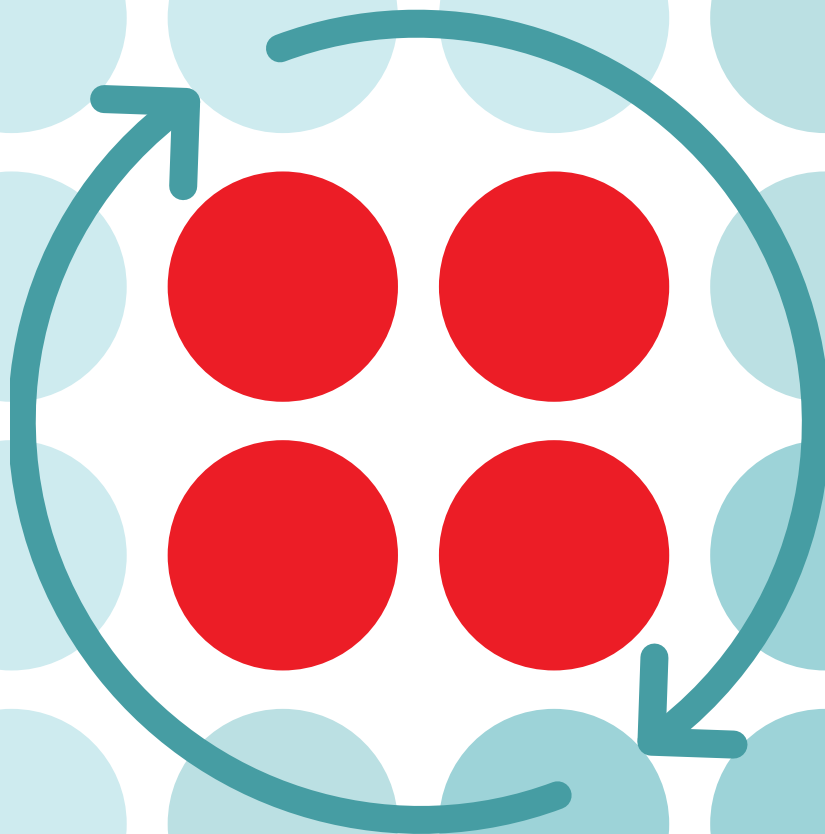


Faktencheck Wasserstoff



Zukunft gestalten

Strategien für Infrastruktur und Beschäftigung in
der regionalen und industriellen Transformation

Klimaneutraler Wasserstoff auf dem Prüfstand

Faktencheck: Wasserstoff

Wasserstoff (H_2) als häufigstes Element des Universums spielt bereits seit Jahrhunderten eine Schlüsselrolle in industriellen Prozessen, in der Raumfahrt oder auch in der Düngemittelproduktion. Sein Potenzial geht jedoch über die aktuellen Anwendungsbereiche hinaus und wird vielfach als wesentlicher Faktor für die Energiewende gesehen.

Für eine klimaneutrale Gesellschaft wird Erneuerbare Energie benötigt, die jedoch nicht überall direkt und in allen Prozessen genutzt werden kann. Wasserstoff spielt dabei eine Schlüsselrolle, da er durch seine Eigenschaften (z. B. Speicherung von Energie und brennbar) fossile Energieträger ersetzen kann, insbesondere in Industrie und Energieversorgung. Da für die Herstellung von Wasserstoff Energie notwendig ist, hängt sein Beitrag zur Energiewende vor allem von der Art ab, wie er hergestellt wird. Vereinfacht wird von Farben gesprochen:

Grüner Wasserstoff entsteht durch Elektrolyse mit Strom aus regenerativen Quellen.¹ Die Gewinnung von grauem (Erdgas) und schwarzem Wasserstoff (Kohle) erfolgt mittels Dampfreformierungsverfahren. Derzeit findet diese Technologie insbesondere in der chemischen Industrie Anwendung, wobei pro Tonne Wasserstoff rund 10 Tonnen CO_2 (Ausgangsstoff: Erdgas) freigesetzt werden. Blauer Wasserstoff wird auch aus Erd-

gas gewonnen, jedoch wird ein Großteil des CO_2 abgeschieden. Türkiser Wasserstoff wird ebenfalls aus Erdgas (Methanpyrolyse) gewonnen und kann klimafreundlich sein, wenn der bei der Pyrolyse entstehende Kohlenstoff sicher gelagert wird. Oranger Wasserstoff wird aus Reststoffen und Biomasse gewonnen.²

Wird bei der Gewinnung kein oder nur wenig CO_2 an die Atmosphäre abgegeben, spricht man auch von klimaneutralem Wasserstoff.³ Als Übergangslösung können daher Herstellungsverfahren mit Kohlenstoffabscheidung eine Option sein. Der Fokus dieses Faktenchecks liegt jedoch auf grünem Wasserstoff und dessen Herstellungsverfahren und Preisentwicklungen. Bei allen Herstellungsverfahren wird jedoch ein im Handling (Speicherung, Transport und Nutzung) gleichwertiges H_2 -Molekül erzeugt.⁴

¹ Bundesumweltministerium 2023.

² EnBW 2024.

³ BMBF 2024.

⁴ Industrie- und Handelskammer Nordschwarzwald 2024.

Es gibt nur eine Technologie, um grünen Wasserstoff zu gewinnen. - falsch -

Zu den vielversprechendsten Verfahren zur Erzeugung von grünem Wasserstoff gehört die Elektrolyse von Wasser unter Einsatz erneuerbarer Energien, wobei aktuell verschiedene Technologien mit spezifischen Vor- und Nachteilen verfügbar sind. Die alkalische Elektrolyse (AEL) ist kostengünstig und weist einen Wirkungsgrad von ca. 65 % vor, allerdings reagiert sie träge auf schwankende Energiebereitstellung. Die Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEM) bietet einen Wirkungsgrad von ca. 63 % und eine höhere Dynamik, ist aber aufgrund teurer Materialien wie Platin kostenintensiver. Die Festoxidelektrolyse (SOE), die bei hohen Temperaturen arbeitet, erreicht mit bis zu 80 % den höchsten Wirkungsgrad, eignet sich jedoch primär für industrielle Anwendungen und ist technisch noch nicht ausgereift.⁵ Dabei zeigen Entwicklungen aus Australien, dass auch ein Wirkungsgrad über 95 % mittels Kapillar-Elektrolyse erreicht werden kann.⁶

Deutschland kann seinen Bedarf an grünem Wasserstoff aus heimischer Produktion vollständig decken. - falsch -

Zwar verfügt Deutschland über Potenzial zur (dezentralen) Produktion von grünem Wasserstoff, insbesondere durch Wind- und Solarenergie, jedoch sind die verfügbaren Flächen und die Energieerzeugungskapazitäten begrenzt.⁷

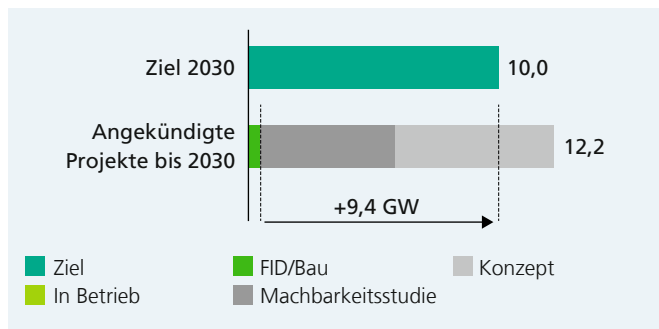


Abb. 1: Elektrolysekapazität Deutschland.⁸

Bis 2030 sollen in Deutschland 10 GW Elektrolysekapazität entstehen. Bei einem Wirkungsgrad von 70 % entspricht dies 28 TWh⁹ (zum Vergleich: Jährlicher Stromverbrauch in Berlin liegt bei ca. 12 TWh).¹⁰ Diesem anvisierten Ziel steht nach heutiger Schätzung ein Bedarf von ca. 95–130 TWh in Wasserstoff

und Derivaten gegenüber.¹¹ Hinzu kommt, dass schwankende Wetterbedingungen zu einer ungleichmäßigen Wasserstoffproduktion führen, was den Aufbau großer Speicherlösungen oder Importe notwendig macht.¹² Zur Deckung des Bedarfs und zur stabilen Versorgung wird Deutschland also langfristig auf Importe aus Regionen mit günstigerem Zugang zu erneuerbarer Energie angewiesen sein, beispielsweise aus Nordafrika, Australien oder dem Nahen Osten.¹³

Klimaneutraler Wasserstoff ist derzeit nur begrenzt verfügbar. - richtig -

Die weltweite Wasserstoffproduktion betrug 2022 etwa 94 Millionen Tonnen, wovon jedoch nur etwa 0,7 % als »grün« oder klimaneutral eingestuft werden. Die Internationale Energieagentur (IEA) prognostiziert, dass die weltweite Elektrolysekapazität für grünen Wasserstoff von 1 GW in 2023 auf 850 GW im Jahr 2030 steigen könnte.¹⁴ Dies würde eine erhebliche Skalierung und Investitionen in Wasserstoffinfrastruktur und erneuerbare Energien erfordern. Für den Markthochlauf spielt der Marktpreis eine entscheidende Rolle. Dieser liegt derzeit deutlich höher als bei konventionellem Wasserstoff. Um die Wettbewerbsfähigkeit zu erhöhen, setzen viele Länder auf Förderprogramme, CO₂-Bepreisung und Forschungsinitiativen. Beispiele hierfür sind die nationale Wasserstoffstrategie Deutschlands (Wasserstoffstrategie)¹⁵ und die europäische Wasserstoffstrategie¹⁶, die Förderanreize für Infrastruktur und Produktion bieten.

Wasserstoff lässt sich problemlos in großen Mengen über lange Zeiträume transportieren und speichern. - richtig, aber -

Wasserstoff ist ein vielversprechender Energieträger, der sich für den Transport und die Speicherung in großen Mengen eignet, jedoch aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften Herausforderungen mit sich bringt. Seine geringe Dichte bedeutet, dass Wasserstoff in gasförmigem Zustand große Volumina benötigt. Dies erfordert eine Speicherung bei hohem Druck (bis zu 700 bar) oder als kryogene Flüssigkeit (Flüssigkeit, welche mindestens -150 °C kalt ist) bei -253 °C.¹⁷ Der Transport über Land erfolgt häufig in Druckbehältern, per Pipeline oder als chemisch gebundener Wasserstoff, während für den Seeweg meist verflüssigter Wasserstoff oder Ammoniak als Trägermedium genutzt wird.¹⁸ Die Speicherung in unterirdischen Kavernen, insbesondere in Salzstöcken, stellt eine vielversprechende, jedoch noch nicht vollständig erforschte

5 Acatech, DECHEMA 2023.

6 Hodges et al. 2022.

7 Caglayan et al. 2019.

8 EY 2024.

9 Umrechnungsbeispiel: 1 GW Leistung x 70 % Wirkungsgrad: Wasserstoffmenge = 0,7 GW x 4000 h = 2800 GWh = 2,8 TWh.

10 Amt für Statistik Berlin-Brandenburg 2023.

11 BMWK 2024a.

12 Gerloff 2023.

13 Feder 2020.

14 IEA 2024.

15 BMWi 2020.

16 European Commission 2024.

17 Demaco Cryogenics 2024.

18 Caglayan et al. 2019.

Lösung dar. Diese Formationen sind in der Lage, Wasserstoff dicht einzuschließen und große Energiemengen über lange Zeiträume aufzunehmen.¹⁹

Grüner Wasserstoff ist deutlich teurer als konventioneller Wasserstoff. - richtig, aber -

Grüner Wasserstoff ist derzeit mit Kosten von ca. 4,5 €/kg teurer als grauer Wasserstoff (ca. 1,5 €/kg), wobei letzterer stark vom aktuellen Gaspreis abhängt. Die Hauptkostentreiber sind die Kosten für erneuerbare Elektrizität und die Investitionskosten für Elektrolyseure, die durch technologische Innovationen und Skaleneffekte jedoch stetig sinken.²⁰ Langfristig wird erwartet, dass die Produktionskosten von grünem Wasserstoff bis 2050 um bis zu 85 % sinken können, also auf etwa 0,6–1,5 €/kg.²¹

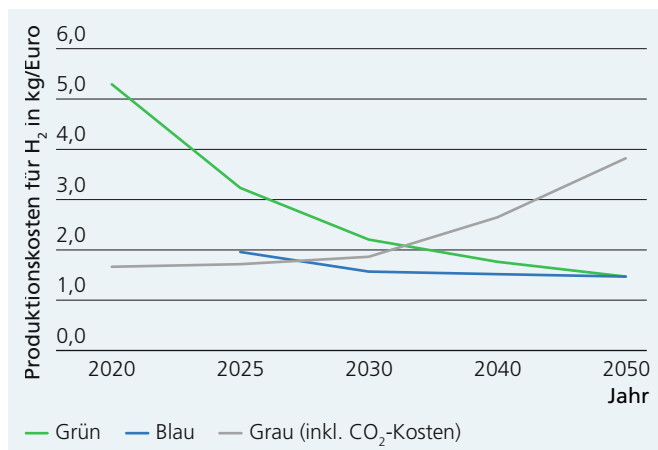


Abb. 2: Produktionskosten Wasserstoff nach Farben.²²

Gerade im Bereich der erneuerbaren Energien haben Standortentscheidungen einen entscheidenden Einfluss auf die langfristigen Kosten der Wasserstoffherzeugung.

Wasserstoff kann einen wichtigen Beitrag zur Sektorenkopplung liefern. - richtig -

Sektorenkopplung bezeichnet ein Konzept, welches darauf abzielt, traditionell getrennt arbeitende Sektoren wie Strom, Wärme, Verkehr und Industrie auf intelligente Weise zu vernetzen. Mittels Sektorenkopplung können die Dekarbonisierung vorangetrieben, der Energieverbrauch gesenkt und die Energiesicherheit erhöht werden.²³ Wasserstoff spielt dabei eine entscheidende Rolle. Als vielseitiges Bindeglied ermöglicht es die Speicherung überschüssiger erneuerbarer Energie und trägt so zur Stabilisierung des Stromnetzes bei. In diesem Kontext wird oft von Power-to-X gesprochen, dabei ist X Platzhalter

19 Williams et al. 2022.
 20 Longden et al. 2020.
 21 Reisch 2020.
 22 Eigene Darstellung nach Hydrogen Council u. McKinsey 2024.
 23 Wietschel et al. 2018.

für Gas (worumter auch Wasserstoff zählt), Liquid (Kraftstoffe), Heat (Wärme) und Chemicals (chemische Grundstoffe) sowie die Wasserstoffderivate Ammoniak und Methanol.²⁴ Um dieses Potenzial zu heben und wichtige industrielle Knoten zu verbinden, ist ein Wasserstoffkernnetz mit einer Gesamtlänge von 9040 km geplant,²⁵ welches damit ein wichtiger Teil des European Hydrogen Backbone (EHB) mit einer Gesamtlänge von über 53 000 km wird.²⁶

Wasserstoff eignet sich für fast alle Bereiche, in denen heute fossile Rohstoffe eingesetzt werden. - richtig, aber -

Während Wasserstoff technisch vielseitig einsetzbar ist, ergibt sich durch Kosten und Verfügbarkeit in den nächsten Jahren eine strategische Priorisierung. Seine Rolle sollte sich primär auf Sektoren konzentrieren, in denen keine direkten Elektrifizierungslösungen existieren – wie die chemische Industrie (stoffliche Nutzung), Stahlproduktion (Temperatur/Erdgas-substitut)²⁷ und Teile des Schwer-/ und Langstreckentransports (Gewicht von Alternativen z. B. Batteriespeicher).²⁸ In anderen Bereichen ist die direkte Elektrifizierung oft die wirtschaftlichere und energetisch (Vermeidung von Umwandlungsverlusten) sinnvollere Lösung (Umweltbundesamt). Beispielsweise beträgt der Gesamtwirkungsgrad für E-Fahrzeuge 62 %. Bei einem Brennstoffzellenfahrzeug mit grünem (komprimiertem) Wasserstoff liegt er bei 28 %.²⁹

Das Handling von Wasserstoff bringt unkalkulierbare Sicherheitsrisiken mit sich. - falsch -

Wasserstoff bringt wie alle Energieträger spezifische Sicherheitsaspekte mit sich, die durch bewährte Technologien und Maßnahmen beherrschbar sind. Aufgrund seiner hohen Brennbarkeit und niedrigen Zündenergie besteht ein erhöhtes Risiko für Brände und Explosionen, besonders in geschlossenen Räumen. Herausforderungen wie die unsichtbare Flamme können durch Wasserstoffsensoren, Belüftungssysteme und automatische Abschaltungen effektiv adressiert werden. Dank seiner geringen Dichte und schnellen Diffusion birgt Wasserstoff in offenen Umgebungen ein geringeres Risiko durch Konzentrationsbildung. Er wird seit Jahrzehnten sicher in der Industrie eingesetzt, erfordert jedoch für neue Anwendungen und größere Mengen angepasste Sicherheitskonzepte wie robuste Lagerung, Materialtests und zuverlässige Überwachungssysteme. Mit diesen Maßnahmen ist Wasserstoff ein sicher handelbarer Energieträger.³⁰

24 TÜV SÜD 2024.
 25 Bundesnetzagentur 2024.
 26 European Hydrogen Backbone 2024.
 27 BMWK 2024b.
 28 Umweltbundesamt 2024a.
 29 Umweltbundesamt 2024b.
 30 Wasserstoff-Sicherheit 2024.

Quellen

Acatech; DECHEMA (Hg.) (2022): Elektrolyse in Deutschland: Kapazitäten, Zielsetzungen und Bedarfe bis 2030. Online abrufbar unter https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Elektrolysekapazitaeten.pdf.

Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2023): Energie- und CO₂-Bilanz Berlin 2023 (vorläufig). Online abrufbar unter <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/e-iv-5-j>.

BloombergNEF (2023): 2023 Hydrogen Levelized Cost Update: Green Beats Gray | BloombergNEF. Online abrufbar unter <https://about.bnef.com/blog/2023-hydrogen-levelized-cost-update-green-beats-gray/>.

BMBF (2024): Wissenswertes zu Wasserstoff. Online abrufbar unter <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/wissenswertes-zu-gruenem-wasserstoff.html>.

BMWi (2020): Nationale Wasserstoffstrategie. Online abrufbar unter https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node.html.

BMWK (2023): Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. Online abrufbar unter https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

BMWK (2024a): Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate. Online abrufbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/importstrategie-wasserstoff.pdf?__blob=publicationFile&v=18. **BMWK (2024a):** Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate. Online abrufbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/importstrategie-wasserstoff.pdf?__blob=publicationFile&v=18.

BMWK (2024b): Grüner Stahl: Wie Wasserstoff Kohle und Erdgas ersetzen kann. Online abrufbar unter <https://www.energieforschung.de/de/aktuelles/news/2024/gruener-stahl-wie-wasserstoff-kohle-und-erdgas-ersetzen-kann>.

Bundesnetzagentur (2024): Bundesnetzagentur genehmigt Wasserstoff-Kernnetz. Online abrufbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20241022_H2Kernnetz.html.

Bundesumweltministeriums (2023): Wichtiger Schritt für Markthochlauf von grünem Wasserstoff- BMUV - Pressemitteilung. Online abrufbar unter <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/wichtiger-schritt-fuer-markthochlauf-von-gruenem-wasserstoff>.

Caglayan, Dilara; Weber, Nikolaus; Heinrichs, Heidi Ursula; Linßen, Jochen; Robinius, Martin; Kukla, Peter A.; Stolten, Detlef (2019): Technical Potential of Salt Caverns for Hydrogen Storage in Europe.

Demaco Cryogenics (2024): Die Energiedichte von Wasserstoff: eine einzigartige Eigenschaft. Online abrufbar unter <https://demaco-cryogenics.com/de/blog/die-energiedichte-von-wasserstoff-eine-einzigartige-eigenschaft/>.

EnBW (2024): Herstellung von Wasserstoff. Online abrufbar unter <https://www.enbw.com/unternehmen/themen/wasserstoff/wasserstoffherstellung.html>.

European Commission (2024): Hydrogen. Online abrufbar unter https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en.

EY; bdew: Fortschrittsmonitor 2024. Elektrolyseausbau Deutschland. Online abrufbar unter https://www.ey.com/content/dam/ey-unified-site/ey-com/de-de/insights/Fortschrittsmonitor/documents/ey_bdew-fortschrittsmonitor-2024.pdf.

Feder, Judy (2020): H2 Economy: Hype, Horizon, or Here? In: Journal of Petroleum Technology 72 (08), S. 20–23.

Gerloff, Niklas (2023): Environmental costs of green hydrogen production as energy storage for renewable energies. In: MRS Energy & Sustainability 10 (2), S. 174–180.

Gulli, Chiara; Heid, Bernd; Noffsinger, Jesse; Waardenburg, Maurits; Wilthner, Markus (2024): Global Energy Perspective 2023: Hydrogen outlook. In: McKinsey & Company, 10.01.2024. Online abrufbar unter <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook>.

Hodges, Aaron; Hoang, Anh Linh; Tsekouras, George; Wagner, Klaudia; Lee, Chong-Yong; Swiegers, Gerhard F.; Wallace, Gordon G. (2022): A high-performance capillary-fed electrolysis cell promises more cost-competitive renewable hydrogen. In: Nature communications 13 (1), S. 1304.

Hydrogen Council (2021): Hydrogen Decarbonization Pathways 2021. Online abrufbar unter <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-decarbonization-pathways/>.

IEA (2024): Hydrogen. Online abrufbar unter <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>.

Industrie- und Handelskammer Nordschwarzwald (2024): Wasserstoff - Die Grundlagen. Online abrufbar unter <https://www.ihk.de/nord-schwarzwald/innovationn/innovation/aktuelles/wasserstoff-grundlagen-5872984>.

Reisch, Marc (2020): The coming challenge of green hydrogen. In: C&EN Global Enterp 98 (2), S. 28.

Thomas Longden; Frank Jotzo; Mousami Prasad; Richard Andrews (2020): Green hydrogen production costs in Australia: implications of renewable energy and electrolyser costs CCEP Working Paper 20-07 August 2020. Online abrufbar unter <https://www.researchgate.net/>.

TÜV SÜD (2024): Power-to-X erklärt. Online abrufbar unter <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/klima-und-energie-info/power-to-x>.

Umweltbundesamt (2024a): Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem. Online abrufbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluesel-im-kuenftigen-energiesystem#Rolle>.

Umweltbundesamt (2024b): Wasserstoff im Verkehr: Häufig gestellte Fragen (FAQs). Online abrufbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/kraftstoffe-antriebe/wasserstoff-im-verkehr-haeufig-gestellte-fragen#effizienz>.

Wasserstoff-Sicherheit (2024): Einsatzkräfte | Wasserstoff-Sicherheit. Online abrufbar unter <https://www.wasserstoff-sicherheit.de/einsatzkraefte/>.

Wietschel, Martin; Plötz, Patrick; Pfluger, Benjamin; Klobasa, Marian; Eßer, Anke; Haendel, Michael et al. (2018): Sektorkopplung - Definition, Chancen und Herausforderungen.

Williams, John D.O.; Williamson, J. P.; Parkes, Daniel; Evans, David J.; Kirk, Karen L.; Sunny, Nixon et al. (2022): Does the United Kingdom have sufficient geological storage capacity to support a hydrogen economy? Estimating the salt cavern storage potential of bedded halite formations. In: Journal of Energy Storage 53.

Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) (2024): Häufig gestellte Fragen zu Wasserstoff. Online abrufbar unter <https://h2.bayern/infothek/faqs/>.

Autor:innen

Christian Klöppelt
Patrick Wagner

Januar 2025

im Auftrag der Hans-Böckler-Stiftung

Kontakt

**Fraunhofer-Institut für Keramische
Technologien und Systeme IKTS**
Technologieökonomik- und
Nachhaltigkeitsanalyse

Christian Klöppelt
Telefon +49 345 131886-134
christian.kloepfelt@ikts.fraunhofer.de

Leipziger Straße 70/71
06108 Halle (Saale)

www.ikts.fraunhofer.de