

# Speicherung von Wasserstoff im Untergrund – Geologisches Potential in Deutschland

Anne Westhues

DEEP.KBB GmbH, Baumschulenallee 16, 30625 Hannover



Westhues

Um die Klimaschutzziele der europäischen Länder und die damit zusammenhängende Dekarbonisierung der Energieerzeugung und Rohstoffversorgung der Industrie zu erreichen, ist ein weiterer massiver Ausbau der erneuerbaren Energien (v.a. Solar- und Windenergie, Geothermie) unverzichtbar. Deutschland ist bei erneuerbarer Stromerzeugung auf einem guten Wege: Im Jahr 2022 wurden fast 50 % des gesamten Nettostroms (233,9 Terawattstunden – TWh) aus erneuerbaren Energieträgern erzeugt (Bundesnetzagentur, 2023). Allerdings unterliegt die Stromerzeugung insbesondere bei Solar- und Windenergie starken kurzfristigen bis saisonalen Schwankungen. So kann es im Extremfall zu sogenannten Dunkelflauten kommen, wenn die Stromerzeugung aus Solar- und Windenergie nicht ausreicht, um den Strombedarf zu decken. Diese können zukünftig nicht mehr durch fossile Energieträger ausgeglichen werden, so dass es anderer Wege bedarf, den Strombedarf zu decken. Auf der anderen Seite kommt es regelmäßig zur Abregelung von Windkraftanlagen, d.h. sie werden bei hohem Windaufkommen abgeschaltet, um Netzüberlastungen zu vermeiden.

Zu Zeiten hoher erneuerbarer Stromerzeugung, wenn häufig abgeregelt wird, sind die Strompreise vergleichsweise niedrig. Anstatt abzuregeln könnte der überschüssige und günstige Strom z.B. zur Wärmeerzeugung (Power-to-Heat) genutzt werden oder als Ausgleich für Zeiten mit hohem Energiebedarf gespeichert werden. Dazu spielen verschiedene Speicherlösungen wie Batterien, Pumpspeicher- oder Druckluftenergiespeicherkraftwerke bereits heute eine große Rolle. Um Energie auf großem Maßstab im hohem Gigawatt- bis

Terrawattstundenbereich zu speichern, hat Wasserstoff als chemischer Energieträger und Speichermedium das größte Potential. Dafür wird Strom genutzt, um durch Elektrolyse Wasserstoff zu erzeugen (Power-to-Hydrogen: PtH<sub>2</sub>). Dieser kann dann für die spätere Nutzung gespeichert werden. Die hohen Investitionskosten von Elektrolyseuren machen diese nur bei mindestens 50 % Auslastung rentabel. Daher wird von den Betreibern sicherlich zusätzlich zum Betrieb bei niedrigen Strompreisen (geringer Strombedarf/ hoher Anteil erneuerbarer Stromerzeugung) auch ein möglichst konstanter Betrieb der Elektrolyseure angestrebt werden.

Bei der Elektrolyse wird Wasser mit Hilfe von Strom in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten. Stammt der erzeugte Strom aus erneuerbaren Energien, spricht man von grünem Wasserstoff. Der erzeugte Wasserstoff ist ein wichtiges Element der Sektorkopplung und kann zum einen zur Wiederverstromung bei Spitzenbedarf genutzt werden, aber zum anderen auch in der Mobilität, z.B. Schwerlasttransport, und Industrie (Abbildung 1). Vor allem bei letzterem kann Wasserstoff fossile Kraft- und Rohstoffe ersetzen, beispielsweise Erdgas in der Ammoniak-Produktion oder Koks in der Stahlproduktion und so einen großen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten.

Zur Speicherung von Wasserstoff gibt es Lösungen mit verschiedenen Kapazitäten. Obertägig sind Röhrenspeicher eine flexible Option, die unabhängig von der Geologie errichtet werden können. Allerdings sind im Vergleich zu anderen Optionen die spezifischen Investitionskosten (€/m<sup>3</sup>) hoch und die Speicherkapazität

Zur Erreichung der Klimaschutzziele und Dekarbonisierung der Energieerzeugung und Industrie wird in Deutschland und Europa der Ausbau erneuerbarer Energien (v.a. Solar- und Windenergie, Geothermie) vorangetrieben. Die daraus resultierende fluktuierende Stromerzeugung, meist nicht mit dem Strombedarf überlappend, kann in Zukunft nicht mehr durch fossile Energieträger ausgeglichen werden, sondern muss gespeichert werden. Wasserstoff als chemischer Energieträger bietet dazu eine gute Option im Gigawatt- bis Terawattstundenbereich. Als großskalige Speicheroption für Wasserstoff bieten sich Salzkavernen an, die schon jahrzehntlang erprobt und Stand der Technik sind. Die bestehenden Kavernen in Deutschland reichen dabei nicht für die prognostizierten Speicherbedarfe aus, Deutschland verfügt aber über ein großes geologisches Potential, neue Kavernen im Untergrund anzulegen.

## Hydrogen Storage Underground – Geological Potential in Germany

To achieve the climate change objectives and decarbonisation of power generation and industry, Germany and Europe are expanding their renewable energies (esp., solar, wind and geothermal energy) vastly. The resulting fluctuation power generation, usually not equalling the current demands, cannot be balanced by fossil fuels in the future and has to be stored instead. Hydrogen as a chemical energy carrier is a good option for the gigawatt- to terawatt-hour range. Salt caverns offer a large-scale storage option for hydrogen that have been used for decades and are state of the art. The existing caverns in Germany are not sufficient for the forecasted storage needs. However, Germany has a large potential for the underground construction of new caverns.

### Schlagworte Keywords

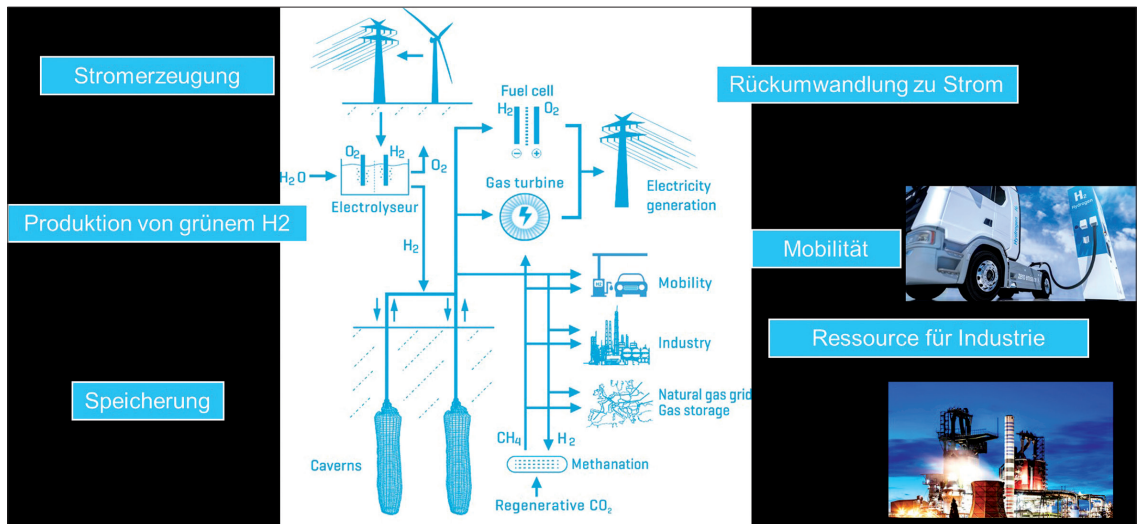
Wasserstoff  
*Hydrogen*

Salzkavernen  
*salt caverns*

Energiewende  
*energy transition*

Energiespeicherung  
*energy storage*

**Abb. 1: Grüner Wasserstoff als Element der Sektorenkopplung ermöglicht Integration der Erneuerbaren Energien in bestehende Infrastruktur.**



von ca. 0,5 t H<sub>2</sub> (entspricht etwa 15 Megawattstunden, MWh) gering.

Speicherung von Wasserstoff im Giga- bis Terrawattstundenbereich ist nur im Untergrund zu erreichen. Mittlere Speicherkapazitäten (etwa 100 t H<sub>2</sub>, 3 Gigawattstunden, GWh) lassen sich mit gasdicht ausgekleideten Großbohrungen erreichen. Diese Lösungen werden von verschiedenen Firmen auf ihre Machbarkeit untersucht, da bisher keine Erfahrungswerte bestehen. Es ist mit hohen spezifischen Investitionskosten zu rechnen. Allerdings sind solche ausgekleideten Großbohrungen ebenfalls größtenteils unabhängig von der Geologie.

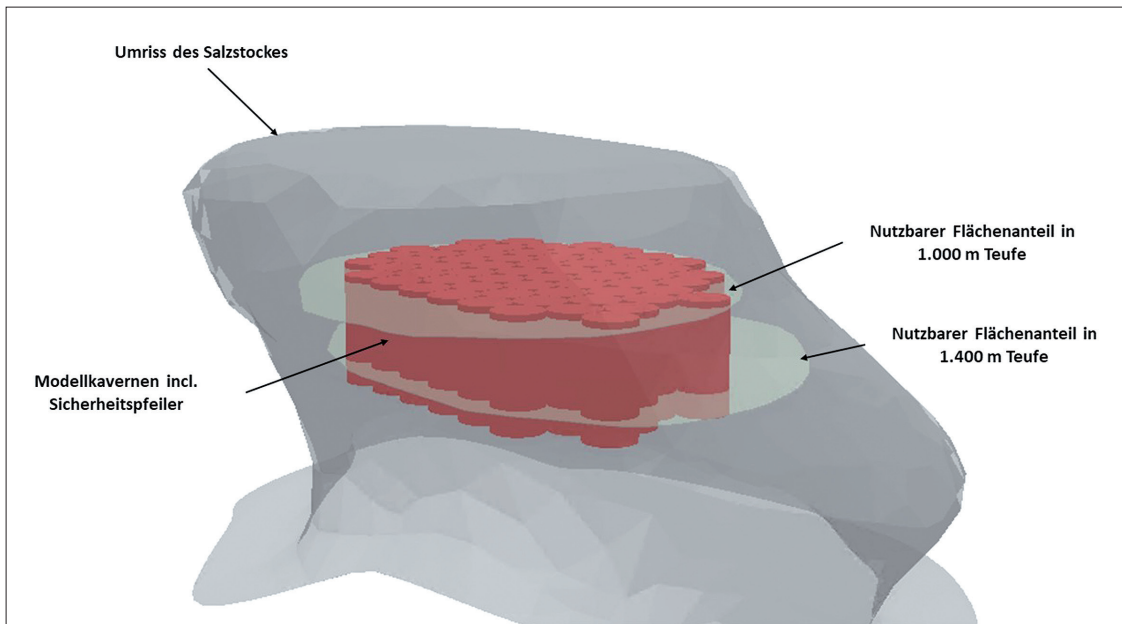
Größere Speicherkapazitäten lassen sich mit Felskavernen erreichen (bis zu 100 GWh), die zum Beispiel in Skandinavien bereits zur Speicherung von Erdgas genutzt werden. Die Felskavernen sind relativ unabhängig von der Geologie, da sie in verschiedenen Gesteinen (z.B. Plutoniten und bestimmten metamorphen Gesteinen) errichtet werden können. Sie müssen zur Gasspeicherung ebenfalls gasdicht ausgekleidet werden (lined rock caverns - LRC). Die spezifischen Investitionskosten sind auch hier recht hoch. Die Speicherung von Wasserstoff in einer Felskaverne wird derzeit im Pilotprojekt HYBRIT von einem Konsortium in Nordschweden getestet, zunächst auf kleinerem Volumen von 100 m<sup>3</sup>, das später auf bis zu 120.000 m<sup>3</sup> erweitert werden soll (Vattenfall, 2022).

Die Wasserstoffspeicherung in Porenspeichern (ausgeförderte Kohlenwasserstoff (KW)-Lagerstätten oder Aquifere) ist eine großvolumige Option mit sehr hoher Speicherkapazität, die sich generell auch durch hohe Dichteit, besonders bei ausgeförderten Kohlenwasserstoff-Lagerstätten, auszeichnet. Allerdings ist die Flexibilität dieser Speicher gering, sodass sie sich vor allem für die saisonale Speicherung eignen, wie derzeit zur Speicherung von Erdgas. Ein großer Teil des gespeicherten Gases muss als sogenanntes Kissengas in der Lagerstätte verbleiben. Weiterhin sind hier chemische und mikrobiologische Reaktionen des Wasserstoffs zu erwarten. Mit Stadtgas, einem Erdgas-Wasserstoff-Gemisch, hat man gewisse Erfahrungen zur Speicherung von Mischgas mit H<sub>2</sub>-Anteil gemacht (Fasano und Molinard, 1989). Dennoch besteht ein

hoher zusätzlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Beispielsweise wird hierzu seit dem Frühjahr 2023 im Forschungsprojekt „Underground Sun Storage“ der RAG Austria AG und Partnern in einer unterirdischen natürlichen Gaslagerstätte die saisonale großvolumige Speicherung von Wasserstoff getestet.

Zur groß angelegten Speicherung von Wasserstoff bieten sich vor allem unterirdische Salzkavernen an, die in den USA und Großbritannien bereits seit vielen Jahren und Jahrzehnten auch zur Wasserstoffspeicherung für die chemische Industrie genutzt werden. Die Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen zeichnet sich durch eine sehr hohe Speicherkapazität aus. So kann für eine durchschnittlich große Kaverne von ca. 500.000 m<sup>3</sup> Hohlraumvolumen kann mit einer Speicherkapazität von ca. 180 GWh pro Kaverne gerechnet werden, abhängig von Teufenlage und zulässigem Druckbereich. Daraus ergeben sich geringe spezifische Investitionskosten im Vergleich zu anderen Speicheroptionen. Dazu kommen eine hohe Dichteit und Sicherheit von Salzkavernen, die durch die Nutzung für die Speicherung von Erdgas bekannt sind.

In Deutschland sind derzeit 273 Erdgas-Kavernenspeicher und 104 Kavernenspeicher für Rohöl, Mineralöl, Flüssiggas in Betrieb, die sich vor allem in Nord- und Mitteldeutschland befinden. Dazu kommen noch 16 Porenspeicher (11 ausgeförderte KW-Lagerstätten und 5 Aquifere), die momentan zur Untertage-Erdgasspeicherung genutzt werden (LBEG, 2022). Nach den aktuellsten Prognosen wird die Umrüstung der bestehenden Kavernenspeicher allein nicht ausreichen, um den zukünftigen Speicherbedarf von Wasserstoff zu decken. Ein Grund hierfür ist, dass Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas das etwa vierfache Speichervolumen benötigt, um die gleiche Menge an Energie zu speichern. Wenn sämtliche bestehenden Kavernenspeicher und ein Teil der Porenspeicher (generell weniger gut geeignet) umgerüstet würden, ließe sich dadurch eine Speicherkapazität von Wasserstoff von 32 TWh erreichen (Bültemeier et al., 2022). Dazu muss allerdings noch die Tauglichkeit der bestehenden Speicher für die Speicherung von Wasserstoff geprüft werden. Das Bundesministerium für Wirtschaft und



**Abb. 2:** Platzierung von Modellkavernen in einem Salzstock in Deutschland, Salzumriss nach BGR (2021), angenommener nutzbarer Flächenanteil von 67 % nach BGR (2016).

Klima rechnet für das Jahr 2050 mit einem wesentlich Wasserstoffspeicherbedarf von 47 bis 73 TWh (Prognose von 2021), so dass neue Wasserstoffspeicher zur Abdeckung des Bedarfs in jedem Falle benötigt werden.

Die Salzvorkommen in Europa, insbesondere in Deutschland, bieten ein beträchtliches geologisches Potential zum Bau von neuen Salzkavernen zur Wasserstoffspeicherung. Kavernen können dabei sowohl in horizontal abgelagertem Schichtensalzvorkommen als auch in Salzstrukturen, die durch tektonische Prozesse und Halokinese entstanden sind, angelegt werden. Voraussetzungen zur Anlage von Salzkavernen sind Salzvorkommen in passenden Teufenlagen und mit ausreichender Mächtigkeit. In Deutschland sind dabei vor allem das Rotliegend-Salinar und das Zechstein-Salinar von Bedeutung, wobei letzteres die größte Mächtigkeit und Verbreitung aufweist. Zur optimalen Wirtschaftlichkeit liegt das Salztop dabei bei maximal 1.500 m und hat mindestens 200 m mächtige geeignete Steinsalzbereiche (gewisse Variationen je nach Kavernengröße und Stratigraphie, Noack et al., 2015). Außerdem spielen auch die Salzqualität (Anteil nicht löslicher Feststoffe sowie leicht löslicher Bestandteile wie Kaliumsalze) eine wichtige Rolle zur erfolgreichen Lösung von neuen Kavernen.

In Deutschland sind die verfügbaren geologischen Daten im internationalen Vergleich sehr umfangreich, was zum einen durch umfangreiche Erdöl- und Erdgas-explorationsprogramme und zum anderen durch die langjährige Nutzung von Salzvorkommen begründet ist. GIS-basierte Datensammlungen aus den InSpEE und InSpEE-DS Studien (BGR, 2016, 2020) sowie des TUNB Verbundprojekts (BGR, 2021) bieten wichtige Entscheidungshilfen, um die bestmöglichen Lokationen von neuen Speicherstandorten als auch die Erweiterungsmöglichkeiten von bestehenden Standorten zu bestimmen. Das bei den InSpEE-Studien theoretisch ermittelte Speicherpotential für Wasserstoff (InSpEE: 1.614 TWh + InSpEE-DS: 1.712 TWh) übertrifft den prognostizierten Speicherbedarf deutlich.

Das öffentlich zugängliche 3D-Modell des TUNB-Projekts (BGR, 2021) bietet die Möglichkeit, die potentielle Wasserstoffspeicherkapazität von 266 Salzstrukturen in Deutschland detailliert abzuschätzen. Durch die Platzierung von Modellkavernen im dreidimensionalen Raum, unter Berücksichtigung von Liegend- und Hangendschweben als auch Sicherheitspfeiler zwischen den Kavernen, kann die theoretisch mögliche Speicherkapazität von einzelnen Strukturen abgeschätzt werden (siehe Abbildung 2). In dem gezeigten Beispiel könnten theoretisch 61 Kavernen (je V: 590.000 m<sup>3</sup>, Energiegehalt 150 - 190 GWh, je nach Betriebsweise, Kavernendach bei 1.150 m) angelegt werden, was einem Energiegehalt von 9-12 TWh insgesamt entspricht.

Auch außerhalb Deutschlands besteht ein erhebliches Potential zur Errichtung von neuen Salzkavernen zur Wasserstoffspeicherung, welches die prognostizierten Speicherbedarfe decken könnte (Caglayan, et al., 2020). Dieses Potential auch zu nutzen und sowohl Speicher als auch die dazugehörige Infrastruktur aufzubauen, ist ein unabdingbarer Schritt für eine funktionierende Wasserstoffwirtschaft. Dazu gehören der weitere Ausbau der Erneuerbaren Energieträger, Aus- und Umbau des Erdgaspipelinetzes auf Wasserstoff, Bau von Elektrolyseanlagen, als auch der Bau von Terminals für den unumgänglichen Import von Wasserstoff und seiner Derivate, wie z.B. Ammoniak, aus anderen Ländern.

Um den sicheren Betrieb von Wasserstoffkavernen nach europäischen Standards zu etablieren, werden derzeit in Deutschland und anderen Ländern Pilotprojekte durchgeführt (z.B. H2CAST in Etzel, HYPOS in Bad Lauchstädt, HyCavMobil in Rüdersdorf, HyStock in Zuidwending (NL)). Schwerpunkte liegen dabei auf den wasserstoffspezifischen Anforderungen an den Betrieb, Umrüstungsmaßnahmen bestehender Kavernen und Wechselwirkungen von Wasserstoff mit Materialien, Salzgestein und Mikrobiologie. Darauf aufbauend sollte der Neubau von Salzkavernen möglichst schnell vorangetrieben werden, um den prognostizierten Speicherbedarf in Zukunft decken zu können.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass für die Speicherung von erneuerbarer Energie Wasserstoff als chemischer Energieträger ein sehr großes Potential bietet. Wasserstoff kann ein entscheidendes Element in der Sektorkopplung sein, und kann z.B. in der Industrie in großem Maßstab fossile Energieträger ersetzen. Deutschland hat sehr gute geologische Voraussetzungen, die untertägigen Speicherkapazitäten für Wasserstoff durch den Neubau von Salzkavernen zu erweitern. Zum Aufbau einer funktionierenden Wasserstoffwirtschaft ist dabei auch der Ausbau der Infrastruktur (Import, Verteilnetze etc.) notwendig.

### Literaturverzeichnis

1. BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2016). Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft). Hannover.
2. BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2020). Informationssystem Salz: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) - Doppelsalinare und flach lagernde Salzschieben. Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie. Hannover.
3. BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2021). TUNB – Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes im Norddeutschen Becken. Hannover.
4. BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2021). Geoviewer TUNB. Von [https://gst.bgr.de/?view=tunb\\_grenzen](https://gst.bgr.de/?view=tunb_grenzen) abgerufen
5. Bültmeier, H., Schlichtenmayer, M., Kruck, O., & Abdel Haq, C. (2022). Wasserstoff speichern - Soviel ist sicher. Transformationpfade Gasspeicher. DVGW, INES, BVEG.
6. Bundesnetzagentur. (04. Januar 2023). Bundesnetzagentur veröffentlicht Daten zum Strommarkt 2022. Von [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/20230104\\_smdr.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/20230104_smdr.html) abgerufen
7. Caglayan, D., Weber, N., Heinrichs, H., Linßen, J., Robinus, M., Kukla, P., & Stolten, D. (2020). Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*.
8. Fasanio, G., & Molinard, J. E. (1989). Mixing in underground gas storage. In M. R. Tek (Ed.), *Underground storage of natural gas. Theory and practice*. NATO Advanced Study Institutes Series, E 171, 301–325.
9. LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. (2022). Untertage Gasspeicherung in Deutschland. *Erdöl, Erdgas, Kohle*, 138, 25–33. <https://doi.org/10.19225/221101>
10. Noack, C., Burggraf, F., Hosseiny, S. S., Lettenmeier, P., Kolb, S., Belz, S., Kalló, J., Friedrich, K. A., Pregger, T., Cao, K. K., Heide, D., Naegler, T., Borggreffe, F., Bünger, U., Michalski, J., Raksha, T., Voglstätter, C., Smolinka, T., Crotogino, F., Donadei, S., Horvath, P.-L., Schneider, G.-S. (2015). Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck. 299 p.
11. Vattenfall. (14. Juni 2022). HYBRIT: A unique, underground, fossil-free hydrogen gas storage is being inaugurated in Luleå. Von <https://group.vattenfall.com/press-and-media/pressreleases/2022/hybrit-a-unique-underground-fossil-free-hydrogen-gas-storage-facility-is-being-inaugurated-in-lulea> abgerufen