

Ergebnisse magnetotellurischer Sondierungen im Raum Emsland–Ostfriesland

Laska Horejschi¹, Hartmut Jödicke¹, Norbert Hoffmann², Wolfgang Müller³

¹ Institut für Geophysik, Westfälische Wilhelms–Universität Münster

² Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Dienstbereich Berlin

³ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Dienstbereich Hannover

Einleitung

Seit über 70 Jahren wird im Rahmen der Kohlenwasserstoffförderung das Norddeutsche Becken geologisch–tektonisch erkundet. In den letzten 10 bis 15 Jahren nahm wegen der fortschreitenden Verlegung der Kohlenwasserstoffexploration in größere Tiefen das wirtschaftliche Interesse am tieferen Untergrund zu. In neuerer Zeit wird vor allem versucht, Gesetzmäßigkeiten des Beckenbildungsprozesses zu erkennen, um damit Fragen zur zeitlich–räumlichen Verteilung der Kohlenwasserstoffe und ihrer Genese besser zu verstehen (Hoffmann et al., 1998).

Seit 1993 werden in diesem Zusammenhang im Norddeutschen Becken neue MT–Messungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Zusammenarbeit mit der Universität Münster mit folgenden Zielen durchgeführt: Zum einen soll der tiefe, elektrisch gute Leiter, der als potentielles Muttergestein für Erdgas von Interesse ist, in seiner regionalen Ausdehnung untersucht werden. Zum anderen soll dieser Leiter stratigraphisch eingeordnet werden, um damit zur geologisch–tektonischen Modellierung des Untergrundes beizutragen.

Als Teil dieses Vorhabens wurden die MT– und ETS–Daten von 36 Stationen entlang dreier Profile parallel zum Verlauf der Ems ausgewertet. Die Einteilung in diese Profile (siehe Abb. 1) wurde beibehalten, um unabhängige 2D–Modellrechnungen mit der Möglichkeit des Vergleichs untereinander durchführen zu können.

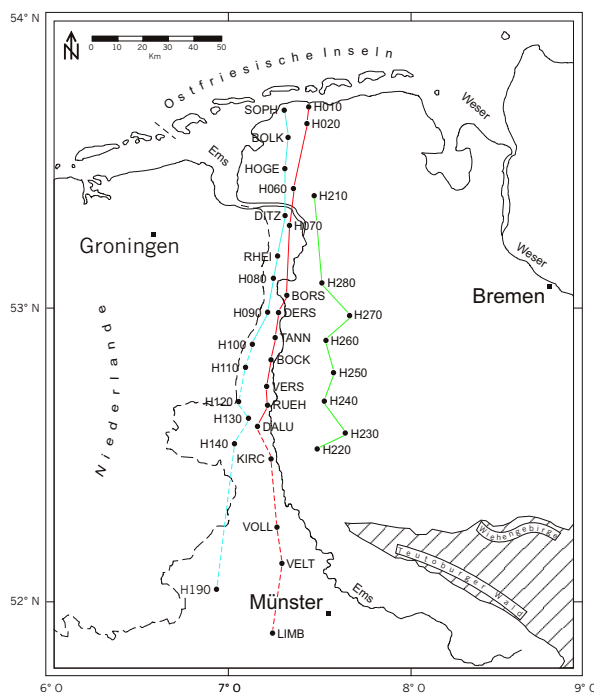


ABBILDUNG 1: Übersicht der vermessenen Stationen und deren Einteilung in West-, Mittel- und Ostprofil.

Datenaufbereitung

Aufgrund geringer magnetischer Anregungen und technischer Störungen sind die Daten des kurzperiodischen Bereichs ($T < 10$ s) durch ein schlechtes Nutz-/Störsignal-Verhältnis gekennzeichnet. Daher wurden nur die verbleibenden Perioden von $T = 10$ s bis $T = 4096$ s in der Auswertung berücksichtigt.

Des weiteren gehen die südlichen Stationen des West- und Mittelprofils aufgrund geringer Datenqualität nicht in die Modellierung ein.

Mit Hilfe des betragssensiblen Verfahrens von Swift (1967) sowie mittels des phasensensiblen Verfahrens von Bahr (1988) wurden die Daten aus dem geographischen Koordinatensystem in das System der magnetotellurischen Hauptachsen überführt. Dazu konnten für ein Drittel der Stationen die Drehwinkel durch Mittelung über alle Perioden, für zwei Drittel nur überwiegend aus den langen Perioden bestimmt werden. Bis auf wenige Ausnahmen befinden sich die berechneten Drehwinkel der einzelnen Stationen zwischen -50° und -45° . Dies entspricht dem geologischen Winkel des herzynischen Streichens (NW-SE-Richtung), das die Strukturen im tieferen Untergrund in Norddeutschland bestimmt (siehe z. B. Schöenberg und Neugebauer, 1997, Haubold und Daber, 1989).

Die im Untergrund vorherrschende Dimensionalität der Leitfähigkeitsverteilung wurde mit Hilfe der Skewness- und Anisotropiekriterien nach Bahr (1988) und Swift (1967) abgeschätzt. Bis auf wenige Ausnahmen (südliche Stationen) liegen die mittels beider Verfahren berechneten Werte der Skewness unterhalb des Grenzwertes von 0,3. Auch die Anisotropie liegt mit Werten um 2 in einem moderaten Bereich. Da dies für alle Perioden der Fall ist, kann eine 2D-Modellierung als gerechtfertigte Näherung gelten. Da die Anisotropiewerte nicht allzu groß sind, wurde zunächst die eindimensionale Interpretation der Daten als erste Näherung bzw. als Startmodell für die 2D-Modellrechnung vorgenommen.

1D-Modelle

Die Berechnung der 1D-Modelle erfolgte mit dem Algorithmus von Fischer et al. (1981), wobei offensichtliche „Ausreißer“ in den Sondierungskurven von der Rechnung ausgeschlossen wurden. Aus der Inversion der einzelnen E-Polarisationskurven ergibt sich ein Widerstands-Tiefen-Modell, welches in Abbildung 2 dargestellt ist. Die beste Anpassung der Modellantwort an die gemessenen Daten wurde fast bei allen Stationen durch einen Vier-Schichten-Fall erreicht. Es zeigt sich ein oberflächennaher guter Leiter (orange) mit Widerstandswerten von 0,4 bis 1,3 Ωm und einer mittleren Mächtigkeit von etwa 3 km. Ein tiefer

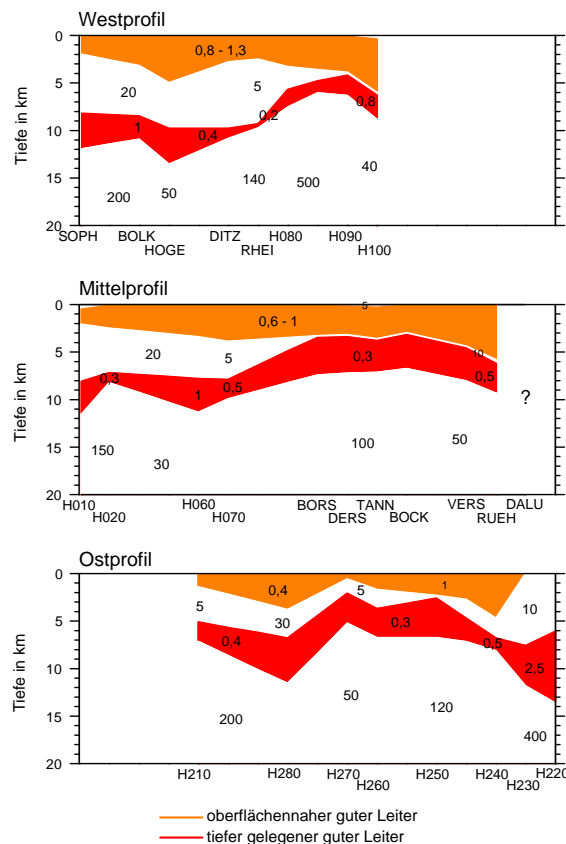


ABBILDUNG 2: 1D-Modelle der E-Polarisation. Der oberflächennahe gute Leiter ist orange, der tiefer liegende Leiter rot dargestellt.

liegender Leiter ist in einem Tiefenbereich von 9 bis 9,5 km an den nördlichen Stationen zu erkennen. Nach Süden nimmt die Tiefenlage ab und erreicht im Bereich der Meßpunkte H080, BORS und H270 eine mittlere Tiefe von ca. 5 km, um weiter südlich wieder abzusinken.

2D-Modelle

Die 2D-Modelle wurden mit Hilfe der Algorithmen von Smith und Booker (1991) und Mackie et al. (1997) berechnet. Die Anpassung der Modelldaten an die gemessenen Daten erfolgte bei beiden Programmen jeweils simultan für die E- und B-Polarisation.

Bei den Modellrechnungen war von besonderem Interesse, inwieweit sich die Wahl des Glättungsfaktors (α bzw. τ) auf das Modellergebnis auswirkt. Der Glättungsfaktor gibt das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Auflösung an. Je größer er wird, desto stärker wird die laterale Leitfähigkeitsverteilung gegenüber der 1D-Lösung gewichtet. Zur Untersuchung des Einflusses wurden Modelle mit Werten zwischen 1 und 300 für diesen Faktor berechnet.

Modellierung mit dem Programm von Smith und Booker

Abbildung 3 zeigt die Modelle des Mittelprofils, denen die 1D-Modelle der E-Polarisation als Startmodell zugrunde liegen, für die vier verschiedenen Glättungsfaktoren $\alpha = 9, 40, 110$ und 250 . Betrachtet man das Ergebnis für $\alpha = 9$, so lassen sich erhöhte Leitfähigkeiten an der Oberfläche sowie in größerer Tiefe erkennen. Die starke Gewichtung der Vertikalen wird an den drei südlichsten Stationen besonders deutlich, da die Modelle dort lateral kaum verbunden sind. Im Vergleich dazu sind die Modelle mit $\alpha = 40, 110$ und 250 zunehmend horizontal betont, wobei sich Mächtigkeiten und Leitfähigkeiten deutlich verändern.

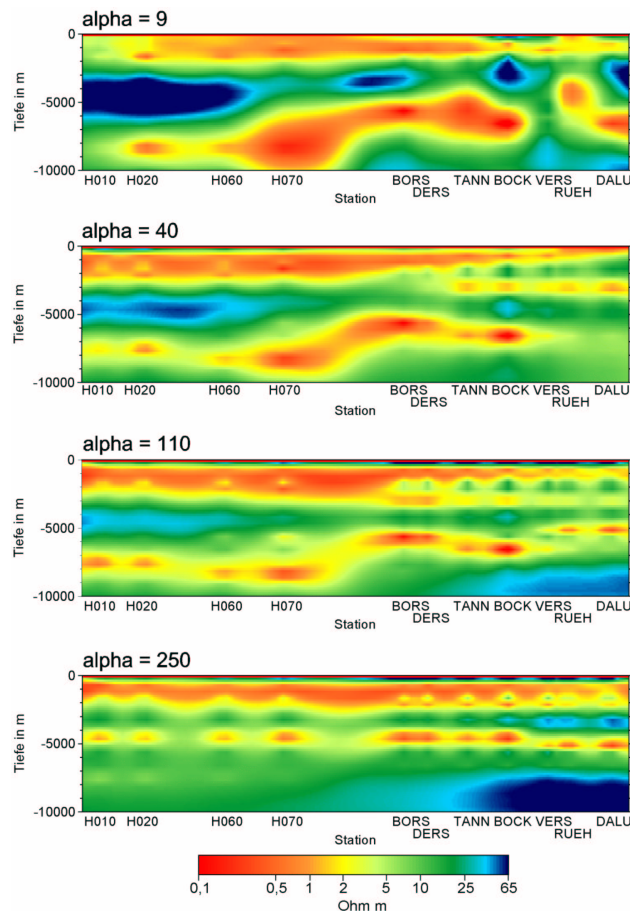


ABBILDUNG 3: Für verschiedene α -Werte berechnete Modelle des Mittelprofils (nach Smith und Booker, 1991) mit den 1D-Modellen der E-Polarisation als Startmodell.

In Abbildung 4 sind die 2D-Modelle für alle drei Profile dargestellt, die zur Interpretation verwendet wurden. Bei allen Modellen ist ein oberflächennaher sowie ein tiefliegender guter Leiter zu erkennen.

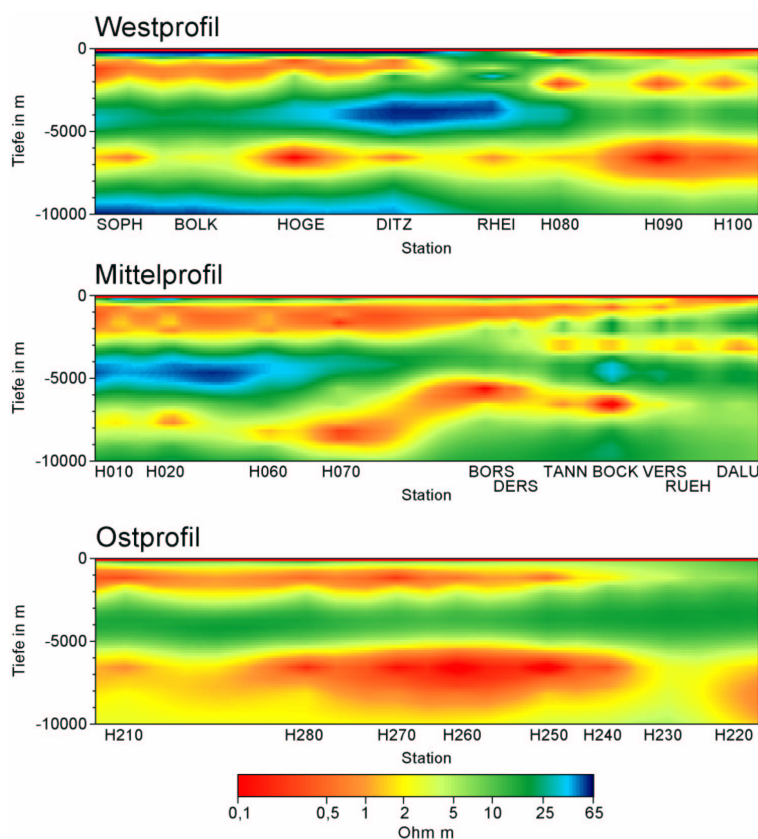


ABBILDUNG 4: 2D-Modelle des West-, Mittel- und Ostprofils nach Smith und Booker (1991) mit den 1D-Modellen der E-Polarisation als Startmodell.

Unterschiede gibt es allerdings in den Mächtigkeiten und Tiefenlagen des unteren Leiters. Allgemein ist festzustellen, daß die Anpassung im Nordteil der Profile schlechter ist als im Mittelteil oder im Süden. Für die weitere Modellierung mit dem Programm von Smith und Booker (1991) wurde ein Glättungsfaktor von 40 benutzt, da dieser ein weitgehend angemessenes Verhältnis zwischen der horizontalen und vertikalen Gewichtung zeigt.

Modellierung mit dem Programm von Mackie et al.

Um einen Vergleich zu haben, wurden die Daten auch mit dem 2D-Programm von Mackie et al. (1997) ausgewertet. In Abbildung 5 sind Modellergebnisse für verschiedene Glättungsfaktoren, hier τ genannt, aufgetragen. Den Modellen liegt ein Halbraum von $100 \Omega\text{m}$ als Startmodell zugrunde. Die oberste Graphik zeigt das Ergebnis für $\tau = 3$. Auffallend ist das Auftreten von fleckenartigen einzelnen gutleitenden Segmenten. Dieses Phänomen beruht offenbar auf der Betonung einzelner Stationen bei der Inversion unter Vernachlässigung der lateralen Beziehungen der Stationen des Profils untereinander. Damit weist das Modell aufgrund der horizontal ausgerichteten Strukturen Ähnlichkeiten zu dem mit einem α von 250 berechneten Modell auf (siehe Abb. 3). Bei einem größeren Glättungsfaktor von 100 erhält man folgendes Modell: An der Oberfläche tritt ein gutleitender Horizont mit einer Mächtigkeit zwischen 1 und 2,5 km auf. Durch die größere laterale Glättung erscheint die Grenzschicht zum darunterliegenden schlechteren Leiter wesentlich ebener als im Modell für $\tau = 3$. Eine zweite elektrisch gutleitende Schicht liegt im Norden (H010 bis H060) in einer Tiefe von 8,5 km. Nach einem Bereich, in dem die Widerstände auf etwa $5 \Omega\text{m}$ in dieser Tiefe ansteigen, wird der Leiter ab dem Meßpunkt H080 fortgesetzt, allerdings in einer höheren Lage von 5,5 km. An den zwei südlichsten Stationen dieses Profils taucht der Horizont wieder auf eine größere Tiefe von 7 km ab. Der tiefe Leiter ist zwar mächtiger, ähnelt aber ansonsten dem Leiter im Modell von Smith und Booker (siehe Abb. 3). Das Modell für einen Glättungsfaktor von 250 sieht dem eben beschriebenen sehr ähnlich. Die ersten beiden Schichten unterscheiden sich nur wenig von denen der vorangehenden Modellierung. Bei dem tiefer liegenden Leiter werden die Widerstände zwischen den Stationen H060 und H080 geringer. Damit entsteht der Eindruck, daß sich der gutleitende Horizont entlang des ganzen Profils fast durchgehend verfolgen läßt. Dies steht in guter Übereinstimmung mit den Modellen der 1D-Modellierung (siehe Abb. 2).

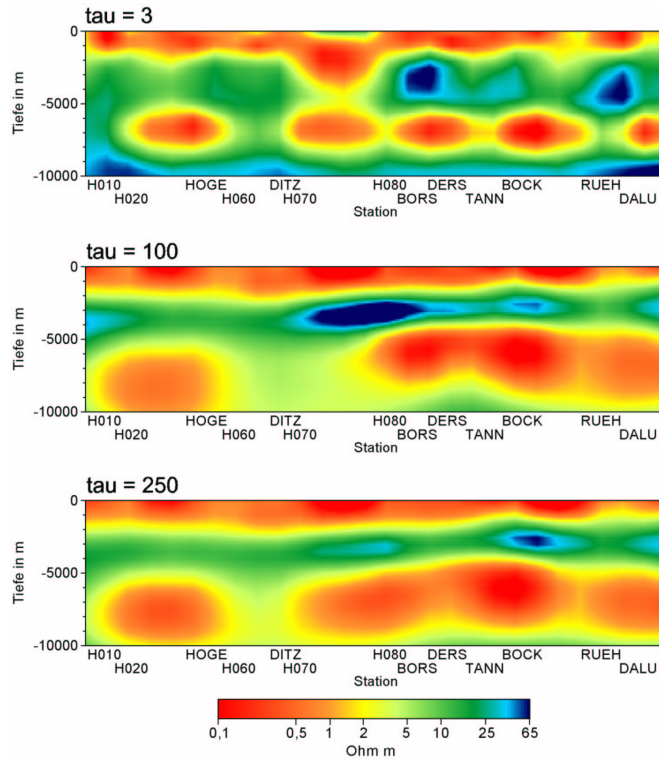


ABBILDUNG 5: Für verschiedene τ -Werte berechnete Modelle des Mittelprofils (nach Mackie et al., 1997) mit einem Halbraum von $100 \Omega\text{m}$ als Startmodell.

Für die weitere Modellierung mit dem Programm von Mackie et al. (1997) fiel die Entscheidung auf einen Glättungsfaktor τ von 250, da dieses Modell des Mittelprofils die größte Ähnlichkeit zu den 1D-Modellen der E-Polarisation und zum 2D-Modell von Smith und Booker aufweist. In Abbildung 6 sind mit diesem τ die 2D-Modelle für das Ost- und Westprofil mit den beiden guten Leitern dargestellt.

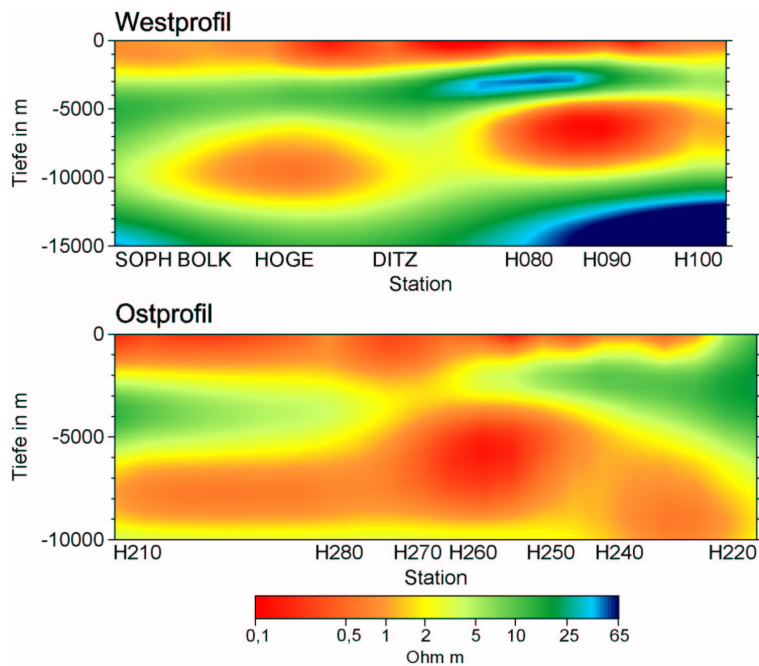


ABBILDUNG 6: 2D-Modelle des West- und Ostprofils (nach Mackie et al., 1997) mit einem Halbraum von $100 \Omega\text{m}$ als Startmodell.

Zusammenfassend läßt sich erkennen, daß die beiden Glättungsfaktoren α und τ in ihrem Einfluß auf die Ergebnisse der Modellierung leicht unterschiedlich sind: Bei kleinen α -Werten ist zu sehen, daß bei den Einzelstationen der Profile der „Blick in die Tiefe“ besonders stark gewichtet wird. Werden größere α -Werte betrachtet, so verliert sich dieser Blick und man erhält eine lateral gemittelte Leitfähigkeitsverteilung, die keine lokale Individualität mehr besitzt. Kleine τ -Werte unterscheiden sich von kleinen α -Werten dadurch, daß zwar ebenfalls die Gewichtung auf den Einzelstationen liegt, aber keine lateralen Unterschiede zu erkennen sind, also rein horizontale Strukturen ausgebildet werden. Für große τ -Werte zeigen die Horizonte laterale Unterschiede, obwohl die Modelle räumlich stark geglättet erscheinen.

Induktionspfeile und Norddeutsche Leitfähigkeitsanomalie

Um einen weiteren Blick auf die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund zu erhalten, wurden die magnetischen Übertragungsfunktionen berechnet. Die Induktionspfeile nach Schmucker (1970), die vom guten zum schlechten Leiter zeigen, liefern eine anschauliche Abbildung dieser Funktionen. Mit der Abbildung 7 werden die lateralen Leitfähigkeitsunterschiede bei verschiedenen Perioden und damit unterschiedlichen Tiefenbereichen vorgestellt. Auf der linken Seite der Abbildung sind Induktionspfeile der Periode $T = 128$ s dargestellt. Die vielen verschiedenen Richtungen sowohl für die Real- als auch für die Imaginärpfeile lassen relativ kleinräumige Strukturen bei einer geringen Eindringtiefe erkennen.

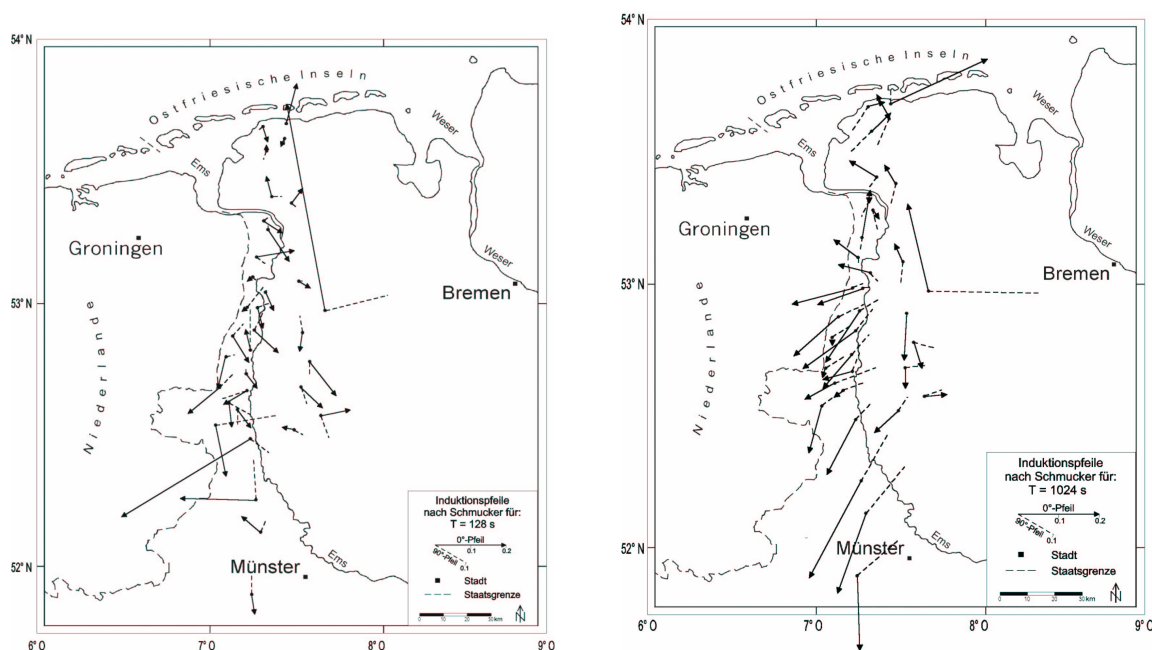


ABBILDUNG 7: Induktionspfeile für die Perioden $T = 128$ s (links) und $T = 1024$ s (rechts).

Die rechte Graphik der Abbildung 7 zeigt die Induktionspfeile für die Periode von $T = 1024$ s. Die Realpfeile der nördlichen Stationen deuten nun bis auf wenige Ausnahmen mit einer durchschnittlichen Länge von 0,1 in Richtung Nordwest. Auf Höhe von 53° N findet ein Umklappen der Pfeile statt. Die Induktionspfeile der südlich gelegenen Stationen sind südwestlich orientiert und weisen im Durchschnitt größere Längen auf (z. B. bis zu 0,2 im Münsterland).

Insgesamt läßt sich beobachten, daß das Umklappen der Realpfeile bei langen Perioden stattfindet und somit die Norddeutsche Leitfähigkeitsanomalie eine Struktur in größerer Tiefe ist.

Zur genaueren Untersuchung des Umklappprozesses sind in Abbildung 8 (oben) die Längen der Realpfeile für die Stationen der drei Profile bei einer Periode von $T = 2340$ s aufgetragen. Diese Periode wurde ausgewählt, da sie zur Beschreibung der Anomalie lang, aber auch sicher bestimmt sein sollte. Dabei soll eine positive Länge, wie sie die nördlichen Stationen aufweisen, eine nach Norden zeigende Komponente und eine negative Länge eine Südkomponente charakterisieren. Es wird deutlich, daß das Umklappen in einem engen Bereich von etwa 10 km stattfindet.

In der unteren Graphik der Abbildung 8 ist die integrierte Leitfähigkeit, das Produkt aus Leitfähigkeit und Schichtdicke, für die Meßpunkte der drei Profile aufgetragen. Betrachtet man die einzelnen Profile,

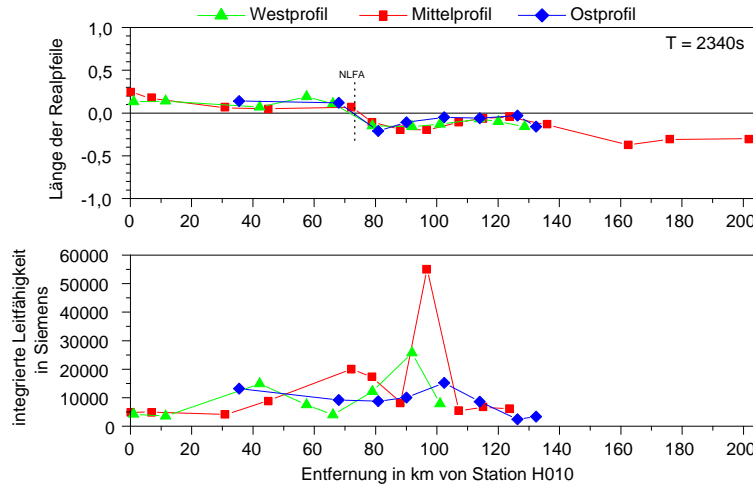


ABBILDUNG 8: Die Länge der Realpfeile aller Stationen mit Kennzeichnung der Norddeutschen Leitfähigkeitsanomalie (NLFA) (oben) und die integrierte Leitfähigkeit (unten), berechnet aus dem 2D-Modell in Abbildung 4.

so fällt auf, daß jedes sein Maximum an einer anderen Stelle hat. Somit stimmt der Ort des Umklappens der Realpfeile, welches den Ort maximaler integrierter Leitfähigkeit markieren sollte, nicht mit dem Maximum der aus den magnetotellurischen 2D-Modellrechnungen bestimmten integrierten Leitfähigkeiten überein. Eine Mittelung über die integrierten Leitfähigkeiten der drei Profile verdeutlicht, daß es kein ausgeprägtes Maximum am Ort des Umklappens der Realpfeile (Linie NLFA in Abb. 8) gibt.

Abbildung 9 zeigt eine Karte von Norddeutschland mit dem untersuchten Meßgebiet im Westen, in der die Induktionspfeile der Perioden $T = 1024$ s (grün) und $T = 4096$ s (rot) eingetragen sind. Die dargestellten Stationen im mittleren und östlichen Gebiet wurden von der BGR in Zusammenarbeit mit der Universität Münster von 1993 bis 1995 vermessen. Die magentafarbene Linie deutet den Verlauf der Norddeutschen Leitfähigkeitsanomalie an, der allein anhand des Umklappens der eingetragenen Pfeile, d.h. ohne Berücksichtigung der Geologie, festgelegt wurde. Mit den neu vermessenen Stationen bzw. deren Induktionspfeilen wird die Lage der Norddeutschen Leitfähigkeitsanomalie nach Schmucker (1959) sehr gut bestätigt.

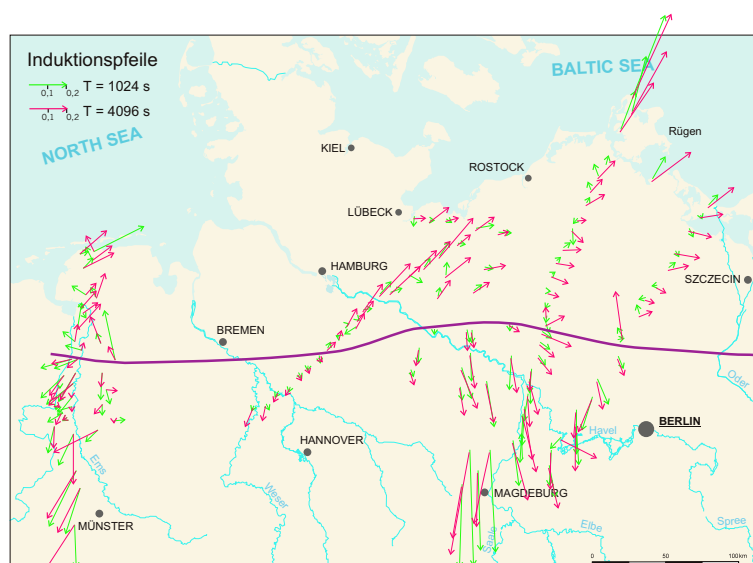


ABBILDUNG 9: Karte von Norddeutschland mit Realpfeilen der Perioden $T = 1024$ s (grün) und $T = 4096$ s (rot) und der Norddeutschen Leitfähigkeitsanomalie (magenta).

Geologische Interpretation der Ergebnisse

Die Magnetotellurik ist ein Verfahren, mit dem die Leitfähigkeitsstrukturen des tieferen Untergrundes untersucht werden können. Seine Empfindlichkeit ist gegenüber guten Leitern besonders hoch. Bei der Interpretation der berechneten Modelle steht der tiefere gute Leiter im Vordergrund, da er als potentielles Erdgasmuttergestein angesehen wird. Bei den schlechter leitenden Horizonten wird die Abnahme der elektrolytischen Leitfähigkeit durch die Abnahme des Porenvolumens mit zunehmender Tiefe erklärt (vgl. Archie, 1942).

Zusatzinformationen aus Bohrungen stehen zur Interpretation des tieferen Untergrundes nicht zur Verfügung, da die meisten Bohrungen nur den oberflächennahen Bereich erreichen und die Daten durch die Industrie außerdem unter Verschluss gehalten werden. Eine Bohrung mit zugänglichen Daten ist die Tiefbohrung Münsterland 1 (BMSL1) mit einer Endteufe von fast 6000 m. Hier erweist sich allerdings der Umstand, daß sie außerhalb der Profile liegt, als ungünstig. Dennoch wurde das Laterolog dieser Bohrung zur Interpretation der Modelle herangezogen.

Oberflächennaher guter Leiter

Die Leitfähigkeit des oberflächennahen guten Leiters wird bestimmt durch junge Sedimente, die wenig verfestigt sind und z. T. einen hohen Tonanteil aufweisen. Zusätzlich leistet der Salzgehalt der Porenwässer mit Werten > 300 g/l (z. T. übersättigt) einen erheblichen Beitrag zur Leitfähigkeit. Durch das Fehlen eines systematischen Vergleichs zwischen Bohrlochdaten und Daten aus der MT kann nur ein pauschales Ergebnis genannt werden: Die betrachteten Deckschichten bis vermutlich einschließlich der Trias sind in ihrer Summe sehr gut leitend. Als entscheidende Parameter für die Leitfähigkeitswerte können die hohe Porosität, der hohe Salzgehalt sowie der hohe Tonanteil genannt werden. Es liegt somit eine hohe elektrolytische Leitung vor.

Tiefliegender guter Leiter

Aus früheren Interpretationen ist ein tiefliegender guter Leiter flächendeckend in Norddeutschland bekannt (Losecke et al., 1979, Jödicke, 1990, und Hoffmann et al., 1998). Ausgangspunkt war der Nachweis eines Leiters an der Basis des Oberkarbons sowie im Unterkarbon im Laterolog der Bohrung Münsterland 1 (siehe Abb. 10). Wie Untersuchungen der betreffenden Schichten zeigten, kommen Schwarzschiefer mit einem hohen C_{org} -Anteil ($\approx 5 - 9\%$) als Ursache für die hohe Leitfähigkeit in Betracht. Die Inkohlung der organischen Substanz ist aufgrund einer tiefen Versenkung so weit fortgeschritten, daß die Rückstände nach der Erdöl- bzw. Erdgasbildung, der sogenannte Kerogenrest, eine graphitähnliche Struktur angenommen haben. Diese graphitähnliche Struktur ist ab dem Metaanthrazit-Stadium elektrisch leitfähig (Jödicke, 1990).

Mit der Betrachtung des Laterologs (siehe Abb. 10) zeigt sich, daß der gutleitende Horizont etwa 3,5 km unterhalb der Karbonoberfläche auftritt. Eine grobe Abschätzung der Tiefenlage dieses guten Leiters in Norddeutschland ist möglich, da die Mächtigkeit des Karbons nach Norden vermutlich weitgehend konstant bleibt. Nach der obigen Überlegung wäre der gute Leiter im Norden in einer Tiefe von 8,5 bis 9 km, im Süden des Profils bei 7 bis 7,5 km zu erwarten. Die berechneten MT-2D-Modelle verdeutlichen, daß diese erwartete Tiefe nur im Nordteil des Profils annähernd erreicht wird. Im Mittelteil des Profils tritt der gute Leiter im Modell dagegen mit einer Tiefe von 5 km wesentlich flacher auf.

Hinweise auf diese Hochlage gibt es aus der Geologie insofern, als drei verschiedene geologische Einheiten von den MT-Profilen überdeckt werden: die im Norden gelegene Pompeckj-Scholle, die Niedersachsen-Scholle (früher als Niedersächsisches Tektogen bezeichnet) in der Mitte und die Münsterland-Scholle im Süden. Dabei bilden die nördliche und südliche Scholle jeweils weitgehend starre Blöcke, während die mittlere Scholle eine Inversionsstruktur darstellt (z. B. Koch et al., 1997). Auffälligerweise stimmt die Position des Versatzes des tiefen guten Leiters von etwa 8 bis 9 km auf ca. 5 km genau mit dem Nordrand der mobilen mittleren Scholle überein. Damit bot sich die Überlegung an, die Inversion der Niedersachsen-Scholle mit Absenkung und späterem Uplift könne zu dem beobachteten Versatz des guten Leiters geführt haben. Die tatsächlichen Versatzbeträge gegenüber den starren Schollen ergeben jedoch lediglich 200 bis 300 m, was zur Erklärung des MT-Modells bei weitem nicht ausreicht.

Einen neuen Interpretationsansatz liefert dagegen die Überlegung, wonach die Hochlage des guten Leiters durch hochinkohlte Flöze des Oberkarbons erzeugt werden könnte. Kohleflöze werden unter den gleichen Bedingungen leitfähig wie Schwarzschiefer, nämlich im Metaanthrazit-Stadium (Jödicke, 1990). Dazu sind Vitrinitreflexionswerte (R_m) um 4,5 % erforderlich. In der Bohrung Münsterland 1 treten die Kohleflöze

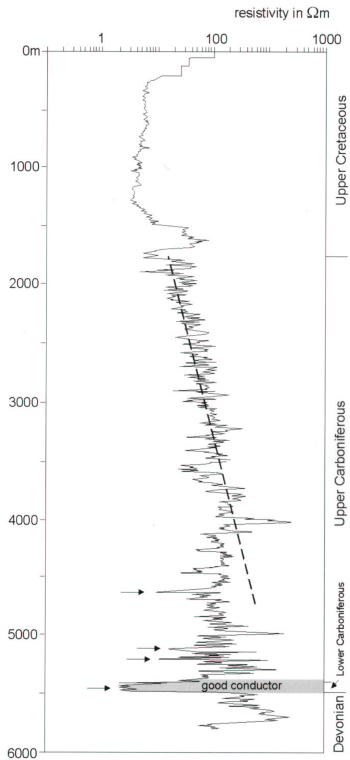


ABBILDUNG 10: Laterolog der Bohrung Münsterland 1 (aus Hoffmann et al., 2001).

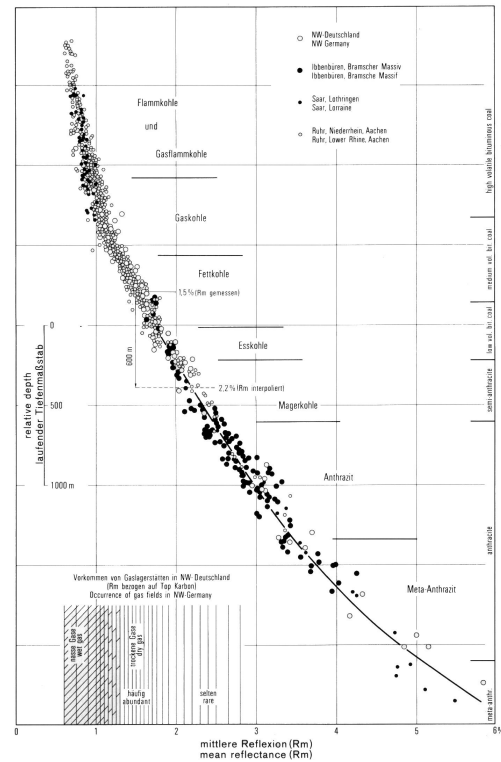


ABBILDUNG 11: Zunahme der Vitrinitreflexion mit der Tiefe (aus Teichmüller und Teichmüller, 1984).

in einem Tiefenbereich von 1800 bis 3000 m mit R_m -Werten von 1 bis 2,5 % auf. Sie sind damit elektrisch (noch) nicht leitfähig. Anhand der Inkohlungswerte an der Karbonoberfläche läßt sich mit Hilfe von Abbildung 11 abschätzen, in welcher Tiefe die organische (kohlige) Substanz das Metaanthrazit-Stadium erreicht hat und damit leitfähig wird. Diese abgeschätzte Tiefe für $R_m = 4,5\%$ ist in Abbildung 12 eingezeichnet, dazu der Tiefenbereich, in dem die Kohleflöze des Oberkarbons zu erwarten sind. Die Tiefenlage des ersten Kohleflözes als Bezugshorizont wurde dabei aus Teichmüller et al. (1984) entnommen. Das

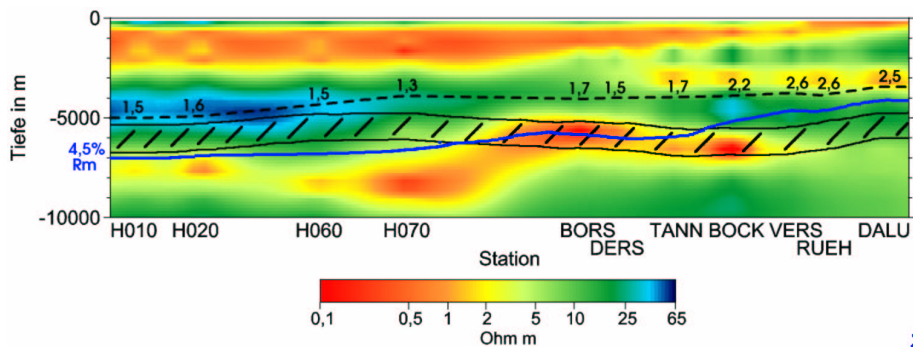


ABBILDUNG 12: 2D-Modell des Mittelprofils nach Smith und Booker mit Präperm-Oberfläche (gestrichelte Linie) (nach Teichmüller et al., 1984), Tiefenbereich der Kohleflöze (schraffierter Bereich) (nach Teichmüller et al., 1984) und 4,5%-Grenze der Vitrinitreflexion (blaue Linie) (nach Teichmüller und Teichmüller, 1984). Die Zahlen stellen die Werte der Vitrinitreflexion an der Präperm-Oberfläche dar (nach Koch et al., 1997).

Ergebnis dieser Zusammenstellung kann wie folgt zusammengefaßt werden: Im Norden des Profils liegt die Linie, die das Erreichen der 4,5 % Vitrinitreflexion symbolisiert, unterhalb des Bereichs, in dem Kohleflöze auftreten. Ähnlich wie im Fall der Bohrung Münsterland 1 sind die Kohleflöze somit nicht leitfähig. In einer noch größeren Tiefe ist der untere gute Leiter zu finden, der mit der erwarteten Tiefe des ausreichend hoch inkohlten Schwarzschiefers gut korreliert. Im Mittelteil des Profils fällt der gute Leiter mit dem Tiefenbereich der oberkarbonischen Kohleflöze zusammen. Innerhalb dieses Bereichs verläuft die abgeschätzte Tiefe der 4,5 % Vitrinitreflexion, so daß die Voraussetzung zur Entstehung hoher Leitfähigkeiten in den Kohleflözen erfüllt ist. Die geringe Tiefenlage des guten Leiters an den Stationen BORS bis

BOCK steht somit nicht im unmittelbaren Zusammenhang mit der Inversionsstruktur. Die Ursache für die Hochlage wird viel mehr auf die erhöhte Inkohlung und auf die größere Tiefe des obersten Kohleflözes und damit im wesentlichen auf die Mächtigkeiten des obersten Westfal sowie vor allem des Stefan in diesem Bereich zurückgeführt. Diese Horizonte fehlen im Norden und im Süden des Profils.

Zusammenfassend kann der tiefliegende gute Leiter in den Modellen im Norden der Profile als Schwarzschieferhorizont des tiefsten Karbon und im Mittelteil als Serie von hochinkohlten Kohleflözen im Oberkarbon interpretiert werden. Die eigentlich zu erwartende Fortsetzung des leitfähigen Schwarzschieferhorizonts von Norden nach Süden unter die hochleitenden Kohleflöze ist vermutlich wegen der abschirmenden Wirkung guter Leiter zur Tiefe hin nicht aufzulösen.

Literatur

- Archie, G. E. (1942). *The electric resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*. Trans. AIME, 146, 54–62.
- Bahr, K. (1988). *Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: Regional induction and local telluric distortion*. J. Geophys., 62, 119–127.
- Fischer, G., Schnegg, P.-A., Peguiron, M. und Le Quang, B. V. (1981). *An analytic one-dimensional magnetotelluric inversion scheme*. Geophys. J. Res. astr. Soc., 67, 257–278.
- Haubold, H. und Daber, R. (1989). *Fachlexikon ABC Fossilien, Minerale und geologische Begriffe*. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/Main.
- Hoffmann, N., Jödicke, H., Fluche, B., Jording, A. und Müller, W. (1998). *Modellvorstellungen zur Verbreitung potentieller präwestfälischer Erdgas-Muttergesteine in Norddeutschland — Ergebnisse neuer magnetotellurischer Messungen*. Z. angew. Geol., 44, 140–158.
- Hoffmann, N., Jödicke, H. und Gerling, P. (2001). *The distribution of pre-westphalian source rocks in the North German Basin — Evidence from magnetotelluric and geochemical data*. Netherlands Journal of Geosciences, 81, 71–84.
- Jödicke, H. (1990). *Zonen hoher elektrischer Krustenleitfähigkeit im Rhenoherynikum und seinem nördlichen Vorland*. Dissertation, Inst. f. Geophysik, Univ. Münster.
- Koch, J., Kockel, F. und Krull, P. (1997). *Coalification at the base of the Zechstein and the pre-Permian surface in Northern Germany*. In: A. Hollerbach und H. Raschka (Hrsg.), *Geol. Jb., Reihe D, Heft 103*, 33–42. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Losecke, W., Knödel, K. und Müller, W. (1979). *The conductivity distribution in the North German sedimentary basin derived from widely spaced areal magnetotelluric measurements*. Geophys. J. R. astr. Soc., 58, 169–179.
- Mackie, R. L., Rieven, S. und Rodi, W. (1997). *Users manual and software documentation for two-dimensional inversion of magnetotelluric data*. Dokumentation, Earth Resources Laboratory, M.I.T., Cambridge (Mass.). 1-14.
- Schmucker, U. (1959). *Erdmagnetische Tiefensondierung in Deutschland 1957 – 59; Magnetogramme und erste Auswertung*. Abh. Akad. Wiss., Göttingen. Math.-Phys. Kl. Heft 5.
- Schmucker, U. (1970). *Anomalies of geomagnetic variations in the Southwestern United States*. Bull. Scripps. Inst. Oceanogr., Univ. of California, 13.
- Schönenberg, R. und Neugebauer, J. (1997). *Einführung in die Geologie Europas*. Rombach, Freiburg i. Br.
- Smith, J. T. und Booker, J. R. (1991). *Rapid inversion of two- and threedimensional magnetotelluric data*. J. Geophys. Res., 96, 3905–3922.
- Swift, C. M. (1967). *A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the Southwestern United States*. Dissertation, Geophys. Lab. M.I.T., Cambridge (Mass.).
- Teichmüller, M. und Teichmüller, R. (1984). *Verbreitung und Eigenschaften tiefliegender Steinkohlen in der Bundesrepublik Deutschland*. Glückauf Forschungshäfte, 45, 140–153.
- Teichmüller, M., Teichmüller, R. und Bartenstein, H. (1984). *Inkohlung und Erdgas – eine neue Inkohlungskarte der Karbon-Oberfläche in Norddeutschland*. Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., 32, 11–34.