

Petrophysikalische Befunde an kristallinen Gesteinen

W. Debschütz, M. Jonas & J.R. Schopper (Clausthal)

In diesem Vortrag möchte ich über das Verhalten kristalliner Gesteine aus der Sicht der Petrophysik sprechen.

Unter dieser speziellen Fragestellung werden von uns in Clausthal auch drei KTB-Projekte bearbeitet, eines davon mit dem Titel "Bohrlochmessungen im Kristallin", bei dem wir uns bemühen, gewonnene petrophysikalische Erkenntnisse sogleich in die Praxis zu übertragen und auswertungstechnische Verfahrensanweisungen zu erstellen.

Bei diesem Projekt haben wir uns zu einem nicht rein empirischen sondern auch theoretisch fundierten Vorgehen entschlossen. Am Beispiel der elektrischen Verhaltensweise möchte ich Ihnen darzulegen versuchen, daß Sediment- und kristalline Gesteine petrophysikalisch zwar grundsätzlich den gleichen Gesetzmäßigkeiten gehorchen, daß dies in den verschiedenartigen Meßgrößen quantitativ jedoch durchaus unterschiedlich zum Ausdruck kommen kann. Eine derartige Auffassung macht es in der Tat leichter, elektrische Bohrlochmessungen anschließend in Bezug auf das Kristallin erfolgreich auszuwerten.

Wie Ihnen vielleicht bekannt sein dürfte, gehen die ersten und heute im Prinzip noch gültigen quantitativen Auswertungsformeln für im Sediment gefahrene elektrische Widerstandslogs auf SUNDBERG (1932) und ARCHIE (1942) zurück (Abb. 1).

$$K_0 = 1/F K_w \quad \text{SUNDBERG} \quad (1)$$

$$F = a \phi^{-m} \quad \text{ARCHIE} \quad (2)$$

durch die die gemessene spezifische Leitfähigkeit des 100% elektrolytgesättigten Gesteins, K_0 , und die spezifische Leitfähigkeit des Elektrolyten selbst, K_w , über den Formationsfaktor F mit der Porosität ϕ in Zusammenhang gebracht wird. Der dabei auftretende Koeffizient a ist eine lithologieabhängige Größe, m - Zementationsexponent genannt - ebenfalls. Zur SUNDBERG-Beziehung ist anzumerken, daß die i.a. berechtigte Annahme, daß die Matrix selbst nicht zur Gesamtleitfähigkeit beiträgt, hier bereits Eingang gefunden hat.

Beiden Formeln wird noch heute im wesentlichen ein empirischer Charakter nachgesagt. Tatsächlich kommen der ARCHIE- (s. PAPE et al., 1984) und auch der SUNDBERG-Beziehung, mit der ich mich im folgenden eingehend beschäftigen möchte, aber mehr wissenschaftliche Exaktheit zu als gemeinhin angenommen. Auf den ersten Blick ist es sicherlich auch einleuchtend, daß eine makroskopische Größe geometrischer Natur, hier der Formationsfaktor F , diese beiden spezifischen Leitfähigkeiten verbindet. Trotzdem spiegelt diese Beziehung das elektrische Verhalten der Sedimentgesteine nur zur Hälfte wieder (Abb. 2). Abweichungen zeigten sich zuerst in Materialien mit tonigen Beimengungen, weswegen sich in der Literatur auch der noch vage Begriff "shaly sand problem" findet, später verallgemeinert bei Materialien mit großer innerer Oberfläche. Das abweichende Verhalten tritt dabei um so mehr zutage, je niedriger die Salinität des Elektrolyten ausfällt, d.h. je niedriger seine spezifische Leitfähigkeit K_w ist.

Elektrische Widerstandsmessungen in Sedimentgesteinen:

Sundberg (1932)

$$\kappa_o = \frac{1}{\bar{F}} \kappa_w \quad (1)$$

(nichtleitende Gesteinsmatrix)

Archie (1942)

$$\bar{F} = a \phi^{-m} \quad (2)$$

κ_o = spezifische Leitfähigkeit des 100% elektrolytgesättigten Gesteins

κ_w = spezifische Leitfähigkeit des Elektrolyten

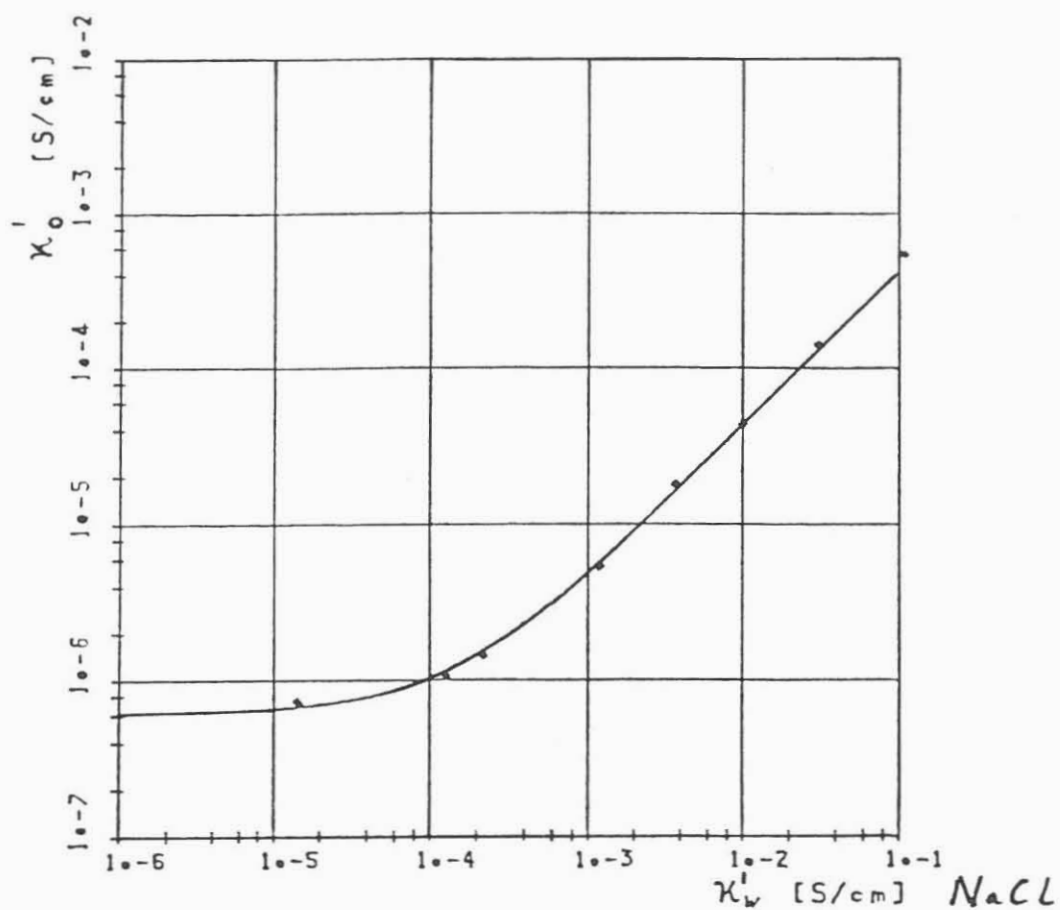
\bar{F} = Formationsfaktor

ϕ = Porosität

a = Koeffizient (0,6... 2)

m = Zementationsexponent (1... 3...)

Doppeltlogarithmische Darstellung:
Realteil der Gesteinsleitfähigkeit gegen Elektrolytleitfähigkeit



Elektrische Leitfähigkeit

Probe: f 4/2 (Fontainebleau - Sandstein)

F: 235.00 Kappa q: 0.0006 mS/cm

Inst. f. Geophysik, TU Clausthal

Bearb.: kulenkampff

Datum: 3.6.87

Dies führte bei allen Autoren, die sich mit diesem Problem beschäftigten, zu einer erweiterten SUNDBERG-Beziehung folgenden Typs (siehe auch Abb. 3):

$$K_0 = K_w / F_{red} + K_q \quad (3)$$

Die hierin auftretenden Größen F_{red} und K_q wurden allerdings, je nach Autor, in unterschiedliche Zusammenhänge gebracht. Als die bekanntesten Arbeiten seien die WAXMAN & SMITS (1968), darauf aufbauend die von CLAVIER, COATES & DUMANOIR (1977), auf deren "dual water model" Schlumberger bei der Auswertung noch heute zurückgreift, sowie die von RINK & SCHOPPER (1973, 1974) genannt. Bei allen wird die Gesamtleitfähigkeit K_0 additiv aufgeteilt

- a) in eine zusätzliche Leitfähigkeit K_q , die ihre Ursache in einer sich an der negativ geladenen Matrixoberfläche ausbildenden positiven, elektrischen Grenzschicht hat, und
- b) wie gehabt, in eine elektrolytische Leitfähigkeit K_w wobei dem Elektrolyten jetzt aber nur der verbleibende, sog. freie Porenraum zur Verfügung steht. Der um den Anteil der elektrischen Grenzschicht reduzierten Porosität ϕ_{red} wird dann der reduzierte Formationsfaktor F_{red} zugeordnet.

Verschiedene Einschränkungen bei den ersten beiden Autorengruppen, auf die ich im einzelnen in der anschließenden Diskussion gerne eingehen kann (auch nachzulesen bei PAPE & WORTHINGTON, 1983), sowie in ganz entscheidendem Maße die Tatsache, daß die Grenzflächenleitfähigkeit bei RINK & SCHOPPER, wie K_q bei ihnen genannt wird, am weitesten multiplikativ aufgetrennt wird, führte schließlich dazu, daß wir in Clausthal letzterem Zusammenhang den Vorzug gaben. Bei ihnen setzt sich K_q aus übersichtlichen elektrochemischen Größen, d.h. der Ladungsdichte σ und der Ionenbeweglichkeit β , und aus Größen geometrischer Natur zusammen, d.h. der Grenzflächentortuosität λ^2 und der inneren Oberfläche, bezogen auf das Porenvolumen, S_{por} .

Somit muß die erweiterte SUNDBERG-Beziehung wie folgt interpretiert werden:

Der erste Term gibt, wie bereits erwähnt, den elektrolytischen Leitfähigkeitsanteil wieder, d.h. die sog. Volumenleitfähigkeit (Abb. 2). Er wird um so größer sein, je großräumigere Porenkanäle vorliegen und natürlich, wie hier zu sehen, je saliner der Elektrolyt ausfällt. Steht dagegen nur wenig Porenraum zur Verfügung oder anders ausgedrückt, gewinnt die innere Oberfläche gegenüber dem Volumen zunehmend an Bedeutung, und ist gar zusätzlich die Salinität des Porenwassers gering, wird die Grenzflächenleitfähigkeit K_q die dominierende Größe in dieser Beziehung bilden.

Soweit zu Erkenntnissen an Sedimenten, und an dieser Stelle läßt sich die durchaus berechnete Frage stellen, warum sich kristallines Gesteinsmaterial petrophysikalisch bzw. elektrisch plötzlich anders verhalten sollte? Experimente an Graniten (Abb. 4) zeigen unmittelbar, daß auch sie der erweiterten SUNDBERG-Beziehung gehorchen, aber außerdem, daß i.a. mit größeren F - und K_q -Werten zu rechnen ist, wofür letztendlich die mikroklüftige Porenraumstruktur verantwortlich gemacht werden kann. Unsere Beobachtungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Die reell erweiterte Sundberg -

Beziehung :
$$\chi_0 = \frac{\chi_w}{\bar{F}_{red}} + \chi_g \quad (3)$$

(3a) Waxman & Smits (1968)

$$\chi_g = \frac{1}{\bar{F}_{red}} \beta_e Q_v$$
 wobei $\bar{F}_{red} = \bar{F}, \tau^2 = 1, Q_v = \frac{b}{f} S_{por}$

(3b) Clavier, Coates & Dumanoir (1977)

$$\chi_g = \frac{1}{\bar{F}} \beta_e Q_v$$
 wobei $\bar{F}_{red} > \bar{F}, \tau^2 = 1, Q_v = \frac{b}{f} S_{por}$

(3c) Rink & Schopper (1973, 1974)

$$\chi_g = b \cdot \beta \frac{S_{por}}{\tau^2 \bar{F}}$$
 wobei $\bar{F}_{red} \geq \tau^2 \bar{F}, \tau^2 \geq 1$

\bar{F}_{red} = reduzierter Formationsfaktor (i.a. $\bar{F}_{red} \approx \bar{F}$)

β_e, β = (äquivalente) Ionenbeweglichkeit ($\beta_e = \beta \tilde{f}$,
 \tilde{f} = Faraday-Konstante)

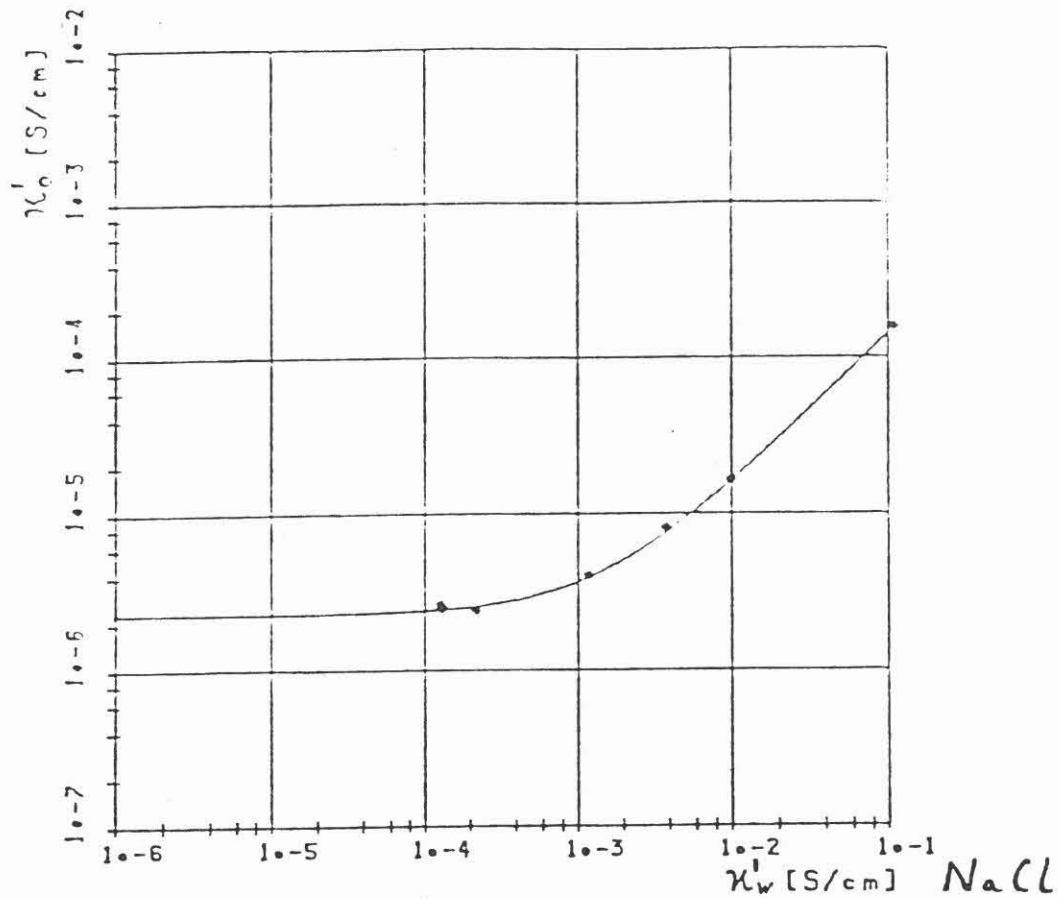
Q_v = Kationenaustauschkapazität, bezogen auf das Porenvolumen

τ^2 = Grenzflächen tortuosität

b_e, b = (äquivalente) Ladungsdichte ($b_e = \frac{z}{f}$)

S_{por} = innere Oberfläche, bezogen auf das Porenvolumen

Doppeltlogarithmische Darstellung:
Realteil der Gesteinsleitfähigkeit gegen die Elektrolytleitfähigkeit



Elektrische Leitfähigkeit

Probe: zg 1r/1 (Falkenberg-Granit)

F: 718.00 Kappa q: 0.0023 mS/cm

Inst. f. Geophysik, TU Clausthal

Bearb.: kulenkampff

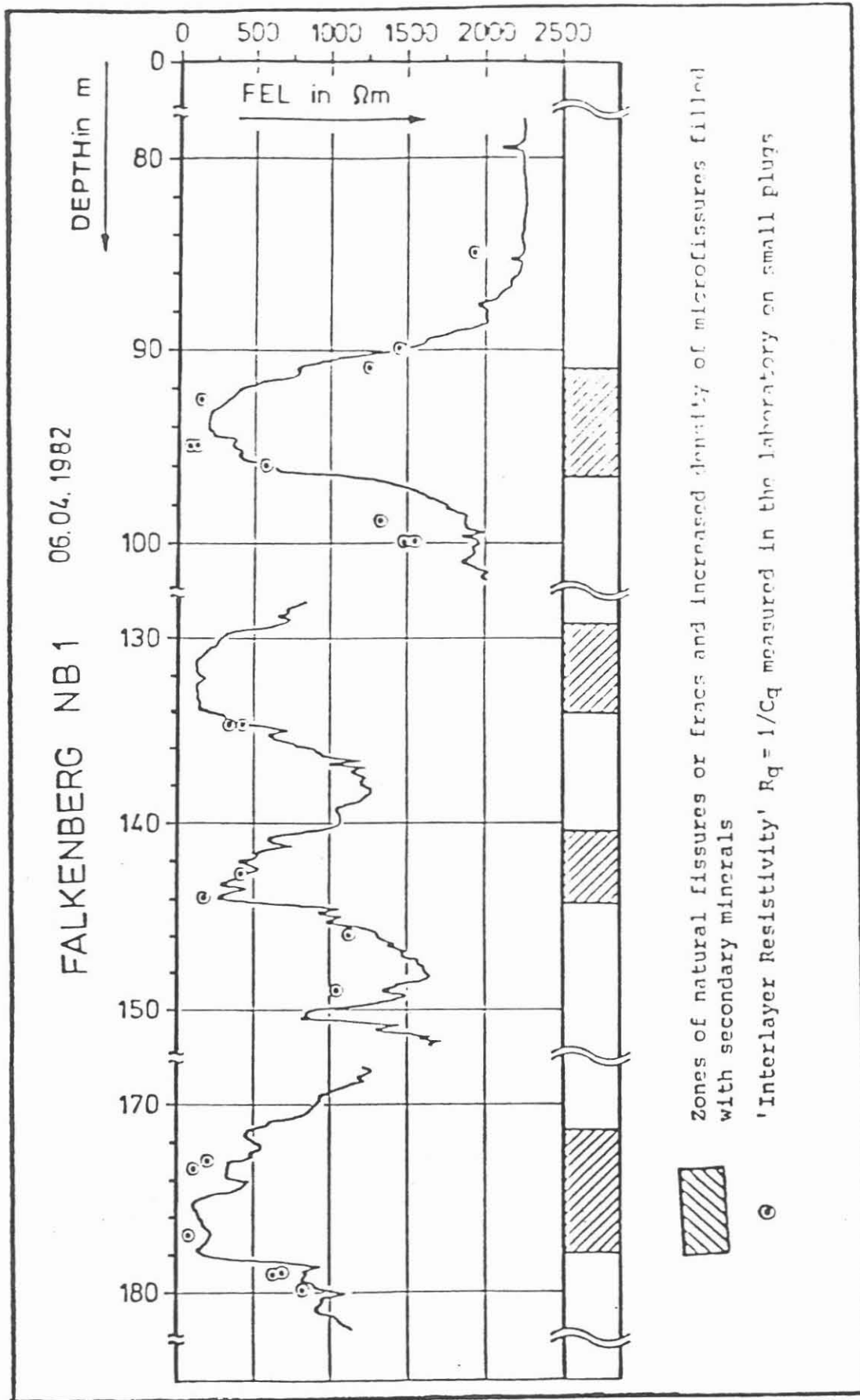
Datum: 24.5.87

Sedimente und kristalline Gesteine zeigen grundsätzlich das gleiche elektrische Verhalten, aber abhängig davon, welche Leitfähigkeitsart dominiert, spielen die einzelnen Terme der erweiterten SUNDBERG-Beziehung eine unterschiedlich gewichtige Rolle. In Sedimenten ist zwar nicht immer, doch in aller Regel der Fall anzutreffen, daß die Volumenleitfähigkeit die Grenzflächenleitfähigkeit überschattet; in vielen Fällen kann K_q sogar ganz vernachlässigt werden. In kristallinem Material ist es dagegen genau umgekehrt. Hier ist die Grenzflächenleitfähigkeit keinesfalls mehr vernachlässigbar, und es ist sogar damit zu rechnen, daß diese Leitfähigkeit den Hauptanteil - wenn nicht sogar den alleinigen Beitrag - zur Gesamtleitfähigkeit liefert. Diesen Sachverhalt sehen Sie in Abb. 5 bestätigt. In einige Teufenausschnitte eines Focussed Electric Log (FEL) der Falkenberger Nebenbohrung NB1 sind die im Labor gemessenen Grenzflächenresistivitäten (R_q) teufenentsprechend eingetragen. Bis auf wenige Ausnahmen zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Sehr deutlich tritt die petrophysikalische Verwandtschaft zwischen Sediment- und kristallinen Gesteinen auch in der Abb. 6 zutage. Hier wird von der Verknüpfung der Permeabilität mit der spezifischen inneren Oberfläche Gebrauch gemacht, nach einer in unserer Arbeitsgruppe in Clausthal mit Hilfe der Theorie der Fraktalen Dimension verallgemeinerten KOZENY-CARMAN-Gleichung. Die Darstellung steht im Zusammenhang mit den sehr umfangreichen Untersuchungen des letzten Jahres, bei denen unser Hauptaugenmerk den elektrochemischen Größen in der RINK-SCHOPPER'schen Formel, also σ und β , galt. Wenn Interesse besteht, kann ich dazu nachher noch mehr sagen, ansonsten verweise ich auf unseren nächsten Bericht. Hier möchte ich Ihnen nur zeigen, daß kristalline Gesteine, die im wesentlichen links von der willkürlichen Trennlinie liegen, sich petrophysikalisch und elektrochemisch nicht andersartig verhalten und größenordnungsmäßig sogar den Anschluß an die Sedimente bilden. An den Achsen sind die Meßgrößen F , K_q und K , die Permeabilität, aufgetragen.

Soweit zur petrophysikalischen Verwandtschaft zwischen Sedimenten und kristallinen Gesteinen. Bei den folgenden Überlegungen möchte ich hinsichtlich ihres elektrischen Verhaltens nun einen Schritt weitergehen, werde dabei aber nicht mehr zwischen beiden Gesteinsarten unterscheiden müssen, wie sich experimentell auch bestätigen wird:

Als fundiertes Ergebnis der bisherigen Betrachtungen ergab sich die erweiterte SUNDBERG-Beziehung, der zunächst als aller einfachstes Ersatzschaltbild zwei parallelgeschaltete ohmsche Widerstände zugeordnet werden können. Doch es wäre sehr kurzsichtig, diese Gleichung als eine rein reelle verstehen zu wollen. Die elektrische Doppelschicht und auch andere Erwägungen legen es nahe, in zweiter Näherung den ohmschen Widerständen Kapazitäten hinzuzufügen, d.h. einfacherweise die gesamte Gleichung ins Komplexe zu übertragen.

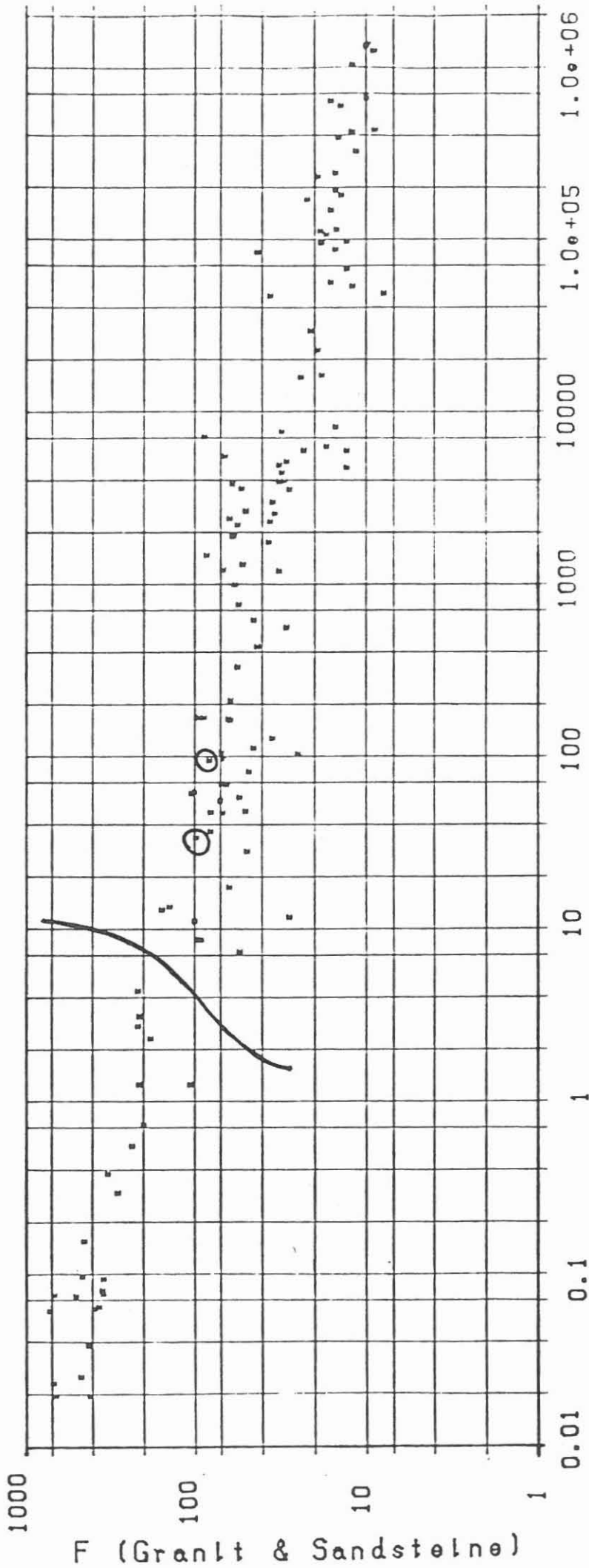
Mit diesem Problem hat sich an unserem Institut Herr Kulenkampff in seiner Diplomarbeit beschäftigt. Er hat die elektrische Gesteinsleitfähigkeit als frequenzabhängige komplexe Größe und in Abhängigkeit von der Salinität der Porenfüllung (NaCl) untersucht. Die komplexe Erweiterung der SUNDBERG-Beziehung (Abb. 7) lautet vollständig



Comparison of FEL-Log readings with laboratory measurements of surface conductivity

INSTITUT FUER
GEOPHYSIK
TU CLAUSTRAL
Sedimentpetrophysik
Prof. J.R. Schopper

← Granite links von willkürlicher Trennlinie, sonst mit O markiert!



INSTITUT FUER GEOPHYSIK TU CLAUSTHAL Sedimentpetrophysik Prof. J.R. Schopper	Bearbeiter: BRAKEMEIER Datum: Nov. 1987
--	--

$K \mu g^2 [md \mu S^2 cm^{-2}]$

Die komplex erweiterte Sundberg- Beziehung

$$\chi_0^* = \frac{\chi_w^*}{F^*} + \chi_g^* \quad (4)$$

mit
$$\chi_0' = \frac{F' \chi_w' + F'' \chi_w''}{F'^2 + F''^2} + \chi_g' \quad (5)$$

$$\chi_0'' = \frac{F' \chi_w'' - F'' \chi_w'}{F'^2 + F''^2} + \chi_g'' \quad (6)$$

im Frequenzbereich 1 kHz ... 1 MHz

(i) Elektrodenpolarisation vernachlässigbar für Frequenzen > 1 kHz; Abschätzung liefert $\chi_w'' \approx 0$;

(ii) Experimente zeigen, χ_0'' fast unabhängig von χ_w' und nicht zu χ_w' proportional $\Rightarrow F'' \approx 0$

$$\Rightarrow \chi_0' = \frac{\chi_w'}{F'} + \chi_g', \quad \chi_0'' = \chi_g'' \quad (7), (8)$$

oder

$$\chi_0^* = \frac{\chi_w'}{F'} + \chi_g' + i \chi_g'' \quad (9)$$

Sundberg
reell

↓

Volumenleit-
fähigkeit

↓

Grenzflächenleit-
fähigkeit

$$K_{\text{O}}^* = \frac{K_{\text{W}}^*}{F^*} + K_{\text{q}}^* \quad (4)$$

mit

$$K_{\text{O}}' = \frac{F'K_{\text{W}}' + F''K_{\text{W}}''}{F'^2 + F''^2} + K_{\text{q}}' \quad (5)$$

$$K_{\text{O}}'' = \frac{F'K_{\text{W}}'' - F''K_{\text{W}}'}{F'^2 + F''^2} + K_{\text{q}}'' \quad (6)$$

wobei komplexe Größen mit einem Stern, ihre Real- bzw. Imaginärteile mit einem bzw. mit zwei Strichen gekennzeichnet sind.

Mit Hilfe einer sinnvollen Abschätzung und aufgrund der experimentellen Befunde läßt sich zeigen, daß F' und F'' verschwindend klein sind, so daß sich Real- und Imaginärteil entkoppeln lassen und sich für

$$K_{\text{O}}' = \frac{K_{\text{W}}'}{F'} + K_{\text{q}}' \quad (7)$$

$$K_{\text{O}}'' = K_{\text{q}}'' \quad (8)$$

findet; als zusammengefaßte Gleichung resultiert dann

$$K_{\text{O}}^* = \frac{K_{\text{W}}'}{F'} + K_{\text{q}}' + i K_{\text{q}}'' \quad (9)$$

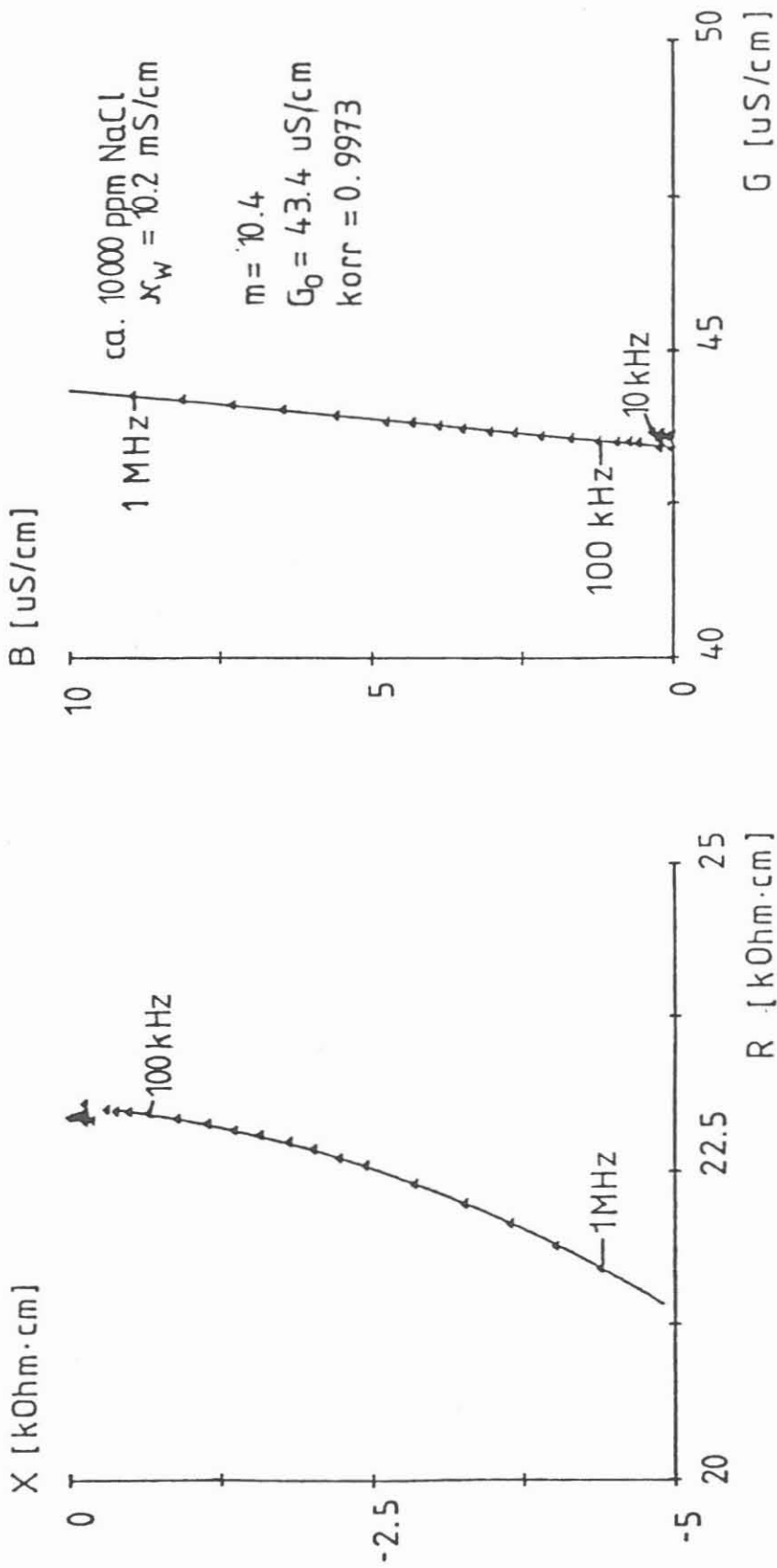
Danach ist der elektrolytische Beitrag lediglich reell, die Grenzflächenleitfähigkeit aber vollständig in der komplexen Form zu berücksichtigen.

Auf die experimentellen Befunde, die vielleicht manche von Ihnen noch von der letztjährigen DGG-Tagung kennen und die auch im zweiten KTB-Rport (87-2) nachzulesen sind, möchte ich jetzt nur soweit eingehen, wie es nötig ist, um anschließend die bohrlochgeophysikalischen Konsequenzen aufzeigen zu können:

Als adäquate Darstellung von Admittanz und Impedanz ist nun die Gauß'sche Zahlenebene zu wählen (Abb. 8). Aufgetragen sind Real- und Imaginärteil der spezifischen Gesteinsleitfähigkeit bzw. ihr Kehrwert, der spezifische Widerstand. Zu jeder vorgegebenen Frequenz gehört ein Meßwert, und als Porenelektrolyt liegt in diesem Beispiel eine 10 000 ppm NaCl-Lösung vor. Hier handelt es sich um eine Sandsteinprobe und man erkennt im Admittanzbild oberhalb 1 kHz einen linearen Verlauf; darunter verschwindet der Phasenwinkel im Bereich der Meßgenauigkeit. Im Impedanzbild erhält man als entsprechendes Pendant einen Kreisbogen (Abb. 9). Zum Vergleich zeige ich Ihnen auch eine Granitprobe, an der sich, wie Sie sehen, das grundsätzlich gleiche Verhalten wie bei der Sandsteinprobe nachweisen läßt.

Wenn wir außer der Frequenz nun auch die Elektrolytleitfähigkeit variieren lassen, ergibt sich für die experimentellen Werte dieses Gesamtbild - hier zunächst die Sandsteinprobe (Abb. 10) und hier die Granitprobe (Abb. 11). Man erkennt, daß mit steigender Salinität und bei jeweils gleicher Frequenz der Imaginärteil leicht zu-

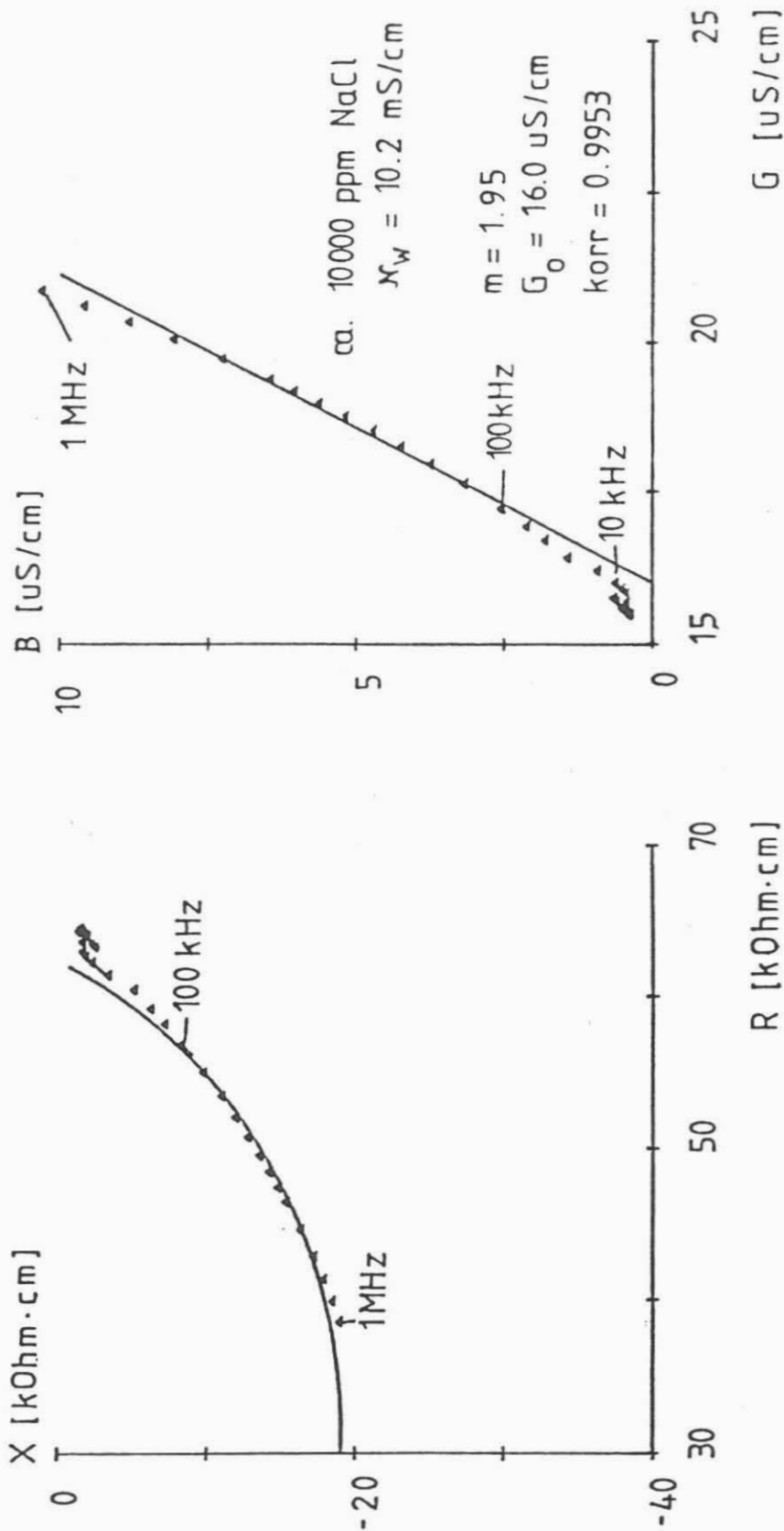
Impedanz und Admittanz
in der komplexen Zahlenebene



Elektrische Impedanzmessung
Institut f. Geophysik, Abt. Petrophysik
TU Clausthal
Datum: 26.1.87 Bearbeiter: Kulenkampff

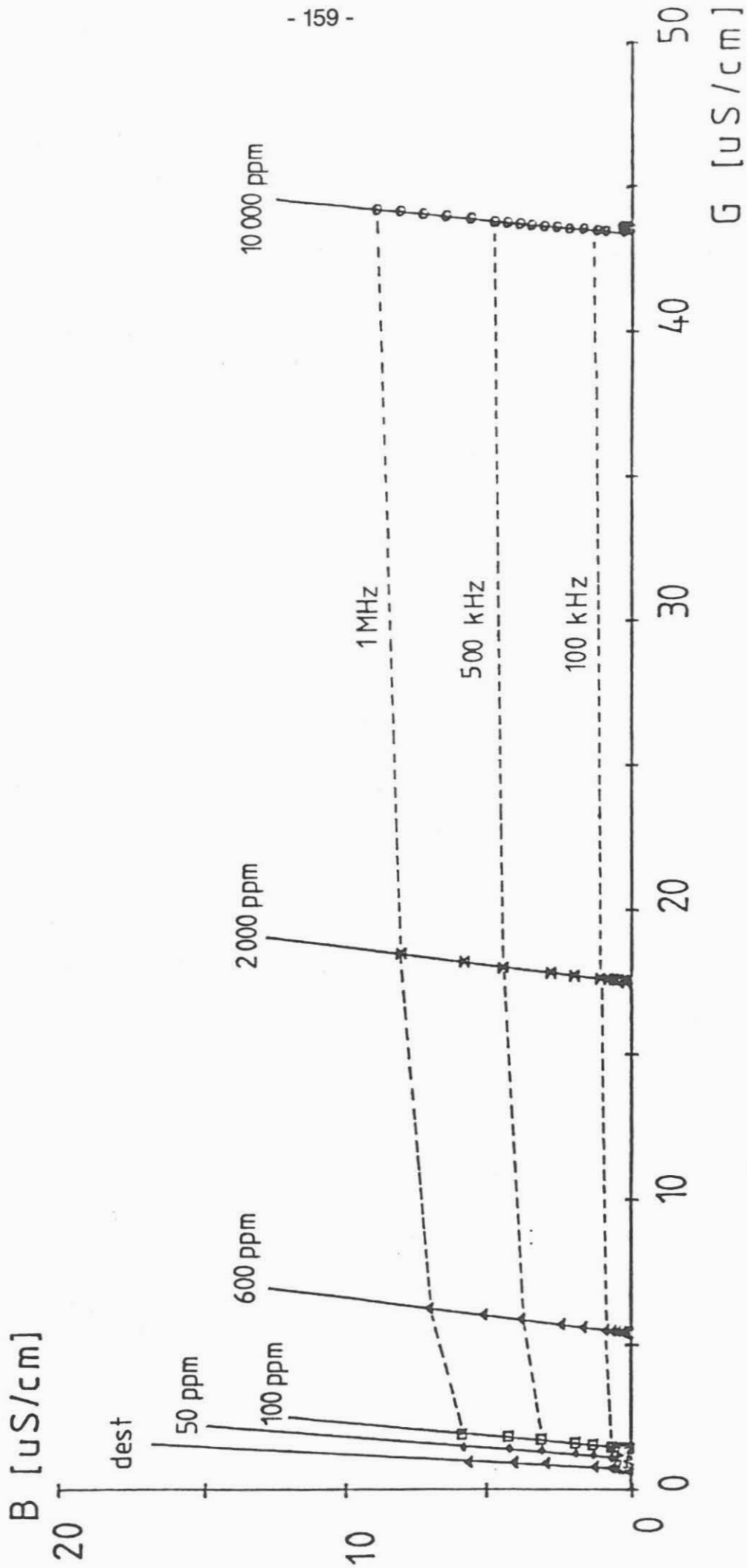
Probe: f 4/2 (Sandstein)

Impedanz und Admittanz
in der komplexen Zahlenebene



Elektrische Impedanzmessung
 Institut f. Geophysik, Abt. Petrophysik
 TU Clausthal
 Probe: zg 1r/1 (Granit)
 Datum: 26.1.87 Bearbeiter: Kulenkampff

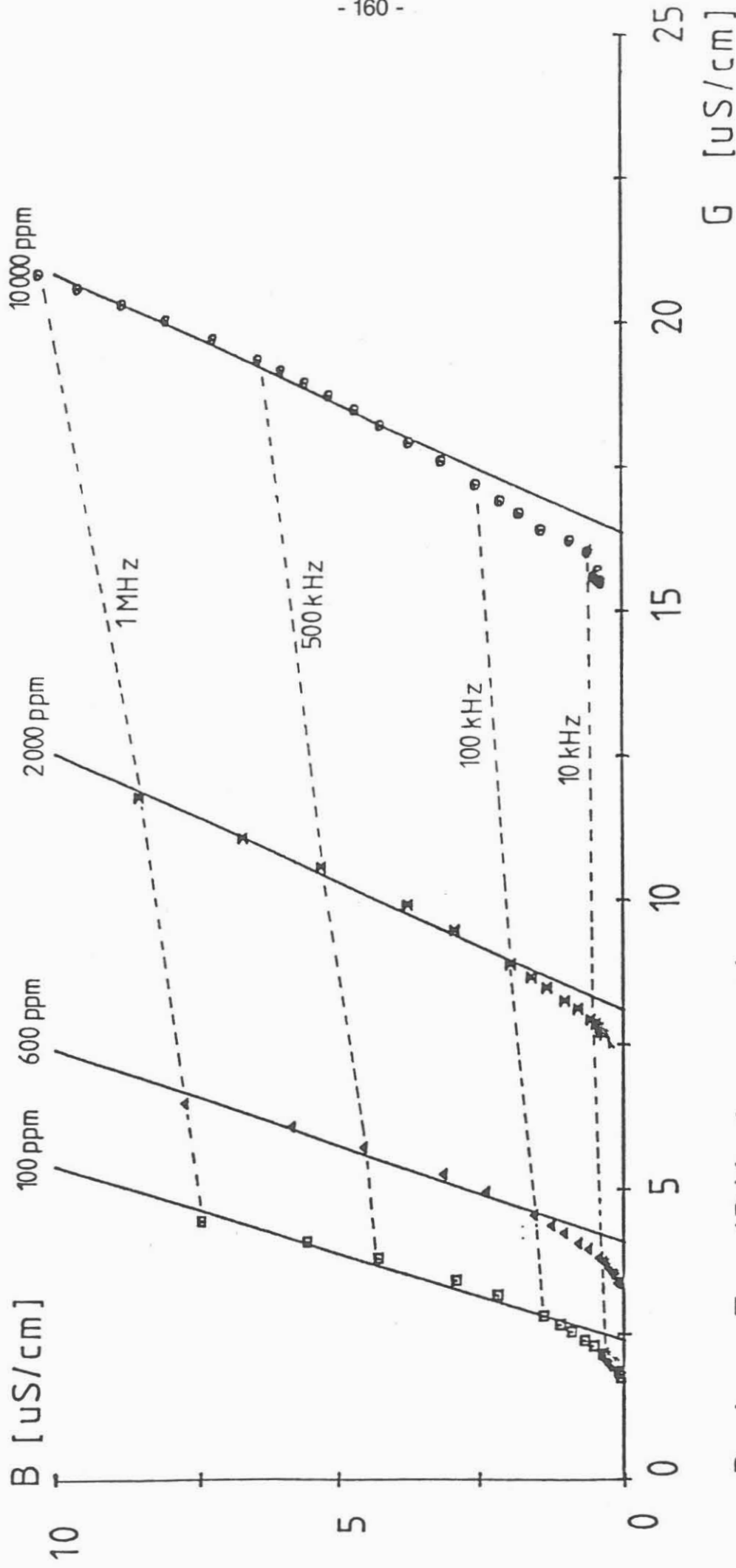
Die Admittanz in der komplexen Zahlenebene



Probe: F 4/2 (Sandstein)

Inst. f. Geophysik, TU Clausthal
2.87 Kulenkampff

Die Admittanz in der komplexen Zahlenebene



Probe: Zg 1R/1 (Granit)

Inst. f. Geophysik, TU Clausthal
2.87 Kulenkampff

nimmt, also die Kapazität, und außerdem wird die Steigung der Admittanzgeraden geringer.

An dieser Stelle halte ich es für angebracht, eine wichtige Bemerkung zu machen:

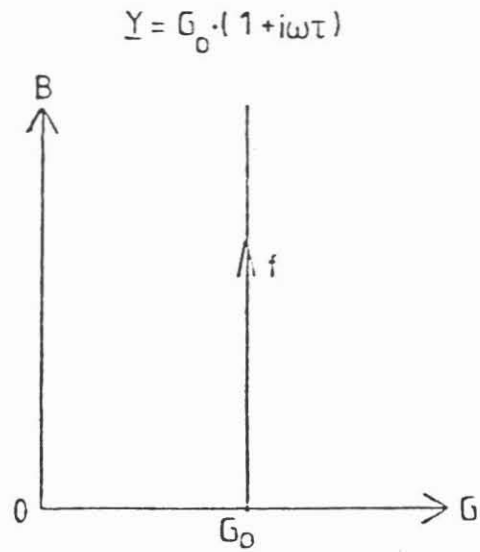
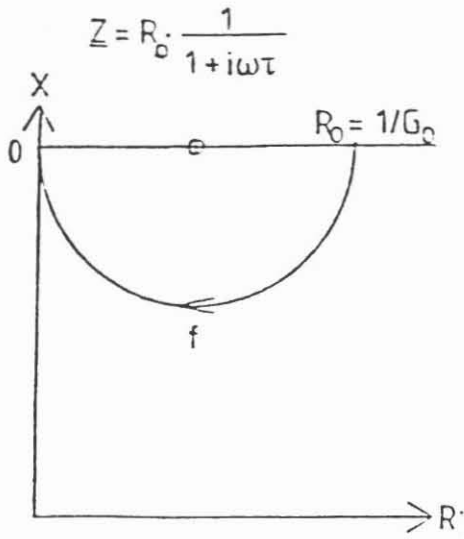
Die Meßergebnisse zeigen sehr schön, daß die Parallelschaltung eines ohmschen Widerstandes und einer Kapazität immer noch ein zu idealisiertes Ersatzschaltbild darstellt (Abb. 12). Es war zu beobachten, daß die Admittanzgeraden nicht mehr vertikal verlaufen, wie es bei einem derartigen Ersatzschaltbild der Fall sein müßte, sondern geneigt sind; auch die Kreisbögen der Impedanz weisen einen flacheren Verlauf auf. Das Koordinatensystem ist um den Steigungswinkel der Admittanzgeraden gedreht, wofür es kein einfaches Ersatzschaltbild gibt. Es deutet sich jedoch an (LEMEHAUTE et al., 1983, 1986), daß fraktal-theoretische Überlegungen, die geometrischen Randbedingungen natürlicher Medien berücksichtigen, dieses Problem lösen. Auf die Einzelheiten werden wir in unserem nächsten Bericht eingehen.

Diese fraktal-theoretischen Überlegungen bilden auch die Grundlage für den großen Nutzen aus bohrlochgeophysikalischer Sicht. Es sind durchaus plausible Beziehungen denkbar, die spezifische innere Oberfläche $S_{p.o.r}$ mit der im Steigungs- bzw. Drehwinkel auftauchenden Größe α , dem sog. Cole-Cole-Exponenten, in Zusammenhang bringen, da dieser wiederum mit der fraktalen Dimension der inneren Oberfläche verknüpft ist. Dieser Zusammenhang ist exponentieller Art, und Sie sehen in Abb. 13 die halblogarithmische Darstellung: An der Ordinate ist α abgetragen, an der Abszisse FK_G , eine zu $S_{p.o.r}$ proportionale Größe. Für die Bohrlochgeophysik würde dies bedeuten, daß mit einer Sonde, die Real- und Imaginärteil eines breitbandigen Signals im Kilo- bis Megahertzbereich mißt, sich die innere Oberfläche bestimmen lassen würde.

Und damit wäre schließlich ein weiterer Weg für die Bestimmung der Permeabilität gegeben, auf die wir dann - wie gesagt - mittels einer fraktal-theoretisch überarbeiteten Kozeny-Carman-Beziehung allein aus Logdaten rückschließen könnten, dafür ist allerdings die bohrlochgeophysikalische Bestimmung des Formationsfaktors F und der spezifischen inneren Oberfläche $S_{p.o.r}$ bzw. einer von ihr eindeutig abhängigen Größe von Nöten.

INSTITUT FUER GEOPHYSIK TU CLAUSTHAL Sedimentpetrophysik Prof. J.R. Schopper	Bearbeiter: KULENKAMPFF Datum: 1987
--	--

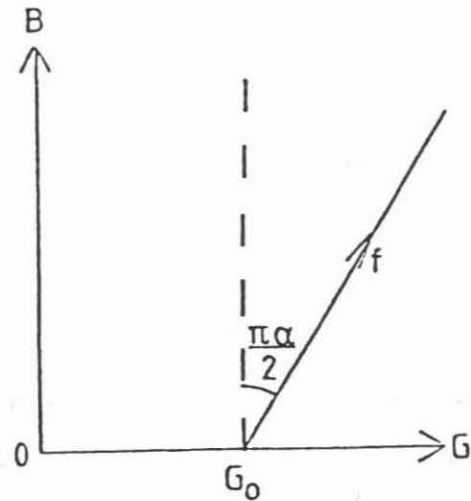
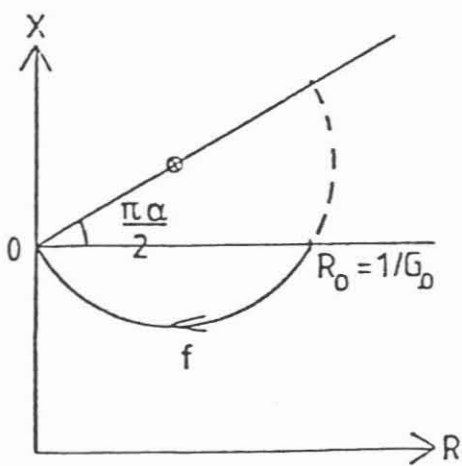
Debye - Gleichung



Impedanz

Admittanz

Cole - Cole - Gleichung



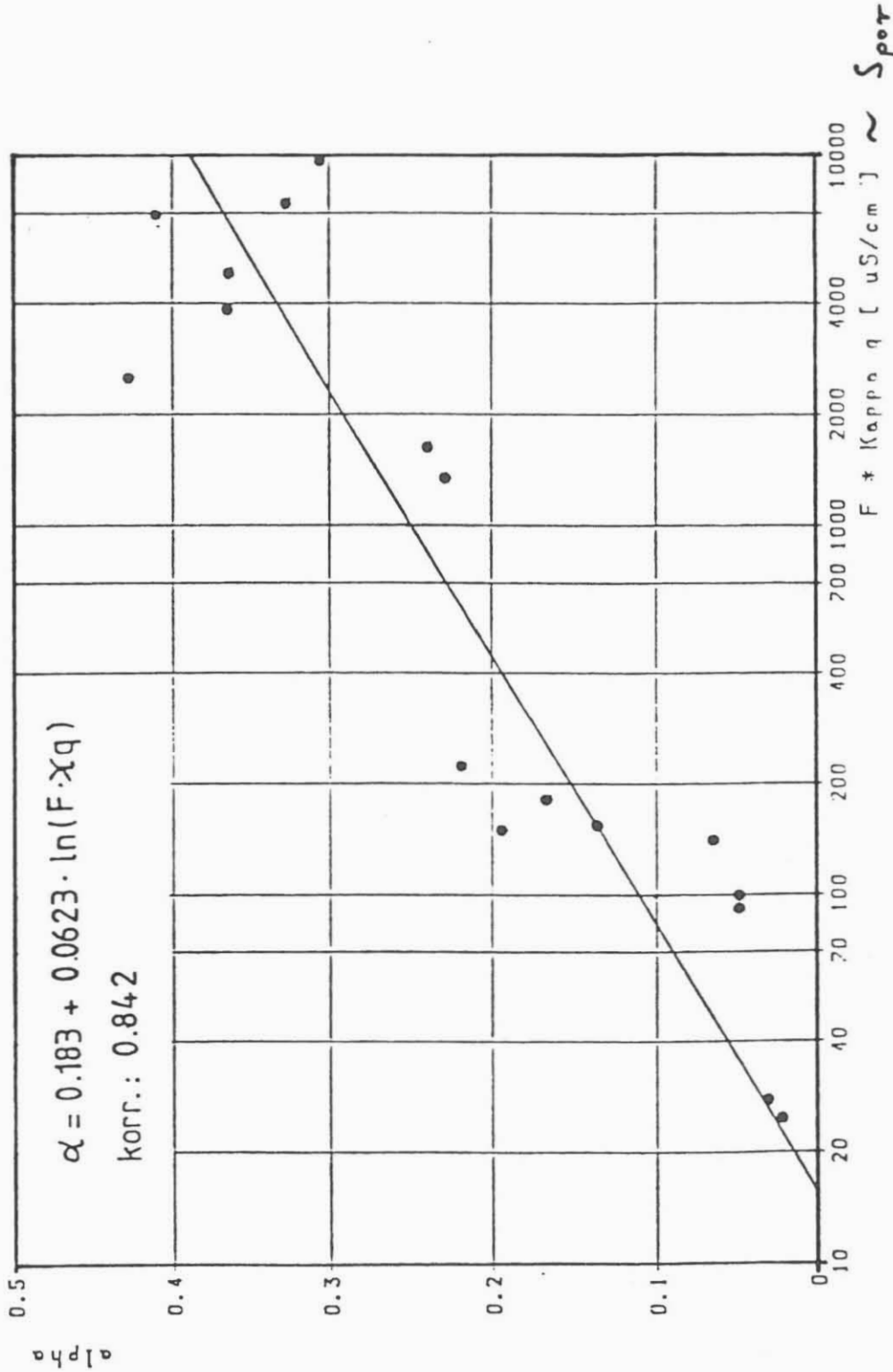
$$Z = R_0 \cdot \frac{1}{1+(i\omega\tau)^{1-\alpha}}$$

$$Y = G_0 \cdot (1+(i\omega\tau)^\alpha)^{-1}$$

Vergleich der Debye - und der Cole - Cole - Gleichung

INSTITUT FUER GEOPHYSIK TU CLAUSTRAL Sedimentpetrophysik Prof. J.R. Schopper	Bearbeiter: KULENKAMPFF Datum: 1987
--	--

Sandsteine und Granite



Halblogarithmische Darstellung:
Cole - Cole - Exponent gegen $F \cdot \kappa q$

- ARCHIE, G.E. (1942): Electrical Resistivity as an Aid in Core Analysis Interpretation. Trans. AIME 146, 54.
- CLAVIER, C., COATES, G. DUMANOIR, J. (1977): The Theoretical and Experimental Bases for the "Dual Water" Model for the Interpretation of Shaly Sands. - Pres. as Paper SPE 6859 at SPE 52nd. Ann. Fall Technical Conference, Denver, Oct. 9-12.
- KTB Report 87-2 (1987): Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik. - KTB-Projektleitung, NLfB.
- KULENKAMPPFF, J. (1988): Die elektrische Gesteinsleitfähigkeit als Poren- und Grenzflächenparameter für Kristalline und Sedimentgesteine. - Diplomarbeit, TU Clausthal, Institut für Geophysik.
- LeMEHAUTE, A., CREPY, G. (1983): Introduction to Transfer and Motion in Fractal Media; The Geometry of Kinetics: - Solid State Ionics, 9/10.
- LeMEHAUTE, CREPY, G., MARCELLIN, G. (1986): Physique des Surfaces. - C.R. Acad. Sc. Paris. SII, 9.
- PAPE, H., RIEPE, L., SCHOPPER, J.R. (1984): The role of Fractal Quantities, as Specific Surface and Tortuosities, for Physical Properties of Porous Media. - 3rd Europ. Symp. on Particle Characterization in Nürnberg 1984, 149-173; and Particle Characterization, 1, 66-73, 1984.
- PAPE, H., WORTHINGTON, P.F. (1983): A Surface-Structure Model for the Electrical Conductivity of Reservoir Rocks. - 8th Europ. Log. Symp. Trans., paper Z, London.
- RINK, M., SCHOPPER, J.R. (1973): Interface Conductivity of Liquid Saturated Porous Media and its Relation to Structure. - Proc. RILEM-IUPAC Internat. Symp. "Pore Structure and Properties of Materials", Final Report, Part II, C-311, Prague.
- RINK, M., SCHOPPER, J.R. (1974); Interface Conductivity and its Implications to Electric Logging. - 3rd Europ. Log. Symp. Trans., paper M, London.
- SUNDBERG, K. (1932): Effect of Impregnating Waters on Electrical Conductivity of Soils and Rocks. - Trans. AIME, 97, 367-391
- WAXMAN, M.H. and SMITS, L.J.M. (1968): Electrical Conductivities in Oilbearing Shaly Sands: - Soc. Pet. Engrs. J. 8, 107-122.