

Flüssigsalz-Latentwärmespeicher in Salzstrukturen zur bedarfsgerechten Strombereitstellung aus Erneuerbaren Energien

Horst Rüter, Reinhard Kirsch

HarbourDom Dortmund, GeolImpulse Kiel

Keywords: heat storage, salt structures, latent heat, phase transition

Zusammenfassung

Für eine erfolgreiche Energiewende müssen Stromerzeugung aus regenerativen Quellen, Verteilernetze und schwarzstartfähige Energiespeicher zügig ausgebaut werden. Hierzu wird das Konzept eines Hochtemperatur Latentwärmespeichers in Salzstrukturen vorgestellt. Die hohe Schmelzenthalpie von Steinsalz ermöglicht eine hohe Speicherkapazität, durch die hohe Schmelztemperatur von Steinsalz von 801°C ergibt sich ein hoher Wirkungsgrad bei der Rückverstromung. Die praktische Umsetzung eines derartigen Speichers ist technisch anspruchsvoll und erfordert ein umfangreiches Forschungs- und Entwicklungsprogramm.

1. Einleitung

Die wachsende Bereitstellung von Elektrizität aus fluktuierenden Quellen (Wind, Fotovoltaik) macht eine Abstimmung zwischen Angebot und Nachfrage zunehmend schwieriger und führt häufig zu Abregelungen der Anlagen mit entsprechendem Energieverlust (Abb. 1). Zwar ist zu erwarten, dass durch den fortschreitenden Ausbau der Stromnetze und deren Verknüpfung im europäischen Rahmen (z.B. durch das Seekabel Nordlink) sowie durch Wasserstoff-Elektrolyse (power to gas) derartige Abregelungen seltener werden. Die angestrebte Dekarbonisierung der Gesellschaft wird aber zu einer Zunahme des Stromverbrauchs und damit einer noch größeren Abhängigkeit vom Stromnetz führen. Daher ist ein deutlicher Ausbau der Speichermöglichkeiten für elektrische Energie erforderlich, die möglichst auch schwarzstartfähig sein sollen, um den Netzaufbau nach einem *black out* unterstützen zu können.



Abb. 1 Energieverlust durch Abregelung von Windkraftanlagen.

Hier ist zunächst ein technologisch offenes Vorgehen angesagt. Alle technisch denkbaren Speichermöglichkeiten sind auf ihre technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit zu untersuchen. Eine der Möglichkeiten ist die Kombination eines Höchsttemperatur-Wärmespeichers mit einem thermodynamischen Kraftwerk (power-to-heat-to-power, P2H2P, Speicherkraftwerk). Da die Effizienz des mitgedachten thermodynamischen Kraftwerks stark von der Temperatur des Arbeitsmittels abhängt (Carnot) ist diese Kombination umso günstiger, je höher die Speichertemperatur des Wärmespeichers ist. Bei 800°C haben die Kraftwerke etwa die heute maximal realisierbare Effizienz. Natürlich kann das Kraftwerk aus Gründen der technischen Realisierbarkeit auch mit Temperaturen unterhalb der Temperatur der Wärmequelle (etwa bei 500 – 700 °C) betrieben werden.

Zurzeit laufen Überlegungen, ob mit derartigen Speichern an Standorten von Braunkohlekraftwerken der Turbinen/Generatorteil der Anlage weiterverwendet werden kann. Eine derartige Anlage auf einem RWE Kraftwerkstandort ist als Reallabor in Planung (Kraftwerk Weisweiler). Die Speicherung der Salzschnmelze erfolgt in Becken oder Behältern, mit denen die Nachtstunden oder Flauten überbrückt werden können. Dies ermöglicht allerdings nur kleine Speicherkapazitäten bei vergleichsweise hohen Kosten.

2. Wärmespeicher / Latentwärmespeicher

Wärmeenergie kann in einem Arbeitsmedium als sensible oder latente Wärme gespeichert werden. In einem Temperaturbereich abseits des Schmelz- oder Siedepunktes führt die Zufuhr von Wärmeenergie zu einer Temperaturerhöhung (sensible Wärme), während für einen Phasenwechsels bei der entsprechenden Temperatur zusätzliche Wärme ohne Temperaturerhöhung (latente Wärme, Schmelzenthalpie) zugeführt werden muss (Abb. 2).

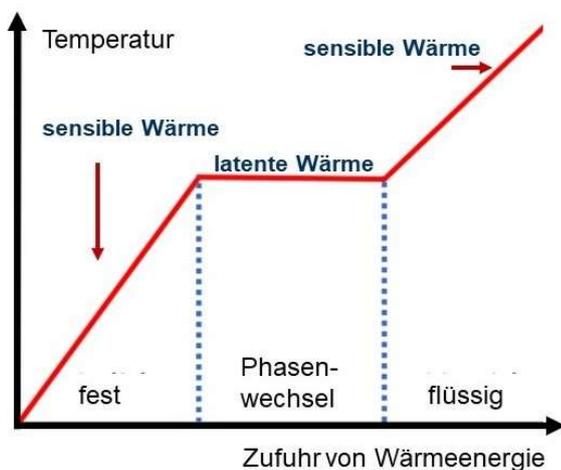


Abb. 2: sensible und latente Wärme.

Bei der Rückgewinnung latenter Wärme kann dem Arbeitsmedium viel Wärmeenergie bei konstanter Temperatur entzogen werden, z.B. bei Wasser/Eis sind es 80 kcal/kg bzw. 334 kJ/kg. Dies führt zu einem konstanten Wirkungsgrad nachgeschalteter Wärmepumpen oder Turbinen zur Stromerzeugung.

Die meisten technischen Wärmespeicher sind sensible Speicher ohne Phasenänderung, wie z.B. beim Projekt Electro-Thermal Energy Storage (ETES) in Hamburg Altenwerder, das mit Basalt und

Temperaturen bis 800°C arbeitet. Der o.a. Salzspeicher beim Projekt TESIS der DLR arbeitet mit einem flüssigen Salzgemisch bei 150 – 560 °C.

Das hier vorgeschlagene Projekt befasst sich mit der Speicherung von latenter Wärme im Steinsalz.

3. Energiespeicher in Salzstrukturen

Natürliche Salzstrukturen sind im Norddeutschen Becken (Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, aber auch NRW) weit verbreitet (Abb. 3), in einem erheblichen Teil der Fläche verfügbar und zum Teil durch die Kohlenwasserstoffexploration gut erkundet. Diese Salzstrukturen erstrecken sich oft über einen größeren Tiefenbereich, sie können mit ihrer oberen Begrenzung nahe an die Erdoberfläche kommen, andererseits aber mehrere tausend Meter Tiefe erreichen (Abb. 4). Zur Speicherung von Erdgas und Erdöl wurden durch Solung bereits zahlreiche Kavernen in Salzstrukturen angelegt.

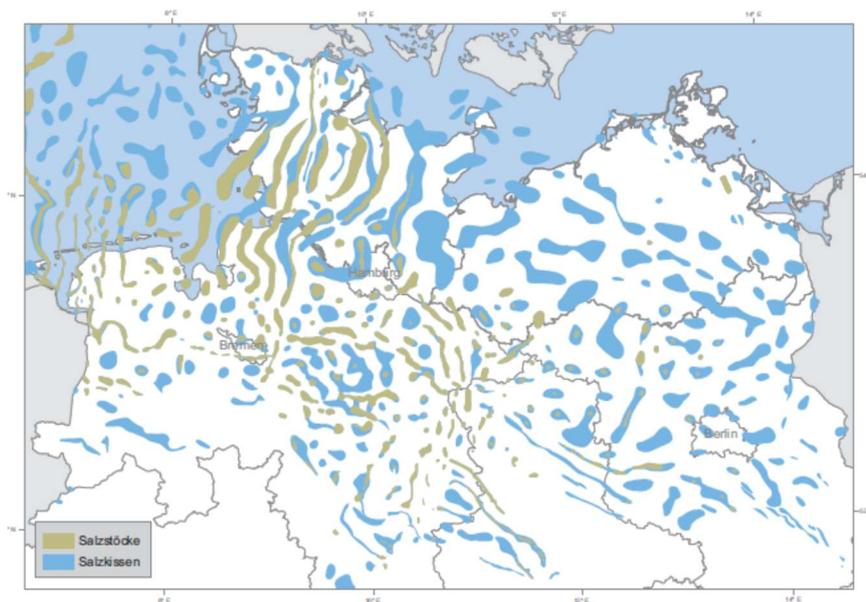


Abb. 3 Salzstrukturen in Norddeutschland. Quelle: BGR.

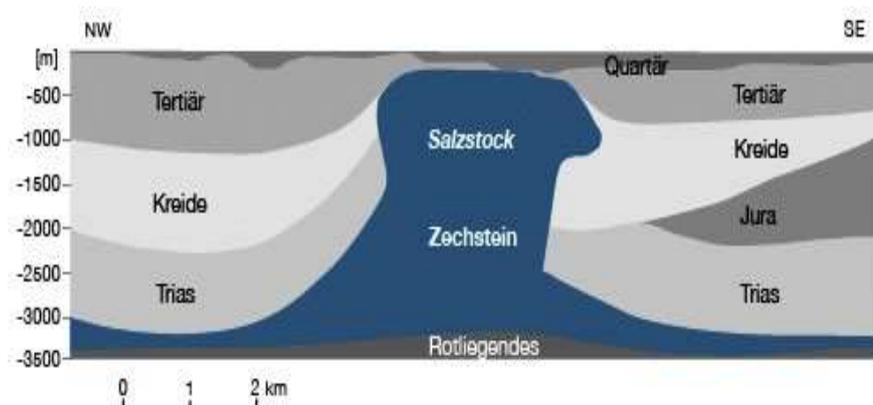


Abb. 4 Typische Form und Tiefenausdehnung eines Salzstockes. Quelle: BGR.

Salzstrukturen sind dort vorhanden, wo zunehmend mit größeren Mengen von überschüssigem Windstrom zu rechnen ist. Es gibt erste Ansätze, Salzkavernen zur Speicherung dieser Energie zu nutzen, so z.B. der bereits 1978 in Betrieb gegangene Druckluftspeicher in Huntorf (Niedersachsen) mit einer Speicherkapazität von 1.200 MWh, der geplante Wasserstoffspeicher in Hemmingstedt (Schleswig-Holstein) oder der geplante Redox-Flow Akku in Jemgum (Niedersachsen).

Die thermischen Eigenschaften von Steinsalz sind für eine Wärmespeicherung günstig. Bei einer Schmelztemperatur von 801 °C beträgt die Schmelzenthalpie 520 kJ/kg. Ein Latentwärmespeicher mit dieser Arbeitstemperatur liefert eine für die Energieeffizienz der Rückverstromung (Carnot) günstige hohe Temperatur des Arbeitsmediums. Thermische und geophysikalische Parameter von festem und geschmolzenem Steinsalz sowie von Sandstein als typisches Umgebungsmaterial eines Salzstocks sind in Tabelle 1 aufgeführt. Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität von Steinsalz sind stark temperaturabhängig, die im Vergleich zu anderen Gesteinen hohe Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz bei Oberflächentemperatur reduziert sich erheblich mit steigender Temperatur.

	Steinsalz 0°C	Steinsalz 300°C	Steinsalz Schmelze	Sandstein
Wärmeleitfähigkeit ¹⁾	6,49 W/(mK)	2,5 W/(mK)	1,0 W/(mK)	3,0 W/(mK)
spezifische Wärmekapazität ²⁾	870 J/(kgK)	920 J/(kgK)		710 J/(kgK)
Dichte	2,16 g·cm ⁻³	leichte Abnahme	1,55 g·cm ⁻³	2,5 g·cm ⁻³
seismische Geschwindigkeit (P)	4600 m/s	leichte Abnahme	1600 m/s (geschätzt)	ca. 4000 m/s
spez. elektrischer Widerstand	10 ⁵ -10 ⁷ Ωm	leichte Abnahme	0,3 Ωm	1000 – 3000 Ωm

Tab. 1 Physikalische Parameter von Steinsalz und Sandstein, ¹⁾Kopiez (1985), ²⁾ Heemann et al. (2014)

4. technisches Konzept: Latentwärmespeicher im Steinsalz

Ähnlich wie bei der Solung von Salzkavernen geht es hier um ein bohrlochorientiertes technisches Konzept. Ob es sich dabei dann letztlich um eine Einzelbohrung oder um mehrere Bohrungen (von ein und demselben Bohrplatz aus) handelt, kann bei der Darstellung des Konzepts zunächst offenbleiben.

Mit Hilfe der Bohrung, die durchaus einige tausend Meter tief sein kann, wird Energie in den Salzstock ein- bzw. ausgespeichert. Beides kann durch ein in der Bohrung zirkulierendes Arbeitsmittel erfolgen, das für den Temperaturbereich geeignet ist. Derartige Technologien für hohe Temperaturen sind in der konventionellen Kraftwerkstechnik (Kohle, Gas) bekannt. Die Bohrung kann hierzu in geeigneter Weise koaxial komplettiert sein. Im Falle der Einspeicherung über ein zirkulierendes Arbeitsmittel müsste dieses in einer übertägigen Anlage auf die notwendige Temperatur elektrisch aufgeheizt werden. Als Arbeitsmittel ist an überkritisches Wasser (Kritischer Punkt 647 K/ 374°C, 22.064 MPa/ 221 bar) zu denken, auch an überkritisches CO₂ (sCO₂) (Kritischer Punkt 304 K/ 31°C, 7.375 MPa/ 74 bar) oder an flüssige niedrigschmelzende Metalle. Überkritisches Wasser wird schon heute in etwa 500 Kohlekraftwerken weltweit im Dampfprozess verwendet, allerdings bei Temperaturen meist von 580 °C und 270 bar Druck. An Anlagen mit 700°C und 350 bar wird gearbeitet.

Eine Einspeicherung könnte (im Gegensatz zur Ausspeicherung) auch elektrisch erfolgen, z.B. durch einen Hochtemperatur-Heizstab in der Bohrung oder durch Auslegung der koaxialen Kompletierung als Heizstab, eingebracht beispielsweise als Coil Tubing Liner (Abb. 5).

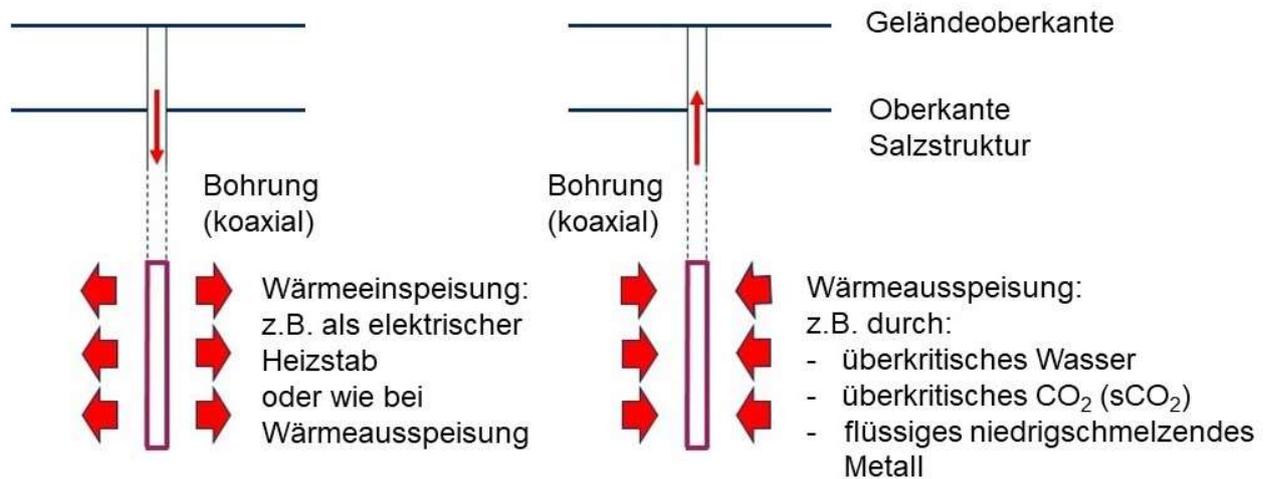


Abb. 5 Möglichkeiten der Wärmeein- und ausspeisung (schematisch).

Durch das zirkulierende Arbeitsmittel oder den Heizstab/Tauchsieder würde die Bohrung über die Schmelztemperatur des Salzes (801 °C) erwärmt was zum Schmelzen des bohrungsnahen Bereichs führen wird. Je nach Zeitdauer der Einspeicherung könnte in einem Bereich von einigen Metern rund um die Bohrung das Salz schmelzen. Schmilzt das Salz bis zu einer Entfernung von 5 m vom Bohrloch auf einer Länge von 1000 m so ergeben sich in etwa folgende Kennwerte:

Salz	Natriumchlorid
Schmelztemperatur	801 °C
Durchmesser des Speichers	10 m
Länge des Speichers	1.000 m
Volumen des Speichers	75.000 m ³
Masse des zu schmelzenden Salzes	165.000 t
Speicherkapazität (Latentwärme)	86.000.000 MJ/23.000 MWh
spezifische Speicherkapazität	306 kWh/m ³

Die für die Einspeicherung notwendigen Zeiten sind von den Details der Anlage (z.B. Flussrate des Arbeitsmittels) abhängig und bestimmen die Leistung der Anlage. Bei einer Ein-/Ausspeicherungsleistung von 1 GW würden etwa 1 Tag zur vollständigen Auf-/Entladung benötigt. Wobei der Speicher jedoch keine streng definierte Obergrenze der Speicherkapazität hat, da ja der Schmelzbereich auch größer als $r = 5$ m werden kann. Ein derartiger Speicher könnte die Tagesleistung von 200-300 Windkraftanlagen onshore bzw. die Tagesleistung mehrerer offshore Windparks aufnehmen.

Ein relativ ‚schlanker‘ Speicher, vergleichsweise lang und mit nur einigen Metern Durchmesser sichert eine gute Interaktion mit der Bohrung bei der Ein- und Ausspeisung. Andererseits ist in Bezug auf Wärmeverluste ein annähernd kugelförmiger Speicher optimal. Hier ist durch Modellieren ein Optimum zu finden.

Der Betrieb der Anlage bei praktisch konstanter Temperatur ist ein technologischer Vorteil gegenüber Wärmespeicheranlagen mit einer großen Temperaturspreizung und den damit verbundenen Problemen durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten der verbauten Materialien, auch in Bezug auf die Temperatur mit der letztlich das Kraftwerk betrieben wird.

5. Integration in ein Versorgungssystem

Es ist vorstellbar, dass ein Flüssigsalzspeicher mit einem oder mehreren Windparks kombiniert wird. Die Leistungen müssten dann aneinander angepasst werden, z. B. durch die Tiefe oder Anzahl der Bohrungen. Gleichzeitig müsste über optimale Distanzen zwischen den beiden Anlagen nachgedacht werden, da es aber um den Transport von Strom geht, scheint dies nicht zu kritisch. In jedem Fall werden durch eine gewisse räumliche Nähe Ansprüche an das Stromleitungsnetz verringert.

Da die Kraftwerkskomponenten eines Flüssigsalzspeicher-Kraftwerks nahezu identisch sind mit den entsprechenden Komponenten fossiler Kraftwerke, ist, an geeigneten Standorten, auch an den Weiterbetrieb eines fossilen Kraftwerks (Kohle, Öl, Gas) mit dieser erneuerbaren Wärmequelle zu denken. Auch Verlegungen von Kraftwerken an einen geeigneteren Standort sind denkbar.

Das vorgesehene Speichersystem ist (mit einigen Zusatzeinrichtungen) schwarzstartfähig und hat einen geschätzten Gesamtwirkungsgrad von über 50%, was im Bereich moderner Gaskraftwerke liegt. Durch eine Kraftwärmekopplung (KWK) lassen sich, wie bei jedem thermodynamischen Kraftwerk die Wirkungsgrade erheblich (auf deutlich über 80%) steigern. Dies setzt natürlich standortnahe Wärmenutzer voraus.

6. Forschungskonzept

Zur Realisierung eines Flüssigsalz-Latentwärmespeichers in einem Salzstock besteht ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, besonders anspruchsvoll ist die Technologieentwicklung zur Wärmeein- und ausspeisung über eine oder mehrere Bohrungen.

Deshalb wird ein Forschungsrahmen vorgeschlagen bis hin zur Errichtung eines Reallabors. Mögliche Arbeitsschritte hierzu sind:

- Numerische Modellierung der Latent-Wärmespeicherung im Salz (schematisierte Salzstruktur), Ermittlung von Speicherkapazität und Speicherleistung
- Numerische Modellierung der Latent-Wärmespeicherung im Salz (reale Salzstruktur), Ermittlung von Speicherkapazität und Speicherleistung
- Labor: Ermittlung physikalischer Parameter von Steinsalz und Wärmeträgermaterialien für die hier vorgesehenen Temperaturbereiche
- Großlabor: Untersuchung des Verhaltens von Steinsalz bei Wärmebelastung durch kleinmaßstäbliche Modelle, z.B. in einem 5x5 m Block, zur technologischen Entwicklung der kritischen Komponenten Wärmeein- und ausspeisung. Derartige Experimente sind vorzugsweise an einem etablierten Forschungsstandort, wie dem RWE Forschungskraftwerk Weisweiler anzusiedeln. Hierbei wird eine Anbindung um das bewilligte Reallaborprojekt der DLR angestrebt.

- Geophysik: Möglichkeit zur Erkundung der inneren Struktur von Salzstöcken (Seismik, Radar) sowie zum Monitoring bei Wärmeein- und Ausspeisung.
- Bohrtechnik: Technische Möglichkeiten zur Errichtung eines Wärmeübertragers untertage
- Bohrtechnik: Bohrungskomplettierung in Koaxialform ev. als Heizstab?
- Kraftwerkstechnik: Arbeitsmedium für hohe Temperaturen, Turbinen
- Kraftwerkstechnik (übertägige Anlagen): Technische Komponenten für hohe Temperaturen (Komplettierung, Bohrlochkopf, Pumpen, Wärmeübertrager etc.)
- Abschätzung des Technologiepotenzials in Nordwestdeutschland
- Systemintegration

Diese Untersuchungen dienen zur Vorbereitung eines Reallabors, bei dem Untersuchungen im Realmaßstab an einer natürlichen Salzstruktur in relative geringer Tiefe (bis etwa 300 m) möglich sind. Sie können zunächst etwas kleiner ausfallen als es dann für einen kommerziellen Speicher anzusetzen wäre. Zunächst wäre sicher eine Bohrung mit einigen hundert Metern Tiefe ausreichend um wesentliche Erkenntnisse zu erarbeiten. Die Umsetzung in einer 1.000 oder 1.500 m Bohrung wäre dann nur ein weiterer Schritt. Ein solches Reallabor wäre am ehesten an einem existierenden Gaskavernenfeld zu realisieren, da dort die infrastrukturellen und genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen am ehesten erfüllt sind.

7. Ergebnis

Mit Wärmespeichern in Salzstrukturen können erheblich größere Speichervolumina und -kapazitäten realisiert werden als in technischen Speichern. 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.

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.

Quellenangaben

HEEMANN, U., KULL, H., LI, S., MIEHE, R., MÜLLER, C.: VIRTUS - Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz. BMWi-Vorhaben, Anhang B, FKZ 02E10890, GRS-354, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 249 S., ISBN 3944161343: Braunschweig (2014).

KOPIETZ, J.: 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 (1985).

Horst Rüter, Schürbankstrasse 20a, 44287 Dortmund
rueter@harbourdom.de, horst.rueter@geothermie.de

Reinhard Kirsch, Graf-Spee-Strasse 4-6, 24105 Kiel
geo-i@mytng.de