

Untersuchungen der frequenzabhängigen komplexen Leitfähigkeit von Gesteinsproben - Aufbau und Kalibrierung der Meßanlage und erste Messungen

R. Markfort und H. Jödicke, Institut für Geophysik, WWU Münster

Die Messung der frequenzabhängigen komplexen Leitfähigkeit von Gesteinsproben ist ein eigenes Arbeitsgebiet mit sehr unterschiedlichen Fragestellungen. Unsere Untersuchungen haben derzeit vorrangig zum Ziel, zur Klärung der Ursache der in magnetotellurischen Modellen auch in größerer Tiefe aufgefundenen guten Leiter durch Labormessungen beizutragen. Über diese Arbeiten wurde bereits in einem ersten Beitrag von JÖDICKE & DREISMICKENBECKER (1994) berichtet. Durch Beschaffung eines weiterentwickelten Meßsystems konnte die Bestimmung gerade der niederohmigen Proben in einem weiten Periodenbereich entscheidend verbessert werden. Im folgenden wird über die ersten Erfahrungen mit der neuen Anlage berichtet (mehr Details s. MARKFORT 1997). Zu Vergleichszwecken wurden zum Teil dieselben Proben bearbeitet wie im genannten ersten Beitrag.

Aufbau des Meßplatzes

Der im Institut für Geophysik der Universität Münster eingerichtete Meßplatz zur Bestimmung elektrischer Gesteinsparameter besteht aus drei Komponenten (Abb. 1): Eine Meßzelle enthält das zu messende Objekt, das Gerät *Solartron 1260* der Fa. Schlumberger als zentrale Komponente dient der frequenzabhängigen Bestimmung verschiedener Meßgrößen wie Impedanzen (Z_1 , Z_2), Spannungen (V_1 , V_2), Spannungsquotienten (V_1/V_2 , V_2/V_1) oder Strömen (I) nach Betrag und Phase oder Real- und Imaginärteil, und mit einem Rechner werden die gemessenen Daten erfaßt und weiterbearbeitet.

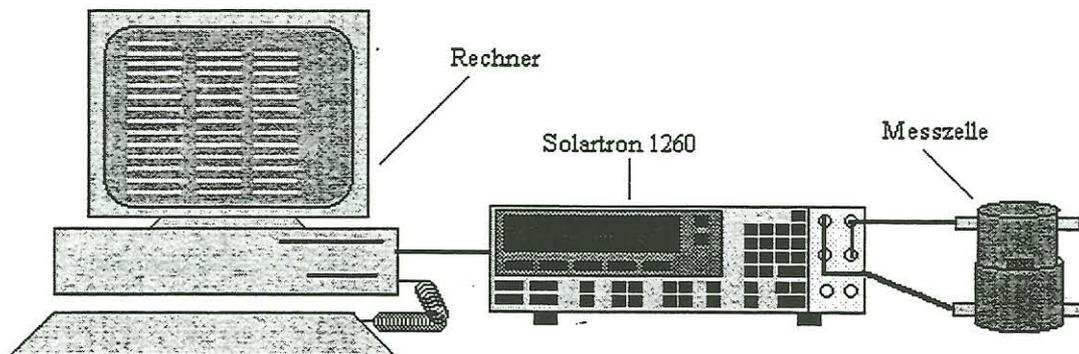


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Meßplatzes

2-Pol-Messung

Die Messung der Gesteinsproben kann in einer 2-Pol- oder in einer 4-Pol-Anordnung durchgeführt werden. Bei der 2-Pol-Messung wird die Gesteinsprobe im Grundprinzip zwischen zwei Elektroden eingespannt, die gleichzeitig zur Strom- und Spannungsmessung verwendet werden (Abb. 2). Bestimmt wird die Probenimpedanz Z_x über den differentiellen Spannungseingang V_{1HI} und V_{1LO} und den Strom I ; U_0 bezeichnet die Generatorspannung, R_i den Innenwiderstand des Generators und R_s den Leitungswiderstand der Meßanordnung.

Die Meßzelle der 2-Pol-Anordnung besteht aus zwei metallischen Kontaktelektroden, die sich im Innenraum zweier ineinandergeschobener, dicht abschließender Messingzylinder befinden (s. JÖDICKE & DREISMICKENBECKER 1994, Abb. 5 oben). Über den Messingzylinder, der der Abschirmung elektromagnetischer Störfelder und der Verhinderung der Austrocknung feuchter Proben dient, kann die Probe mit einem gewissen Druck beaufschlagt werden. Zur Kontaktverbesserung zwischen Probe und Elektrode werden mit Elektrolyt getränkte Zellstoffscheiben eingelegt. Sind an den Proben

keine ergänzenden 4-Pol-Messungen erforderlich, hat sich das Beschichten der Stirnseiten der Proben mit Silberkontaktkleber bewährt.

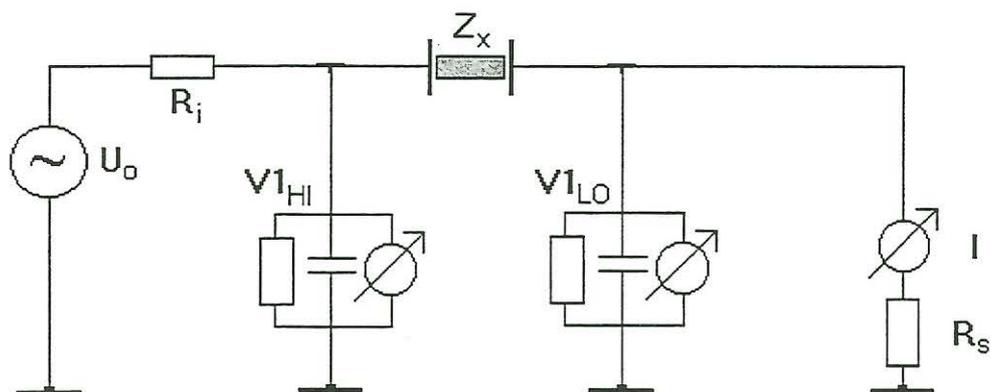


Abb. 2: Meßaufbau der 2-Pol-Messung

Die 2-Pol-Zelle läßt sich sehr einfach handhaben und erlaubt zumindest bei Frequenzen über 1 Hz einen relativ großen Probendurchsatz. Ihr nutzbarer Frequenzbereich liegt bei Einsatz des Geräts *Solartron 1260* zwischen 10 μ Hz (in der Praxis 1 mHz) und 32 MHz. Ihr entscheidender, grundsätzlicher Nachteil ist jedoch die Elektrodenpolarisation, die zwischen den Metallelektroden und allen elektrolytisch leitenden Proben im Frequenzbereich unterhalb von etwa 10 kHz auftritt. Nur Proben mit quasi-metallischem Leitfähigkeitsmechanismus, wie zum Beispiel graphitführende Gesteine, können auch unter 10 kHz gemessen werden, ohne daß die Elektrodenpolarisation das Meßergebnis verfälscht.

4-Pol-Messung

Die 4-Pol-Messung unterscheidet sich von der 2-Pol-Messung durch die räumliche Trennung der Spannungs- und Stromelektroden zur Umgehung der Elektrodenpolarisation, die zwar an den Stromelektroden weiterhin auftritt, aber nicht in die Messung eingeht (Abb. 3, vgl. auch JÖDICKE & DREISMICKENBECKER 1994, Abb. 5 unten). In der Meßzelle erfolgt die Ankoppelung der Probe an die Elektroden elektrolytisch. Dabei ist als Spannungselektrode ein Gitter aus Platindraht unmittelbar vor den Stirnflächen der Proben positioniert, die Stromelektroden aus Platin befinden sich in ca. 5 cm Entfernung jeweils am Ende einer zylindrischen Kammer. Für die Messungen werden die in diesem

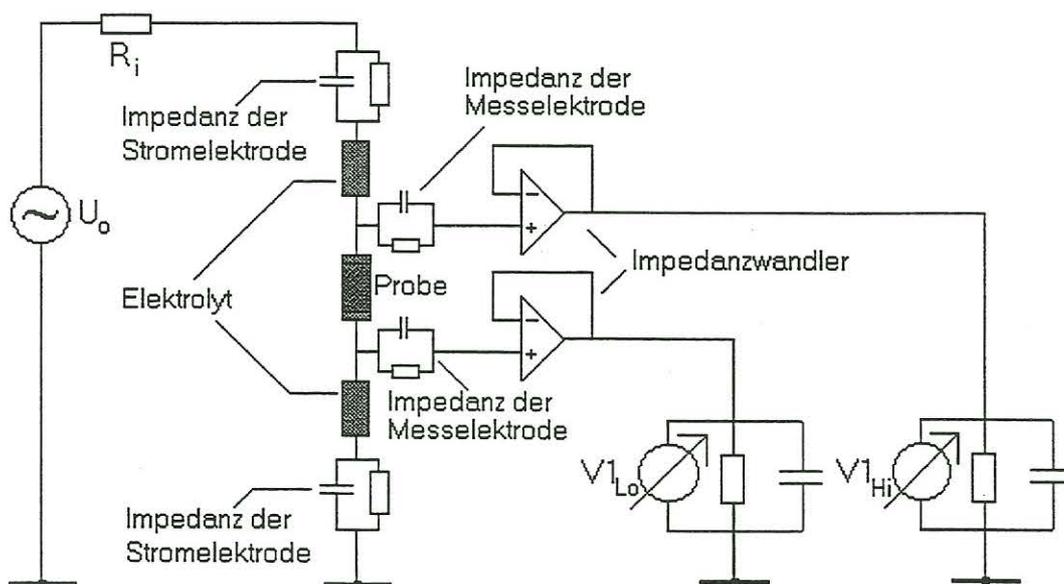


Abb. 3: Meßaufbau der 4-Pol-Zelle

Fall notwendigerweise zylinderförmigen Proben in einen Schrumpfschlauch mit innenliegendem Kleber eingeschweißt, um Leckströme entlang der Probenoberfläche zu vermeiden, elektrolytgesättigt und in die Meßvorrichtung eingespannt, die anschließend mit Elektrolyt befüllt wird.

Bei ersten Testmessungen speziell an Flüssigkeiten mit bekannten Widerständen stellte sich heraus, daß die Größe der Eingangsimpedanz an den Spannungskanälen in der 4-Pol-Anordnung nicht ausreichend war. Um eine ausreichend stromlose Spannungsmessung zu gewährleisten, wurden zwischen Spannungselektroden und Spannungskanälen zwei als Impedanzwandler arbeitende Verstärker zwischengeschaltet (Abb. 3), die bis 1 MHz phasengleich arbeiten. Damit ist die Höchstgrenze der nutzbaren Frequenzen bei den 4-Pol-Messungen festgelegt.

Messungen im Standard-Verfahren (ohne Kalibration)

Bevor Messungen an einzelnen Gesteinsproben durchgeführt werden konnten, wurden die Eigenschaften und die von der Frequenz und der Größe der Widerstände abhängigen Leistungsgrenzen des Meßplatzes anhand umfangreicher Untersuchungen an Testwiderständen im 2-Pol-Verfahren und an Testflüssigkeiten im 4-Pol-Verfahren überprüft. Dazu wurden getrennt das Hochfrequenzverhalten von Widerständen in der 2-Pol-Zelle zwischen 1 kHz und 32 MHz und das Niederfrequenzverhalten in der 4-Pol-Zelle zwischen 1 mHz und 1 MHz getestet. Die Frequenzuntergrenze von 1 mHz bei den 4-Pol-Untersuchungen wurde aus praktischen Gründen gewählt, da Messungen längerer Perioden wegen der erforderlichen Integrationszeiten Stunden bzw. Tage dauern. Der untersuchte Impedanzbereich erstreckte sich zwischen 0,01 Ω und 100 M Ω und sollte damit die Leitfähigkeit natürlich vorkommender Gesteine (sofern ein gewisser Restgehalt an Feuchtigkeit vorhanden ist) abdecken.

Das einfache „Standardverfahren“ ist vom Hersteller des *Solartron 1260* für die Messung von elektronischen Bauteilen gedacht, die unmittelbar am Geräteeingang in eine kapazitätsarme Spezialhalterung geklemmt werden können. Es kann aber auch für schnelle Übersichtsmessungen bei nicht zu hohen Frequenzen sowohl mit der 2-Pol-Zelle als auch mit der 4-Pol-Zelle eingesetzt werden, indem die Impedanz Z unmittelbar aus dem Quotienten eines differenziell geschalteten Spannungskanals V_1 (oder V_2) und eines Stromkanals I bestimmt wird. Bei hohen Frequenzen umfaßt diese unkalibrierte Messung jedoch neben der Probenimpedanz auch den Beitrag der Impedanz des Meßaufbaus, wie z.B. den kapazitiven Anteil der Meßzelle und die Induktivität der Zuleitungen.

Für die ersten Untersuchungen wurden Testwiderstände zwischen 1 Ω und 1 M Ω in der Spezialhalterung zwischen 1 kHz und 32 MHz gemessen und mit theoretisch zu erwartenden Daten verglichen. Ein Widerstand besteht in seinem Ersatzschaltbild (1. Ordnung) aus seinem Wirkanteil, dem eine induktive Komponente in Reihe zugeschaltet ist. Parallel zu dieser Reihenschaltung liegt die Kapazität des Bauteils. Daraus resultiert folgende Gleichung für die Impedanz des Bauteils:

$$Z = \frac{R + i\omega L}{1 + i\omega CR - \omega^2 CL}$$

Stellvertretend für die vielen Impedanzuntersuchungen ist ein 1 Ω -Testwiderstand mit Betrag und Phase zwischen 1 kHz und 32 MHz in Abb. 4 dargestellt. Man erkennt ein induktives Verhalten mit einem linearen Anstieg des Scheinwiderstandes bei Frequenzen über 1 MHz ($\sim\omega L$) und einem dazugehörigen Anstieg der Phase. Nach obenstehender Gleichung lassen sich die Parameter R , L und C durch Anpassung finden, im vorliegenden Fall erhält man für C 1,3 pF und für L 65 nH. Günstiger wäre es, wenn Eichwiderstände zur Verfügung stünden, deren Eigenschaften im untersuchten Frequenzbereich ausreichend gut bekannt sind und zur Überprüfung des Genauigkeitsfeldes der Anlage genutzt werden könnten. Nach unseren Erfahrungen gibt es solche Widerstände für den vorgesehenen Frequenzbereich nicht.

Das in Abb. 4 erkennbare induktive Verhalten tritt nur bei niederohmigen Widerständen auf. Hochohmige Widerstände zeigen im Hochfrequenzbereich ein kapazitives Verhalten mit einem linearen Abfall des Scheinwiderstandes ($\sim 1/\omega C$) und einem Absinken der Phase auf fast -90° . Der Über-

gang zwischen diesen gegensätzlichen Eigenschaften liegt bei etwa $1\text{ k}\Omega$, Widerstände dieser Größe erscheinen dann rein reell.

Zusammenfassend haben die Untersuchungen an Testwiderständen gezeigt, daß im Standardverfahren die erwarteten Meßwerte in angemessener Genauigkeit resultieren (wobei vorausgesetzt wird, daß die Eigenschaften der Testwiderstände mit obenstehender einfacher Gleichung beschrieben werden können). Diese Aussage gilt allerdings nur für Frequenzen unterhalb 10 MHz . Bei höheren Frequenzen weichen Scheinwiderstände und Phasen von den berechneten Werten so weit ab, daß der Meßbereich bei diesem Verfahren entsprechend begrenzt werden muß. Insbesondere die Phasenwerte werden instabil, wie auch in Abb. 4 anhand des übersteilen Anstiegs zu erkennen ist.

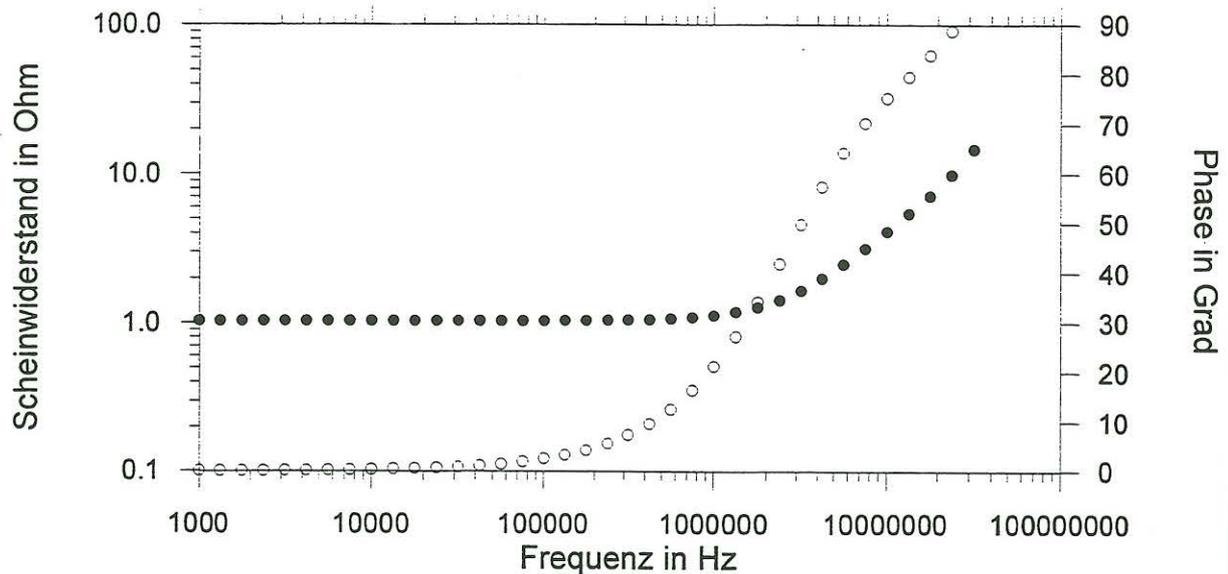


Abb. 4: 1 Ohm -Widerstand, gemessen im Standardverfahren ohne Zuleitung
geschlossene Symbole: Scheinwiderstand, offene Symbole: Phase

Messungen mit kalibriertem Standardverfahren

Der Einfluß der Zuleitungen und der 2-Pol-Meßzelle kann durch eine geräteseitig zur Verfügung gestellte Kalibrationsfunktion minimiert werden. Damit werden vor der eigentlichen Probenmessung eine Durchlaß- und eine Leerlaufmessung notwendig, um die induktiven und kapazitiven Anteile des Meßaufbaus eliminieren zu können. Bei der Durchlaßmessung wird ein Metallring anstelle der Probe in die Meßzelle gesetzt, bei der anschließenden Leerlaufmessung müssen die Elektroden exakt den Abstand der zu messenden Probe haben. Die Kalibrationsmessungen werden nur für Frequenzen über 1 Hz durchgeführt, da die Eigenschaften von Zuleitungen und Meßzelle das Meßergebnis bei niedrigen Frequenzen nicht beeinflussen und so die Meßdauer wesentlich verkürzt werden kann. Eine Kalibration der 4-Pol-Zelle ist meßartbedingt auf diese Weise nicht möglich.

Abb. 5 zeigt als Beispiel wieder den $1\text{ }\Omega$ -Widerstand vor und nach der Kalibration bei Messung in der 2-Pol-Zelle, wie sie auch für Gesteinsproben verwendet wird. Bedingt durch den Meßaufbau mit einer Leitungslänge von einem Meter und den Einbau des Testwiderstands zwischen den Platten einer RC-Halterung zur Simulation zylinderförmiger Gesteinsproben („Leer-Dummy“) unterscheidet sich der Verlauf des Scheinwiderstandes und der Phase von dem in Abb. 4 dadurch, daß der induktive Effekt etwa eine Frequenzdekade früher einsetzt. Über 10 MHz treten jetzt noch stärkere Abweichungen vom erwarteten Verhalten auf. Nach der Kalibration wird deutlich, daß der induktive Anteil stark reduziert ist. So beträgt die Phase bei 10 MHz nur noch etwas mehr als 20° statt 89° , und der Scheinwiderstand verläuft bis 10 MHz praktisch konstant. Nach Tests über einen großen Widerstandsbereich zeigte sich jedoch erneut, daß die Ergebnisse über 10 MHz auch nach der Kalibration nicht verwendbar sind.

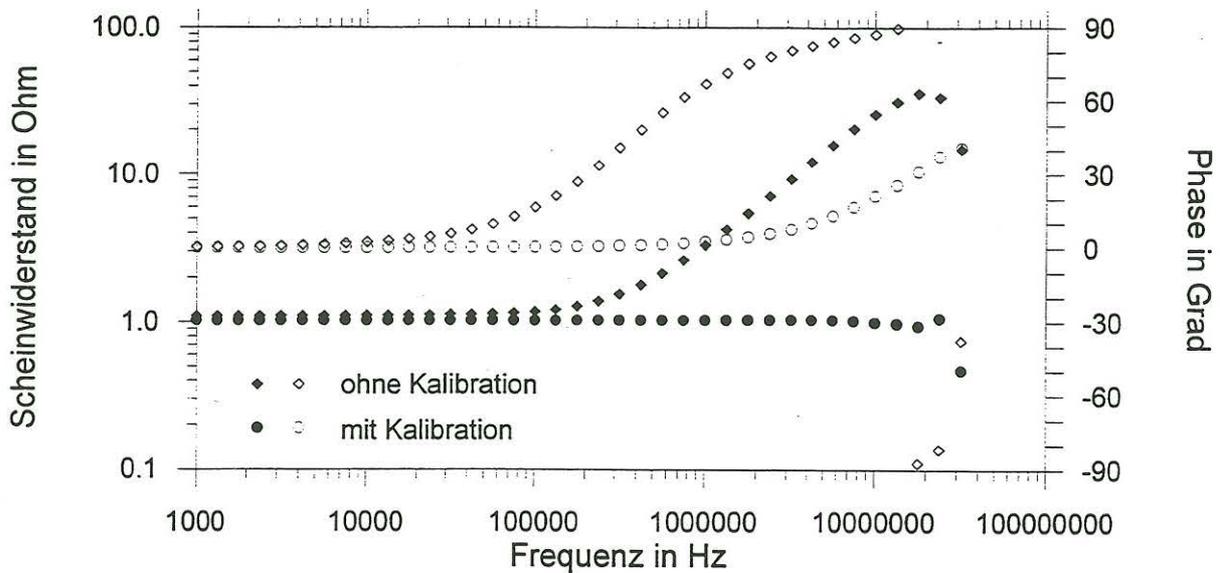


Abb. 5: 1 Ohm-Testwiderstand in 2-Pol-Zelle mit 1 m Zuleitung vor und nach geräteinterner Kalibration; ausgefüllte Symbole: Scheinwiderstände; offene Symbole: Phasen

Messungen nach dem Quotientenverfahren

Um auch den Frequenzbereich zwischen 10 und 32 MHz möglichst korrekt zu erfassen, wurde das von PELSTER (1991) entwickelte „Quotientenverfahren“ erprobt, mit dem die Impedanz über die Messung von Spannungsquotienten unter Nutzung der Leerlaufkapazität der Meßanordnung als Kalibrierkonstante bestimmt wird. Abbildung 6 zeigt den Meßaufbau.

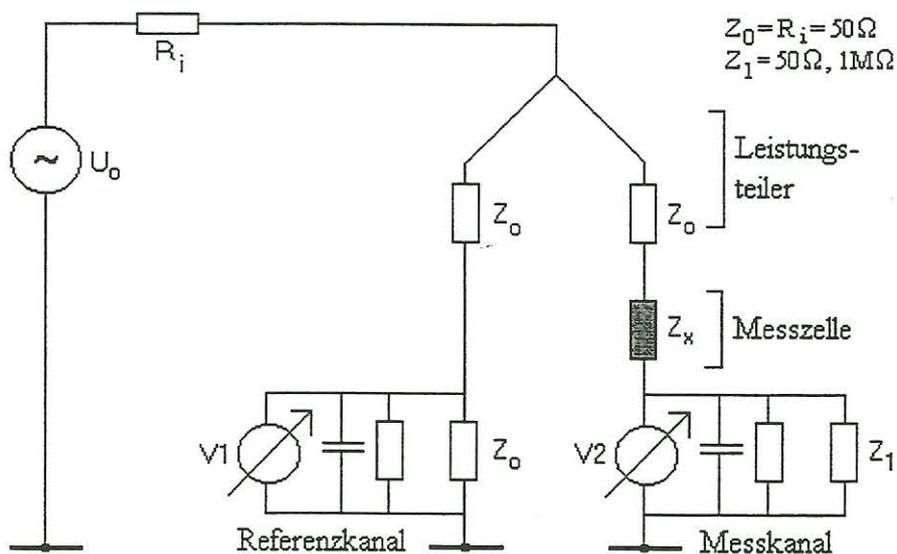


Abb. 6: Meßaufbau der 2-Pol-Zelle beim Quotientenverfahren

Das Generatorsignal U_0 wird hier über einen Leistungsteiler („power-splitter“) in einen Meßast, der die Meßzelle enthält, und in einen Referenzast gesendet. Im Meßgerät wird der Quotient der Spannungen aus dem Meßkanal V_2 und dem Referenzkanal V_1 gebildet (V_2/V_1) und zum Rechner übermittelt. Die Impedanz Z_0 beträgt 50Ω , während die Abschlußimpedanz Z_1 des Meßkanals je nach Größe der zu messenden Impedanz zu 50Ω oder $1 M\Omega$ (Spannungsteilung) gewählt wird. Nach der Vierpoltheorie werden in der Meßzelle nacheinander die Transmissionskoeffizienten bei Durchlaß-

Leerlauf- sowie Probenmessung und daraus die Probenimpedanz Z bestimmt (PELSTER 1991; vgl. MARKFORT 1997):

$$Z = \frac{\frac{t_a}{S_{21}^{(m)}} - 1}{\frac{t_a}{t_b} - 1} \frac{1}{\omega C_b} \quad , Z = (Z_0 + Z_1) \left(\frac{t_a}{S_{21}^{(m)}} - 1 \right)$$

Durchlassmessung: $t_a = \frac{V_2}{V_1}$

Leerlaufmessung: $t_b = \frac{V_2}{V_1}$

Probenmessung: $S_{21}^{(m)} = \frac{V_2}{V_1}$

Dabei ist C_b die zellenspezifische und abstandsabhängige Kapazität der Meßzelle, die einmal bestimmt werden muß. Die zweite der beiden Gleichungen gilt bei Frequenzen unterhalb 1 MHz mit 50Ω an V_2 , da t_b bei diesen Frequenzen praktisch nicht mehr meßbar ist.

Für den Einsatzbereich des Quotientenverfahrens ergab sich nach unseren Testmessungen:

- 50 Ω Abschluß an V_2 : Meßbereich zwischen 1 mHz und 32 MHz, falls der zu messende Widerstand zwischen $0,01 \Omega$ und 20 k Ω liegt
- 1 M Ω Abschluß an V_2 : Meßbereich 1 kHz bis 1 MHz für Widerstände über 20 k Ω und DK-Proben

Abb. 7 zeigt am Beispiel des 1 Ω Widerstandes, daß das Quotientenverfahren bei Frequenzen über 10 MHz gegenüber dem kalibrierten Standardverfahren vorzuziehen ist.

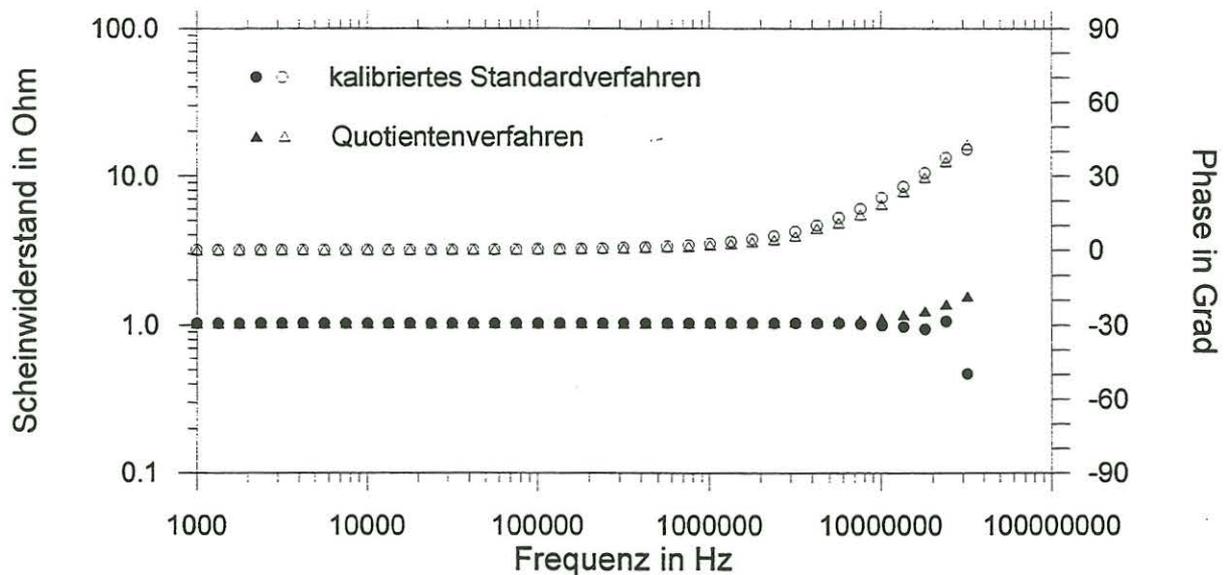


Abb. 7: Vergleich Quotientenverfahren mit kalibriertem Standardverfahren an 1 Ohm-Testwiderstand
geschlossene Symbole: Scheinwiderstände, offene Symbole: Phasen

Untersuchungen der 4-Pol-Zelle

Das Verhalten der 4-Pol-Zelle wurde speziell im Niederfrequenzbereich untersucht, da dort trotz räumlicher Trennung der Strom- und Spannungselektroden bei Messungen an Flüssigkeiten zunächst weiterhin Elektrodenpolarisationen auftraten. Wie Abb. 8 zu entnehmen ist, brachte der oben bereits erwähnte Einsatz zweier Impedanzwandler zwischen den Spannungselektroden und den beiden Eingängen des Spannungskanals ausreichend Abhilfe: Bei der Testflüssigkeit, hier eine 0,01 M KCl-Lösung, tritt nun das theoretisch zu erwartende Niederfrequenzverhalten eines konstanten spezifischen Scheinwiderstandes und einer Phase von 0° auf. Geringe Abweichungen des Betrages und der Phase zwischen 1 und 10 mHz sind auf ein „Rauschen“ der Testflüssigkeit zurückzuführen, das nach frischem Befüllen der Zelle besonders groß ist und bei längerem „Stehen“ geringer wird. Am oberen Frequenzende zeigen die Phasenwerte, daß auch bei Einsatz der Impedanzwandler nicht über 100 kHz gemessen werden sollte. Dies stellt aber kein Problem dar, weil Anschlußmessungen mit der 2-Pol-Zelle durchgeführt werden können.

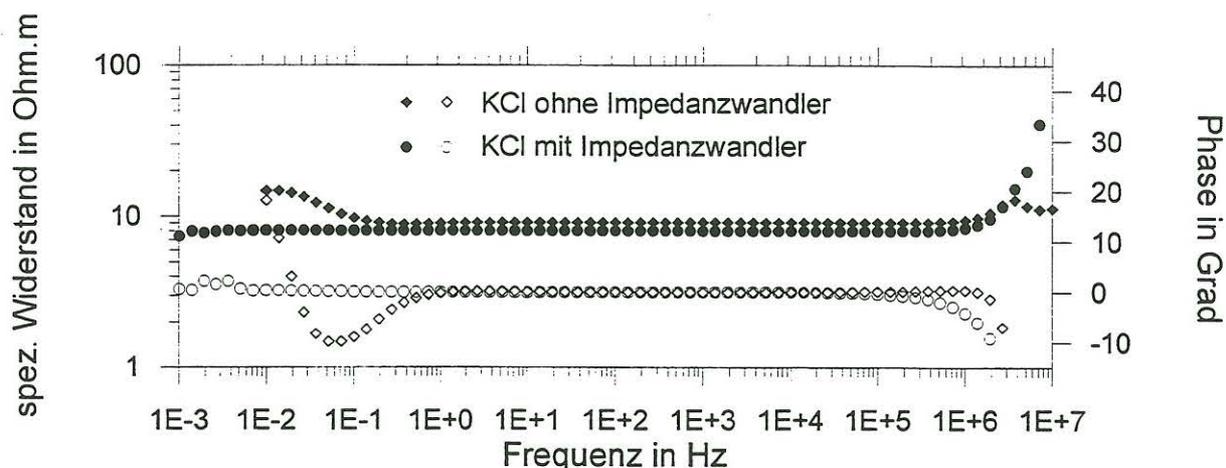


Abb. 8: 0,01 M KCl-Lösung mit und ohne Impedanzwandler; die stark streuenden Werte der Messung ohne Impedanzwandler bei Frequenzen unter 10^2 Hz sind weggelassen

Messungen an Gesteinsproben

Abschließend werden einige Ergebnisse von Messungen an Gesteinsproben gezeigt. Vorgestellt sei zuerst ein Beispiel für die Leitfähigkeit von Schwarzschieferproben der Bohrung Münsterland 1, die für die Interpretation magnetotellurischer Messungen in Norddeutschland und im Münsterland von ausschlaggebender Bedeutung waren (DUBA et al. 1988; JÖDICKE 1991). Gezeigt wird hier das Ergebnis einer besonders leitfähigen, schranktrockenen Probe aus 5415 m Tiefe aus der Formation der „Hangenden Alaunschiefer“ des tiefsten Namur, die in der 2-Pol-Zelle mit dem Quotientenverfahren vermessen wurde (Abb. 9). Die Probe enthält mit 6 - 9 % C_{org} einen sehr hohen Anteil an organischer Substanz, auch der Gehalt an Pyrit (bestehend hauptsächlich aus lagenförmig angeordneten Framboiden sowie lagig oder fein dispers verteilten, makroskopisch sichtbaren Kristallen) ist mit über 10 % hoch. Das mittlere Vitrinit-Reflexionsvermögen mit 4,5 % R_m weist darauf hin, daß die Inkohlung das Metaanthrazit-Stadium und damit die kohlige Substanz quasi-metallische Leitfähigkeitseigenschaften erreicht hat. Man erkennt dementsprechend im Frequenzbereich zwischen 1 mHz und 100 kHz einen praktisch frequenzunabhängigen Verlauf des spezifischen Widerstandes bei einem Wert von ca. $0,25 \Omega m$, auch die Phasenwerte sind mit etwa 0° bis ca. 10 kHz konstant. Ungewöhnlich ist das weitere Verhalten im anschließenden Hochfrequenzbereich zwischen 100 kHz und 27 MHz, es wurde in dieser Form bisher noch nicht beobachtet. Bei etwa 6 MHz durchläuft die Phase ein Minimum, im Scheinwiderstand tritt ein Wendepunkt auf. Die Ursache dieser Relaxation ist unbekannt, ein Maxwell-Wagner-Effekt an Grenzflächen zwischen dem hochinkohlten C_{org} und dem Pyrit kann nicht ausgeschlossen werden.

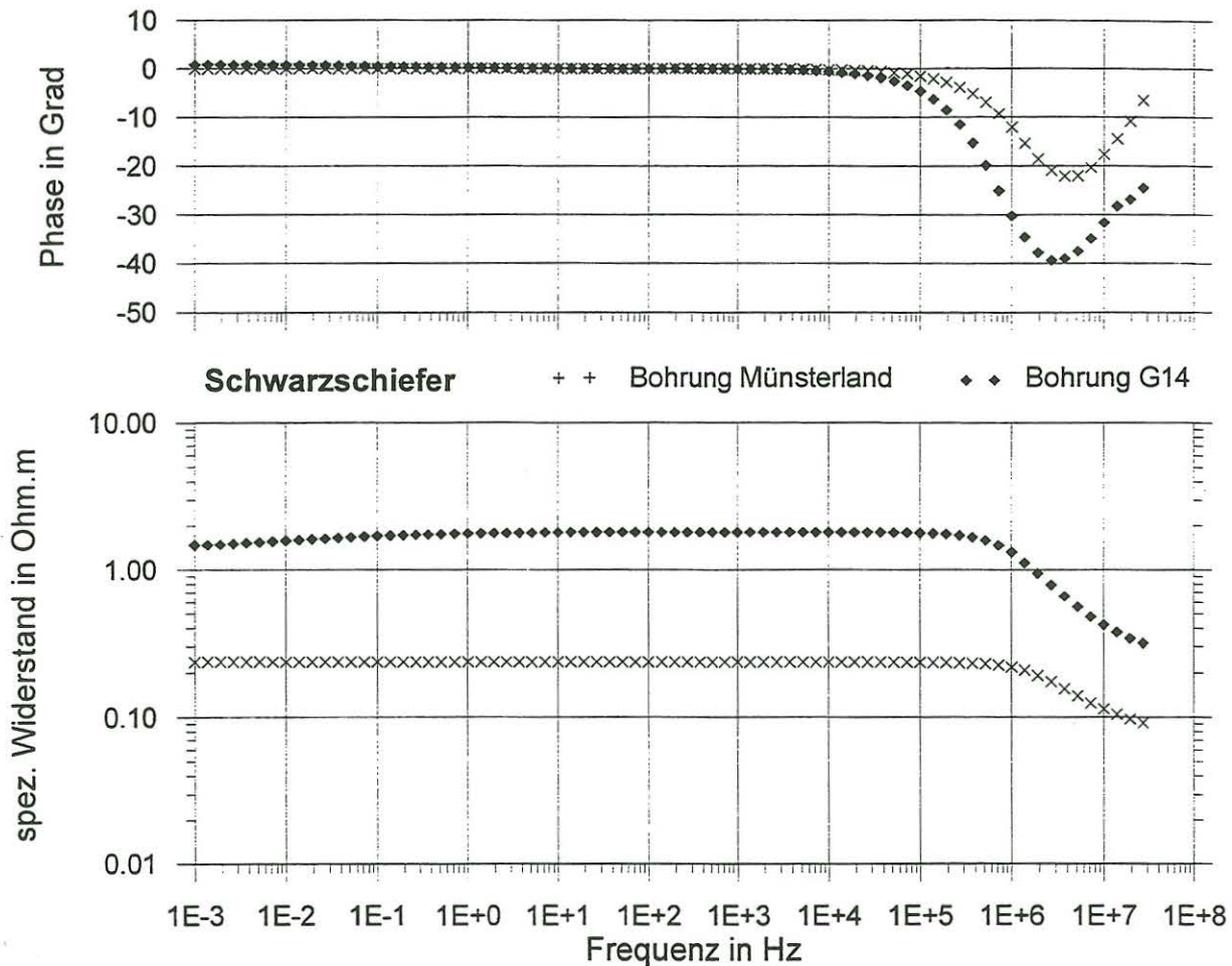


Abb. 9: Frequenzabhängige spezifische Widerstände und Phasen von zwei trockenen Schwarzschieferproben

Das zweite Beispiel einer wiederum schranktrockenen, nach dem Quotientenverfahren in der 2-Pol-Zelle vermessenen Probe stammt aus der Bohrung G14 in der Ostsee nördlich von Rügen (Abb. 9). Dort wurde in einer Tiefe von etwa 1600 m eine Serie von Schwarzschiefern erbohrt, die den Skandinavischen Alaunschiefern des mittleren bis oberen Kambrium zugeordnet wird (HOFFMANN et al. 1996). Inkohlungsgrad, C_{org} - und Pyritgehalt der Probe entsprechen ungefähr den Werten des Schwarzschiefers der Bohrung Münsterland 1. Auch das ungewöhnliche Hochfrequenzverhalten tritt wieder auf, das Phasenminimum liegt sogar bei -40° . Der spezifische Gleichstromwiderstand von ca. $2 \Omega m$ muß allerdings diesmal dem Bereich konstanter Scheinwiderstände bei mittleren Frequenzen entnommen werden, da im Niederfrequenzbereich unter 1 Hz eine leicht positive Phase und gekoppelt ein Abfall des spezifischen Scheinwiderstandes auftreten. Die Ursache für dieses Verhalten ist ebenfalls unbekannt. Sicher handelt es sich nicht um eine Polarisation zwischen Metallelektroden und Gestein, bedingt etwa durch Restfeuchte, da in diesem Fall der spezifische Scheinwiderstand zu niedrigen Frequenzen ansteigen und die Phase absinken müßte. Aus demselben Grund scheidet auch eine „anomale Niederfrequenzdispersion“, wie sie z.B. von BÖRNER (1991) beschrieben wird, aus.

Die letzten Proben stammen aus dem Gebiet der Serre San Bruno in Kalabrien/Süditalien. Dort steht eine Serie gekippter Unterkrustengesteine an der Erdoberfläche an. Alle im Gelände entnommenen Proben sind hoch metamorph. Gezeigt wird zunächst das Meßergebnis von zwei Proben eines graphitführenden Kataklasits. Sie erreichen wegen der guten Vernetzung des Graphits - offensichtlich ein Resultat der Scherbewegung - zwischen 1 mHz und 1 MHz spezifische Scheinwiderstände von 0,04 bzw. 0,6 Ωm , gemessen erneut schranktrocken in 2-Pol-Anordnung. Im Frequenzbereich über 1 MHz bewirkt die extreme Leitfähigkeit der ersten Probe sogar ein induktives Verhalten als Folge der Probenlänge (vgl. Abb. 7). Im Vergleich zu früheren Messungen (JÖDICKE & DREISMICKENBECKER 1994, Abb. 6b) läßt sich an diesen Proben die Phase nun auch bei langen Perioden ausreichend sicher bestimmen.

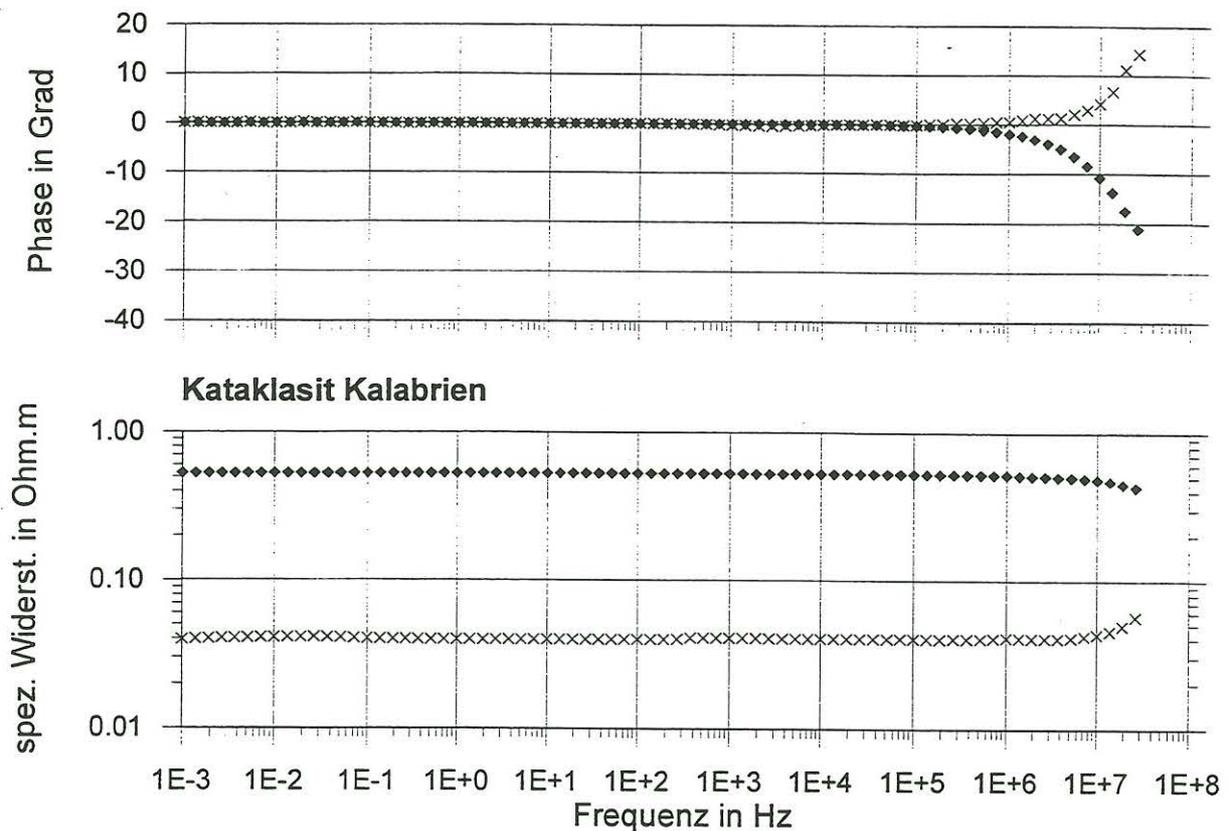


Abb. 10: Frequenzabhängige spezifische Widerstände und Phasen von zwei Proben eines trockenen Kataklasits, Serre San Bruno, Kalabrien

Die bisherigen Ergebnisse belegen hauptsächlich den quasi-metallischen Charakter der Leitfähigkeit hoch inkohlter Schwarzschiefer und graphitführender Scherzonen und sollten aufzeigen, welche Werte des spezifischen Widerstandes erreicht werden können. Der quasi-metallische Leitfähigkeitsmechanismus, verbunden mit hoher Leitfähigkeit, erlaubte Messungen an trockenen Proben im 2-Pol-Verfahren, ohne daß eine Elektrodenpolarisation auftrat, was die Existenz und gute Vernetzung einer nichtelektrolytischen hochleitfähigen Komponente im Gestein unmittelbar beweist. Im Fall des graphitführenden Kataklasits hätte es dieses Beweises nicht unbedingt bedurft, da das graphitische Netzwerk auch makroskopisch sichtbar ist (vgl. JÖDICKE & DREISMICKENBECKER 1994, Abb. 4b). Anders verhält es sich bei den Schwarzschiefern, da hier das vermutlich aus Kerogenrest aufgebaute leitfähige Netzwerk bisher weder mikroskopisch noch elektronenmikroskopisch nachgewiesen werden konnte (JÖDICKE 1991).

Die Leitfähigkeit von Proben ohne dominierenden quasi-metallischen Leitungsmechanismus, d.h. die Leitfähigkeit der weitaus überwiegenden Mehrheit aller Gesteine, muß bei niedrigen Frequenzen in der elektrolytgefüllten 4-Pol-Zelle bestimmt werden, zu hohen Frequenzen sollten sich Messungen in der 2-Pol-Zelle anschließen. Abb. 11 macht deutlich, daß die Ergebnisse beider Meßverfahren gut aneinander anschließen. Dargestellt ist die Dispersion eines graphitreichen Metaquarzits, in dem der Graphit in Form voneinander isolierter Schüppchen vorliegt (vgl. JÖDICKE & DREISMICKENBECKER 1994, Abb. 4a, 6a). Gemessen wurde parallel und senkrecht zur Foliation. Zu erkennen ist eine richtungsabhängige Anisotropie des spezifischen Widerstand, die mit höheren Frequenzen zunimmt. Auffällig ist aber vor allem der starke Phaseneffekt (IP-Effekt) zwischen 10^{-3} und 10^4 Hz, der durch Redoxreaktionen an den Grenzflächen zwischen Elektrolyt und Graphit verursacht wird. Dieser Phaseneffekt tritt demnach auch im klassischen Frequenzbereich der Magnetotellurik auf. Damit wird die Frage aufgeworfen, ob es notwendig ist, in magnetotellurischen Modellen frequenzabhängige Leitfähigkeiten einzuführen. Da es einen derartigen Graphitreichum wie im gezeigten Beispiel des kalabrischen Metaquarzits in Krustengesteinen nach derzeitiger Erfahrung nur sehr selten gibt, scheint dies wohl nur in Ausnahmefällen erforderlich zu sein.

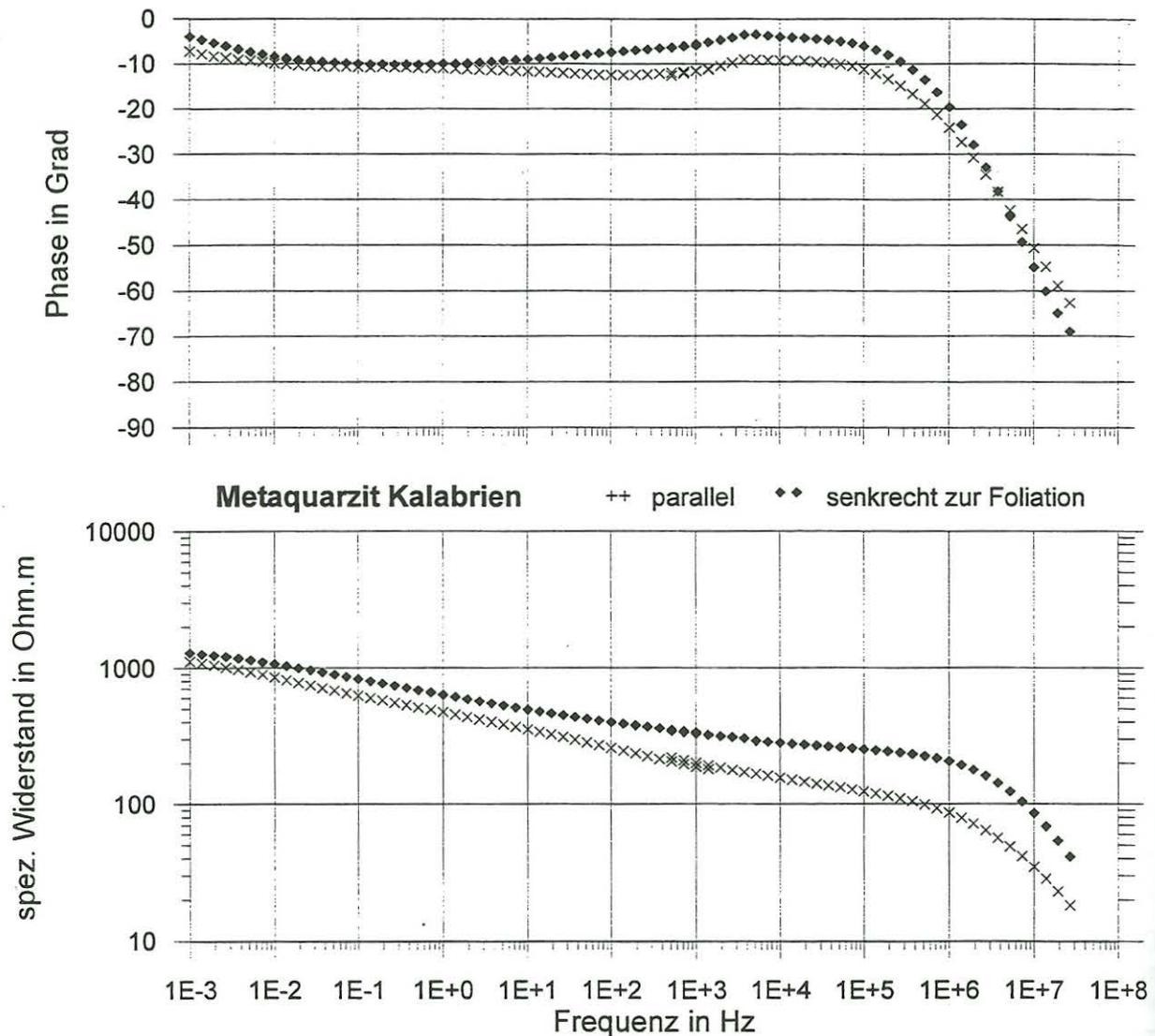


Abb. 11: Frequenzabhängige spezifische Widerstände und Phasen von zwei wassergesättigten Proben eines Metaquarzits, Serre San Bruno, Kalabrien

Literatur

- BÖRNER, F. (1991): Untersuchungen zur komplexen elektrischen Leitfähigkeit von Gesteinen im Frequenzbereich von 1 Millihertz bis 10 Kilohertz. - Diss. Math.-Nat. Fak. Bergakad. Freiberg.
- DUBA, A., HUENGES, E., NOVER, G., WILL, G. & JÖDICKE, H. (1988): Impedance of black shale from Münsterland 1 borehole: an anomalously good conductor? - J. Geophys. 94: 413 - 419.
- HOFFMANN, N., FLUCHE, B., JÖDICKE, H., JORDING, A. & MÜLLER, W. (1996): Ergebnisse neuer magnetotellurischer Messungen in Norddeutschland: Neuerkenntnisse zur tektonischen Felderung und zur Verbreitung potentieller Muttergesteine im Präperm. - Prot. 16. Koll. Elektromagnetische Tiefenforschung, Burg Ludwigstein, 9.4. - 12.4.1996: 412-433.
- JÖDICKE, H. (1991): Zonen hoher elektrischer Krustenleitfähigkeit im Rhenohorzynikum und seinem nördlichen Vorland. - Diss. Math.-Nat. Fak. Univ. Münster; Lit.-Verlag, Hochschulschriften Bd. 24; Münster, Hamburg.
- JÖDICKE, H. & DREISMICKENBECKER, N. (1994): Zur elektrischen Leitfähigkeit graphitführender Unterkrustengesteine der Serre San Bruno in Kalabrien (Italien). - Prot. 15. Koll. Elektromagnetische Tiefenforschung, Höchst im Odenwald, 28.3. - 31.3.1994: 336-345.
- MARKFORT, R. (1997): Die Erprobung eines Impedanz-Phasenanalysators zur Messung elektrischer Gesteinsparameter im Frequenzbereich von 1 mHz bis 32 MHz. - Dipl.-Arb. Inst. f. Geophys. Univ. Münster [unveröff.].
- PELSTER, R. (1991): A Novel Analytic Method for the Broadband Determination of Electromagnetic Impedances and of Material Parameters. - II. Physikalisches Institut Universität zu Köln.