

# Grüner Wasserstoff und andere regenerative Energierohstoffe im globalen Energiesystem



FZ Jülich

Dr. Heidi Heinrichs  
h.heinrichs@fz-juelich.de

Dr. Amin Lahnaoui  
a.lahnaoui@fz-juelich.de

DBFZ

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

Dr. Marco Klemm  
marco.klemm@dbfz.de

DLR

Jürgen Kern  
juergen.kern@dlr.de

Fraunhofer IEE

Lukas Jansen  
lukas.jansen@iee.fraunhofer.de

Norman Gerhardt  
norman.gerhardt@iee.fraunhofer.de

ISFH

Florian Peterssen  
f.peterssen@isfh.de

IZES

Eva Hauser  
hauser@izes.de

Henrik Mantke  
mantke@izes.de

KIT

Prof. Dr. Daniel Banuti  
daniel.banuti@kit.edu

Dr. Christine Rösch  
christine.roesch@kit.edu

Wuppertal Institut

Fabio Schojan  
fabio.schojan@wupperinst.org

## 1. Motivation

Grüner Wasserstoff (H<sub>2</sub>) ist gemäß Transformations-szenarien für das deutsche Energiesystem eine Säule der Treibhausgasneutralität (Stolten et al. 2021). Dabei ermöglicht der Import von grünem Wasserstoff oder anderen regenerativen Energierohstoffen vorteilhafte Bedingungen für erneuerbare Energien in anderen Ländern (bspw. bessere Wetterbedingungen und eine höhere Landverfügbarkeit) für uns nutzbar zu machen. Wie dies erfolgen könnte und was es dabei zu beachten gilt, wird in diesem Beitrag anhand von Forschungsergebnissen aus verschiedenen Projekten umrissen.

## 2. Aktuelle Forschungsergebnisse

Im Folgenden wird zunächst auf Beispiele von Wasserstoffproduktions- und Transportrouten neben den hauptsächlich betrachteten Routen via Wasserelektrolyse und Fischer-Tropsch Synthese eingegangen. Daran schließt sich eine Betrachtung möglicher Wasserstoff-Exportländer und relevanter Aspekte im potenziellen Importland Deutschland an

### 2.1 Wasserstoffproduktions- und Transportrouten

#### 2.1.1 Nachhaltige, resiliente Wasser- und Landnutzung der Wasserstoffproduktion

Befragungsergebnisse (z.B. Konrad et al. 2021) zeigen, dass die Gesellschaft dem Thema Wasserstoff positiv und offen gegenübersteht. Jedoch sind Akzeptanzprobleme in Teilbereichen möglich, insbesondere bei der nachhaltigen und resilienten Nutzung begrenzter Wasser- und Landressourcen. Dabei gibt es große regionale Unterschiede. Einige der techno-ökonomisch guten Standorte liegen in wasserarmen Gebieten mit teilweise prekärer Wasserversorgung oder sinkenden Grundwasser- und Oberflächenwasservorkommen. Der Wassernachschub durch Niederschläge ist aufgrund des Klimawandels zunehmend volatil.

Wenn eine internationale Verständigung auf verbindliche ökologische und soziale Kriterien in einem Zertifizierungssystem gelingt, ist ein Ausbau resilienter Produktionskapazitäten für grünen Wasserstoff möglich, ohne knappe lokale Wasser- und Landressourcen zu gefährden und Nutzungskonflikte zu verstärken (acatech, DECHEMA 2022).

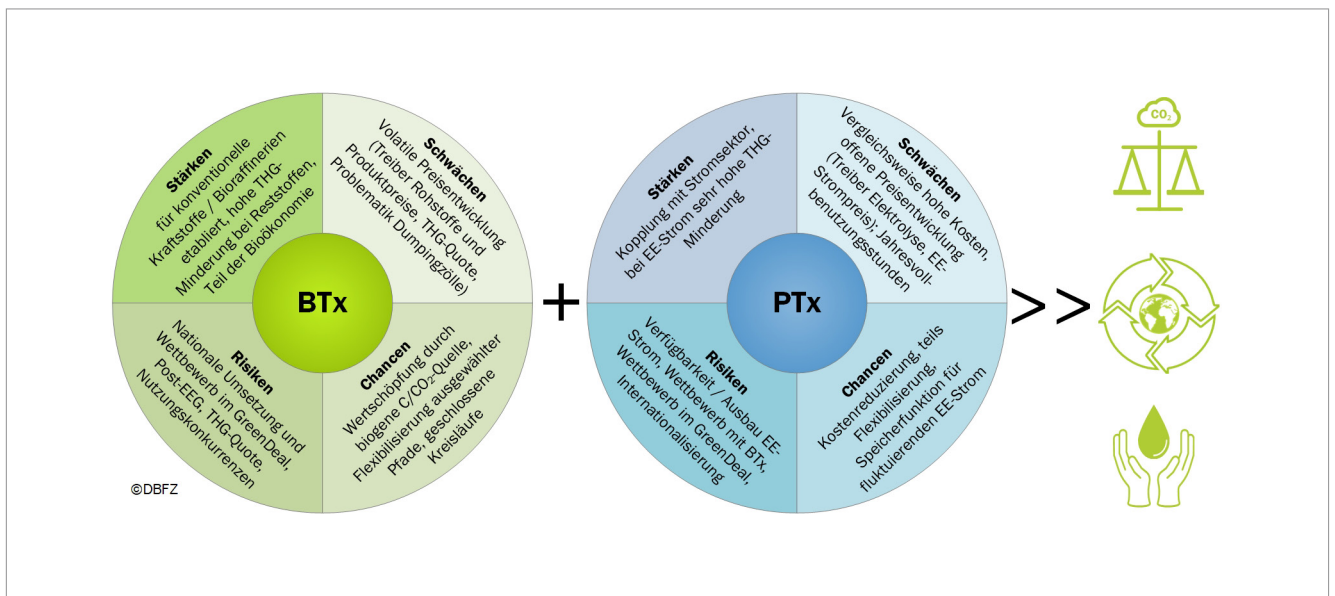
#### 2.1.2 Synergien von biomasse- und strombasierten Technologien

Durch geschickte Kombination von biomasse- und strombasierten Technologien können Synergien für die Treibhausgasneutralität, die Kreislaufwirtschaft und den Ressourcenschutz erreicht werden, wie an einer vereinfachten SWOT ablesbar ist (► *Abbildung 1*).

So ermöglicht die Nutzung von biogenem Kohlenstoff gute Treibhausgasbilanzen bei geringem Aufwand. Prozesse wie die Biomassevergasung können als Zwischenprodukt CO liefern, welches aufgrund seiner Reaktivität Prozesse ermöglicht, die mit CO<sub>2</sub> nicht möglich sind oder eine Reverse-Shift-Reaktion erfordern. Ein Beispiel für den SynBioPtX-Ansatz ist die katalytische Methanisierung mit Wasserstoff unter Nutzung des CO<sub>2</sub> im Biogas im Vorhaben Pilot-SBG mit dem Ziel einer maximalen Nutzung von Kohlenstoff aus biogenen Rest- und Abfallstoffen für Bio-LNG als Kraftstoff.

#### 2.1.3 Pyrolyse kombiniert mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und LH<sub>2</sub>-Transport

Bei der Pyrolyse von Biomasse im Flüssigmetallreaktor mit Carbon-Capture werden sogar negative CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht, wenn Kohlenwasserstoffe in gasförmigen Wasserstoff und festes Kohlenstoffpulver (Carbon Black) gespalten werden. Der zuvor aus der Atmosphäre gebundene Kohlenstoff kann dann sequestriert oder als Rohstoff in die Industrie gebracht werden („Teal Hydrogen“ / „grün-blauer Wasserstoff“), was im Rahmen der Projekte „NECO<sub>2</sub>C“ und „Solar Hydrogen“ erforscht wird.



Für den Transport ist verflüssigter kryogener Wasserstoff (LH<sub>2</sub>, liquid hydrogen) eine attraktive Möglichkeit, da dessen Dichte die des gasförmigen komprimierten Wasserstoffs deutlich übersteigt, ohne dabei Drucktanks zu benötigen. In den europäischen Projekten PRESLHY und ELVHYS werden hier die technischen und insbesondere sicherheitstechnischen Grundlagen erforscht, die LH<sub>2</sub> als Breitentechnologie ermöglichen soll.

## 2.2 Potenzielle Wasserstoffexportländer

### 2.2.1 Chile

Die globale Flächenidentifizierung und Anlagenauslegung an repräsentativen Inselform-Standorten für den globalen PtX-Atlas hat ein kosteneffizientes und nachhaltiges PtX-Erzeugungspotenzial von 2062 TWh Fischer-Tropsch Kraftstoff in Chile ergeben (Pfennig et al., 2023). Da diese Analysen keine heimischen Bedarfe und keine Restriktionen im Markthochlauf berücksichtigten, hat das Fraunhofer IEE diese Aspekte mithilfe einer länderspezifischen, modellbasierten Szenarienanalyse betrachtet. Das Ergebnis der sektorenübergreifenden Energiesystemanalyse ist, dass sich das flächenbasierte Exportpotenzial von 2062 TWh je nach Sensitivität um 74-97% reduziert.

### 2.2.2 ECOWAS in Westafrika

Die Machbarkeit einer grünen Wasserstoffindustrie in der ECOWAS-Region wurde mittels zusammengesetzter Indikatoren (grüne H<sub>2</sub>-Produktion (HP), grüner H<sub>2</sub>-Export (HE), Rahmenbedingungen der Energieversorgung (ER) und Energiepolitik (EP)) untersucht (► *Abbildung 2b*).

Ghana sticht mit den höchsten Punktzahlen hervor,

während Togo zeigt, dass ER und EP nicht korrelieren müssen. Niger und Mali haben die höchsten HP-Punkte und die Länder am Golf von Guinea für den Export (HE). Dies zeigt, wie wichtig die Kooperation zwischen (benachbarten) Ländern für eine Exportwirtschaft für grünen Wasserstoff sein kann (hohe HP und hohe HE in (► *Abbildung 2a*)). Vorteilhaft politische Rahmenbedingungen für H<sub>2</sub> (hohe ER & EP in ► *Abbildung 2a*) könnten dabei auf benachbarte Handelspartner übergreifen.

### 2.2.3 MENA Region

Die MENAfuels Studie untersuchte die Rolle des Nahen Ostens und Nordafrikas bei der Versorgung Deutschlands und Europas mit Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen aus erneuerbaren Ressourcen. Hierzu wurden erstmals regional hochaufgelöste Daten zu technischen Potenzialen, Produktionskosten und Investitionsumfeldern vereint. Die MENA-Region hat mit insgesamt mehr als 400 PWh/a sehr große Erzeugungspotenziale an erneuerbaren Energien vor allem an Solarenergie, die den deutschen Bedarf an synthetischen Kraftstoffen um das 60- bis 1.200-fache übersteigen können.

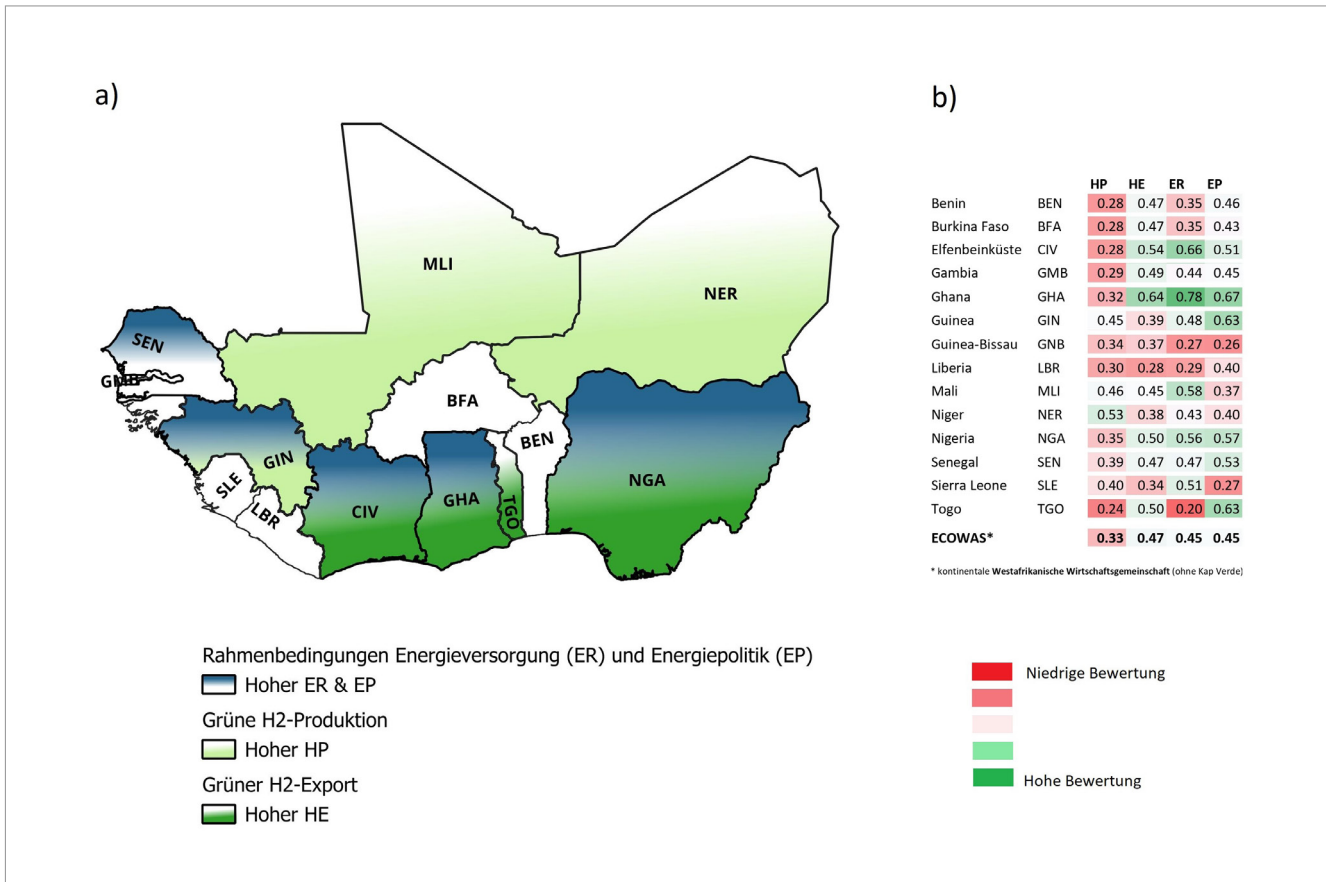
Während die Risiken der MENA-Länder insgesamt erheblich variieren, gelten Länder wie Saudi-Arabien, Oman und Marokko aufgrund niedriger Risikobewertungen in Politik, Ökonomie und Technologie als vielversprechende Exportpartner (Viebahn et al. 2022). Deswegen ist eine umfassende Analyse von Chancen und Risiken in den Exportländern erforderlich. Erfahrungen aus vergangenen Energiepartnerschaften, wie im Öl- und Gassektor, weisen auf mögliche innen- und außenpolitische Risiken hin. Dazu gehören Verteilungskonflikte, ungleiche

► *Abbildung 1*

**Vereinfachte SWOT-Analyse für das Zusammenwirken von BtX (biomassebasierten) und PtX (strombasierten) Technologien**

SWOT= Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Risiken)

(Quelle: DBFZ)



► *Abbildung 2*

a) *Hauptschwerpunkt-länder in ECOWAS*

b) *Zusammenfassung der Ergebnisse für die verschiedenen zusammengesetzten Indikatoren (HP, HE, ER, EP)*

(Quelle: FZ Jülich)

Exportverteilung, politische Instabilität, ethnische Konflikte und Sicherheitsbedenken in den Ländern und den Lieferketten. Weitere Herausforderungen sind nicht nachhaltige Produktion, Abhängigkeit von Autokratien und institutionelle Hürden. Diese Risiken müssen berücksichtigt werden, um ein widerstandsfähiges Energiesystem zu gewährleisten.

#### 2.2.4 Globale Verteilung von Wasserstoffexportländern

Potenzielle Wasserstoffexportländer sind nicht regional begrenzt. Im Projekt ETSAP-DE wurden die Kostenpotenziale für den Export von Flüssigwasserstoff für 28 Länder weltweit räumlich und zeitlich hochaufgelöst untersucht, inklusive der kompletten Wasserstoff-Infrastrukturkette bis zum Exporthafen (Franzmann et al. 2023). Das Gesamtpotenzial von rd. 1540 PWh/a im Jahr 2050 übersteigt das 8-fache des globalen Primärenergieverbrauchs in 2020 (Energy Institute 2023).

Dabei lassen sich die betrachteten Länder in drei Gruppen unterteilen (► *Abbildung 3*):

1. Länder mit günstigen, stabilen, sehr großen und PV-dominierten H<sub>2</sub>-Potenzialen
2. Länder mit mittleren bis eher teuren, großen Potenzialen mit starkem Kostenanstieg bei höherer

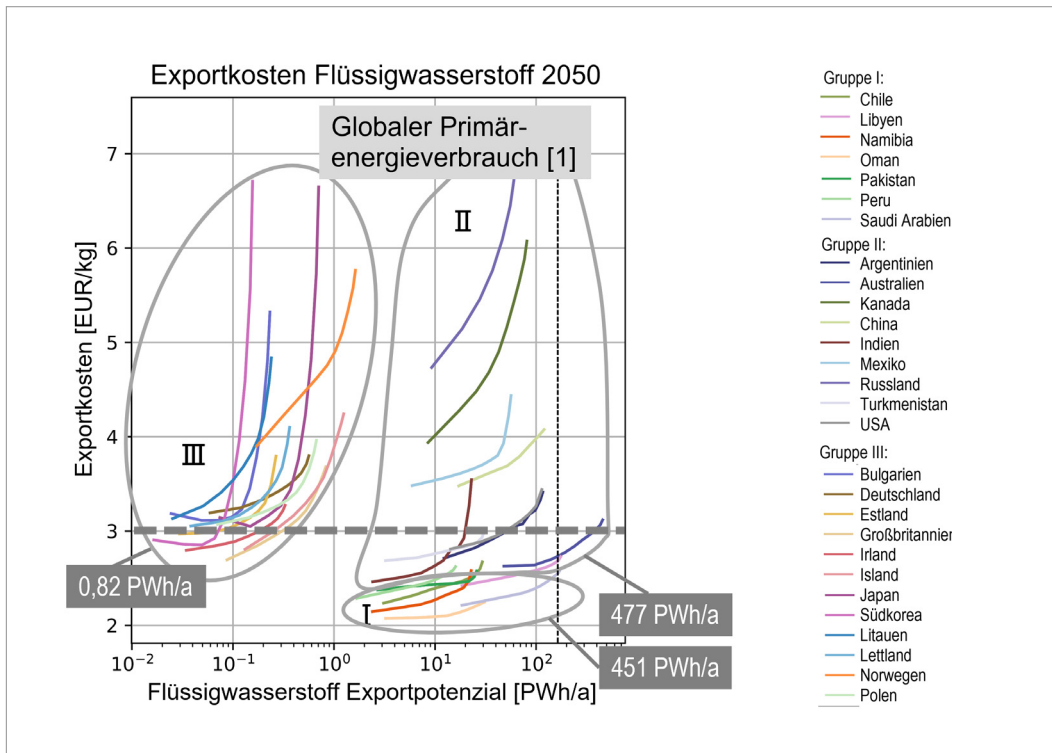
Potenzialausnutzung bedingt durch Windenergie 3. kleinere Länder mit Potenzialen <1 PWh/a mit erkennbaren Skalierungseffekten und insgesamt starken Kostenanstiegen bei steigender Potenzialnutzung.

Alle Ländergruppen weisen für das Jahr 2050 Potenziale unter 3 /kgH<sub>2</sub> für Flüssigwasserstoff im Exporthafen auf (► *Abbildung 3*).

### 2.3 Deutschland als Importland

#### 2.3.1 Einfluss von Wasserstoffimporten

Da es für Wind- und Bioenergie aufgrund verschiedener Randbedingungen klare Begrenzungen gibt, verbleiben vor allem Photovoltaik und der Import grüner Energieträger für ein treibhausgasneutrales Energiesystem. Mit einem Energiesystemmodell untersucht das ISFH, wie abhängig das deutsche Energiesystem vom Importangebot grüner Energieträger bei unterschiedlichen Photovoltaik-Ausbauleistungen ist. Es zeigt sich, dass 500 GW Photovoltaik no-regret sind, wenn die verfügbare Importmenge von billigem Wasserstoff nicht höher als 500 TWh liegt (► *Abbildung 4*).



► *Abbildung 3*

**Kostenpotenziale für Flüssigwasserstoff im Exporthafen**

(Quelle: Franzmann et al. 2023)

2.3.2 Priorisierung der Wasserstoffnutzung

Im Rahmen des Projektes BeniVer wurde durch eine Analyse von angekündigten Wasserstoffproduktionsmengen bis 2030 festgestellt, dass grüner Wasserstoff zunächst ein knappes Gut bleiben wird, was eine Priorisierung der Nutzung erfordert. Dafür bietet sich die kriterielle Bewertung der ökologisch-systemischen Sinnhaftigkeit an, welche im Projekt BeniVer für Marktmechanismen im Verkehrssektor erarbeitet wurde. Hierbei werden für jeden Technologiepfad dessen Alternativen mit ihren technologischen Reifegraden und dem jeweiligen Ressourcenverbrauch verglichen. Technologiepfade mit schlechten Alternativen und geringem Ressourcenverbrauch sind zu bevorzugen, was auf synthetische Kraftstoffe in der Schiff- und Luftfahrt, nicht aber auf den bodengebundenen Verkehr

zutrifft. Eine solche Analyse kann auf weitere Sektoren ausgeweitet werden, um Lock-in Effekte zu vermeiden.

3. Fazit und Ausblick

Über die Forschungsprojekte hinweg zeigt sich, dass grüner Wasserstoff und andere regenerative Energierohstoffe zur Erreichung des Ziels der Treibhausgasneutralität bis 2045 erforderlich sind. Die globalen Wasserstoffpotenziale sind weltweit stark verteilt und sehr groß und ein starkes Kostensenkungspotenzial bis 2050 wird angenommen.

Die Produktions- und Transportrouten sind vielfältig, so dass je nach Situation die beste Option gewählt werden kann. Bei der Auswahl der Exportländer muss

Verfügbarer teurer H <sub>2</sub> -Import (5 €/kg)	Verfügbarer billiger H <sub>2</sub> -Import (3 €/kg)	Inst. Photovoltaik Leistung	Inst. Wind Onshore Leistung	Inst. Wind Offshore Leistung	Verfügbare Biomasse
unbegrenzt	wird variiert	wird variiert	210 GW <sup>1)</sup> (§3 Abs. 1 WindBG)	70 GW (§1 Abs. 2 WindSeeG)	362 TWh (Ruiz et al. 2019)

<sup>1)</sup> Annahme: 29,4 MW/km<sup>2</sup>

► *Abbildung 4*

**Spanne der Energiesystemkosten in Abhängigkeit von der installierten Photovoltaikleistung bei unterschiedlichen Importpotenzialen für billigen Wasserstoff**

(Quelle: ISFH)

darauf geachtet werden, dass die lokale Energienachfrage zuerst gedeckt wird und für jede Exportregion eine Chancen-Risiko-Analyse erfolgt, um nachhaltig sichere Energiepartnerschaften zu ermöglichen.

Einschränkungen oder Verzögerungen im nationalen Ausbau erneuerbarer Energien erhöhen die Abhängigkeit Deutschlands von Wasserstoffimporten, erschweren den geplanten Markthochlauf für Wasserstoff und können eine Priorisierung des Einsatzes in schwer zu dekarbonisierenden Sektoren erforderlich machen.

Offene Fragen in diesem Kontext betreffen den Einfluss von Importen von Wasserstoff und -derivaten auf die Entwicklung der deutschen Wertschöpfung (Stichwort: Standortverlagerungen), die resiliente Ausgestaltung von Handelsbeziehungen mit ausreichender Diversifizierung sowie Engpässe und Wechselwirkungen mit der maritimen Infrastruktur und die Gestaltung einer nachhaltigen und resilienten Wasserstoffproduktion ohne Wasser- und Landnutzungskonflikten im Rahmen eines globalen Zertifizierungssystems.

#### 4. Danksagung

Ein Teil dieser Arbeit wurde im Rahmen folgender Projekte durchgeführt: ETSAP-DE (03EI1032B) gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), H2-Wegweiser Niedersachsen (VWZN3770) gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur, BEniVer (03EIV116B) gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

#### 5. Literatur

- acatech, DECHEMA (Hrsg.): Auf dem Weg in die deutsche Wasserstoffwirtschaft: Resultate der Stakeholder\*innen -Befragung, Berlin 2022. DOI: [https://doi.org/10.48669/h2k\\_2022-1](https://doi.org/10.48669/h2k_2022-1)
- Konrad, W., Kuhn, R., Wist, S.-K., und Witzel, B. (2021). Einstellungen in Deutschland zu Wasserstofftechnologien: Ergebnisse von Repräsentativbefragungen in der Übersicht. Stuttgart: DIALOGIK gemeinnützige Gesellschaft für Kommunikations- und Kooperationsforschung mbH. Zugriff am 13.01.2022. <https://www.dialogik-expert.de/sites/default/files/downloads/de/arbeitsbericht-wasserstoff-umfragen.pdf>

- Mills, R. (2020). A Fine Balance: The Geopolitics of the Global Energy Transition in MENA. In: Hafner, M., Tagliapietra, S. (eds) The Geopolitics of the Global Energy Transition. Lecture Notes in Energy, vol 73. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39066-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39066-2_6)
- Viebahn, P. et al. (2022). Synthese und Handlungsoptionen – Ergebnisbericht des Projekts MENA-Fuels. Teilbericht 14 des Wuppertal Instituts, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und des Instituts für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Wuppertal, Stuttgart, Köln, Saarbrücken.
- Ruiz, P. et al. (2019): ENSPRESO - an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials. Energy Strategy Reviews 26, 100379. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100379>.
- Stolten, D. et al. (2021). Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045.
- Franzmann, D. et al. (2023) Green hydrogen cost-potentials for global trade, International Journal of Hydrogen Energy, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.012>.
- Energy Institute (2023) Statistical Review of World Energy, <https://www.energyinst.org/statistical-review>.
- EC (2022): Hydrogen. European Commission (EC). Online verfügbar unter [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en), zuletzt geprüft am 08.11.2023.
- IEA (2022): Global hydrogen demand by production technology in the Net Zero Scenario, 2020-2030. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-production-technology-in-the-net-zero-scenario-2020-2030>, zuletzt geprüft am 08.11. 2023.
- IEA (2023): International Energy Agency: Global Hydrogen Review 2023. Paris.
- Müller-Langer, F. (2022) SynBioPTx-Ansätze | Wettbewerber oder Teamplayer? in: DBFZ (Hrsg.) DBFZ Tagungsreader, Nr. 24 SynBioPTx – Synergien biomasse- und strombasierter Technologien. Workshop im Rahmen der ProcessNet Energieverfahrenstechnik. DOI: 10.48480/xqvx-q424.
- M. Pfennig et al. (2023) Global GIS-based potential analysis and cost assessment of Power-to-X fuels in 2050, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121289.