

Die elektrisch leitfähige Erde

Oliver Ritter, Ute Weckmann, Gerard Muñoz
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Understanding the electrical conductivity of earth materials is important to decipher structures and processes in Earth's deep interior. Electromagnetic deep sounding methods are used to unravel structures at depths from a few tens of meters to tens of kilometres. The Geo-Electromagnetic Group of GFZ is interested in all aspects of this research field: sensor and instrument development, novel algorithms for signal processing and data inversion, conductivity measurements on rock samples and application of the method to basic and applied research topics. We present examples from the San Andreas Fault, California, South Africa and the North German Basin.



Einige Metalle, wie beispielsweise Kupfer oder Aluminium, setzen dem elektrischen Stromfluss wenig Widerstand entgegen. Andere Stoffe, beispielsweise Granit oder Marmor, leiten dagegen den elektrischen Strom so gut wie nicht. Salzwasser mit seinem hohen Anteil gelöster Ionen ist wiederum ein guter Leiter. Auch tief in der Erde gibt es Schichten unterschiedlicher Leitfähigkeit. Wie gut einzelne Gesteinsschichten den elektrischen Strom leiten, hängt von ihrem Wassergehalt, ihrer chemischen Zusammensetzung und vor allem vom Grad ihrer Mineralisation ab. So sind stark mineralisierte Gesteine, die Erze, Graphit und viele Sulfide enthalten, sehr gute unterirdische Leiter.

Da man den elektrischen Widerstand der Gesteine im tiefen Untergrund nicht direkt messen kann, werden die elektrischen und magnetischen Felder an der Erdoberfläche mit Sonden aufgenommen. Als „Stromquelle“ dienen dabei die Sonne und Blitze, denn der ständig wehende Sonnenwind und die weltweite Gewitteraktivität, vor allem im tropischen Gürtel, erzeugen in der Magnetosphäre und Ionosphäre elektrische Wechselströme. Weltweit gibt es zwischen 2000 und 3000 Gewitter täglich, mit bis zu 30 Mio. Blitzen. Deren Magnetfeldänderungen wiederum induzieren elektrische Ströme im Untergrund. Die horizontalen magnetischen und elektrischen Feldkomponenten können an der Erdoberfläche mit geeigneten Messsystemen aufgezeichnet und diese Daten anschließend mit Computerprogrammen ausgewertet werden. Als Ergebnis erhält man ein Modell der Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit mit der Tiefe. Diese Messungen werden als „magnetotellurische Tiefensondierungen“ (MT) bezeichnet.

Die Geo-Elektromagnetikgruppe am Deutschen GeoForschungszentrum GFZ beschäftigt sich mit allen Aspekten der elektromagnetischen Tiefenforschung. Sie betreibt z. B. aktiv die Entwicklung von Sensor- und Datenerfassungssystemen für die Magnetotellurik-Komponente des Geophysikalischen Gerätepools Potsdam (GIPP). GIPP ist eine Forschungsinfrastruktur des GFZ, die hunderte von Messgeräten für die Seismologie und über 70 Geräte für die Magnetotellurik umfasst (vgl. Artikel Haberland und Ryberg in diesem Heft). Über diesen Instrumentenpool können sich Universitäten und andere deutsche

Forschungseinrichtungen Instrumente für geophysikalische Experimente ausleihen. Weitere Forschungsschwerpunkte der Geo-Elektromagnetikgruppe sind die Entwicklung neuer Algorithmen für die Signalverarbeitung und numerische Inversionsverfahren, Leitfähigkeitsuntersuchungen an Gesteinsproben, sowie die Entwicklung und Anwendung elektromagnetischer Verfahren mit künstlichen Quellen.

Die Durchführung großer Feldexperimente ist ein wesentlicher Aspekt unserer Forschung. Das Ziel ist dabei, Strukturen tief im Erdinneren besser zu verstehen. Große, aktive Verwerfungszonen, wie zum Beispiel die San Andreas-Verwerfung in Kalifornien, sind mehr als tausend Kilometer lang und trennen tektonische Platten bis in Tiefen von mehreren Zehner-Kilometern. Geophysikerinnen und Geophysiker bauen deshalb ihre Geräte und Sensoren an diesen Zonen auf.

Eine magnetotellurische Messstation besteht aus Magnetometern und Elektroden zur Aufzeichnung der magnetischen und elektrischen Wechselfelder sowie einem Datenerfassungssystem. Die Sensoren (Magnetometer und Elektroden) messen dabei nur vorhandene Felder, ohne selbst Ströme im Untergrund zu erzeugen. Die Messdauer an einem Punkt hängt von der angestrebten Sondierungstiefe ab. Für Eindringtiefen im Bereich von mehreren hundert Metern bis einigen Kilometern beträgt sie typischerweise ein bis drei Tage, für Tiefen von mehreren zehn bis hundert Kilometern können die Messzeiten einen Monat und länger betragen.

Die elektrisch leitende San Andreas-Verwerfung

Auf diese Weise sind inzwischen eine Reihe geologisch aktiver Gebiete vermessen worden. Dabei gilt ein besonderes Augenmerk den sogenannten Scherzonen, also jenen Bereichen der Erdkruste, in denen sich zwei Gesteinsschollen aneinander vorbeischieben. Große Horizontalverschiebungen, wie die San Andreas-Verwerfung in Kalifornien, sind Nahtstellen der Erde, die durch die gesamte Erdkruste bis in den Erdmantel hinein wirken. Welche Prozesse dabei ablaufen und welchen Verlauf solche Störungszonen in der Tiefe nehmen, ist ein geowissenschaftlich hochaktuelles Thema. An der Erdoberfläche wandert Los Angeles jährlich im Mittel rund sechs Zentimeter auf San Francisco zu, weil sich die Pazifische Platte, auf der Los Angeles liegt, nach Norden bewegt, parallel zur Nordamerikanischen Platte, auf der San Francisco liegt. In einigen Bereichen der Verwerfung ist diese Bewegung fast kontinuierlich, kriechend, während sich andere Bereiche verhaken, um sich dann, mit starken Erdbeben verbunden, ruckartig um mehrere Meter gegeneinander zu verschieben. Beim San Francisco-Erdbeben von 1906 wurde z. B. ein schlagartiger Versatz von sechs Metern registriert.

Mit Magnetotellurikmessungen ist es gelungen, diese Grenzfläche bis in große Tiefen abzubilden und einen Zusammen-

Links: Magnetotellurik-Messgeräte: Stationsaufbau im Tien Shan in Kirgisistan (Foto: G. Willkommen, GFZ)

Left: Magnetotelluric equipment: Station deployment in the Tien Shan in Kyrgyzstan



Kontakt: O. Ritter
(oritter@gfz-potsdam.de)

hang zwischen Vorgängen in der Tiefe und den Prozessen an der Erdoberfläche herzustellen (Becken et al., 2011). Im Abbild der elektrischen Leitfähigkeit in Abb. 1 wird deutlich, dass Gesteinswässer aus Tiefen des oberen Erdmantels, d. h. zwischen 20 und 40 km, bis in oberflächennahe Bereiche des kriechenden Teils der Verwerfung eindringen können, während diese Wässer in den anderen Bereichen von einer undurchlässigen Deckschicht am Aufstieg gehindert werden. Wo Fluide aufsteigen können, wird ein Gleiten der Platten begünstigt, während sie sich an anderer Stelle verhaken. Diese Ergebnisse legen nahe, dass es auch in der Tiefe große Unterschiede in den mechanischen und stofflichen Eigenschaften entlang der Störung gibt. So scheinen die sogenannten Tremor-Signale an Bereiche unterhalb der San Andreas-Verwerfung gekoppelt zu sein, in denen Fluide eingeschlossen sind. Mit Tremor werden niederfrequente Erschütterungen bezeichnet, die nicht mit Bruchvorgängen einhergehen, wie sie für normale Erdbeben typisch sind. Die Beobachtungen stützen insgesamt die Annahme, dass Fluide bei der Entstehung oder dem Ausbleiben von starken Erdbeben entlang großer Störungszonen eine wichtige Rolle spielen.

Die Arbeiten helfen, die treibenden Kräfte der Plattentektonik besser zu verstehen und zeigen neue Möglichkeiten auf, den Ablauf dynamischer Prozesse von großen Störungssystemen zu erklären. Ein besonders spannender Aspekt dieser Arbeiten ist der mögliche Zusammenhang von Fluiden und den an der San Andreas-Verwerfung beobachteten Tremorsignalen. Dies ist Gegenstand weitergehender Forschungstätigkeiten.

Generell sind die aktiven tektonischen Gebiete der Erde, in denen tektonische Platten aufeinandertreffen, wichtige Untersuchungsziele für die Geowissenschaften. Häufig werden diese geodynamischen Fragestellungen mit einer Vielzahl von Methoden und Verfahren in multi-disziplinären Ansätzen und in international vernetzten Projektgruppen untersucht. Die tiefe Magnetotellurik liefert für eine große Zahl dieser regionalen Projekte wertvolle Daten. Beispiele dafür sind die Verwerfung am Toten Meer (Israel/Jordanien), die zwei kontinentale Platten voneinander trennt, die kontinentale Kollisionszone im Pamir und Tien Shan (Kirgisistan/Tadschikistan) und die Subduktionszone in Chile.

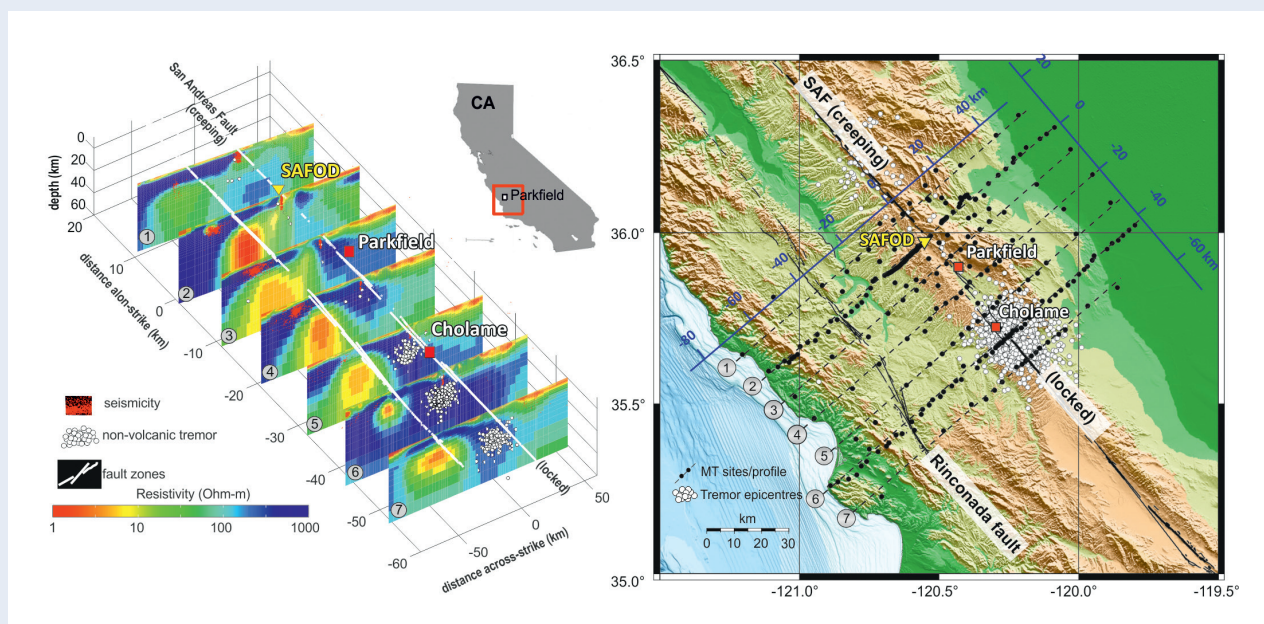


Abb. 1: Links: Im Abbild der elektrischen Leitfähigkeit erscheint im Bereich der San Andreas-Verwerfung ein tieferreichender, leitfähiger Kanal, der die gesamte Erdkruste bis in den oberen Erdmantel hinein durchdringt. Hohe Leitfähigkeiten, hier in roten und gelben Farbtönen dargestellt, lassen sich durch das Vorkommen von Fluiden erklären. Rechts: Verteilung der MT-Stationen (schwarze Punkte) und Lage der San Andreas-Verwerfung (SAF) in Kalifornien. Die weiß markierten Punkte zeigen Gebiete, in denen Tremorsignale gefunden wurden.

Fig. 1: Left: The image of electrical conductivity shows a deep-reaching conductive channel in the area of the San Andreas Fault penetrating the entire crust and into the upper mantle. High conductivities, shown in red and yellow colours, are explained with the presence of fluids. Right: Distribution of MT stations (black dots) and location of the San Andreas Fault in California. White dots show areas where tremor signals have been detected.

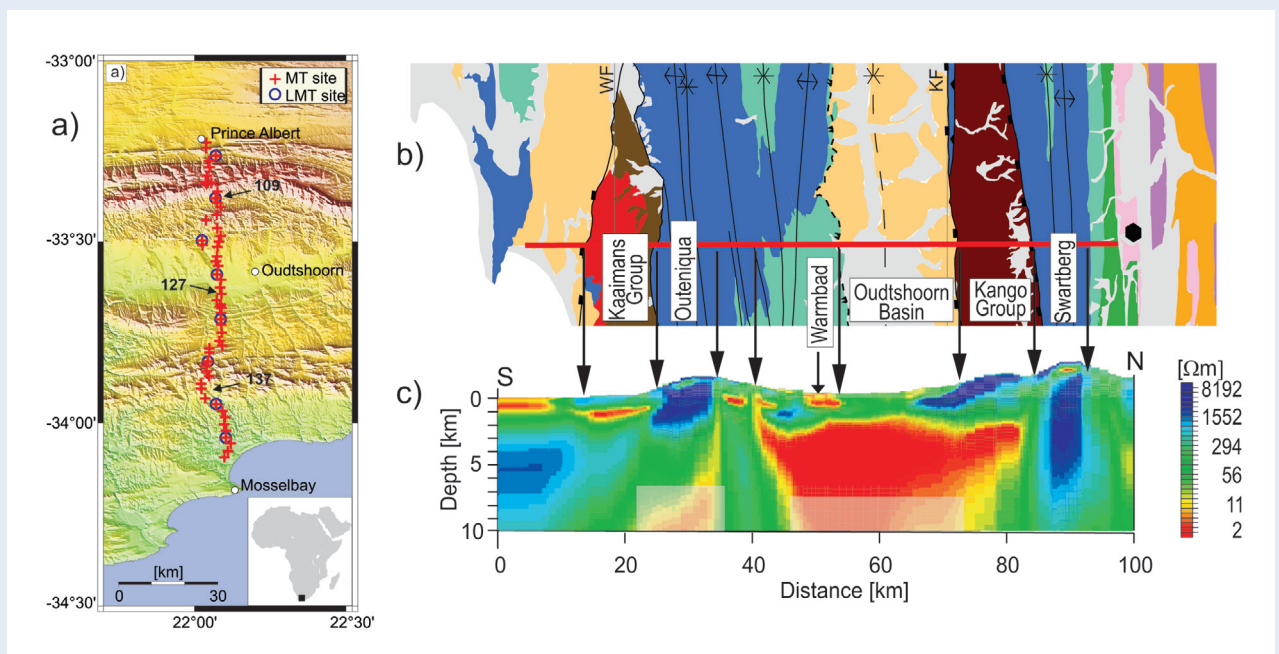


Abb. 2: a) Topographische Karte des Cape Fold Belts in Südafrika mit magnetotellurischen Messstationen (rote Kreuze). b) Oberflächengeologie entlang des in a) gezeigten Stationsprofils. c) Im Abbild der elektrischen Leitfähigkeit zeigen Gebirgszüge, wie der Swartberg und die Outeniqua-Berge schlecht leitende Gebirgswurzeln (blaue Farbe) bis in 2 km bzw. 7 km Tiefe. Unterhalb des Oudtshoorn-Beckens erscheint eine große Leitfähigkeitsanomalie (rote Farbe) ab einer Tiefe von etwa 3 km, die wahrscheinlich von heißen (und salzhaltigen) Wässern hervorgerufen wird.

Fig. 2: a) Topographic map of the Cape Fold Belts in South Africa with magnetotelluric stations (red crosses). b) Surface geology along the profile shown in a). c) In the image of electrical conductivity mountain ranges, like the Swartberg and the Outeniqua Mountains show poorly conductive roots (blue colours) down to depths of 2 km and 7 km, respectively. Below the Oudtshoorn Basin a large high conductivity anomaly (red colour) appears at a depth of about 3 km, possibly caused by hot (and saline) water.

Fossile Kollisionzonen und passive tektonische Gebiete

Während von den heute aktiven Platten- oder Kontinentalgrenzen eine direkte Gefahr in Form von starken Erdbeben für die dort lebenden Menschen ausgeht, erscheinen alte, sogenannte fossile Kollisionzonen zunächst weniger wichtig zu sein. Dennoch ist die Untersuchung und das Verständnis dieser Gebiete ein wichtiges Thema für die Geoforschung, denn an fossile Scherzonen sind viele heutige Georessourcen, wie z. B. Erze, gebunden. Außerdem waren heute tektonisch inaktive Gebiete zu anderen Zeiten der Erdgeschichte sehr aktiv. Das Verschieben und Aufbrechen von Kontinenten hatte erheblichen Einfluss auf unser Klima. Im südlichen Afrika lassen sich die Spuren dieser tektonischen Prozesse über einen sehr langen Zeitraum besonders gut studieren. Dieser Teil des Kontinents beherbergt nämlich die ältesten Gesteine der Erde und besitzt somit ein Geo-Archiv, das bis in die frühe Entwicklungsgeschichte unseres Planeten Erde zurück reicht.

Mit Magnetotellurik sind in den Jahren 2004 bis 2010 verschiedene Geo-Traversen in Südafrika vermessen worden, um Spuren der früheren Kontinentalkollisionen in Erdkruste und -mantel abzubilden (Weckmann et al., 2012). Die heutige Form Afrikas geht auf die Öffnung des Südatlantiks zurück, die vor etwa 130 Mio. Jahren einsetzte – der damalige Superkontinent Gondwana brach auseinander. Abb. 2a zeigt die Stationsverteilung eines MT-Profiles durch den Cape Fold Belt in Südafrika, der als letzte größere tektonische Einheit mit dem damaligen Superkontinent Gondwana vor etwa 250 Mio. Jahren kollidiert ist. Durch die enormen Kräfte bei der Kollision sind zwei Gebirgsketten (blaue/braune Farben in Abb. 2b) aufgeschoben worden. Die Swartberge und die Outeniqua-Berge besitzen tiefe Gebirgswurzeln (Abb. 2c), wogegen die Kango-Gruppe aufgrund dieses Leitfähigkeitsabbilds eher als flache Überschiebungsdecke zu interpretieren ist. Von besonderer wirtschaftlicher Bedeutung für die Region könnte die große Leitfähigkeitsanomalie unterhalb des Oudtshoorn-Beckens sein. Sie zeigt höchst wahrscheinlich einen heißen (salinaren)

Wasserspeicher in mehr als 3 km Tiefe an. Entlang von Störungs-zonen scheint es Wegsamkeiten für die Fluide bis fast an die Erdoberfläche zu geben, was auch durch heiße Quellen, wie etwa im Ort Warmbad, gestützt wird.

Generell helfen diese neuen Abbilder der tieferen Erdkruste, existierende geologische Modelle zu modifizieren, die hauptsächlich auf Oberflächenbeobachtungen basieren und neue Erkenntnisse für die Entstehung von Kontinenten abzuleiten. Mit ihnen lassen sich aber ebenso Abschätzungen über das Ressourcenpotential, z. B. für Wassernutzung oder geothermische Energiegewinnung, tätigen.

Geophysikalische Exploration

Während die Zone stark erhöhter elektrischer Leitfähigkeit im obigen Beispiel von Südafrika im Nachhinein als mögliche Wasser-Ressource gedeutet wurde, werden elektromagnetische Messungen auch gezielt zur geophysikalischen Exploration eingesetzt. Mit hydrogeophysikalischen Verfahren können oberflächennahe wasserführende Schichten, sogenannte Aquifere, aufgespürt und kartiert werden. Die Spezialität der Geo-Elektromagnetik am GFZ ist die Charakterisierung von Aquiferen in mehreren Kilometern Tiefe. Diese sind neben der

Trinkwasserversorgung auch für die Gewinnung geothermischer Energie oder der Speicherung von Gasen im Untergrund von Bedeutung.

Abb. 3 zeigt die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit entlang eines 40 km langen Profils, das nördlich von Berlin im Gebiet des GFZ-Geothermielabors Groß Schönebeck vermessen wurde (Muñoz et al., 2010). In diesem aus zwei rund 4 km tiefen Bohrungen (einer sogenannten Doublette) bestehenden In-situ-Labor werden Technologien für die Stromerzeugung mittels Erdwärme entwickelt (Huenges et al. 2007, vgl. auch Beitrag Huenges in „GFZ-Journal System Erde“ (2011) Heft 2; online verfügbar: <http://systemerde.gfz-potsdam.de>). Für eine nachhaltige Nutzung der geothermischen Energie sind Temperaturen von über 100 °C und eine langfristige Wasserzirkulation im Untergrund erforderlich. Die elektromagnetischen Verfahren spielen bei der geothermischen Exploration eine wichtige Rolle, denn die elektrische Leitfähigkeit nimmt mit der Temperatur und der Permeabilität der Gesteine zu. Die gut leitenden Zonen in rund 4 km Tiefe (Abb. 3, rote Farben) stellen die Regionen dar, in denen der Untergrund besonders durchlässig ist und ein nachhaltiger Fluidenkreislauf möglich wäre.

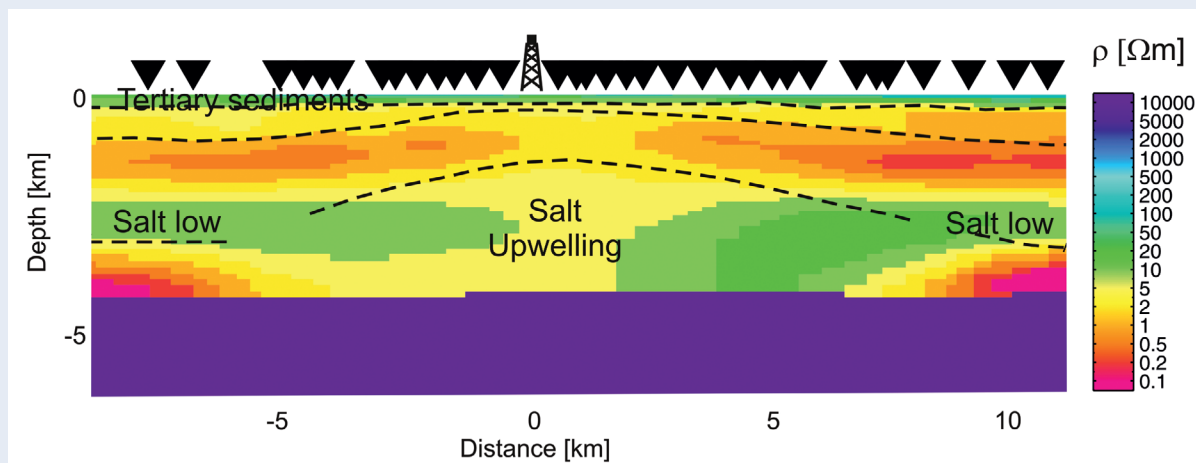


Abb. 3: Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Gebiet von Groß Schönebeck nördlich von Berlin. Die Dreiecke zeigen die Lokationen der MT-Messpunkte und der Bohrturm die Lage des In-situ-Geothermielabors. Die Zonen hoher Leitfähigkeit (rote Farbe) in einer Tiefe von ca. 4 km korrelieren wahrscheinlich mit stark zerklüfteten Gesteinen. Das Grundgebirge (ab einer Tiefe von etwa 4 bis 5 km) wird als schlecht leitend (blaue Farbe) abgebildet.

Fig. 3: Distribution of electrical conductivity in the region of Groß Schönebeck, north of Berlin. The inverted triangles show locations of MT stations and the drilling rig the position of the in-situ geothermal laboratory. Areas with high conductivity (red colours) at a depth of approximately 4 km could be correlated with heavily fractured rocks. The basement (from a depth of approximately 4-5 km) is imaged as a poor conductor (blue colour).

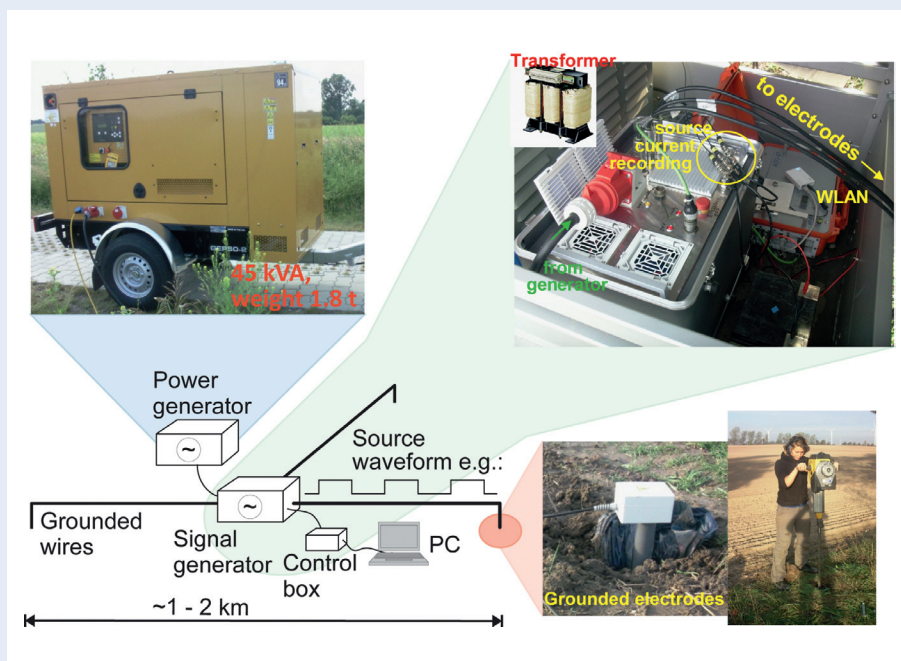


Abb. 4: Controlled Source-Elektromagnetik: Mit einem handelsüblichen 3-Phasen-Stromerzeuger (a) werden über einen programmierbaren Signal-generator (b) und Erdungselektroden Ströme in die Erde eingespeist. Als Einspeiseelektroden dienen Stahlspeieße, die mit einem hydraulischen Hammer einige Meter tief in den Boden getrieben werden (c) und die mit bis zu 1 km langen Kabeln an der Erdoberfläche verbunden sind.

Fig. 4: Controlled Source Electromagnetics: Currents are injected into the ground using a commercially available 3-phase power generator (a) and a programmable signal generator (b). For the current electrodes, steel rods are driven several meters into the ground using a hydraulic hammer (c); they are connected at surface with cables of up to 1 km length.

Elektromagnetische Tiefensondierung mit eigenen Stromquellen

Da die Magnetotellurik auf natürlich vorkommenden elektromagnetischen Feldern beruht, hat man keinen Einfluss auf deren Feldstärke. Gerade in den dicht besiedelten Gebieten Mitteleuropas gibt es vielfältige, durch menschliche Aktivitäten geschaffene Störquellen, die MT-Messungen stark erschweren können. Abhilfe kann das Verfahren der aktiven (oder „*controlled source*“) Elektromagnetik schaffen, mit dem Wechselströme gezielt in den Boden eingespeist werden; mit der Entwicklung und Anwendung dieser Methode haben sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ in den letzten Jahren intensiv beschäftigt.

Abb. 4 zeigt die prinzipiellen Komponenten des Systems (Streich et al., 2011). Es können verschiedene Signalformen (Rechteck, *pseudorandom binary sequences*) in einem breiten Frequenzbereich von mHz bis kHz mit bis zu 560 V und 40 A erzeugt und so bis in Entfernungen von mehreren Kilometern gemessen werden. Eine Besonderheit dieses neuartigen Systems ist es, dass mit einem Aufbau gleich mehrere Senderichtungen (Polarisationen) erzeugt werden können.

Mittlerweile haben wir das Verfahren am GFZ-Teststandort für CO₂-Untertagespeicherung in Ketzin trotz hoher Rauschpegel erfolgreich einsetzen können. Aus den gemessenen Daten können mittels mathematischer Verfahren, sogenannten Inversionsverfahren, Leitfähigkeitsmodelle abgeleitet werden. Erste Inversionsergebnisse zeigen, dass mit dem Verfahren

bis in Tiefen von mehreren Kilometern sondiert werden kann und damit weitere innovative Möglichkeiten zur Erkundung sowie zum Management des geologischen Untergrunds bereitgestellt werden.

Literatur

- Becken, M., Ritter, O., Bedrosian, P., Weckmann, U. (2011): Correlation between deep fluids, tremor and creep along the central San Andreas fault. - *Nature*, 480, 87-90, 10.1038/nature10609.
- Huenges, E., Moeck, I., Geothermal Project Group (2007): Directional drilling and stimulation of a deep sedimentary geothermal reservoir. - *Scientific Drilling*, 5, 47-49, 10.2204/iodp.sd.5.08.2007.
- Muñoz, G., Ritter, O., Moeck, I. (2010): A target-oriented magnetotelluric inversion approach for characterizing the low enthalpy Groß Schönebeck geothermal reservoir. - *Geophysical Journal International*, 183, 3, 1199-1215, 10.1111/j.1365-246X.2010.04795.x.
- Streich, R., Becken, M., Matzander, U., Ritter, O. (2011): Strategies for land-based controlled-source electromagnetic surveying in high-noise regions. - *The Leading Edge*, 30, 10, 1174-1181, 10.1190/1.3657078.
- Weckmann, U., Ritter, O., Chen, X., Tietze, K., de Wit, M. (2012): Magnetotelluric image linked to surface geology across the Cape Fold Belt, South Africa. - *Terra Nova*, 24, 3, 207-212, 10.1111/j.1365-3121.2011.01054.x.