

# Aus Experimenten wächst Planung – Labore bereiten den Weg für geologische Wasserstoffspeicherung

Prof. Dr. Ingo Sass; Wisdom David, M.Sc.; Lea Döpp, M.Sc.;  
Dr. Anna-Maria Eckel; Dr. María Belén Febbo; Dr. Peter Pilz;  
Dr. Cornelia Schmidt-Hattenberger, Dr. Juliane Kummerow,  
Dr. Mrityunjay Singh, Dr. Nora Wolff

Sektion 4.3 Geoenergie  
Potsdam, 16. Oktober 2025

# Wasserstoffspeicherung im Kontext des Energiesystems

.... Strom  
— H<sub>2</sub>  
-- Wärme



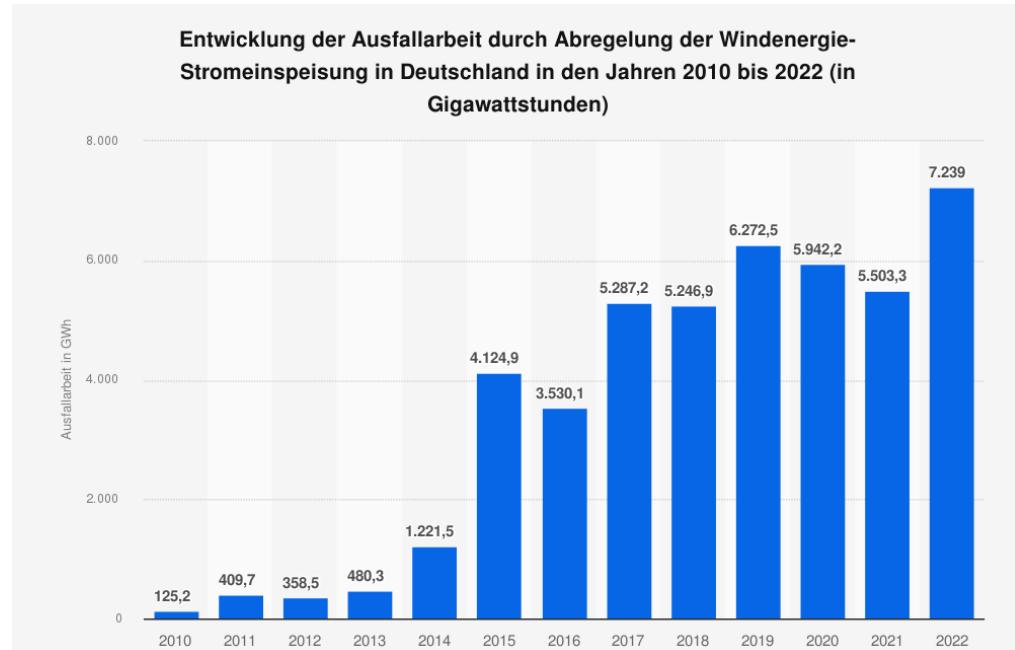
- Fluktuation der erneuerbaren Energien ausgleichen
- Sektorenübergreifende Dekarbonisierung (Strom + Wärme + Verkehr + Industrie)
- Versorgungssicherheit durch hohe Speicherkapazität

# Wasserstoffspeicherung im Kontext des Energiesystems

Der **Ausbau erneuerbarer Energien** in Deutschland bringt Chancen zur autarken und nachhaltigen Energieversorgung.

## Herausforderungen:

- Stromspeicherung im TWh Bereich
- Sektorenkopplung
- Dekarbonisierung energieintensiver Industrie



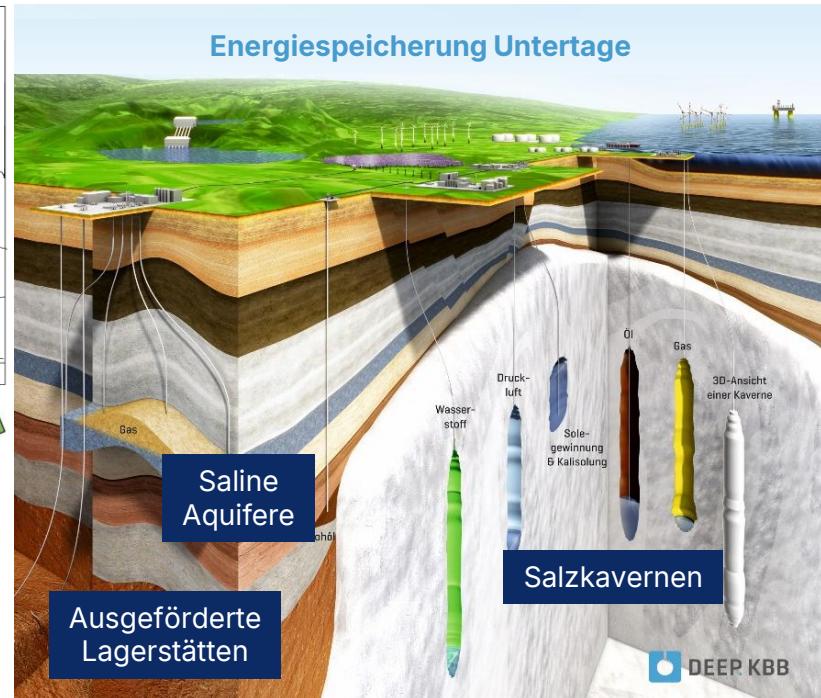
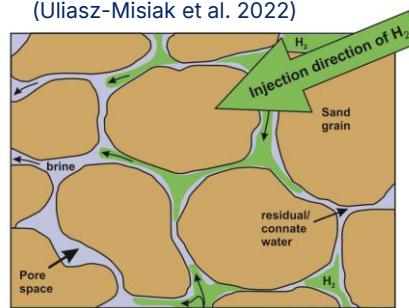
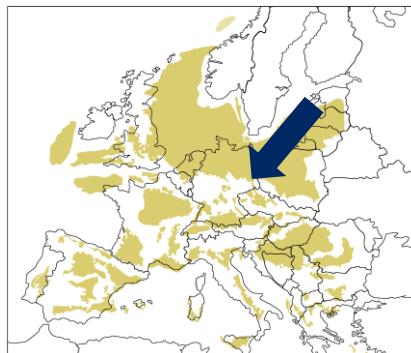
Quelle: Bundesnetzagentur, Monitoringbericht 2023

# Wasserstoffspeicherung im Untergrund

## Porespeicher

### Saliner Aquifer

- Sedimentbecken in Europa
- Speicherkapazität im GWh-TWh Bereich
- Geringer Ausbauaufwand
- Jahrzehntelange Erfahrung in Erdgasspeicherung



(Verändert nach DEEP KBB)

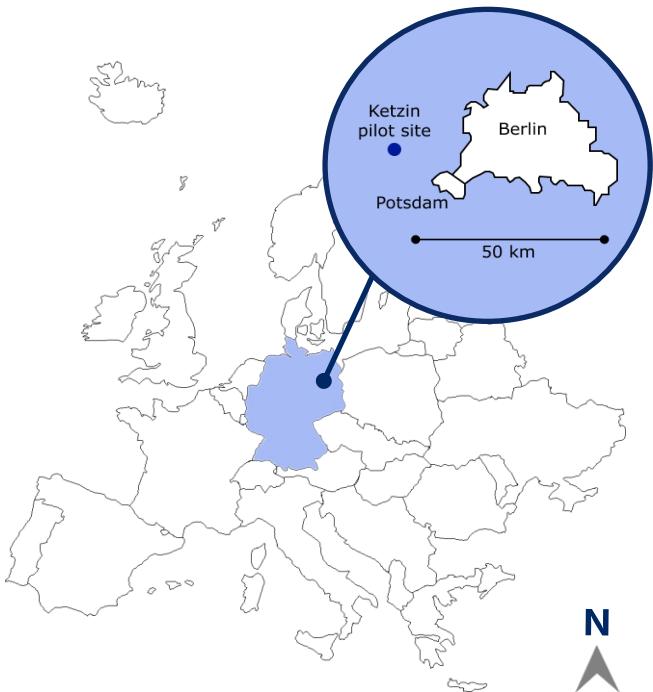
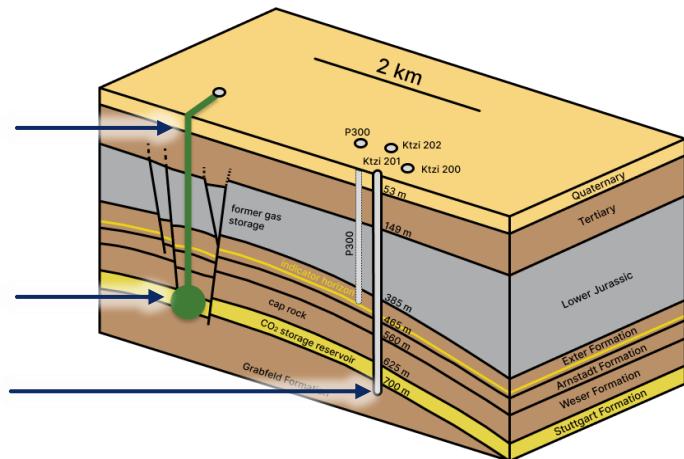
# Fallbeispiel Speicherstandort Ketzin

- 1964-1999 Speicherung von Stadtgas und Erdgas
- 2004-2017 Speicherung von CO<sub>2</sub>
- 2022-2026 Experimentelle und numerische Studien zu H<sub>2</sub> (Projekt GEOZeit/HyPrepare)

Injektions- und Förderbohrung

Reservoir Stuttgart Formation

Ehemaliger CO<sub>2</sub> Speicher

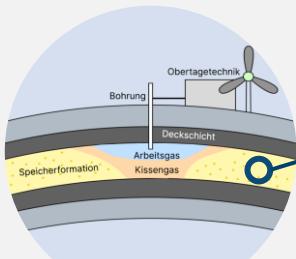


Verändert nach Liebscher et al. (2013)  
und Martens et al. (2012)

# HyPrepare: Ein multi-disziplinärer Forschungsansatz (Phase 1)



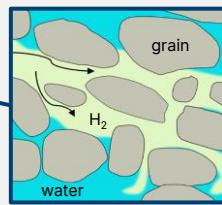
## Geologische Charakterisierung



Charakterisierung des Reservoir- und Deckgestein in einem geologischen Modell



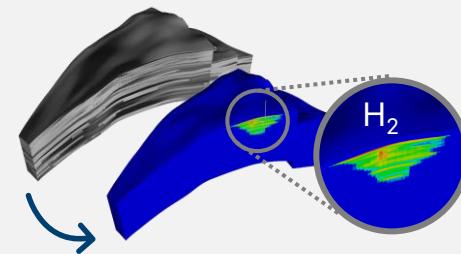
## Wasserstofflabor und petrophysikalisches Labor



Petrophysikalische Untersuchungen der Fluid-Gestein-Mikroben Wechselwirkungen



## Numerische Modelle der H<sub>2</sub> Speicherung



Modellierung des H<sub>2</sub> Transports und Ausbreitung im Reservoir

# Wasserstoff im Untergrund – wie viel löst sich im Formationswasser?

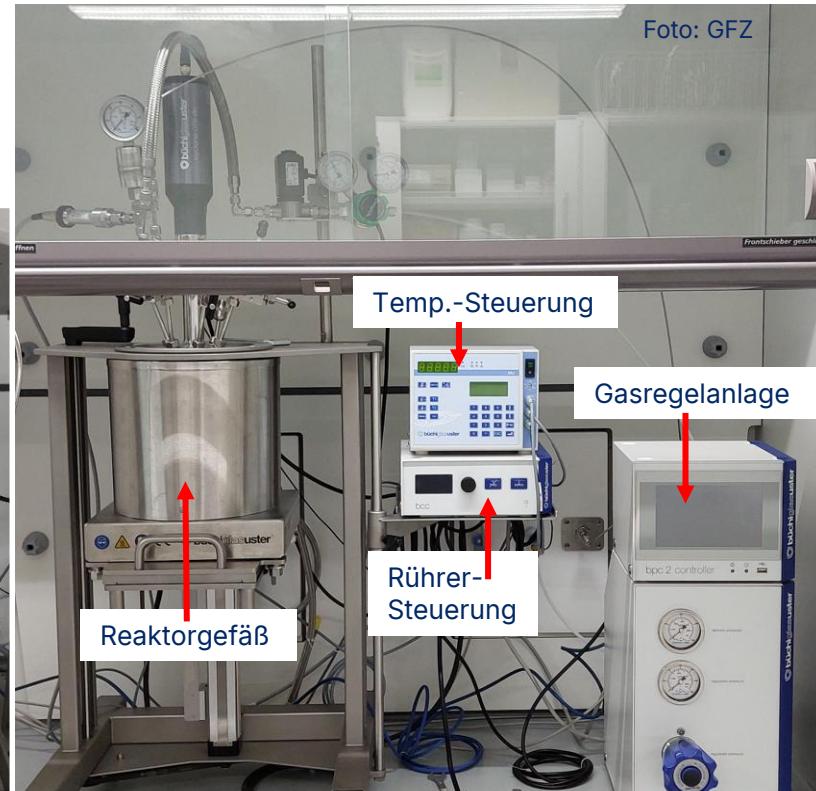
## Wasserstofflöslichkeit

$H_2$ -Löslichkeitsexperimente in komplexen  $H_2O$ - $H_2$ -Salz-Systemen unter Reservoirbedingungen

**Messprinzip:** Berechnung der gelösten  $H_2$ -Menge aus Gasverbrauch und Druckabfall in einem Autoklav

- Reaktionstemperatur bis 100°C
- Druck 50 – 200 bar
- Magnetrührer 800 U/min

**Ziel:** realitätsnahe Reservoir-Simulation von Wasserstoffspeichern, Beurteilung möglicher Speicherverluste



# Bleibt der Wasserstoff, wo wir ihn speichern?

## Wasserstoffdiffusion

Experimente an Gesteinsproben, die ein typisches Speichermedium für H<sub>2</sub> im Untergrund repräsentieren

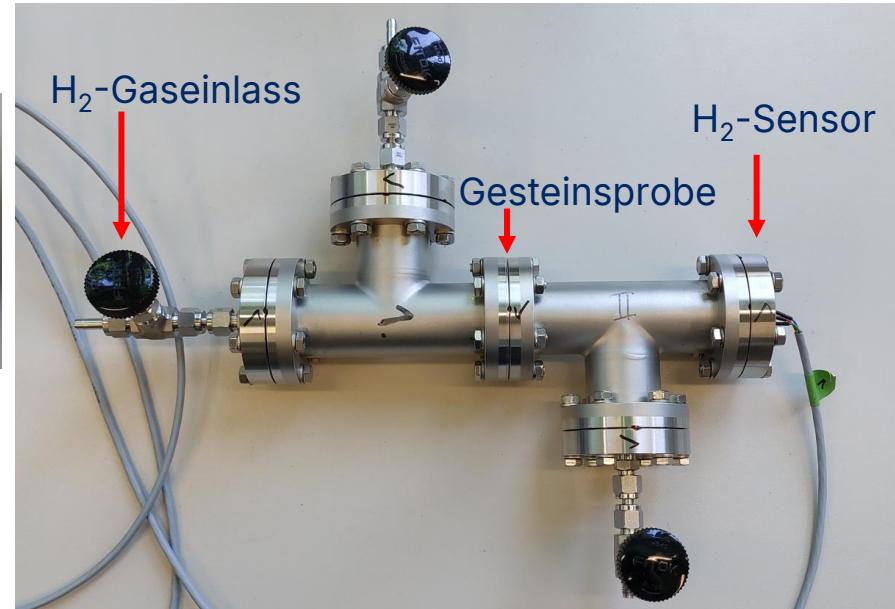


## Messprinzip:

2 Gaskammern → Diffusion durch Gesteinsprobe zum H<sub>2</sub>-Sensor

## Ziel:

- Abschätzung von Wasserstoffverlusten und mögliche Sicherheitsrisiken
- Bewertung von Materialdichtheit



Diffusionszelle Setup mit Gesteinsprobe (oben links),  
Fotos: GFZ.

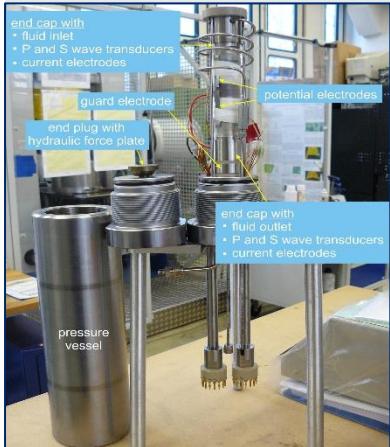
# Experimentierplattformen zur Reservoirsimulation

## SEPP

$p_{\text{conf}} = 40 \text{ MPa}$  (Tiefe < 2 km)

$p_{\text{pore}} = 25 \text{ MPa}$

$T_{\text{max}} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$



## ITHERLAB

$p_{\text{conf}} = 200 \text{ MPa}$  (Tiefe < 8 km)

$p_{\text{pore}} = 100 \text{ MPa}$

$T_{\text{max}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$



## FLECAS-HT

$p_{\text{conf}} = 40 \text{ MPa}$  (Tiefe < 2 km)

$p_{\text{pore}} = 25 \text{ MPa}$

$T_{\text{max}} = 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$

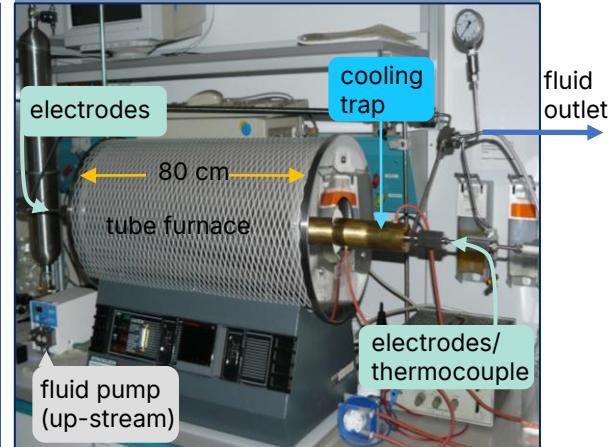


## Fluid Conductivity Cell

$p_{\text{conf}} = 40 \text{ MPa}$  (Tiefe < 2 km)

$p_{\text{pore}} = 40 \text{ MPa}$

$T_{\text{max}} = 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$



## Gemessene Parameter

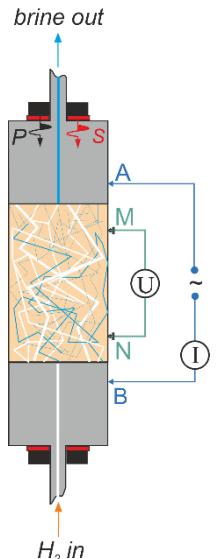
- (Relative) Permeabilität
- Elektrischer Widerstand
- P- und S-Wellen Geschw.
- Fluid sampling

- (Relative) Permeabilität
- Temperaturleitfähigkeit
- Wärmeleitfähigkeit
- Fluid sampling

- (Relative) Permeabilität
- Elektrischer Widerstand
- Fluid sampling

- Elektrische Eigenschaften von Fluiden
- Elektrisches Widerstands-Monitoring während des reaktiven Flusses
- Minerallöslichkeitsraten
- Fluid sampling

# Durchströmungsversuche zur Bestimmung petrophysikalischer Parameter

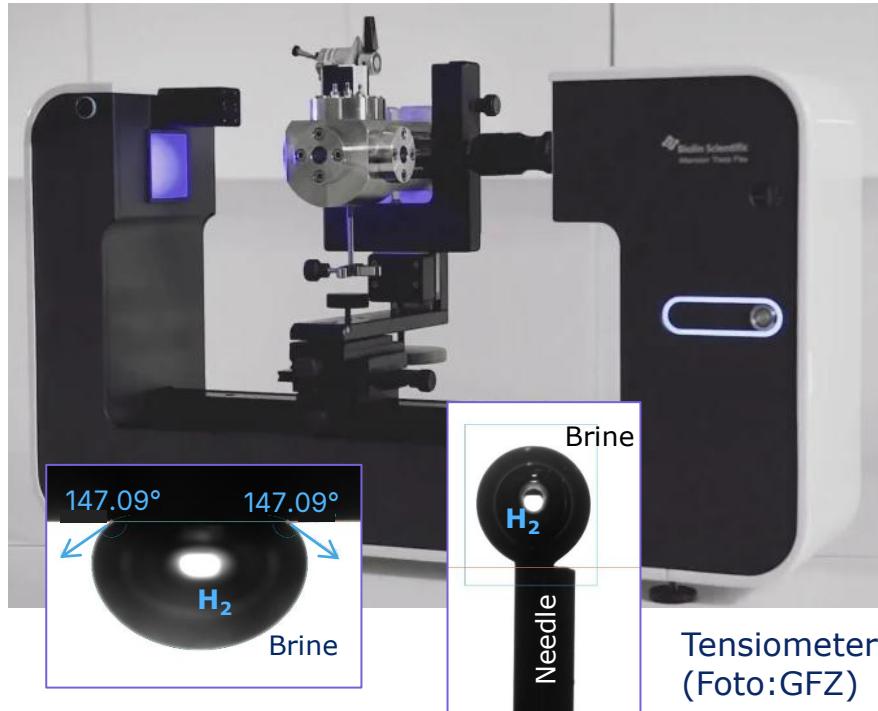


$p_{\text{conf}} = 150$  bar  
 $p_{\text{pore}} = 75$  bar  
 $T = 37$  °C  
Porenfluid: hoch-salinar

## Laborverfahren zur Untersuchung der Wasserstoffspeicherung in porösen Medien:

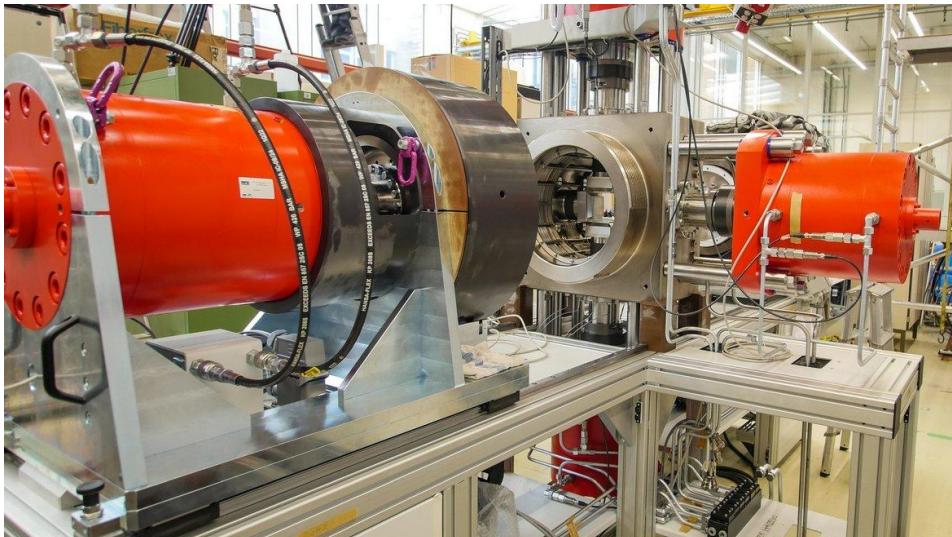
- Bestimmung der **relativen Permeabilität** durch sukzessive Verdrängung von Salzlösung mit  $\text{H}_2$
- Konstante maximale  $\text{H}_2$ -Sättigung über 2–4 Wochen
- **Rückgewinnung von  $\text{H}_2$**  durch Injektion von Salzlösung
- **Gasprobenahme** zur chemischen Analyse
- Durchführung von 2–3 Zyklen (abiotische und biotische Betriebsweise möglich)

# Kontaktwinkel- und Oberflächenspannungs-Messung



- Der Kontaktwinkel zwischen Wasserstoff, Formationswasser und Gesteinsoberfläche bestimmt die **Verteilung von H<sub>2</sub> im Porenraum**.
  - Die Oberflächenspannung (zwischen H<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O) beeinflusst die **Kapillardruck-Kurve im Poresystem**.
- Beide Parameter haben Einfluss auf die **Speicherkapazität** und die **Rückgewinnungsrate von Wasserstoff**.

# Mit dem H<sub>2</sub>-THM-System die Kräfte im Untergrund messbar machen



Hochdruck-Prüfanlage für Gesteinsproben „TrueTriax“ (Foto: GFZ)  
Gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) durch das Land Brandenburg via ILB, und aus Mitteln des GFZ.

## H<sub>2</sub>-THM-Triaxial System:

- Untersuchung thermischer, hydraulischer und mechanischer Prozesse bei der H<sub>2</sub>-Speicherung.

## Nutzen für Speicherbetreiber:

- **Realitätsnahe Labordaten:** Simulation der Speicherbedingungen (Druck, Temperatur, Spannungen) unter kontrollierten Bedingungen
- **Bewertung der Speicherstabilität:** Reaktion des Gesteins auf Druckzyklen und Gasinjektion – Schlussfolgerungen für die Integrität der Speicherformation.

# Vorhaben H<sub>2</sub>-THM-Triax (Phase 2)

Untersuchung Thermisch-Hydraulisch-Mechanischer Prozesse

## Arbeitsabläufe



Multidisziplinäre  
Laborexperimente



Zyklische  
Belastungsprozesse



Porennetzwerkanalyse



Molekulardynamische  
Untersuchungen

## Ziele

- Bewertung der **Reservoirtüchtigkeit**
- Analyse **mechanischer Prozesse** für sicheren Speicherbetrieb
- **Open Access Datenbank** für Wissenstransfer in Forschung und Industrie

# Von der Molekùlbewegung zum Poreennetzwerk – wie Wasserstoff im Gestein „unterwegs“ ist



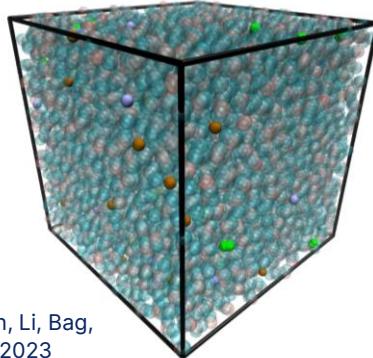
$H_2O$



$H_2$

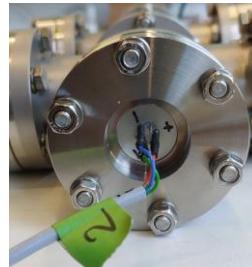
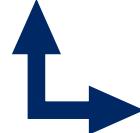


$NaCl$



Bhimineni, Zhou,  
Mahmoodpour, Singh, Li, Bag,  
Sass, Müller-Plathe, 2023

Einfließen  
thermodynamischer  
und kinetischer  
Eigenschaften



Teil der Diffusionszelle  
(Foto: GFZ)

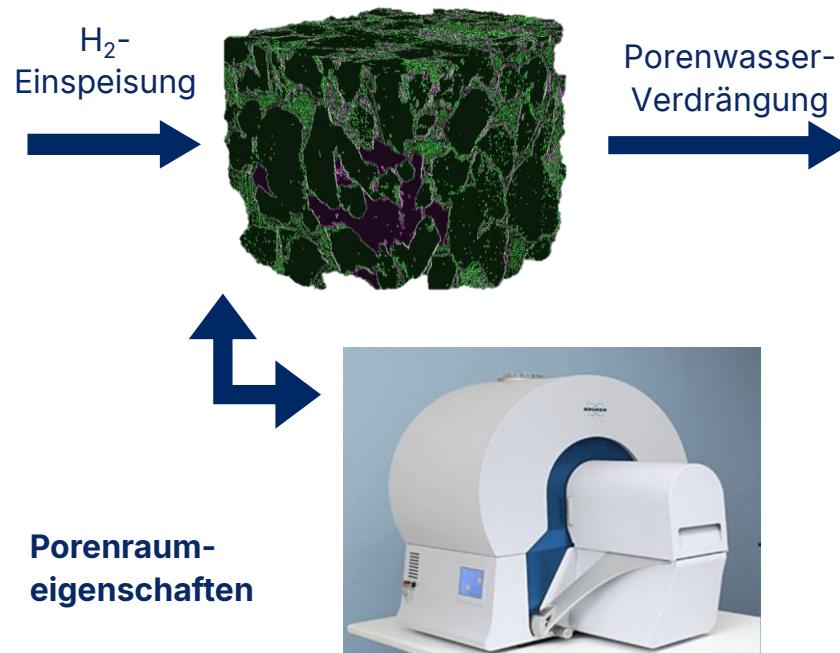
## Molekùl-Skala (Gasmolekùle)

- Molekùldynamik (MD) beschreibt die Molekùlbewegungen und Wechselwirkungen
- Liefert eine Methodik, um die experimentellen Beobachtungen bei  **$H_2$ -Diffusion** und  **$H_2$ -Löslichkeit** zu interpretieren oder zu extrapolieren.

## Nutzen für Speicherbetreiber:

- **Effizienz:** Optimierung der Befüllung und Entnahme von Wasserstoff im Speicher
- **Planung:** Grundlage für langfristige Simulationen und Entscheidung über Speicherbetrieb und Kapazität

# Vom Porennetzwerk bis zur Molekùlbewegung – wie Wasserstoff im Gestein „unterwegs“ ist



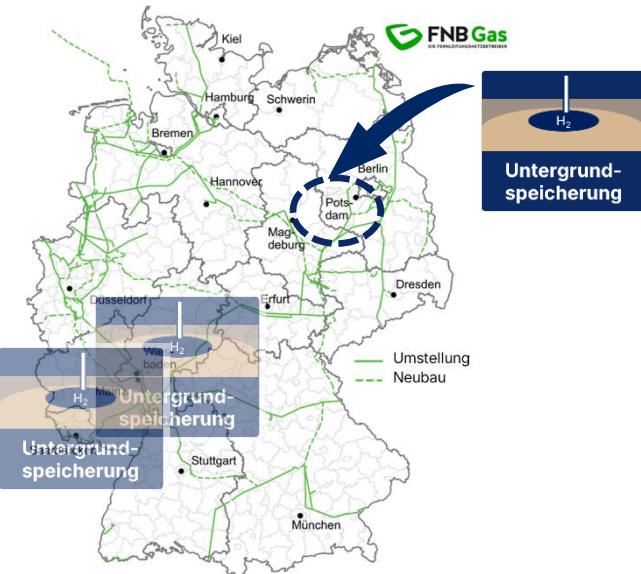
## Porenraum-Skala (Bohrkern)

- **Phasenfeld-Modelle** zeigen für die Bohrkerndaten, wie sich Wasserstoff, Porenwasser und Gestein im Porenraum verhalten.

## Nutzen für Speicherbetreiber:

- **H<sub>2</sub>-Verteilung verstehen:** Gleichmäßige Migration im Reservoir oder Verdrängung infolge von Druck- und Strömungsgradienten in einzelnen Speicherzonen.
- **Sicherheit erhöhen:** Engstellen oder schlecht durchströmte Bereiche frühzeitig erkennen, Risiken minimieren

# Zukunftsprojekt HyAquistore - H<sub>2</sub>-Speicherung im salinen Aquifer



Wasserstoff-Kernnetz (Bundesnetzagentur 2024)

**Skalierbarer H<sub>2</sub>-Demonstrator mit Infrastruktur für Injektion, Speicherung und Rückförderung**  
→ Übertragung des Konzepts auf verschiedene Standorte als **Demonstrator-Portfolio**

Integration umfangreicher Echtzeitüberwachung mit geophys./ geochem. Sensoren → Speichersicherheit und Umweltmonitoring

Kombination von Wasserstoffspeicherung mit Power-to-Gas-Anlagen und erneuerbaren Energien → Wirtschaftlichkeitsanalysen

Öffentlichkeitsarbeit zur Akzeptanz neuer Technologien  
→ Förderung der Wasserstoffwirtschaft

# Potenzielles Konsortium für H<sub>2</sub>-Demonstratorkonzept

## Raum für weitere Partner und Ideen

**Unterstützungsschreiben** von  
Konsortialpartnern für das  
H<sub>2</sub>-Demonstratorkonzept (Stand 03/2024):



**DBI**  
Gruppe

**LEAG**

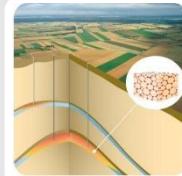


**SIEMENS**  
energy

Das Vorhaben wird  
unterstützt durch:



**STADTWERKE**  
POTSDAM



Umstellung  
vorhandener Speicher

- Bohrkonzept und -technik
- Operatives Engineering
- Betriebsführung
- Energiesystem-Integration
- Transportleitungen
- Risikoanalyse

## Kontakt:

Prof. Dr. Ingo Sass

Diplom-Geologe

Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger  
für Geothermie - Brunnenbau – Tiefbohrtechnik

Beratender Ingenieur, IngKH und IngKBW

Leitung Sektion 4.3 Geoenergie

[ingo.sass@gfz.de](mailto:ingo.sass@gfz.de)



Foto: GFZ