

Großskalige Wasserstoffspeicherung als notwendiges Bindeglied zwischen Erzeugung und Verbrauch

Mit der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) [1] definiert die Bundesregierung einen Handlungsrahmen für den Einsatz von Wasserstofftechnologien als Kernelemente der Energiewende. Sie sollen dazu beitragen, den Umbau der auf fossilen Energieträgern basierten Energiewirtschaft voranzutreiben, Produktionsprozesse zu dekarbonisieren und neue Wertschöpfungsketten für die deutsche Wirtschaft zu schaffen. Wasserstoff bekommt bei der Weiterentwicklung und Vollendung der Energiewende eine zentrale Rolle, denn er ermöglicht es, mit Hilfe erneuerbarer Energien (EE) die CO₂-Emissionen vor allem in den Sektoren Industrie und Verkehr deutlich zu verringern und zur Erreichung der Klimaziele beizutragen.

Für die erfolgreiche Etablierung einer nationalen Wasserstoffökonomie müssen alle Komponenten des Systems untersucht und evaluiert werden. Das betrifft also die künftige Erzeugung, den Transport, die Nutzung und Weiterverwendung von Wasserstoff und die damit verbundenen Innovationen und Investitionen.

Nach dem jetzigen Kenntnisstand werden die für eine treibhausgasneutrale Gesellschaft im Jahr 2050 benötigten Erzeugungskapazitäten von Wasserstoff nicht ausschließlich in Deutschland zu realisieren sein. Ein beachtlicher Anteil des Wasserstoff-Bedarfs (ca. 70%) [2] soll daher durch den Import auf EU- und internationaler Ebene gedeckt werden.

Zwischenspeicherung zur Absicherung von Reserven oder als Lastmanagement spielt dabei eine wesentliche Rolle.

Im Hinblick auf die Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch erfüllen Netze die Funktion des erforderlichen räumlichen Bedarfsausgleichs und Speicher die des zeitlichen Bedarfsausgleichs. Oberirdische Netz- und Speicherinfrastrukturen sind aber nicht in der Lage, Wasserstoff in der prognostizierten Größenordnung industrieller Großverbraucher (z. B. Grundstoffchemie, Roheisen und Stahl) zu speichern. Eine groß angelegte und langfristige H₂-Speicherung zur Gewährleistung der erforderlichen Systemstabilität ist im TWh-Maßstab nur in geologischen Speichern möglich [3] (► *Abbildung 1*).

Die in Deutschland seit den 1960er Jahren gesammelten Erfahrungen zur Erdgasspeicherung können als wichtiger Grundstein für eine wirtschaftliche untertägige Wasserstoffspeicherung genutzt werden [4]. Gegenwärtig existieren in Deutschland 47 unterirdische Speicheranlagen für Erdgas, davon 16 Porenspeicher- und 31 Kavernenstandorte, deren Speicherkapazitäten von ca. 26,5 Mrd. m³ (ca. 240 TWh) Arbeitsgas als die höchsten im europaweiten Vergleich [5] und an vierter Stelle im weltweiten Maßstab [6] einzuordnen sind.

Kavernen in Salzgestein eignen sich ideal für die kurz- bis mittelfristige H₂-Speicherung, sind aber lokal begrenzt. Porenspeicher (Aquifere und ausgeförderte Erdgaslagerstätten) hingegen sind regional weiter verbreitet und haben um Größenordnungen größere Speicherkapazitäten als Salzkavernen.

Für die zu erwartenden Ausbauperspektiven sowie für die Planung und Auslegung der Wasserstoff-Infrastruktur werden alle verfügbaren Speicherpotenziale in räumlicher Anbindung zur Energie- und Grundstoffindustrie oder zum Mobilitätssektor benötigt. Die geographische Verteilung von Salzstrukturen und Sedimentbecken [7], die jeweils die Standorte für Kavernen- und Porenspeicher repräsentieren, ergeben eine gute, komplementäre Abdeckung des Speicherpotenzials auf nationalem Maßstab.

In einer Folge von Forschungsarbeiten in nationalen und europäischen Projekten [8] wurden die verschiedenen geologischen Speicher an Hand eines Kriterienkatalogs bereits ersten technisch-ökonomischen Analysen unterzogen. Dabei wird offensichtlich, dass je nach den geologischen und geographischen Besonderheiten, den Anbindungsmöglichkeiten an industrielle Ballungsgebiete und Transportnetze und auch einer möglichen Umwidmung bestehender Infrastrukturen sehr unterschiedliche Kosten-Nutzen-Abschätzungen zustande kommen [9].



GFZ

Dr. Cornelia Schmidt-Hattenberger
cornelia.schmidt-hattenberger
@gfz-potsdam.de



GFZ

Dr. Peter Pilz
peter.pilz@gfz-potsdam.de

Dr. Wolfgang Weinzierl
wolfgang.weinzierl
@gfz-potsdam.de

DLR

Nadine Jacobs
nadine.jacobs@dlr.de

Dr. Michael Kröner
michael.kroener@dlr.de

KIT

Prof. Dr. Andreas Class
andreas.class@kit.edu

Prof. Dr. Christoph Hilgers
christoph.hilgers@kit.edu

Prof. Dr. Frank Schilling
frank.schilling@kit.edu

UFZ

Dr. Carsten Vogt
carsten.vogt@ufz.de

Florian Zill
florian.zill@ufz.de

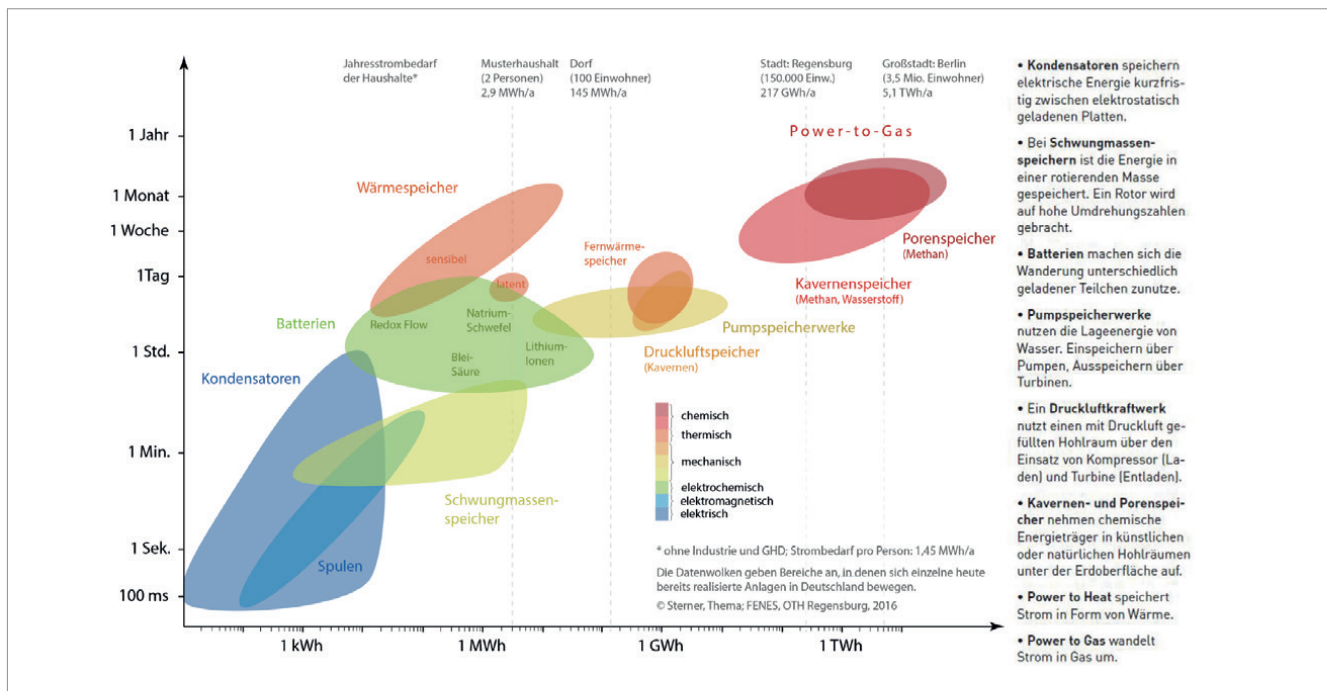


Abbildung 1 **Speicherkapazität und Entladedauer für verschiedene Arten von Energiespeichern.**

Die größten Speicherpotenziale (TWh-Bereich) sind in Kavernen- und Porenspeichern verfügbar (Modifiziert nach Sterner, 2017).

Vor- und Nachteile von Salzkavernen- und Porenspeicherung und ihre geographischen Verfügbarkeit in Deutschland

Salzkavernen werden wegen ihrer Flexibilität durch hohe Ein- und Ausspeicherraten bei hohen Drücken als favorisierte Lösung gesehen. Sie bieten einen hohen Anteil an Arbeitsgas (Gasanteil, der tatsächlich aus dem Speicher entnommen werden kann) und einen geringen Kissengasanteil (Gasanteil, der zur Aufrechterhaltung des Betriebsdrucks dauerhaft im Speicher bleibt). Kavernen zeigen kaum Mineralreaktionen und haben beim Wiederausfordern nur einen geringen Wassergehalt im Fördergas und sind damit weniger aufwändig bei der Gasaufbereitung. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass mikrobielle Umsetzungen des H₂ in Salzkavernen aufgrund des hohen Salzgehalts stark eingeschränkt sind.

Deutliche Nachteile sind mögliche Subsidenzerscheinungen im Top der Kaverne, die bei falschem Ausbau oder Betrieb zu Grundbrüchen und Gasleckagen führen können. Die Einrichtung neuer Kavernen durch Aussolungsprozesse erfordert einen hohen Genehmigungs- und Zeitaufwand. Die Sole-Entsorgung (Einleitung in die Nordsee oder ehemalige Tagebaue) unterliegt starken Beschränkungen und erzeugt Zusatzkosten.

Der Untergrund Deutschlands hält ausreichende Volumina für umrüstbare und neu zu bauende Salzkavernen in Deutschland bereit. Die geographische Verfügbarkeit der Salzkavernen ist beschränkt, d.h. die südlichste Anlage der Republik ist in der Nähe

von Fulda lokalisiert, darüber hinaus gibt es keine größeren, für die Speicherung leicht nutzbaren Salzstrukturen.

Porenspeicher bilden mit ihrer geographischen Verfügbarkeit und den hohen Speichervolumina eine interessante komplementäre Speicheroption. Im Gegensatz zur bereits schon weiter ausgereiften Technologie der H₂-Speicherung in Salzkavernen befinden sich Porenspeicher für diese Anwendung allerdings noch im technologischen Entwicklungsstadium.

Nachteilig sind ausgeprägte mikrobiologische Umwandlungen und es sind auch mineralischen Reaktionen zu erwarten, die bei der Auslegung und im Betrieb beachtet werden müssen. Deshalb muss mit einem höheren Aufwand in der Nachbearbeitung und Reinigung des rückgeführten Wasserstoffs gerechnet werden. Wie jedoch die Speicherung von Stadtgas (mit H₂-Gehalten von 40–60 Vol.-%) zeigte, lassen sich bei geeigneten Rahmenbedingungen die Gasverluste in einem Porenspeicher minimieren, so dass ein wirtschaftlicher Speicherbetrieb möglich ist. Erste Forschungsaktivitäten fokussierten auf Erdgasspeicherung in ausgeförderten Feldern mit einem H₂-Anteil von maximal 10–20 Vol.-% [10]. Daraus ergibt sich dringender Forschungsbedarf, z. B. zu Reaktionen und Wechselwirkungen mit den Speicher- und Deckgesteinen, zur Dichtigkeit von H₂-Speichern in Bezug auf Diffusionsverluste oder zu mikrobiologisch gesteuerten Gasumwandlungsprozessen.

Verbundprojekte mit Helmholtz-Beteiligung zur geologischen Speicherung von Wasserstoff

- **H2-UGS**

Prinzipielle Anforderungen an Salzkavernen zur Wasserstoffspeicherung werden von einem Projektkonsortium im BMBF-Verbundprojekt H₂-UGS untersucht. Besondere Schwerpunkte des Forschungsvorhabens liegen auf der Prüfung der Degradationssicherheit von Stahlwerkstoffen für den Einsatz unter Wasserstoff, auf Sicherheitsfragen der Geomechanik sowie Fragen zu mikrobiologisch gesteuerten Reaktionen. Mit numerischen Simulationen (FEM/DEM) werden Dichtheits- und Stabilitätsnachweise erbracht. Ziel ist die Entwicklung einer Methodologie für die technischen und genehmigungsrechtlichen Fragestellungen zur Speicherintegrität, d. h. die Erstellung eines Leitfadens für Genehmigungsbehörden und potenzielle Investoren.

- **HyCavMobil**

Das BMVI-Projekt HyCavMobil beschäftigt sich mit der Rolle von Kavernen für den Mobilitätssektor, in dem eine hohe Gasreinheit für die Anwendung von Wasserstoff in Brennstoffzellen erforderlich ist. Hierfür werden die Kavernenbedingungen in Testreaktoren simuliert und dabei auch die Eignung und Alterung bzw. Veränderung von Materialien im Zusammenhang mit der H₂-Reinheit für Kraftstoffanwendungen geprüft (► *Abbildung 2*). Eine Vielzahl physikalischer Untersuchungen, wie z. B. beschleunigte Alterung durch Temperaturzyklierung, Änderung in Kristallinität und Kristallstruktur, Rissbildung, optische und mechanische Änderungen etc. werden an Stahl, Dichtungen und Zement unter Kavernenbedingungen betrachtet. Mit Hilfe von Spurengasanalytik lassen sich Kontaminationen und chemische Reaktionen detektieren. Ein weiteres Projektziel ist die Systemintegration, d. h. die Feststellung geeigneter Standorte für die Netzintegration von Kavernen- und H₂-Erzeu-

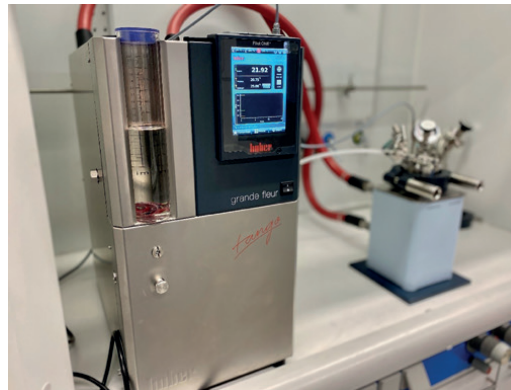


Abbildung 2
Simulation von Kavernenbedingungen in Testreaktoren
zur Validierung der Materialeignung für die Gewährleistung der H₂-Reinheit
(Quelle: DLR)

gungsanlagen, sowie die Kombination von Gas- und Stromnetz zur großskaligen Wasserstoffherstellung und Verteilung.

- **H2_ReacT-2**

Das BMBF-Verbundprojekt H₂_ReacT-2 untersucht in Fortsetzung des Vorgängerprojektes H₂_ReacT reaktive Transportprozesse von Wasserstoff im geologischen Untergrund und widmet sich grundlegenden petrophysikalischen, geochemischen und biogeochemischen Fragen der geologischen Wasserstoffspeicherung. Bisher sind Prognosen zum Langzeitverhalten und zur Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff-Porenspeichern nur eingeschränkt möglich, da u. a. verlässliche Daten zur Geschwindigkeit relevanter Redoxreaktionen oder zur Wasserstoffdurchlässigkeit von Deckschichten fehlen.

Forschungsschwerpunkte dieses Projekts sind

1. die Quantifizierung reaktionskinetischer Parameter chemischer und mikrobieller Redoxreaktionen,
2. die Bestimmung der spezifischen Adsorption von gasförmigem und gelöstem H₂ an Mineraloberflächen,
3. die Bestimmung der Durchströmungs- bzw. Diffusionseigenschaften von Speicher- und Deckgesteinen in Bezug auf H₂ (► *Abbildung 3*) und
4. die Bestimmung der H₂-Löslichkeiten in Salz-Fluid-Systemen unter Reservoirbedingungen.

Abbildung 3
Apparatur zur Bestimmung der molekularen H₂-Diffusion
mit innenliegendem, nichtverbrauchendem H₂-Sensor (links) und dessen Funktionsschema (rechts)
(Quelle: GFZ)

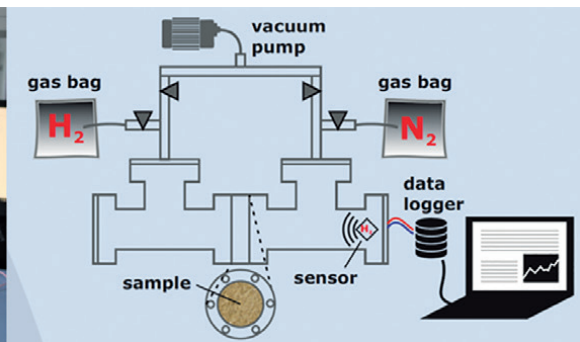
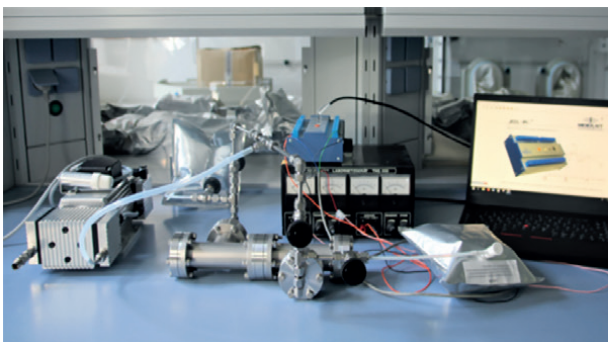
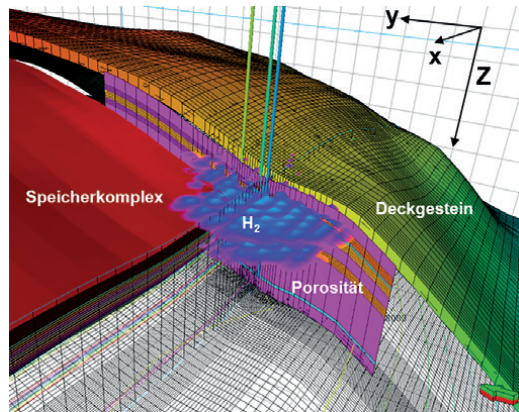


Abbildung 4
Numerische Simulation eines zyklischen H₂-Betriebs im Porenspeicher (saliner Aquifer)
(Quelle: GFZ)

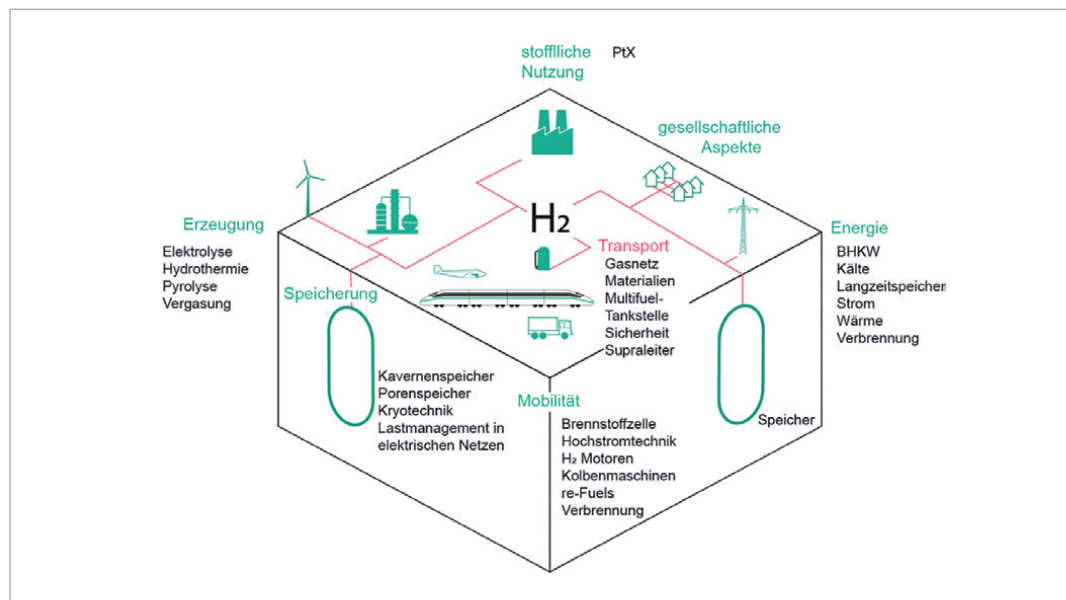


- **H₂VL**
Ein erster konzeptioneller Ansatz zur Speicherschließung soll im Rahmen des BMVI-Vorhabens H₂VL im Landkreis Havelland (Brandenburg) vorbereitet werden (► *Abbildung 4*). Dazu gehören:
 1. eine detaillierte geologische Erkundung, um die Eignung als Speicher zu belegen,
 2. Untersuchungen abiotischer und biotischer Reaktionen zwischen Reservoir- und Deckgestein und Porenfluiden,
 3. die Entwicklung und Anwendung geeigneter Methoden zur Überwachung physikalischer, chemischer und mikrobiologischer Prozesse im Speicher,
 4. die Abschätzung wirtschaftlich sinnvoller Injektions- und Rückförderraten im Speicherbetrieb und
 5. die Änderung von Kissengasanteil und Gaszusammensetzung im Verlauf weiterer Speicherzyklen.

- **SUBI und SAMUH₂**

Der Funktionalität, Integrität und dem Monitoring von Speichern unter zyklischer Belastung widmete sich bereits das BMBF Projekt SUBI (Sicherheit von unterirdischen Gasspeichern bei zyklischer Belastung: Funktionsfähigkeit, Integrität und Überwachung von Speicherstätten und Bohrungen). Das Projekt konzentrierte sich vor allem auf verbesserte Erschließungs- und Nutzungskonzepte von Kavernen- und Porenspeichern, um z. B. Veränderungen an der Oberfläche (z. B. fortwährende Subsidenz) und andere umweltrelevante Gefährdungen zu minimieren, als auch jährliche Speicherverluste zu vermeiden. Es wurde herausgearbeitet, dass ein Umrüsten von existierenden Speichern prinzipiell geht, jedoch kann der Aufwand individuell sehr groß und das Vorhaben damit auch unrentabel sein. In Untersuchungen haben sich Speichergesteine von Porenspeichern als langfristig stabil erwiesen, auch bei höherfrequenten Wechselbelastungen. Die Arbeiten zur Speicherschließung sollen durch das BMWK-Vorhaben SAMUH₂ fortgesetzt werden. Der Fokus dieses Projektes liegt in der Entwicklung von Strategien zur verbesserten Nutzung bestehender Kavernen- und Porenspeicher und der Auslegung moderner Speicher auf der Basis von systematischen Untersuchungen und einer holistischen Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von Untertage-Gasspeichern (► *Abbildung 5*).

Abbildung 5
Sektorübergreifendes Erschließungskonzept für die langfristige, effiziente und sichere Nutzung von Untertage-Gasspeichern (UGS)
(Quelle: KIT)



Aus den aktuellen Forschungsarbeiten lässt sich feststellen, dass alle großskaligen Speicheroptionen regionale Wertschöpfungseffekte liefern können, wovon sowohl die Wirtschaft profitiert (wie z. B. Energieproduzenten, Netzbetreiber, Untertage- und Explorationsunternehmen) als auch die Kommunen und die regionale Bevölkerung. Allerdings sollte die Bevölkerung rechtzeitig in den Planungsprozess mit eingebunden werden, um von Beginn an ihre Akzeptanz für derartige großtechnische Projekte zu gewinnen.

Zum Gelingen der Energiewende und für die Erreichung der klimapolitischen Ziele bedarf es des zügigen Ausbaus einer Wasserstoff-Infrastruktur mit geologischen Speichern, um die bedarfsgerechte Integration von Wasserstoff als Energieträger, Grundstoff und Speichermedium vorzubereiten. Die multi-disziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Forschungszentren kann dazu beitragen, Wissenslücken auf allen Fachgebieten (z. B. geologische Charakterisierung, Untergrundtechnologie und operativer Betrieb, Materialforschung, numerische Simulation zur Gasmigration im Speicher, technisch-ökonomische Analysen zur Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Speicheroptionen) zu schließen, die Vorlaufzeit zur Vorbereitung von Speicherdemonstratoren zu nutzen und durch Erstellung von Best-Practice-Handreichungen auch die regulativen Voraussetzungen für den Markthochlauf der Wasserstofftechnologien zu schaffen.

Bedingt durch den sehr guten Technologievorlauf aus dem konventionellen Gasspeichermarkt können deutsche Unternehmen hier ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken und ausbauen, indem sie zusammen mit der Forschung innovative Wasserstofftechnologien weiter entwickeln.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Die Nationale Wasserstoffstrategie, 2020 <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>
- [2] Prognos 2020, Klimaneutrales Deutschland, https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf
- [3] The Future of Hydrogen – IEA International Energy Agency, 2019
- [4] M. Warnecke und S. Röhling, Z. Dt. Ges. Geowiss. (J. Appl. Reg. Geol.) Open Access Article, 2021
- [5] LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Erdöl, Erdgas, Kohle, 11, 2020, 20–25 <https://doi.org/10.19225/201101>
- [6] Cedigaz, 2020, <https://www.cedigaz.org/underground-gas-storage-in-the-world-2020-status/>
- [7] BGR Hannover (2014). Der tiefere geologische Untergrund von Deutschland - Kurzübersicht über Verteilung und Dichte geowissenschaftlicher Daten und Informationen. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Karten/Der_tiefere_geologische_Untergrund_Dtl_auch_K_MAT_11.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D4
- [8] Fördervorhaben H2STORE (EU), H2_React (BMBF), HyINTEGER (BMWK) u. a.
- [9] HyUnder, 2013, http://hyunder.eu/wp-content/uploads/2016/01/D3.3_Benchmarking-of-selected-storage-options.pdf
- [10] RAG Österreich. <https://www.rag-austria.at/forschung-innovation/underground-sun-storage-2030.html>