

# Flüssigsalz-Latentwärmespeicher in Salzstrukturen zur bedarfsgerechten Strombereitstellung aus Erneuerbaren Energien

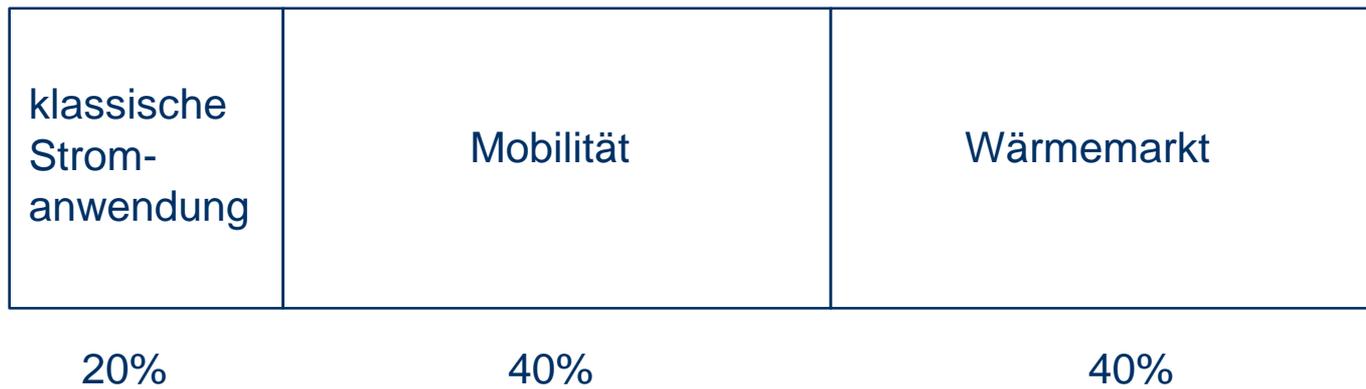
Horst Rüter  
Reinhard Kirsch

# Inhalt

- Motivation
- Wärmespeicher / Latentwärmespeicher
- Energiespeicher in Salzstrukturen
- Basisdaten Steinsalz
- Konzept: Latentwärmespeicher in Steinsalz
- Forschungskonzept

zur Motivation .....

ganz grob: Energieeinsatz in der Bundesrepublik .....



## zur Motivation .....

### **Dekarbonisierung:**

fossile Energieträger werden durch (regenerativ erzeugte) elektrische Energie ersetzt.

Zwar wird hierbei (hoffentlich) der Wirkungsgrad höher sein als bei der Nutzung fossiler Energie, dennoch ergibt sich ein insgesamt erheblich höherer Strombedarf als heute mit steigender Tendenz durch vermehrte Digitalisierung.

Dieser zusätzlich erforderliche Strom muss erzeugt, transportiert und zum Teil auch gespeichert werden.

## Kieler Nachrichten

10.11.2020

### **Strombedarf steigt stark an**

**BERLIN.** Auf dem Weg zur angestrebten Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 wird der Strombedarf in Deutschland einer Studie zufolge stark steigen. Um 60 Prozent im Vergleich zu 2018 müsste der Verbrauch durch den Umstieg von Öl und Gas etwa auf elektrische Energie klettern und er müsste komplett aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden, heißt es in einer Berechnung mehrerer Institute für die Denkfabriken Agora Energiewende und Verkehrswende sowie die Stiftung Klimaneutralität.

## zur Motivation .....

Dies führt zu einer noch höheren Abhängigkeit vom Stromnetz. Die Folgen von **blackouts** werden größer. Ein Teil der Stromproduktion und der Speicher muss daher **schwarzstartfähig** sein, um ein ausgefallenes Netz wieder anfahren zu können.

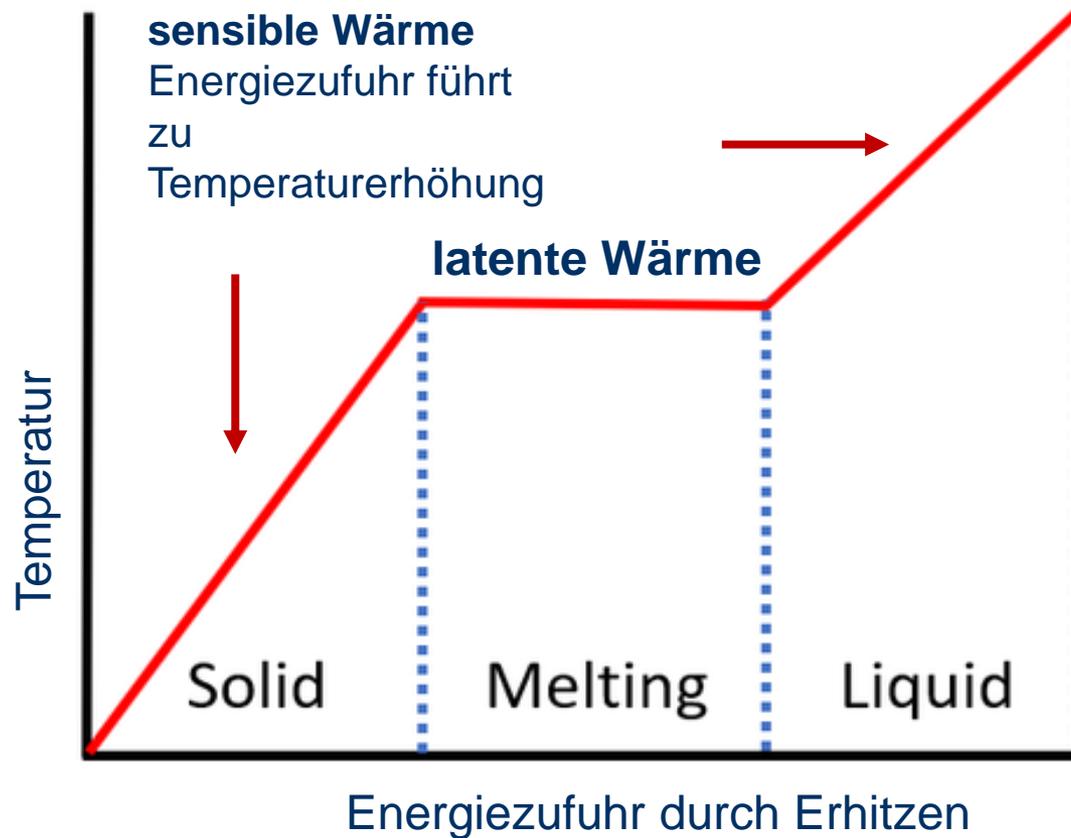


**Chancen für die Geothermie?** Geothermische Kraftwerke sind schwarzstartfähig, sie können nach Ausfall mit Unterstützung eines Dieselgenerators oder Batterien den Betrieb wieder aufnehmen. **Das gilt auch für Energiespeicher im Untergrund.**

**Und hierum geht es im Vortrag.**

## Wärmespeicher

### Speicherung von Wärme:

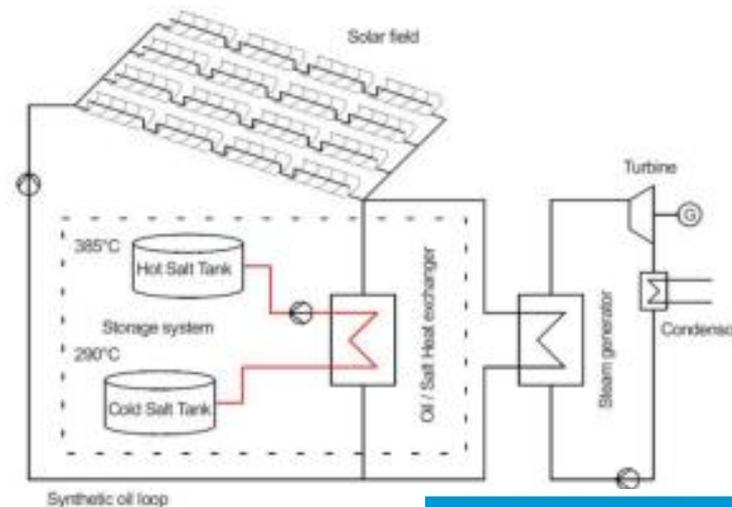


Bei Zufuhr von Wärmeenergie in einen Feststoff oder eine Flüssigkeit erhöht sich die Temperatur  
→ **sensible Wärme**.  
Für einen Phasenwechsel (z.B. fest-flüssig) muss zusätzlich Wärme zugeführt werden  
→ **latente Wärme**

## Wärmespeicher

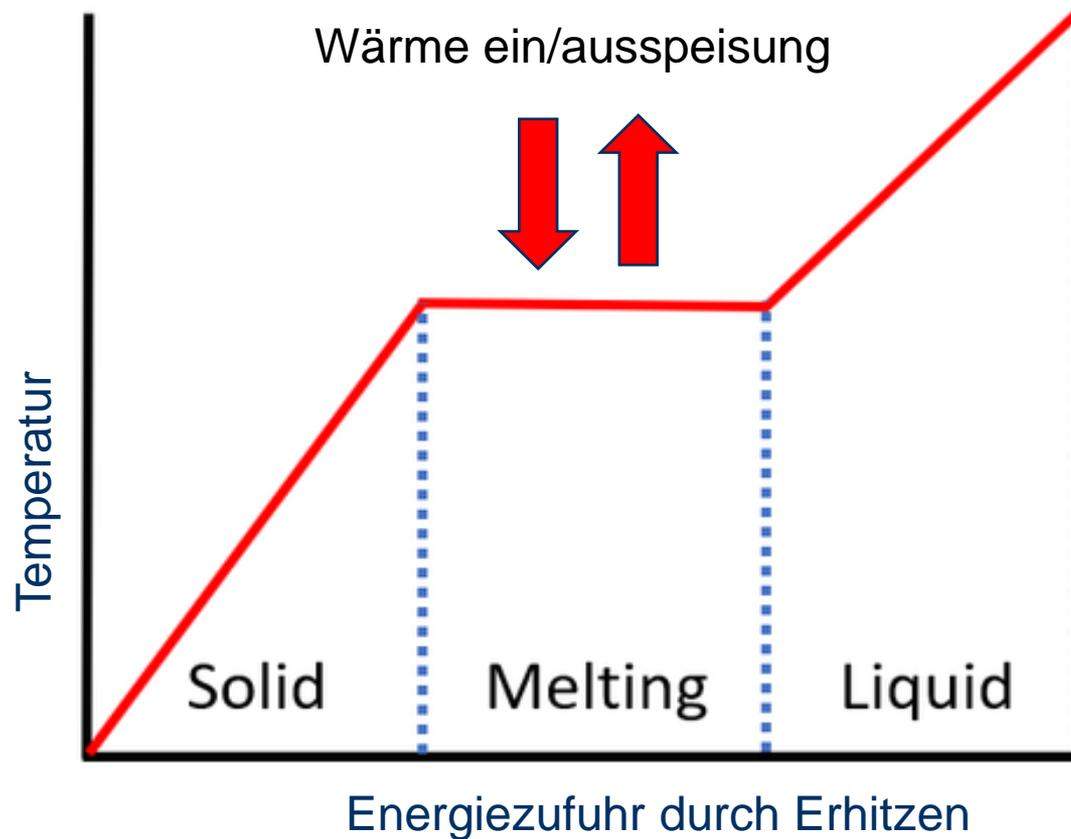
### Beispiel zur Nutzung sensibler Wärme: Solarprojekt Andasol (Spanien)

Speicherung von Solarwärme zur Verstromung in einer flüssigen Salzmischung (hier 60% Natriumnitrat und 40 % Kaliumnitrat) im Temperaturbereich 170 - 560 °C.



Hierzu ist ein Forschungsvorhaben der DLR als Reallabor am RWE Kraftwerkstandort Weisweiler geplant.

## Latentwärmespeicher



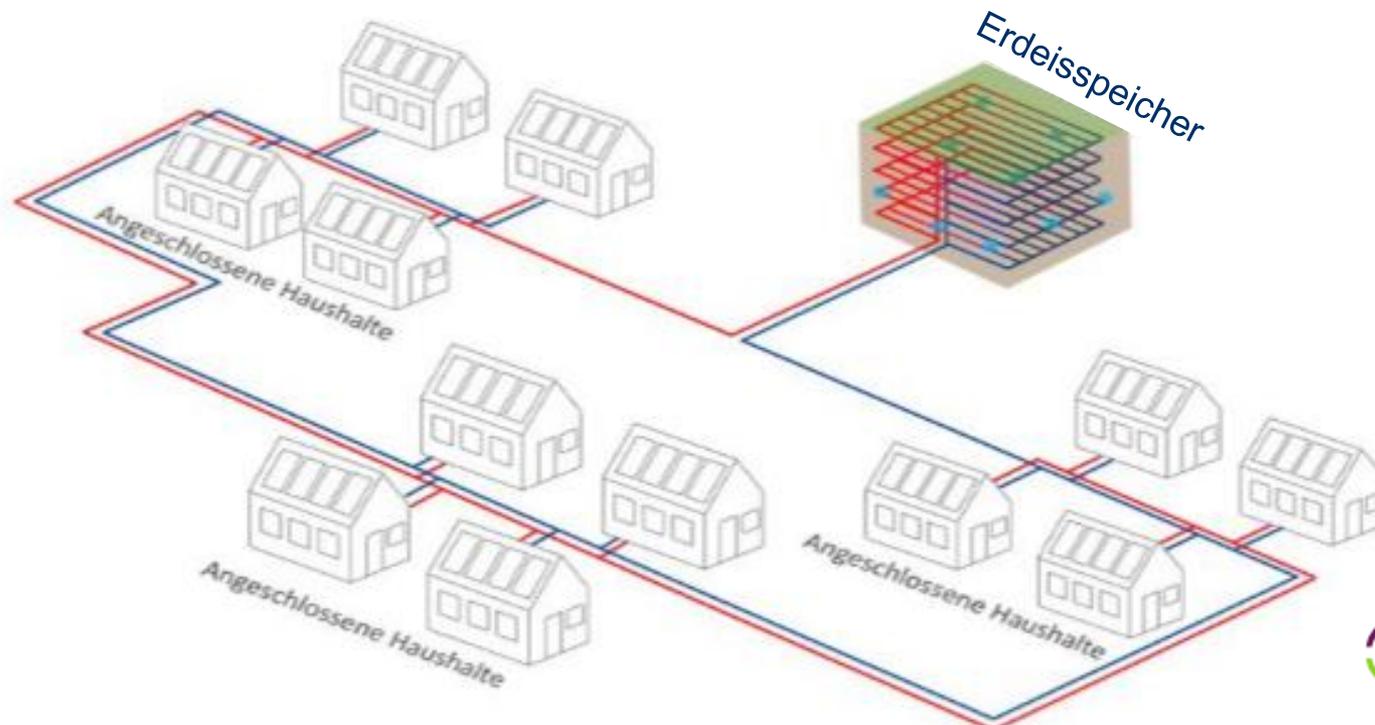
Bei der Nutzung latenter Wärme kann bei der Temperatur des Phasenwechsels viel Wärmeenergie gespeichert bzw. rückgewonnen werden, ohne dass sich die Temperatur ändert.

**Beispiel Wasser:** latente Wärme bei Eisbildung 334 kJ/kg bzw. ca. 80 kcal/kg.

## Latentwärmespeicher

### Beispiel zur Nutzung latenter Wärme: Eisspeicher

z.B. in kalten Nahwärmenetzen – die Wärmeregeneration erfolgt durch Horizontal- oder Vertikalkollektoren. Bildet sich Eis im Kollektorbereich, kann noch viel Wärmeenergie entzogen werden und ins Wärmenetz eingespeist werden, ohne dass die Vorlauftemperatur sinkt. Die in das Netz integrierten Wärmepumpen haben auch dann noch einen ausreichenden COP.



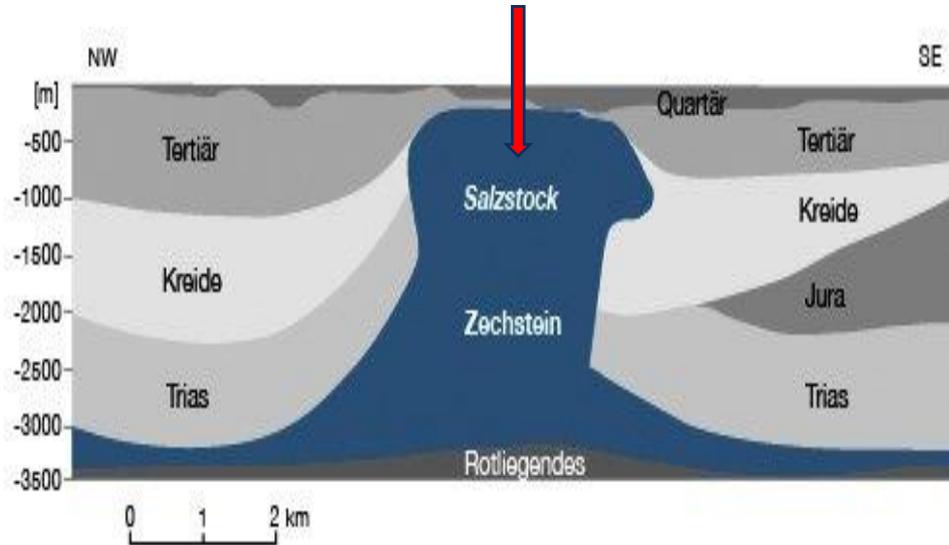
Bock (2019)

 Stadtwerke SH

Stadtwerke SH (Schleswig, Eckernförde, Rendsburg),  
Partner im Forschungsvorhaben ErdEis2

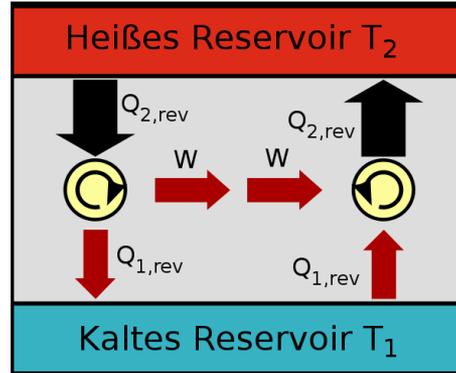
## Latentwärmespeicher

### Vorschlag: Latentwärmespeicher in Salzstöcken



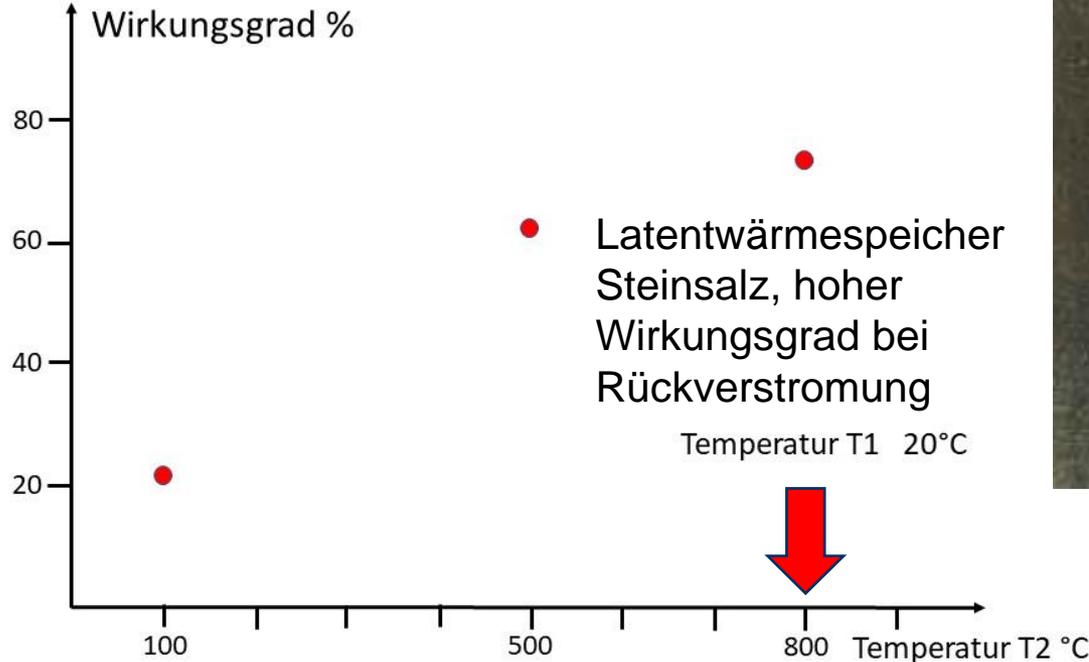
**Vorteil:** sehr hohe Speicherkapazität im Salzstock durch hohe latente Wärme von Steinsalz (560 kJ/kg)  
Phasenwechsel bei 801°C → bei Rückverstromung hohe Temperatur des Arbeitsmediums

Carnot – Kreisprozess:



maximal realisierbarer Wirkungsgrad

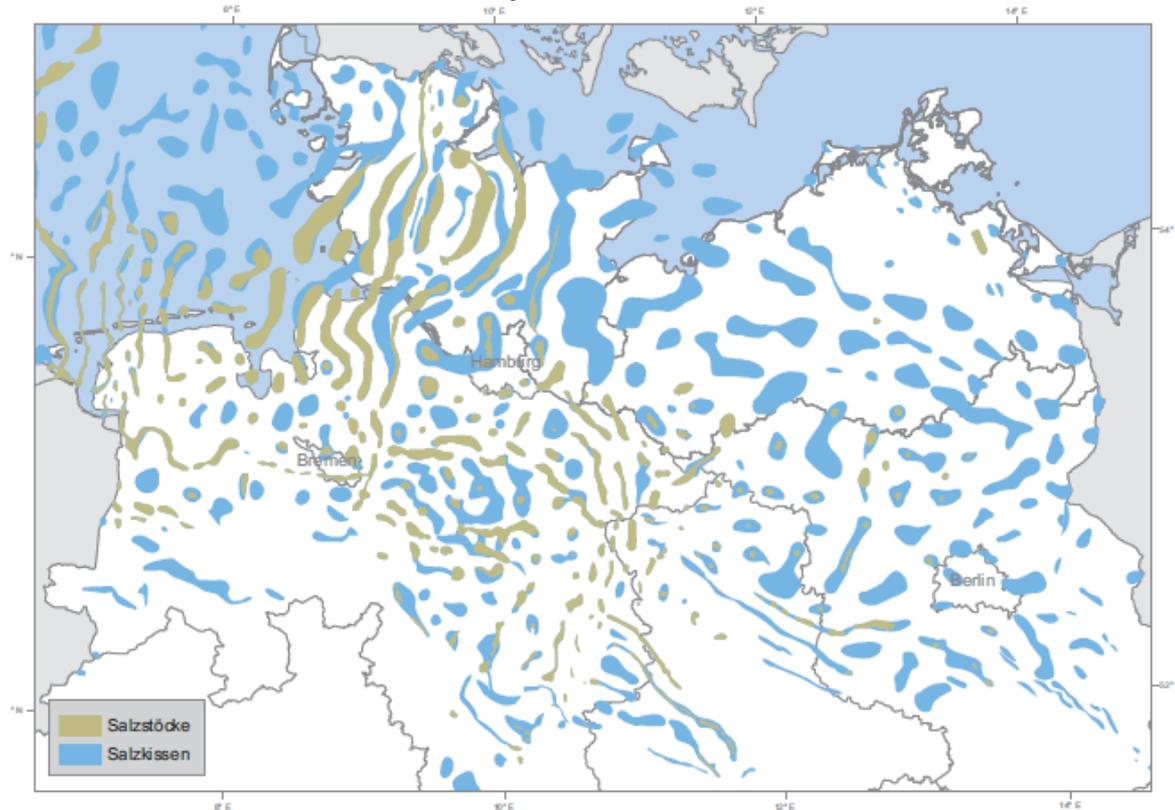
$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$



Sadi Carnot 1796 - 1832

## Energiespeicher in Salzstrukturen

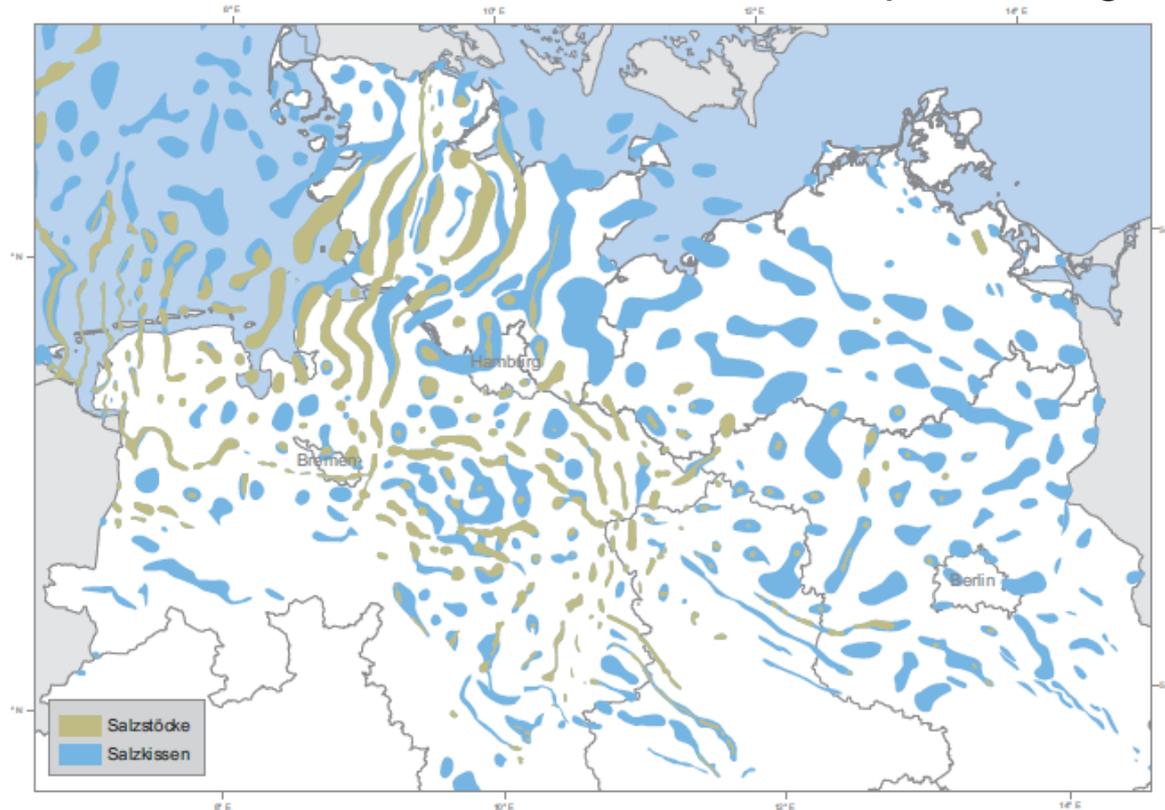
daher: es lohnt sich, über Latentwärmespeicher in Salzstöcken nachzudenken



Salzstöcke sind in Nordwestdeutschland weit verbreitet, auch offshore. Hier liegt auch ein Großteil der Windkraftstandorte. Die hauptsächliche Nutzung zur Zeit sind Kavernen, z.B. zur Speicherung von Erdöl- oder Erdgas.

## Energiespeicher in Salzstrukturen

an einigen Lokationen werden Salzkavernen bereits zur Speicherung regenerativer Energie genutzt:



- Huntorf (Niedersachsen): Druckluftspeicher CAES
- Jemgum (Niedersachsen): Redox-Flow Batterie (im Bau)
- Hemmingstedt (Schleswig-Holstein): Speicher von Elektrolyse-Wasserstoff (in Planung)

## Eigenschaften von Steinsalz

### Basisdaten Steinsalz

ein paar Eigenschaften von kristallinem Steinsalz:

Dichte:  $2,16 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Wärmeleitfähigkeit:  $6,49 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

latente Wärme:  $520 \text{ kJ}/\text{kg}$

Schmelzpunkt:  $801^\circ\text{C}$

spezifischer elektrischer Widerstand:  $10^5 - 10^7 \Omega\text{m}$

seismische Geschwindigkeit (P-Wellen):  $4600 \text{ m}/\text{s}$



## Eigenschaften von Steinsalz

### Basisdaten Steinsalz

ein paar Eigenschaften von kristallinem Steinsalz im Vergleich zu Sandstein  
(typisches Umgebungsgestein)

Dichte von Steinsalz ist:	geringer
Wärmeleitfähigkeit:	höher
latente Wärme:	
Schmelzpunkt:	geringer
spezifischer elektrischer Widerstand:	erheblich höher
seismische Geschwindigkeit (P-Wellen):	etwas geringer

## Eigenschaften von Steinsalz

### Basisdaten Steinsalz

und im Vergleich dazu die Salzschnmelze?

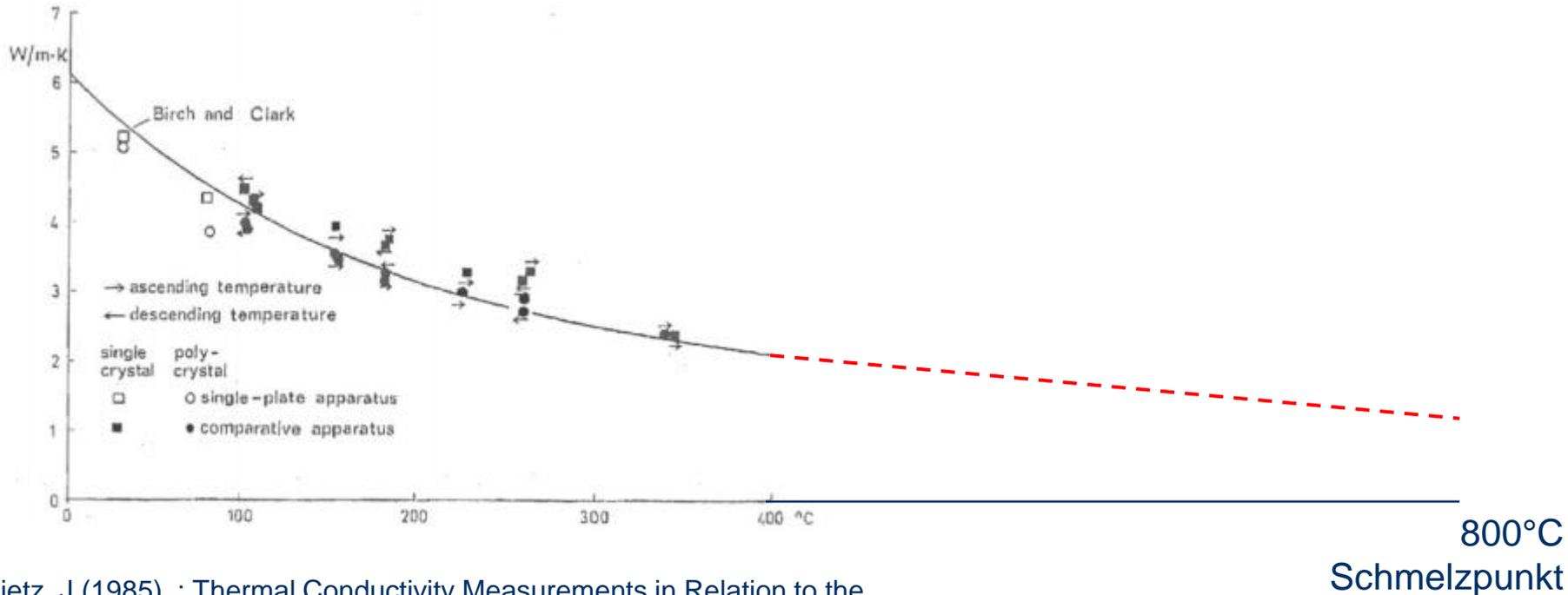
	kristallines Steinsalz:	Salzschnmelze:
Dichte:	2,16 g·cm <sup>-3</sup>	1,55 g·cm <sup>-3</sup>
Wärmeleitfähigkeit:	6,49 W/(m·K) bei 0°C	1,0 W/(m/K) 827°C *)
latente Wärme:	520 kJ/kg	
Schmelzpunkt:	801°C	
spezifischer elektrischer Widerstand:	10 <sup>5</sup> – 10 <sup>7</sup> Ωm	0,3 Ωm
seismische Geschwindigkeit (P-Wellen):	4600 m/s	1600 m/s (geschätzt)



## Eigenschaften von Steinsalz

### Basisdaten Steinsalz

und: die Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz ist stark temperaturabhängig

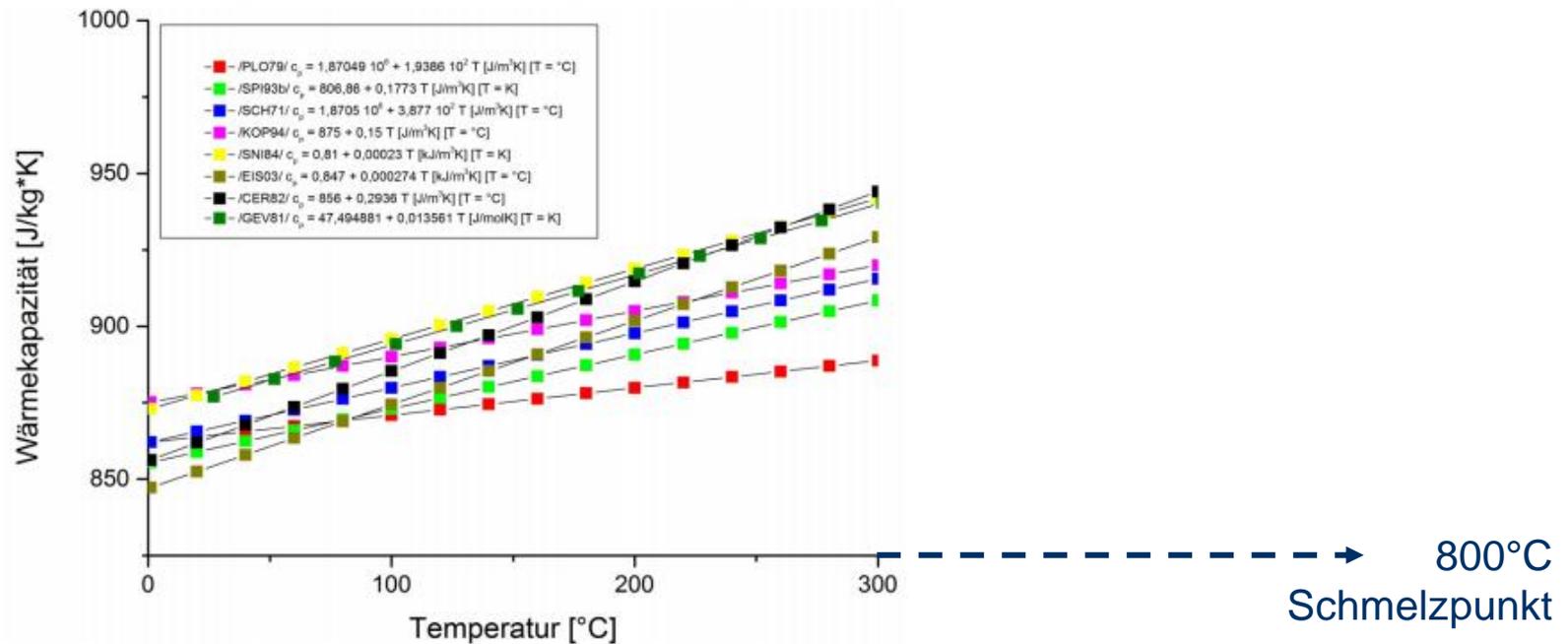


Kopietz, J (1985) .: Thermal Conductivity Measurements in Relation to the Geothermal Exploration of the Gorleben Salt Dome, Proceedings of the 19th International Conference on Thermal Conductivity, 19th International 147 Conference on Thermal Conductivity (ITCC): Cookeville, Tennessee

## Eigenschaften von Steinsalz

### Basisdaten Steinsalz

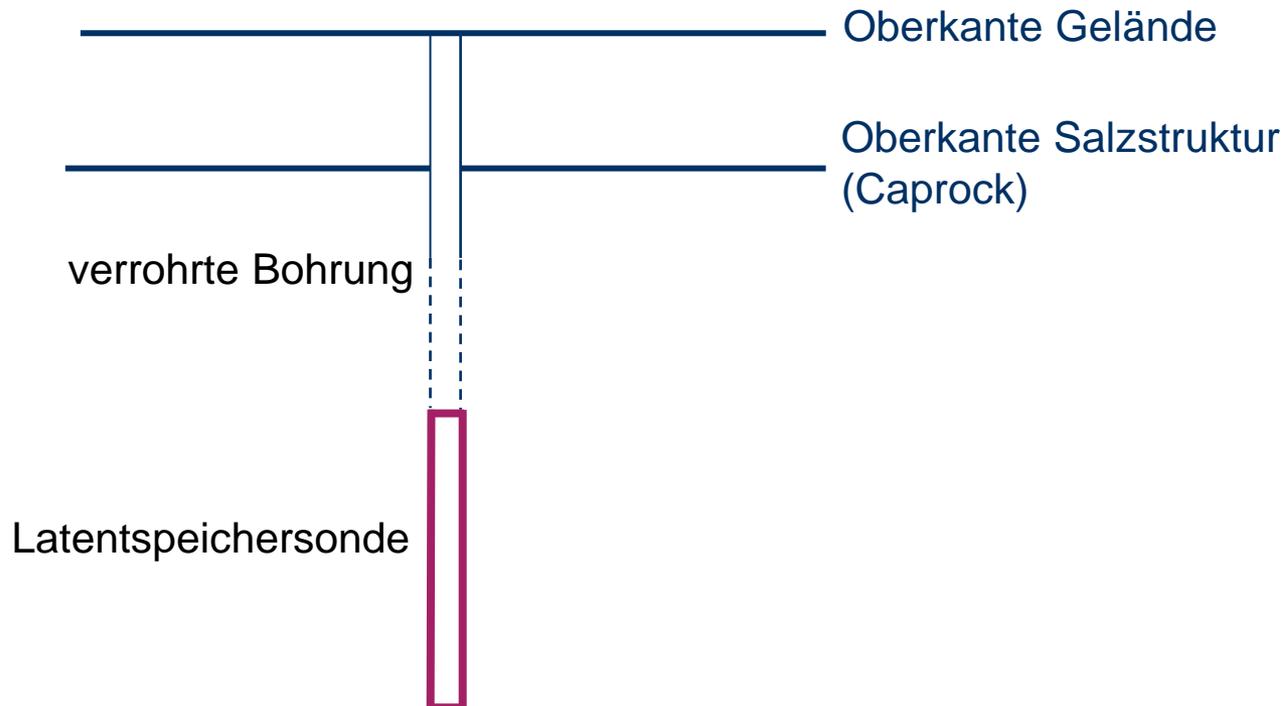
die spezifische Wärmekapazität ist ebenfalls temperaturabhängig



Heemann U, Kull H, Li S, Miede R, Müller C (2014): VIRTUS. Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz. Anhang B, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10890, GRS-354 Anhang B, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 249 S., ISBN 3944161343: Braunschweig

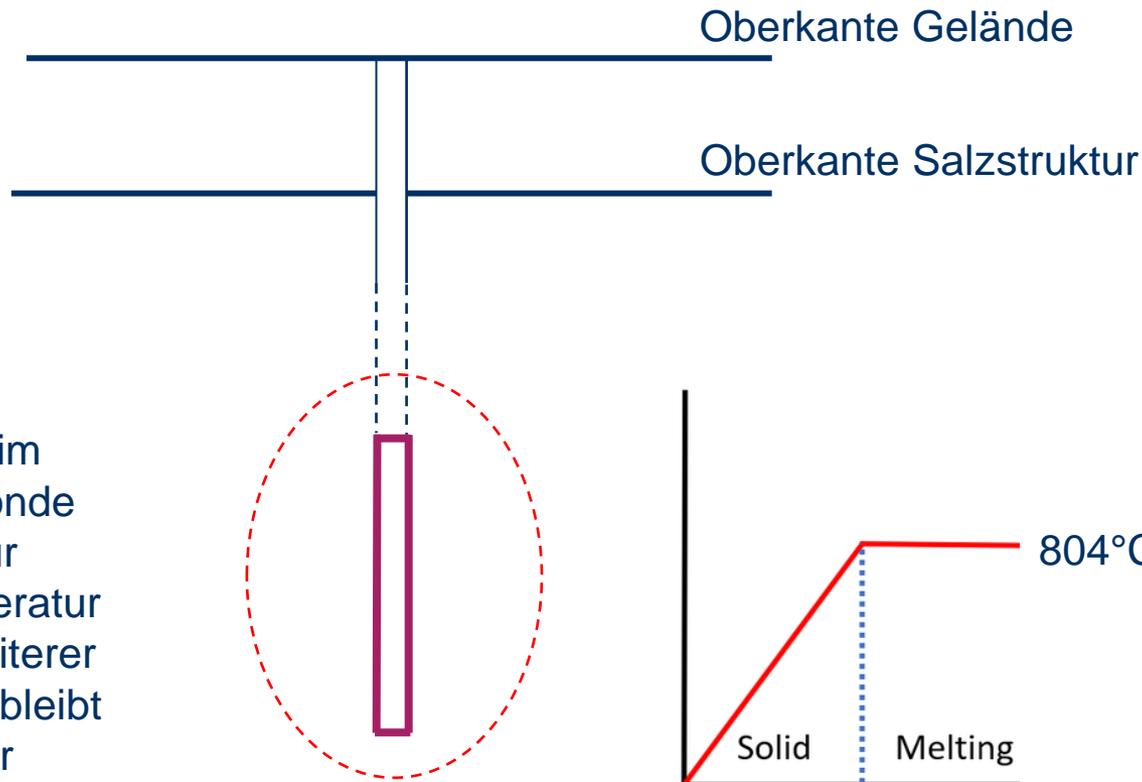
## Konzept eines Latentwärmespeichers in Salzstrukturen

wie könnte eine Latentspeichersonde konfiguriert sein?



## Konzept eines Latentwärmespeichers in Salzstrukturen

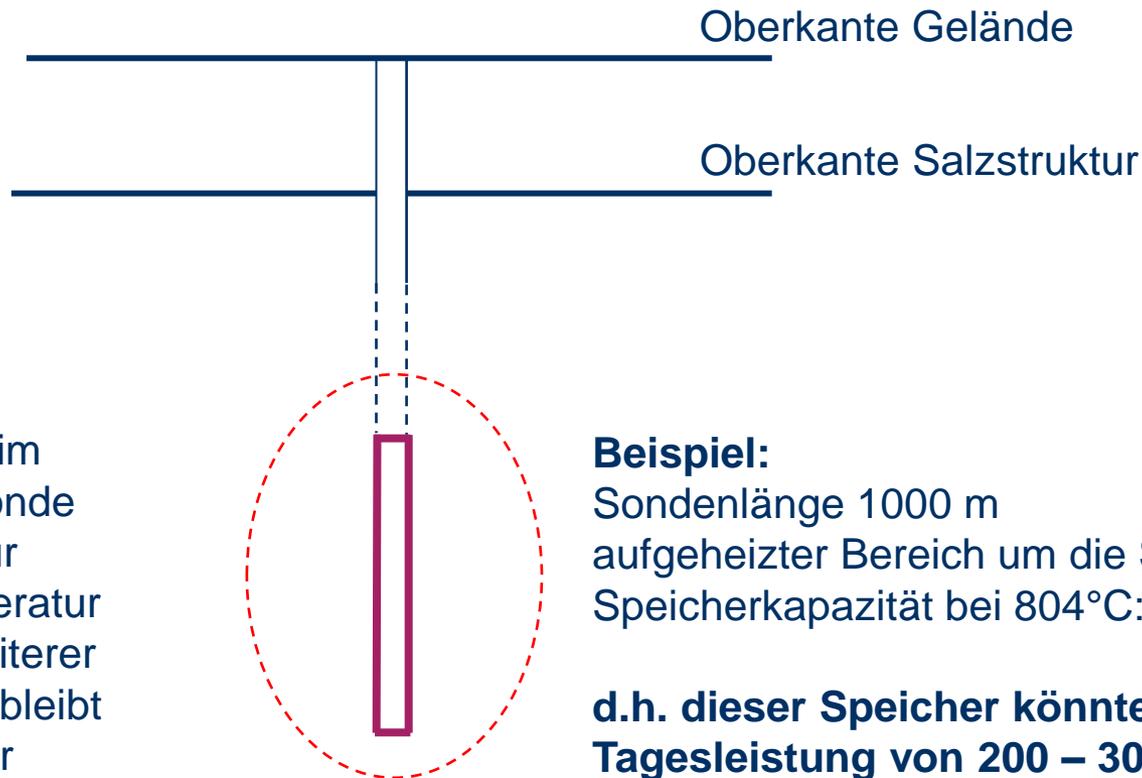
wie könnte eine Latentspeichersonde konfiguriert sein?



das Steinsalz im Umfeld der Sonde wird auf bis zur Schmelztemperatur erhitzt. Bei weiterer Wärmezufuhr bleibt die Temperatur erstmal konstant.

## Konzept eines Latentwärmespeichers in Salzstrukturen

wie könnte eine Latentspeichersonde konfiguriert sein?



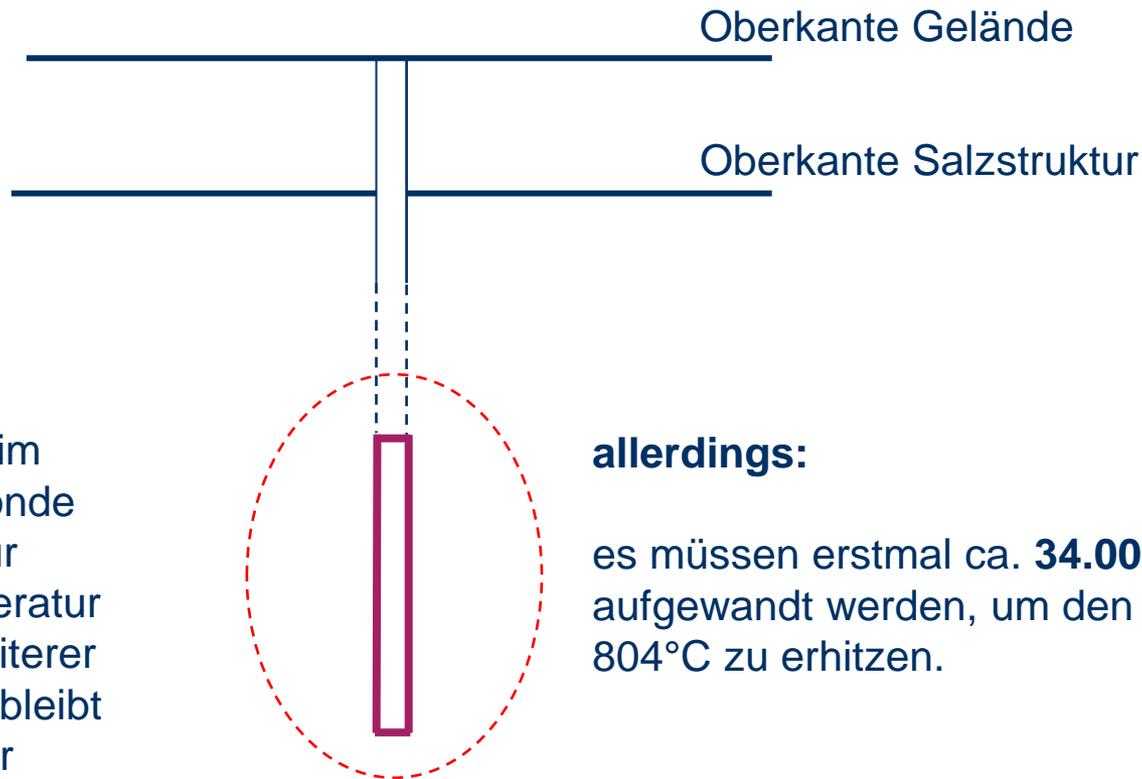
das Steinsalz im Umfeld der Sonde wird auf bis zur Schmelztemperatur erhitzt. Bei weiterer Wärmezufuhr bleibt die Temperatur erstmal konstant.

**Beispiel:**  
Sondenlänge 1000 m  
aufgeheizter Bereich um die Sonde: 10 m  
Speicherkapazität bei 804°C: **23.000 MWh**

**d.h. dieser Speicher könnte die Tagesleistung von 200 – 300 onshore Windkraftanlagen bzw. von mehreren offshore Windparks aufnehmen, ohne dass die Temperatur von 800°C überschritten wird**

## Konzept eines Latentwärmespeichers in Salzstrukturen

wie könnte eine Latentspeichersonde konfiguriert sein?



das Steinsalz im Umfeld der Sonde wird auf bis zur Schmelztemperatur erhitzt. Bei weiterer Wärmezufuhr bleibt die Temperatur erstmal konstant.

**allerdings:**

es müssen erstmal ca. **34.000 MWh** aufgewandt werden, um den Speicher auf 804°C zu erhitzen.

## Konzept eines Latentwärmespeichers in Salzstrukturen

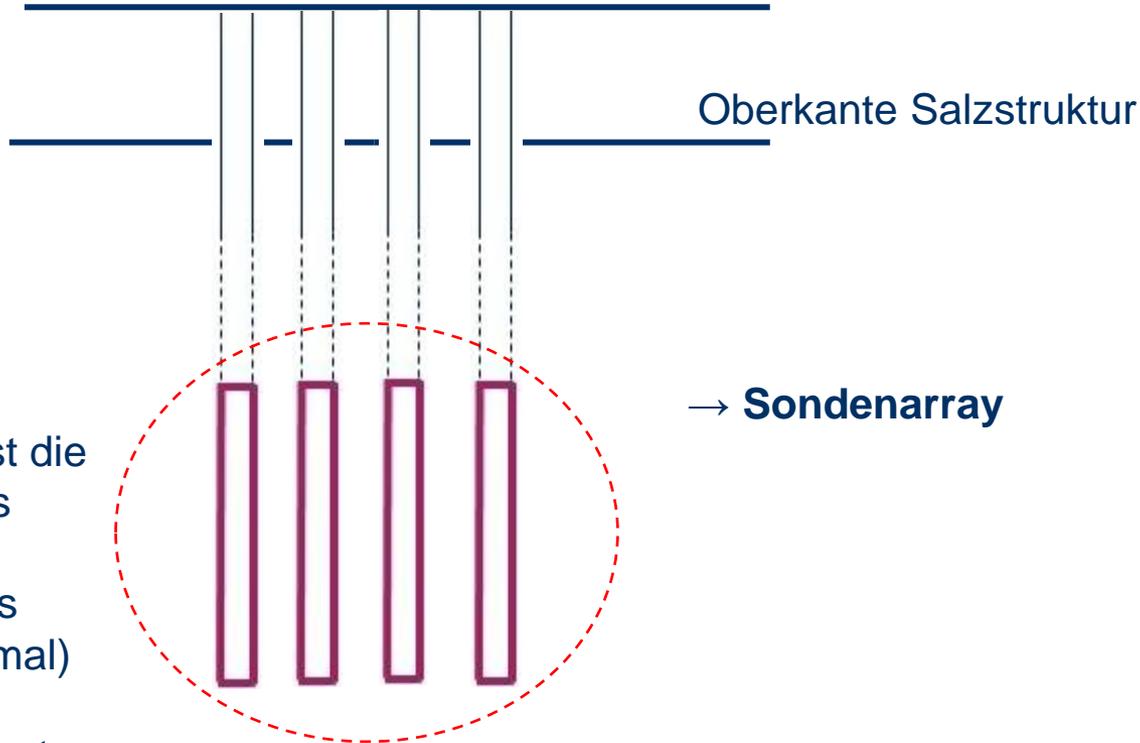
wie könnte eine Latentspeichersonde konfiguriert sein?

Oberkante Gelände

Oberkante Salzstruktur

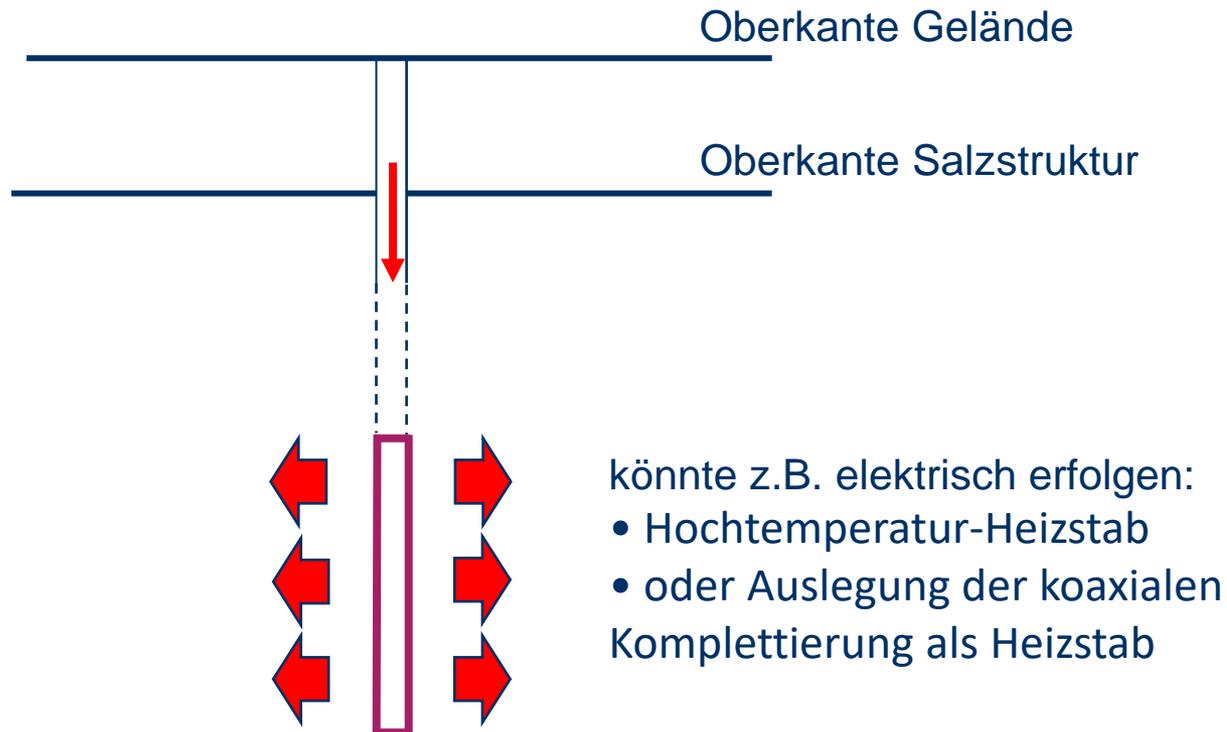
→ **Sondenarray**

bei einer Einzelsonde ist die Geometrie des wirksamen Speicherraums (lang und schmal) ungünstig → Wärmeverlust



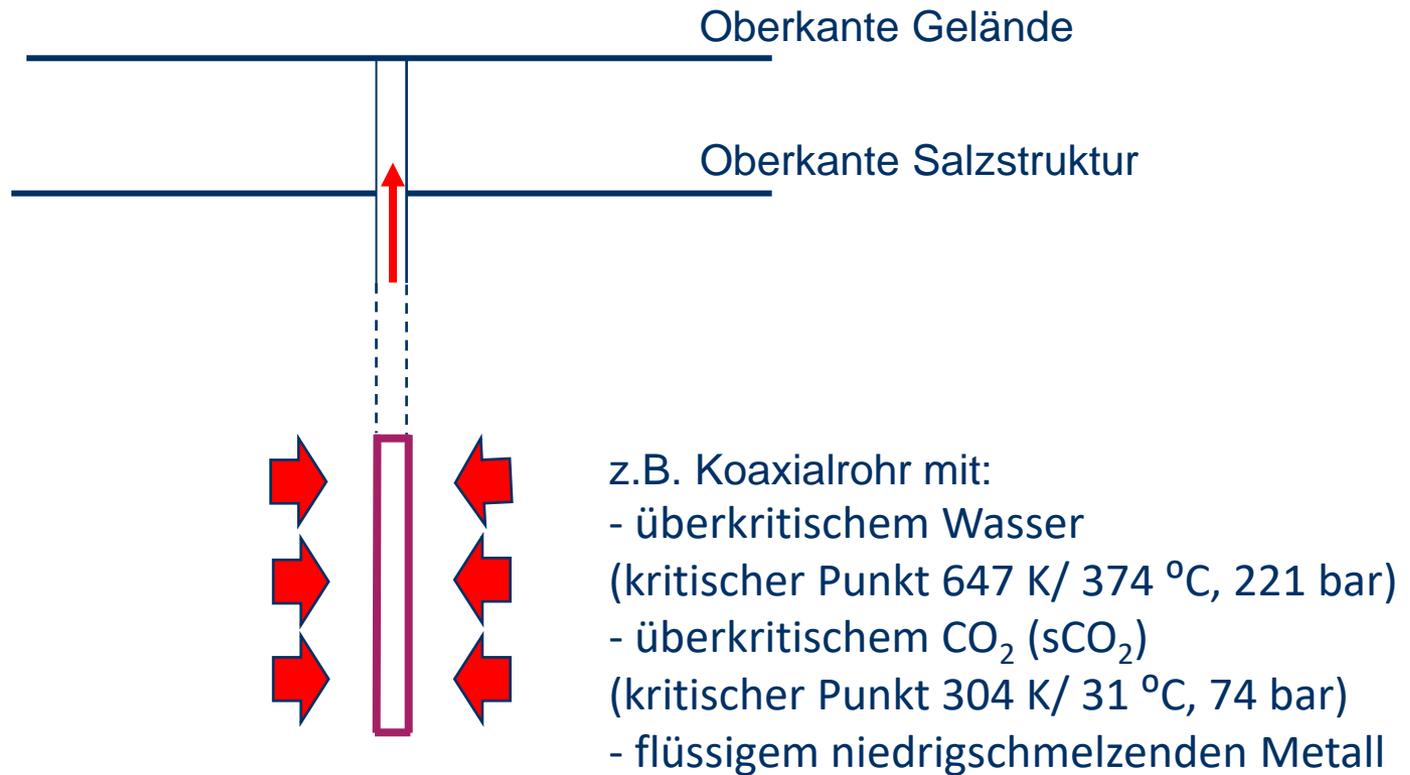
## Konzept eines Latentwärmespeichers in Salzstrukturen

wie könnte eine Latentspeichersonde konfiguriert sein - Energieeinspeisung



## Konzept eines Latentwärmespeichers in Salzstrukturen

wie könnte eine Latentspeichersonde konfiguriert sein - Energierückgewinnung



hohe technische Herausforderung!!!

## Forschungsbedarf

bis zu einem arbeitsfähigen Latentwärmespeicher in einer Salzstruktur  
ist es noch ein weiter Weg mit viel Forschungsbedarf



## Forschungsbedarf

Numerische  
Modellierung

Großlabor

Geophysik

Bohrtechnik

Kraftwerks-  
technik

Reallabor

**numerische Modellierung:**

Wärmetransport bei Ein-/Ausspeicherung

Temperaturfeld/Wärmeverluste

Mindestabstand zu Caprock und Grundwasserleitern

**Labor/Großlabor:**

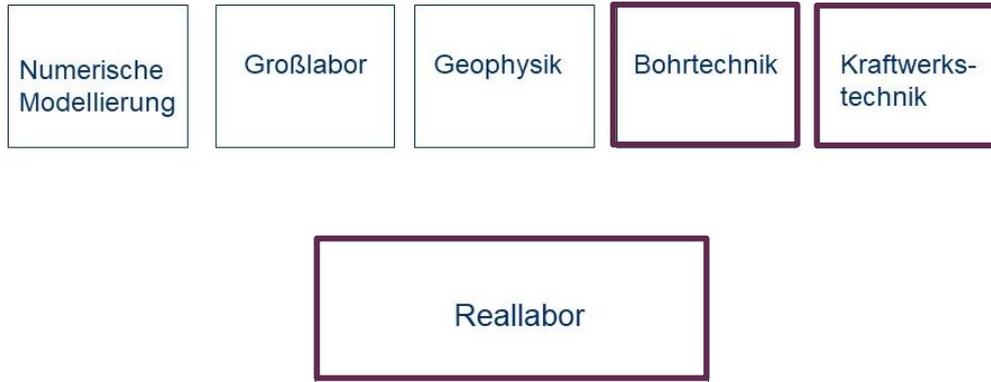
Petrophysikalische Eigenschaften von Steinsalz im Latentbereich

experimentelle Ein-/Ausspeicherung bei Salzvolumen im m<sup>3</sup>-Bereich**Geophysik:**

Erkundung der inneren Struktur von Salzstrukturen

Möglichkeit eines Monitorings

## Forschungsbedarf



### **Bohrtechnik:**

technische Möglichkeiten zur Errichtung eines Wärmeübertragers untertage

Bohrtechnik: Bohrungskomplettierung in Koaxialform  
ev. als Heizstab?

### **Kraftwerkstechnik:**

Arbeitsmedium für hohe Temperaturen, Turbinen

Technische Komponenten für hohe Temperaturen (Komplettierung, Bohrlochkopf, Pumpen, Wärmeübertrager etc.)

### **Reallabor:**

Auswahl eines Standorts, Errichtung eines Reallabors in einer Salzstruktur zunächst in einem kleineren Maßstab und in relativ geringer Tiefe (bis etwa 300 m)

**Wärmespeicher in Salzstrukturen** ermöglichen erheblich größere Speichervolumina und -kapazitäten als technische Speicher.

**Latentwärmespeicher** haben den zusätzlichen Vorteil, dass die Wärmeeinspeicherung und -rückgewinnung bei konstanter Temperatur erfolgt, woraus sich ein konstanter Wirkungsgrad bei der nachgeschalteten Verstromung ergibt. Dadurch haben Latentwärmespeicher im Steinsalz in hohes Potential zur Stabilisierung des Stromnetzes bei zunehmendem Einsatz regenerativer Energien (Schwarzstart).

Die Realisierung eines derartigen Wärmespeichers setzt eine anspruchsvolle Technologieentwicklung voraus. Hierfür ist ein umfangreiches Forschungsvorhaben erforderlich bis hin zur Errichtung eines Reallabors in einer Salzstruktur.