

Thermohaline Wärmespeicherung in Salzkavernen zur zentralen Wärmeversorgung und Stromspeicherung

F. Wuttke

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Lehrstuhl für Marine und terrestrische Geomechanik / Geotechnik

Zusammenfassung: Für die Speicherung elektrischer Energie in der Größenordnung des Tagesbedarfs eines Einfamilienhauses (Kilowattstunden, kWh), einer Siedlung (Megawattstunden, MWh) oder einer Stadt (Gigawattstunden, GWh) werden derzeit zahlreiche Konzepte diskutiert. Darunter genießen Pumpspeicherwerke, Druckluftspeicherkraftwerke und Batteriespeicher die größte Aufmerksamkeit. Doch ist zur Zeit keine dieser drei Technologien zugleich standortunabhängig, flächendeckend konzipierbar und kostengünstig. Nachfolgend soll ein innovatives Konzept für Großspeicher auf thermohaliner Basis von elektrischer Energie und Wärme diskutiert werden.

Einführung und Zielstellung

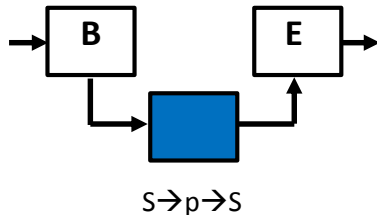
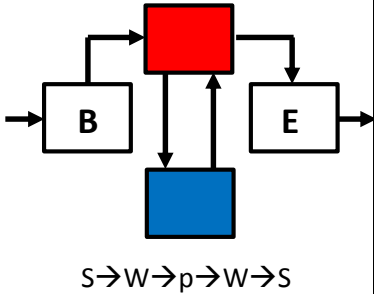
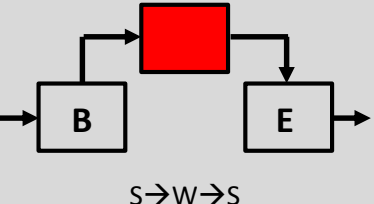
Ausgangspunkt der nachfolgenden Erläuterungen ist die Frage: „Kann das Speicherproblem gelöst werden, indem man elektrische Energie in Wärme umwandelt, die Wärme in ausreichender Menge speichert und bei Bedarf in elektrische Energie oder als saisonal verfügbare thermische Energie für Fernheizsysteme zurückverwandelt und dabei eine ausreichende räumliche Verteilung berücksichtigt?“ Dieses Konzept wird im Folgenden als Strom-Wärme-Strom-Energiespeicher bezeichnet (SWS-Energiespeicher) soll unter dem Gesichtspunkt einer neuartigen, nachhaltigen, drucklosen hydrothermalen Speicherung von regenerativen erzeugter elektrischer Energie in geologischen, salinaren Formationen hinsichtlich der Speicherpotentiale und der dazu offenen geomechanischen Fragenstellungen diskutiert werden.

Einordnung thermohaliner Energiespeicher

Die Einordnung von S-W-S-Energiegroßspeichern zum Stand der Technik kann grob nach Tabelle 1 vorgenommen werden, wobei diverse Unterarten nicht benannt wurden. Das in der linken Spalte skizzierte herkömmliche Druckluftspeicherkraftwerk (Crotonino et al 2001) ist im Wirkungsgrad dadurch beschränkt, dass die bei der Kompression erzeugte Wärme verloren geht und dass der expandierenden Luft beim Entladeprozess von außen Wärme zugeführt

werden muss. So beträgt der ideale Wirkungsgrad eines konventionellen Druckluftspeicherkraftwerkes bei einem Speicherdruck von 100 bar etwa 70%, während in Realität ca. 50% erreicht werden. Dieser Mangel wird bei dem adiabaten Druckluftspeicherkraftwerk (Bullough et al. 2004, Zunft et al. 2006) dadurch überwunden, dass die Kompressionswärme in einem Wärmespeicher aufgefangen und beim Entspannungsprozess wieder an die Luft abgegeben wird. Nach Zunft et al. (2006) wird für das reale adiabate Druckluftspeicher ein Wirkungsgrad von ca. 70% erreicht. Der ebenfalls skizzierte S-W-S-Energiespeicher verdeutlicht, dass es sich beim S-W-S-Energiespeicher um eine Neu- bzw. Weiterentwicklung handelt und dass dieser Speichertyp weitgehend unerforscht ist.

Tabelle 1: Strom-Wärme-Strom (SWS) – Großspeicher (nach Thess 2013, Wuttke et al. 2014)

Druckluftspeicher- kraftwerk	Adiabates Druckluftspeicher- kraftwerk	S-W-S-Speicherkraftwerk
vorhanden	geplant	weitgehend unerforscht
 <p>$S \rightarrow p \rightarrow S$</p>	 <p>$S \rightarrow W \rightarrow p \rightarrow W \rightarrow S$</p>	 <p>$S \rightarrow W \rightarrow S$</p>
Energiespeicherung rein mechanisch	Energiespeicherung mechanisch und thermisch	Energiespeicherung rein thermisch
idealer Wirkungsgrad ca. 70%	idealer Wirkungsgrad 100%	idealer Wirkungsgrad 100%
realer Wirkungsgrad ca. 50% gemessen	realer Wirkungsgrad 70% prognostiziert	realer Wirkungsgrad weitgehend unbekannt
Realisierungsmöglichkeit standortabhängig	Realisierungsmöglichkeit standortabhängig	Realisierungsmöglichkeit standortunabhängig

Einordnung des SWS-Energiespeichers: S = Strom, p = Druck, W = Wärme, B = Beladeeinrichtung, E = Entladeeinrichtung.

Aus der Salzindustrie ist die Handhabung von salinaren Lösungen in Ingenieurbauwerken über Tage als auch in untertägigen Speicherhöhlräumen bzw. -kavernen aus über viele Jahrzehnte bestehenden bergbaulichen Erfahrungen bekannt. Für den Umgang mit heißen Salzlösungen und das Erstellen von Solkavernen mit unterschiedlichen Betriebstemperaturen für die industrielle Mineralsalzgewinnung existiert eine Vielzahl von Fachliteratur (Grüschow & Krumbbein 1997, Duchow et al. 1990, Bartl et al. 1990). Die als Speichermedium dienenden

Salze sind entweder NaCl, MgCl₂ oder KCl-NaCl-MgCl₂-Mischungen, welche sich aus den vielen in Deutschland vorhandenen Lagerstätten gewinnen und lagern lassen als auch wissenschaftlich auf ihre chemische Eignung analysiert wurden (Emmons & Naumann 1989).

Neuheit und Zielstellung thermohaliner GeoEnergiespeicher

Grundlage zu dem neuen Typ von thermohaliner Wärme- und Energiespeicherung ist das Patent (Scherzberg, Kaps, Wuttke und Thess, 2013). Der Typ des Speichers ist im Wesentlichen ein Großspeicher basierend auf Salzkavernen von 1,000,000.00 m³ oder größeren Volumina, gefüllt mit heißer Salzlösung, siehe dazu Abbildung 1.

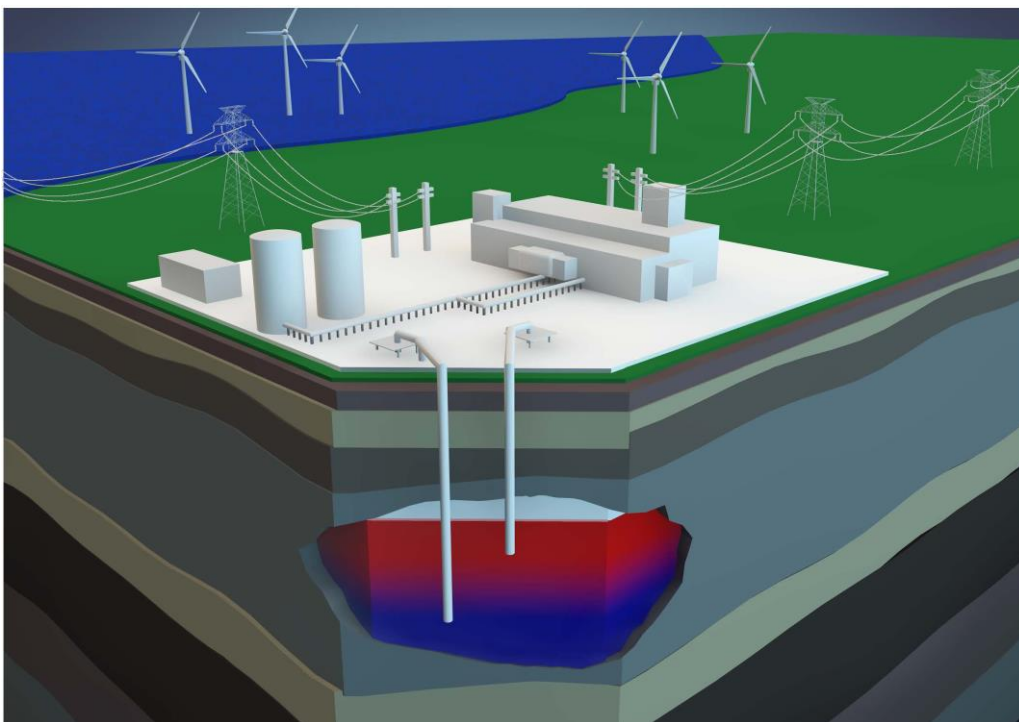


Abbildung 1: Prinzipielle Darstellung der thermohalinen Energiespeicherung in existierenden oder zur erstellenden Salzkavernen.

Dieser neuartige Speicher basiert auf dem Zusammenführen von bekannten Elementen der Salinentechologie und salzverarbeitenden Industrie sowie zum Teil unbekanntenen Elementen in der Geomechanik und neuen effektiveren Komponenten zu thermodynamischen Kreisprozessen. Dazu wird derzeit an Fragen der Machbarkeit und des Wirkungsgrades gearbeitet sowie Pilotprojekte mit Bundes-, Landes- und Industriepartnern als nächste Zielstellungen definiert.

Die unmittelbaren zu untersuchenden Zielstellung ist die Gewinnung der Erkenntnisse, ob und mit welchem Aufwand sich derartige Salzformationen nutzen lassen, um ein schwankende Energiedargebot aus regenerativen Energien im GWh-Bereich ohne größere Mediendrucke zu speichern. Da die vereinzelt Elemente und Grundprinzipien, aus Salzindustrie, Geomechanik und SWS-Energiespeichern bekannt sind, soll in dem Projekt geklärt werden, in welcher Art und Weise diese Einzelkomponenten im Gesamtmodell und -prozess interagieren und gestaltet werden können, welche Komponenten fehlen und erarbeitet werden müssen, so dass eine maximale Effektivität erreicht wird, der Speicher eine zyklische Langzeitstabilität aufweist und in Deutschland eine flächendeckende Anwendung findet.

Insbesondere die mögliche räumlich verteilte Positionierung dieser Speicher würde viele Probleme innerhalb Deutschlands, Europas oder weltweit lösen, da entsprechende Salzformationen weltweit bzw. über Deutschland verteilt anzufinden sind.

Der Vorteil von thermohalinen Speichern unter Nutzung von gesättigten Salzlaugen, liegt in einer ca. 50% bis 70% höheren Energiespeicherfähigkeit gegenüber Wasser, da der praktisch nutzbare Temperaturbereich bis ca. 170°C und höher, infolge der höheren Dichten und geologischen Drücke reicht. Zusätzlich entfällt ein die Druckbeständigkeit eines Gebirges, wie für Druckluftspeicher.

Anforderungen und offene Forschungspunkte

Neben der Hauptanforderung einer Langzeit-Stabilität der salinen Gebirgsformation unter den thermisch-zyklischen Belastungen bestehen folgende weitere offene geomechanische Fragestellungen:

- a) Thermische Salzlösungs-Schichtung und deren Stabilität unter Wärmespeicherung und -entnahme.
- b) Schädigung, Auflösung und Verformung des umgebenden Gebirges und der unmittelbaren Fluid-Fels-Grenzfläche durch die zyklische Temperaturlast
- c) Die Temperaturverteilung, Wärmefluss und Energieverlust im Fluid und umgebenden Gebirge

Zusätzlich zu den geomechanischen Fragestellungen bestehen die Herausforderungen in der Umsetzung von geeigneten S-W-S Wandlungs-Technologien hoher Wirkungsgrade. Letztlich wurde eine Speicherung von überschüssiger Elektroenergie aus fluktuierenden Energiemengen durch regenerative Energiequellen in Systeme von den Strom-Wärme-Strom-Wechselanlagen (siehe Abbildung 2) unter Nutzung von heißem Salzlösungspufferspeicher bislang nicht

untersucht oder in Betracht gezogen. Die Vorteile sind jedoch zahlreich: a) *nahezu drucklose Speicherung*, b) *hohe Energiedichte, ohne Nachteile der Phase-Change-Materialien*, c) *extrem Nachhaltig, durch natürliche Materialien*, d) *Nutzung bekannter Industriekomponenten aus der Salzindustrie*, e) *große Speichermengen möglich* und f) *geologische Salzformationen vielfältig vorhanden*.

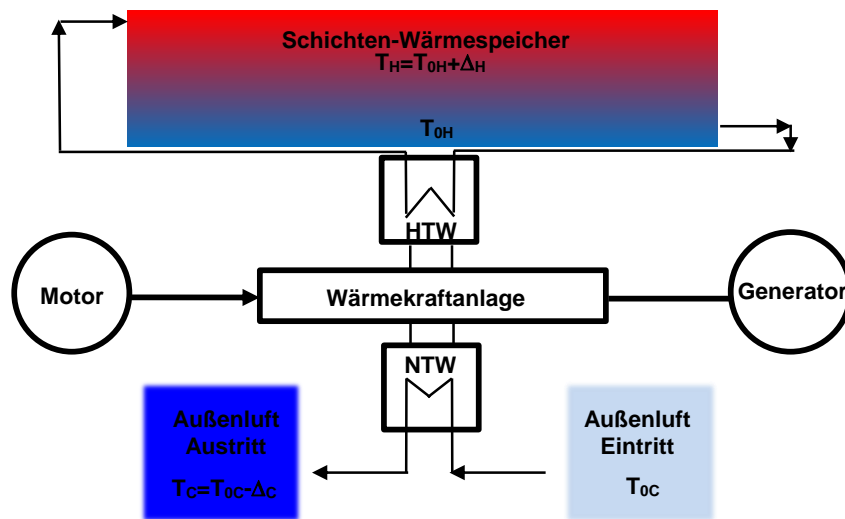


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Elemente eines Thermohaliner Energiespeichers (Einbehälter-SWS-Energiespeichers) und die Energie- und Stoffströme (Pfeile) während der Speicherbeladung (HTW = Hochtemperaturwärmeübertrager, NTW = Niedertemperaturwärmeübertrager), siehe auch Thess (2013).

Speicherprozess und Geomechanische Auswirkungen

In Abbildung 3 ist der grundsätzliche Speicherprozess abgebildet (Wuttke et al. 2013). Dabei wird die ursprüngliche Laugentemperatur von 30-40°C auf 170°C durch S-W-S Technologien erhöht und in den Speicher gepumpt. Die gespeicherte Energie in dem Speicher kann als rückgewonnene elektrische Energie oder als Wärmeenergie wieder genutzt werden. Die Speicherzyklen verschieben dabei, die durch den Temperatureinfluss entstandene Fluidschichtung in der Kaverne zyklisch in vertikaler Richtung.

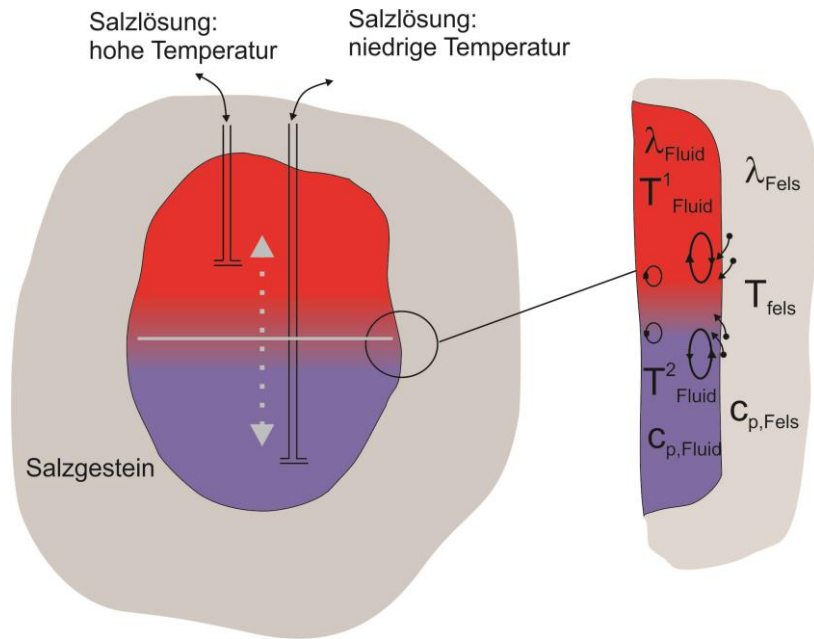


Abbildung 3: Prinzip des Speichervorgangs von thermohalinen Untergrundspeichern

In Wuttke et al. (2014) wurde anhand eines einfachen numerischen Beispiels die grundsätzliche Eignung einer Salzkaverne als Energiespeicher nachgewiesen. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Temperatur innerhalb des Fluid's über die Zeit einer Speichersaison weitestgehend erhalten werden kann, siehe Abbildung 4.

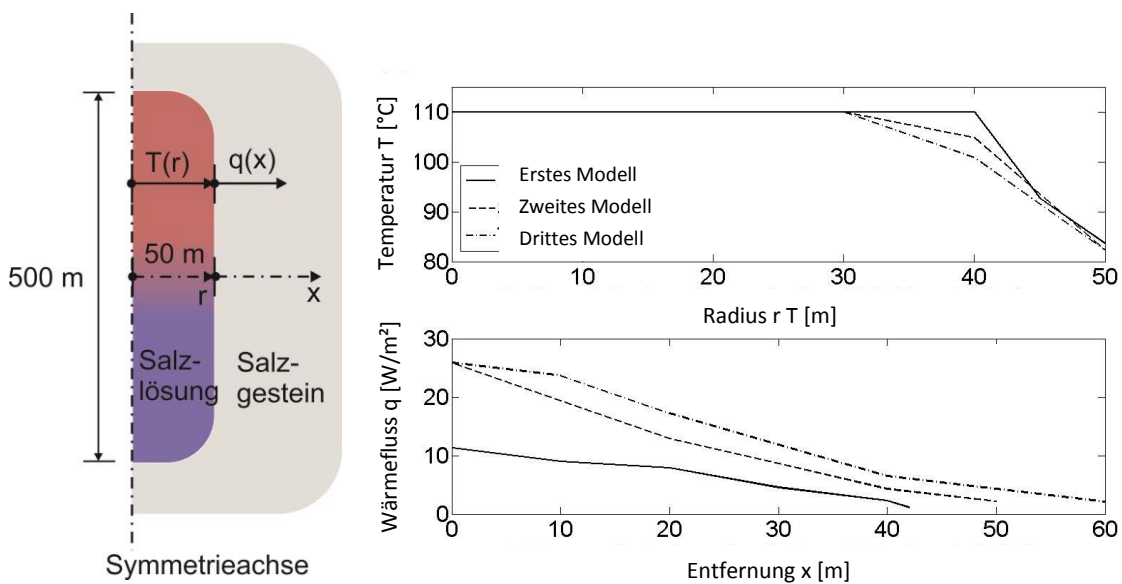


Abbildung 4: Numerisches Modell der untersuchten Speicherkaverne und Temperatur und Wärmefluss in Salzgestein nach 6 Monaten der Wärmezufuhr von 40°C auf 110°C über eine Periode von 10 Tagen, nach Wuttke et al. 2014.

Bei thermisch gespeicherter Energie in einer Kaverne findet ein ständiger Energieverlust in das umgebende Salzgestein statt, wie die einfache Simulation unterschiedlicher Randbedingungen zeigt. Jedoch beträgt der Energieverlust zwischen der initial zugeführten Energiemenge und nach der nach 6 Monaten noch vorhandenen Energiemenge, nur 7 % der initialen Gesamtenergiemenge, so dass der tatsächliche Verlust von Energie beherrschbar bleibt.

Diese Tatsache wird auch durch die Betrachtung der thermalen Diffusionszeit bestätigt, wonach die Zeitdauer für die Verminderung der Temperatur T in der Salzlösung innerhalb der Kaverne quadratisch mit dem Speicherdurchmesser r zunimmt:

$$\tau = r^2/\kappa,$$

wobei $\kappa = \lambda/(\rho c_p)$, λ – thermische Leitfähigkeit, ρ – Dichte und c_p die spezifische Wärmekapazität darstellt. Die Effektivität eines Wärmespeichers ist somit durch den vorhandenen Durchmesser des Speichers beeinflussbar und beherrschbar.

Aus der Literatur ist die Ab- und Auflösung von Salzgestein unter thermisch zyklisch belasteten Salzlösungen sehr gut bekannt. Durch die wechselnde Zuführung von kalten und heißen Salzlösungen in der Kaverne wird ein ständiger Lösungsvorgang stattfinden. Grundsätzlich hat das Problem technisch so gelöst zu werden, dass ein minimaler Fluideinfluss auf eine Materialab- und -auflösung oder auch der Ausfällung stattfindet. Da die kalte und heiße Salzlösung unterschiedliche Sättigungsgrade hinsichtlich des Salzgehaltes besitzt, könnte zur Beeinflussung dieser Prozesse die Konzentration technisch erhöht oder verringert werden.

Der Sättigungsgrad selber führt zu unterschiedlichen Fluidichten und damit zu der gewünschten Schichtung in dem Speicher. Inwiefern diese thermische und Konzentrationsschichtung innerhalb des Speichers stabil bleiben, muss in zukünftigen Untersuchungen analysiert werden. Die in dem Fluid von Großspeichern auftretenden Konvektionsprozesse, welche durch unterschiedliche Temperaturen und Konzentrationen auch in ruhenden Fluiden entstehen werden, konnten in den durchgeführten, kleinskaligen Laboruntersuchungen (Wuttke et al. 2014, siehe Abbildung 5) nicht analysiert werden. Dabei entstehen zusätzlich zu den Vermischungen des Fluids mit nachfolgender Reduktion des Temperaturgradienten und Verlust von Energiespeicherkapazität, eine zusätzliche Materialablösung an den Grenzflächen des Salzgebirges

$$\frac{dw}{dt} = K(c_s - c).$$

Die dabei vorhandene zeitabhängige Ablösungskonstante K ist abhängig von einer Vielzahl von Einflussparametern, wie Oberflächenrauigkeit, Temperatur, Geometrie, Fluidkonzentration u.a. und oftmals nur experimentell in-situ oder durch sehr aufwändige Technikumsversuche zu ermitteln.

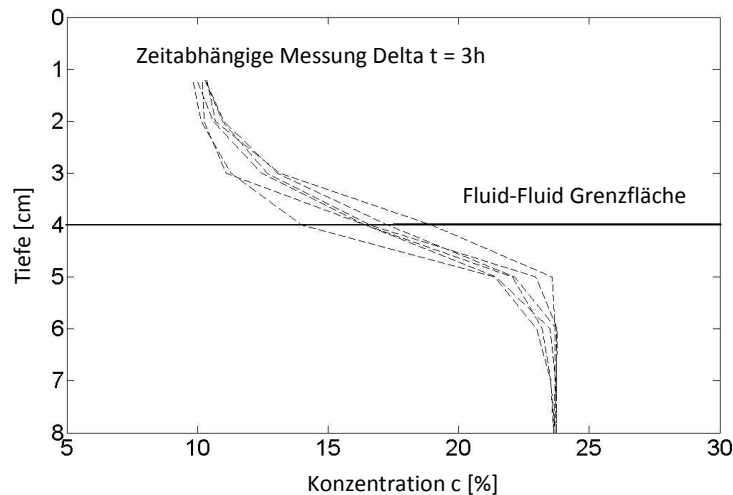


Abbildung 4: Laboruntersuchungen zur zeitabhängigen Stabilität von Fluid-Schichtungen, nach Wuttke, et al. 2014.

Ausblick und Zusammenfassung

In dem vorgestellten neuen Speicherverfahren für regenerativ erzeugte elektrische Energie durch Strom-Wärme-Strom Transformation oder die weitere Nutzung von Wärmeenergie, werden die Vorteile der vorhandenen Salientechnologie mit dem höheren Energiespeichervermögen von konzentrierter Salzlösung zu einem neuen thermohalinen Speichertyp kombiniert. Die prinzipielle Anwendungsfähigkeit als Saisonaler Speichertyp wurde durch die Abschätzung eines potentiellen Energieverlustes und der Stabilität der erforderlichen, thermischen und konzentrationsabhängigen Fluidschichtungen dargestellt. Neben diversen Laboruntersuchungen und numerischen Fallstudien, besteht noch eine Vielzahl von offenen Fragestellungen in der Geomechanik, Thermodynamik und Technologie, um die Anwendungsreife zu erhalten. Sind diese Fragen gelöst, so kann dieser Speichertyp durch die einfache Anwendungsfähigkeit an beliebige geologische Salzstrukturen, die Adaptierbarkeit in der Größe an das urbane Bedürfnis als auch Hinsichtlich der Nachhaltigkeit eine signifikante Rolle in der europäischen Energielandschaft spielen.

Referenzen

- Bartel, H., Döring, G., Hartung, K., Schilder, C., Slotta, R., Kali im Südharz-Unstrut-Revier, Dt. Bergbau-Museum Bochum, 2: 608-614, 2003
- Bullough B, C. Gatzen, C. Jakiel, M. Koller, A. Nowi, S. Zunft, 2004
Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage for the Integration of Wind Energy, Proceedings of the European Wind Energy Conference, EWEC 2004, 22-25 November 2004, London UK.
- Crotogino F, Mohmeyer K-U, and Scharf R., 2001
- Huntorf Compressed Air Energy Storage: More than 20 Years of Successful Operation. Proceedings of SMRI Spring Meeting, Orlando, Florida, USA, 15-18 April 2001.
- Duchow, D., Fitz, I., Grüschow, N., Fulda, D., Chancen für einen rentablen Carnallitbergbau, Neue Bergbautechnik, 1: 22-27, 1990
- Emmons, E., Naumann, R., Latentwärmespeicher – Entwicklung und chemische Probleme, Zeitschrift für Chemie, 29(10): 353-368, 1989
- Grüschow, N., Krumbein, J., Status and Development of Carnallite Solution Mining in Bleicherode, Germany, Solution Mining Congress 1997, Cracow/Poland
- Scherzberg, H., Kaps, S., Wuttke, F., Thess, A. (2013) Storage System and Method to store temporary surplus of electrical energy, German Patent, 10 2013 006 814.2 (filed April 2013).
- Thess, A. (2013) Thermodynamic Efficiency of Pumped Heat Electricity Storage, *Physical Review Letters*, accepted for publication
- Wuttke, F., Wagner, N., Khan, M., Thess, A., Scherzberg, H. (2014) Thermohaline Energy Geo-Storage – Evolution of Fluid-Fluid Layers and Fluid-Salt Rock Interaction, *Geotechnique Letters* (in Print)
- Zunft S., C. Jakiel, M. Koller, C. Bullough, 2006
Adiabatic Compressed Air Energy Storage for the Grid Integration of Wind Power, Sixth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Windfarms, 26-28 October 2006, Delft, the Netherlands