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) in einem Hochtemperaturreaktor hergestellt wird. Anstelle von CO₂ entsteht dabei fester Kohlenstoff in großen Mengen. Voraussetzungen für die CO₂-Neutralität des Verfahrens sind auch hier Strom aus erneuerbaren Energiequellen, zudem die dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs. Allerdings scheint «türkiser» Wasserstoff bislang nur in wenigen Laboranlagen produziert zu werden. Von einer industriellen Anwendung ist das Verfahren offensichtlich weit entfernt.

Aus Wasserstoff können Folgeprodukte hergestellt werden (Ammoniak, Methanol, Methan, Benzin, Diesel usw.). Sofern diese Produkte unter der Verwendung von «grünem» Wasserstoff erzeugt werden, wird in der Wasserstoffstrategie der Bundesregierung übergreifend von Power-to-X (PtX) gesprochen. Je nachdem, ob die erzeugten Folgeprodukte in gasförmiger oder flüssiger Form anfallen, spricht man von Power-to-Gas (PtG) oder von Power-to-Liquid (PtL).

LITERATUR

- Agora Verkehrswende/Agora Energiewende/ Frontier Economics (2018):** Die zukünftigen Kosten strombasierter Kraftstoffe, unter: www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf.
- Arepo – Arepo GmbH (2022):** Fair Green Hydrogen: Chance or Chimera in Morocco, Niger and Senegal?, hrsg. von der Rosa-Luxemburg-Stiftung, Berlin, unter: www.rosalux.de/publikation/id/46412.
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2020a):** Bundesforschungsministerin und nigrischer Amtskollege verständigen sich über Aufbau einer Wasserstoff-Partnerschaft mit Westafrika, Pressemitteilung vom 11.2.2020, unter: www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/pressemitteilungen/de/karliczek-wasserstoff-partnerschaft-mit-afrika-geplant.html.
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2020b):** H2 ATLAS AFRIKA – Potenzialatlas Grüner Wasserstoff in Afrika, unter: www.fona.de/medien/pdf/200831_PH2-ATLAS_AFRIKA_-_Potenzialatlas_Gruener_Wasserstoff_in_Afrika.pdf.
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2021):** Potenzialatlas Wasserstoff: Afrika könnte Energieversorger der Welt werden, unter: www.bmbf.de/bmbf/de/home/_documents/potenzialatlas-wasserstoff-afr-ergieversorger-der-welt-werden.html.
- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020):** Die Nationale Wasserstoffstrategie, unter: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html.
- BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022a):** Eröffnungsbilanz Klimaschutz, unter: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=14.
- BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022b):** Fortschrittsbericht Energiesicherheit vom 25.3.2022, unter: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0325_fortschrittsbericht_energiesicherheit.pdf?__blob=publicationFile&v=14.
- bp (2020):** Statistical Review of World Energy 2019, unter: www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html.
- Bundesregierung (2021):** Bericht der Bundesregierung zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie, unter: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/bericht-der-bundesregierung-zur-umsetzung-der-nationalen-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16#:~:text=Die%20Bundesregierung%20hat%20am%2010,Erreichen%20der%20Klimaziele%20wesentlich%20beitragen.
- Burgess, James (2021):** Blue hydrogen 20% worse for GHG emissions than natural gas in heating, unter: www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/natural-gas/081221-blue-hydrogen-20-worse-for-ghg-emissions-than-natural-gas-in-heating-study.
- Deutscher Bundestag (2020a):** Antwort auf Kleine Anfrage der Fraktion DIE LINKE: Ökologische Folgen und Kosten der Wasserstoffwirtschaft, BT-Drucksache 19/18834, unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/188/1918834.pdf>.
- Deutscher Bundestag (2020b):** Antwort auf Kleine Anfrage der Fraktion DIE LINKE: Ökologische Folgen und Kosten der Wasserstoffwirtschaft (Nachfrage zur Antwort der Bundesregierung auf BT-Drucksache 19/18834), BT-Drucksache 19/21845, unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/218/1921845.pdf>.
- Euractiv (2022):** Bundesregierung sagt Nein zu Förderung von «blauem Wasserstoff», unter: www.euractiv.de/section/energie/news/bundesregierung-sagt-nein-zu-foerderung-von-blauem-wasserstoff/?utm_source=piano&utm_medium=email&utm_campaign=12114&pnewsid=7bd_DzVXbL0ZwqbAvG.tDjiFvkOhRMd5MvrgxfRr80ZmrE3D0J7jTHQv8.mr.Lea6V_dbEZZSg.
- Forschungszentrum Jülich (2021):** H₂-Wasserstoff-Atlas Westafrika, unter: <https://africa.h2atlas.de/>.
- Heinemann, Christoph u. a. (2019):** Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland. Bericht im Rahmen der BMBF-Initiative «Kopernikus-Projekte für die Energiewende», Öko-Institut e. V., unter: www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/PtX-Hintergrundpapier.pdf.
- Heinemann, Christoph/Mendelevitch, Roman (2021):** Sustainability dimensions of imported hydrogen, Öko-Institut Working Paper 8/2021, unter: www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-imported-hydrogen.pdf.
- Howarth, Robert/Jacobson, Mark (2021):** How green is blue hydrogen?, in: Energy Science & Engineering 10/2021, S. 1676–1687, unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.956>.
- IWR – Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (2021):** Bundesregierung will Import von «grünem» Wasserstoff beschleunigen, unter: www.iwr.de/news/bundesregierung-will-import-von-gruenem-wasserstoff-beschleunigen-news37474.
- Matthes, Felix u. a. (2021):** Die Wasserstoffstrategie 2.0. Untersuchung für die Stiftung Klimaneutralität, Öko-Institut e. V., unter: www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Die-Wasserstoffstrategie-2-0-fuer-DE.pdf.

NWR – Nationaler Wasserstoffrat (2021a): Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021–2025, unter: www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2021-07-02_NWR-Wasserstoff-Aktionsplan.pdf.

NWR – Nationaler Wasserstoffrat (2021b): Nachhaltigkeitskriterien für Importprojekte von erneuerbarem Wasserstoff und PtX-Produkten, unter: www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2021-10-29_NWR-Stellungnahme_Nachhaltigkeitskriterien.pdf.

Öko-Institut (2015): Klimaschutzszenario 2050, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, unter: www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf.

Piria, Raffaele et al. (2021): Wasserstoffimport-sicherheit für Deutschland – Zeitliche Entwicklung, Risiken und Strategien auf dem Weg zur Klimaneutralität, hrsg. vom Kopernikus-Projekt Ariadne am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), unter: <https://ariadneprojekt.de/publikation/analyse-wasserstoffimportsicherheit-fuer-deutschland-zeitliche-entwicklung-risiken-und-strategien-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet/>.

Prognos/Öko-Institut/Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045, unter: www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland/.

Rudolph, Frederic (2019): Der Beitrag von synthetischen Kraftstoffen zur Verkehrswende: Optionen und Prioritäten, Kurzstudie im Auftrag von Greenpeace, unter: www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/kurzstudie_kraftstoffe_verkehrswende.pdf.

SOWE – Stiftung Offshore-Windenergie (2021): Potential der Windenergie auf See in Deutschland beträgt laut Studie mindestens 60 GW, unter: www.offshore-stiftung.de/potential-der-windenergie-auf-see-deutschland-betr%C3%A4gt-laut-studie-mindestens-60-gw.

The Boston Consulting Group/Prognos (2018): Klimapfade für Deutschland, Studie im Auftrag des BDI, unter: www.prognos.com/de/projekt/klimapfade-fuer-deutschland.

UBA – Umweltbundesamt (2019): Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050, Abschlussbericht, unter: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-19_texte_114-2019_energieversorgung-verkehr.pdf.

Witt, Uwe (2022): Klimapolitischer Rahmen, hrsg. von der Rosa-Luxemburg-Stiftung in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Alternative Wirtschaftspolitik e. V., Online-Studie, i.E.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung

BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

CCfD – Carbon Contracts for Difference

CCS – Kohlenstoffabscheidung und -speicherung

CCU – Kohlenstoffabscheidung und -nutzung

CO₂ – Kohlendioxid

EU – Europäische Union

H₂ – Wasserstoff

GW – Gigawatt

NWR – Nationaler Wasserstoffrat

NWS – Nationale Wasserstoffstrategie

PtG – Power-to-Gas

PtL – Power-to-Liquid

PtX – Power-to-X

TWh – Terawattstunden

UBA – Umweltbundesamt