

## Werk

**Jahr:** 1970

**Kollektion:** fid.geo

**Signatur:** 8 Z NAT 2148:36

**Digitalisiert:** Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

**Werk Id:** PPN101433392X\_0036

**PURL:** [http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X\\_0036](http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0036)

**LOG Id:** LOG\_0164

**LOG Titel:** Versuch einer Einteilung von Gesteinen nach gefügekundlichen und elektrischen Größen

**LOG Typ:** article

## Übergeordnetes Werk

**Werk Id:** PPN101433392X

**PURL:** <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

**OPAC:** <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

## Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

## Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen  
Georg-August-Universität Göttingen  
Platz der Göttinger Sieben 1  
37073 Göttingen  
Germany  
Email: [gdz@sub.uni-goettingen.de](mailto:gdz@sub.uni-goettingen.de)

# Versuch einer Einteilung von Gesteinen nach gefügekundlichen und elektrischen Größen

## Rock Classification on the Basis of Fabric and Electric Parameters

Von W. BITTERLICH und H. WÖBKING, Innsbruck<sup>1)</sup>

Eingegangen am 29. August 1969

*Zusammenfassung:* Es wird ein Einteilungsprinzip für Gesteine beschrieben, das auf gefügekundlichen und elektrischen Gesteinsparametern basiert. Ein einfaches Modell für das Porengefüge einer Gesteinsscheibe wird gewählt, um durch Leitfähigkeits( $\sigma_G$ )-, Permeabilitäts( $k$ )- und Porositäts( $\Phi$ )-Messungen zu einer Klassifizierung zu gelangen. Als Kriterium für die Einteilung dienen die Funktionen  $\sigma_G = \sigma_G(\Phi)$ ,  $k = k(\Phi)$  und  $\sigma_G = \sigma_G(k)$ .

*Summary:* A principle of rock classification is described on the basis of fabric and electric parameters of rock. A simple model is chosen for the pore structure of a rock disk in order to reach classification by measuring conductivity ( $\sigma_G$ ), permeability ( $k$ ), and porosity ( $\Phi$ ). The relations  $\sigma_G = \sigma_G(\Phi)$ ,  $k = k(\Phi)$  and  $\sigma_G = \sigma_G(k)$  are taken as the criterion of classification.

### 1. Einleitung

Im Rahmen des VLF-Projektes Innsbruck haben die Verfasser [BITTERLICH 1967, WÖBKING 1968] eine Anzahl verschiedener Gesteine, die in Form dünner Scheiben vorlagen, auf ihre elektrischen Eigenschaften hin untersucht. Es wurde der Frequenzgang der Dielektrizitätskonstante und der elektrischen Leitfähigkeit gemessen, und zwar mit Hilfe einer Kapazitäts-Verlustfaktor-Brücke für den Frequenzbereich von 30 Hz bis 300 kHz. Da die Geometrie der Gesteine und der Elektroden bekannt war, konnten die Leitfähigkeiten der Gesteinsproben sehr genau (Fehler maximal  $\pm 4\%$ ) bestimmt werden. Bei diesen Versuchen wurde der Wassergehalt der Gesteine variiert — es wurde aber zur Sättigung bei allen Proben dasselbe Wasser (mit gleichen elektrischen Eigenschaften) verwendet.

Bei diesen Messungen fiel auf, daß einige Proben im gesättigten Zustand eine Leitfähigkeit zeigten, die invers zur Porosität war. Angeregt durch diese Erscheinung soll nun untersucht werden, ob derartige Ergebnisse theoretisch zu deuten sind. Bei den diesbezüglichen Betrachtungen fällt automatisch ein Einteilungsmodus an, der auf gefügekundlichen und elektrischen Parametern basiert.

Es wird nicht eine Einteilung angegeben werden, die mit petrographischen oder mineralogischen Aspekten korreliert; es wird vielmehr untersucht werden, inwieweit man aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit, der Permeabilität und der Porosität Einteilungsprinzipien für Gesteine aufstellen kann.

<sup>1)</sup> Univ.-Doz. Dr. WOLFRAM BITTERLICH, Innsbruck, Kaiser-Franz-Josef-Str. 5.  
Dr. HANS WÖBKING, Montanwerke Brixlegg/Tirol.

Es wurde bewußt auf die Einführung weiterer Gesteinsparameter, die für die elektrische Leitfähigkeit und die Permeabilität relevant sein mögen — wie mittlere Kapillarität, Kapillarremanenz, Korngröße, innere Porenoberfläche etc. — verzichtet. Alle diese Größen sind in den Mittelwerten  $r$ ,  $T$  und  $n$  implizit enthalten.

Um die Mittelwerte eliminieren zu können, war es notwendig, ein relativ primitives Modell zu benutzen und eine Klassifizierung in nur drei Gruppen vorzunehmen.

Zu den Mittelwertbildungen sei gesagt, daß für die charakteristischen Größen der Porenkanälchen das arithmetische Mittel benutzt wird, um anstelle der elektrischen bzw. der hydraulischen Tortuosität die „geometrische“ Tortuosität verwenden zu können.

## 1. Theoretische Betrachtungen

### 1.1 Der Einteilungsmodus

*Vorbemerkung:* Die in diesem Aufsatz verwendeten Größen weichen etwas von denen, die üblicherweise benutzt werden, ab. Der Grund dafür ist darin zu suchen, daß hier nicht zwischen einer „elektrischen“ und einer „hydraulischen“ Tortuosität — siehe z. B. SCHOPPER [1966] — unterschieden werden soll. Statt dieser beiden Größen wird  $T$ , die geometrische Tortuosität, eingeführt.

Da die Aussagen über gefügekundliche Größen durch Messungen an runden Gesteinsscheiben erfolgen soll, wird mit  $A$  die Deckfläche (Grundfläche) und mit  $d$  die Dicke der Scheiben bezeichnet.

Um möglichst einfache Zusammenhänge zu bekommen, sollen sich die folgenden Betrachtungen auf ein idealisiertes Gestein beziehen. Idealisiert bedeutet in diesem Fall:

- Die Porosität wird von durchgehenden Porenkanälchen hervorgerufen.
- Die Porenkanälchen bilden kein kommunizierendes System miteinander.
- Die Poren werden als nicht gekrümmte, relativ zu einer planen Oberfläche geneigte Kanälchen betrachtet.
- Der Querschnitt der Poren sei kreisförmig und über die gesamte Länge eines Kanälchens konstant. Siehe hierzu Abb. 1.

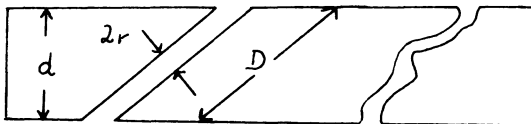


Abb. 1: Querschnitt einer Gesteinsscheibe.

Cross section through a disk of rock.

Rechts: „normales“ Porenkanälchen.

Right: "normal" pore channel.

Links: idealisiertes Porenkanälchen.

Left: idealized pore channel.

Das Volumen eines  $i$ -ten Porenkanälchens mit dem Radius  $r_i$  und der wahren Länge  $D_i$  ist

$$V_i = \pi r_i^2 D_i. \quad (1)$$

Wenn  $N$  solcher Kanälchen vorhanden sind, ist das gesamte Porenvolumen  $V_P$

$$V_P = i \sum \pi r_i^2 D_i. \quad (2)$$

Für die nachfolgende Betrachtung ist es zweckmäßig, eine Mittelwertbildung durchzuführen, nämlich

$$\frac{i \sum \pi r_i^2 D_i}{N} = \pi r^2 D, \quad (3)$$

d. h., man definiert mit (3) zur Vereinfachung ein „Einheitsporenkanälchen“ mit dem Radius  $r$  und der Länge  $D$ , das an die Stelle der wahren Kanälchen treten soll. Das Porenvolumen nimmt nun die Form

$$V_P = i \sum \pi r_i^2 D_i = N \pi r^2 D \quad (4)$$

an. Führt man weiterhin die Porendichte  $n = N/A$  und die geometrische Tortuosität  $T = D/d$  ein, so gilt für die Porosität

$$\Phi = \frac{V_P}{V_{\text{gesamt}}} = \frac{N \pi r^2 D}{A \cdot d} = n \pi r^2 \cdot T. \quad (5)$$

Die Porosität ist also eine Funktion der Porendichte  $n$ , des Radius  $r$  und der Tortuosität  $T$ .

Es sollen nun drei Grenzfälle für die Porosität  $\Phi(n, r, T)$  definiert werden und zwar derart, daß für eine Gesteinsart zwei der variablen Größen als konstant betrachtet werden. Somit ergibt sich folgende Einteilung:

a)  $n$ -Typ mit  $r = \text{const.}$  und  $T = \text{const.}$

$$\Phi = \Phi(n) = (\pi r^2 T) \cdot n = C' n \quad (6)$$

$$n = \frac{\Phi}{\pi r^2 T} \quad (7)$$

b)  $t$ -Typ mit  $r = \text{const.}$  und  $n = \text{const.}$

$$\Phi = \Phi(T) = (\pi r^2 n) T = C'' \cdot T \quad (8)$$

$$T = \frac{\Phi}{\pi r^2 n} \quad (9)$$

c)  $r$ -Typ mit  $n = \text{const.}$  und  $T = \text{const.}$

$$\Phi = \Phi(r) = (\pi n T) r^2 = C''' \cdot r^2 \quad (10)$$

$$r^2 = \frac{\Phi}{\pi n T} \quad (11)$$

(Es ist selbstverständlich möglich, noch weitere Typen zu definieren, indem man nur eine Variable als konstant betrachtet. Die theoretischen Betrachtungen werden dann aber sehr unübersichtlich und führen zu Ergebnissen, die im Experiment nur sehr schwer nachzuprüfen sind. Aus diesem Grunde wird obige Einteilung in drei Typen beibehalten.)

Es soll nun versucht werden, Zusammenhänge zwischen Gesteinsgrößen zu finden, die eine Typisierung nach den oben erwähnten drei Klassen zulassen und die im Experiment leicht nachzuprüfen sind.

Nach Ansicht der Verfasser sind Porosität, Gesteinsleitfähigkeit und Permeabilität (Durchlässigkeit) Größen, die sich mit einem vertretbaren Aufwand an Geräten messen lassen, die andererseits auch recht anschauliche Begriffe darstellen.

Da die Porosität eine dominierende Rolle für die Leitfähigkeit gesättigter Gesteine und für deren Permeabilität zu spielen scheint, soll der Zusammenhang dieser Größen für die drei erwähnten Typen von Gesteinen unter den genannten vereinfachenden Voraussetzungen theoretisch abgehandelt und gegebenenfalls als Kriterium zur Einteilung unbekannter Gesteine benutzt werden.

## 1.2 Die Gesteinsleitfähigkeit als Funktion der Porosität (bei Sättigung)

Hier soll nur der Fall betrachtet werden, daß die elektrische Leitfähigkeit eines flüssigkeitsgesättigten Gesteins allein durch die Flüssigkeit (Porenwasser) hervorgerufen wird, d. h., man vernachlässigt die Leitfähigkeit des reinen (trockenen) Gesteins. Diese Vernachlässigung ist sicherlich zulässig, wenn die betrachteten Proben kein gut leitendes Material (Erz) enthalten. In den erwähnten Fällen lag die Leitfähigkeit des trockenen Gesteins bei ca.  $10^{-10} \text{ S cm}^{-1}$ , die des Porenwassers bei etwa  $10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ . Bedenken mögen sich gegen die relativ niedere Leitfähigkeit des Porenwassers richten, da die folgenden Betrachtungen vorwiegend für höhere  $\sigma_w$  gelten. Da aber die beschriebenen Messungen u. U. am Anstehenden oder in Bohrlöchern ausgeführt werden müssen, erschien die Verwendung von Wasser mittlerer Leitfähigkeit gerechtfertigt.

Das zur Tränkung der Gesteinsscheiben benützte Wasser habe die Leitfähigkeit  $\sigma_w$ . Die Leitfähigkeit des mit Wasser gesättigten Gesteins sei  $\sigma_G$ . Dann gelten folgende Beziehungen:

Der Leitwert  $G_i$ , hervorgerufen durch ein „mittleres“ Porenkanälchen mit dem Radius  $r$  und der Länge  $D$ , ist gegeben durch

$$G_i = \sigma_w \cdot \frac{\pi r^2}{D}, \quad (12)$$

bei  $N$  Porenkanälchen gilt für die gesamte Leitfähigkeit  $G$ :

$$G = i \sum G_i = \sigma_w \cdot \frac{N \pi r^2}{D}. \quad (13)$$

Für eine scheibenförmige Probe mit der Kontaktfläche  $A$  [cm<sup>2</sup>] und der Dicke  $d$  [cm] wird folgender Leitwert definiert:

$$G = \sigma_G \cdot \frac{A}{d} \quad (14)$$

Der Vergleich von (13) und (14) liefert

$$\sigma_G \cdot \frac{A}{d} = \sigma_w \cdot \frac{N \pi r^2}{D},$$

mit  $T = D/d$  und  $n = N/A$  ergibt sich

$$\sigma_G = \sigma_w \cdot \frac{N \pi r^2 d}{A \cdot D} = \sigma_w \cdot n \cdot \pi r^2 \cdot T^{-1}. \quad (15)$$

Die Gesteinsleitfähigkeit ist somit eine Funktion von  $r$ ,  $T$  und  $n$ . Die Leitfähigkeit  $\sigma_w$  des Porenwassers soll als konstant angenommen werden.

Führt man auch hier die Typisierung wie im Abschnitt 1.1 ein, so erhält man:

a)  $n$ -Typ

$$\sigma_G = \sigma_G(n) = (\sigma_w \cdot \pi r^2 T^{-1}) n \quad (16)$$

mit Gleichung (7):

$$\sigma_G = \frac{\sigma_w}{T^2} \cdot \Phi = c' \cdot \Phi. \quad (17)$$

Die Gesteinsleitfähigkeit ist bei konstantem  $T$  und  $r$  der Porosität  $\Phi$  proportional.

b)  $r$ -Typ

$$\sigma_G = \sigma_G(T) = (\sigma_w \cdot n \pi r^2) \cdot T^{-1} \quad (18)$$

mit (9) erhält man:

$$\sigma_G = \sigma_w \cdot n^2 \pi^2 r^4 \Phi^{-1} = c'' \cdot \Phi^{-1}. \quad (19)$$

In diesem Fall ist die Gesteinsleitfähigkeit (bei konstantem  $n$  und  $r$ ) dem Kehrwert der Porosität proportional.

c)  $r$ -Typ

$$\sigma_G = \sigma_G(r) = (\sigma_w n \pi T^{-1}) r^2. \quad (20)$$

Setzt man Gleichung (11) ein, so ergibt sich:

$$\sigma_G = \frac{\sigma_w}{T^2} \Phi = c''' \Phi, \quad (21)$$

d. h. eine Proportionalität zwischen der Gesteinsleitfähigkeit und der Porosität.

Man erkennt, daß sich ein Gestein vom  $t$ -Typ durch den Zusammenhang  $\sigma_G \sim \Phi^{-1}$  von den Gesteinen des  $r$ - und  $n$ -Typs mit  $\sigma_G \sim \Phi$  unterscheiden würde. Weiterhin wird deutlich, daß sich aufgrund von Leitfähigkeitsmessungen die  $n$ - und  $r$ -Typen nicht trennen lassen. Die (geo)physikalische Erklärung für das letzte Ergebnis ist darin zu suchen, daß es für die Gesteinsleitfähigkeit gleichgültig ist, ob eine bestimmte Porosität durch viele kleine oder wenige große Poren hervorgerufen wird.

Man hat somit nach weiteren Beziehungen zu suchen, um auch ein  $r$ -Gestein von einem  $n$ -Gestein trennen zu können. Hierzu bietet sich die Untersuchung der Permeabilität  $k$  in ihrer Abhängigkeit von der Porosität an.

### 1.3 Die Permeabilität als Funktion der Porosität

Bei laminarer Strömung einer Flüssigkeit durch die Porenkanälchen einer Gesteinscheibe mit der Oberfläche  $A$  [cm<sup>2</sup>] und der Dicke  $d$  [cm] gilt das d'Arcy'sche Gesetz [ENGELHARDT, PITTER 1951]

$$Q = k \cdot \frac{\Delta p}{d} \cdot \frac{A}{\eta}, \quad (22)$$

wobei  $k$  die Permeabilität,  $\Delta p/d$  der Druckgradient,  $\eta$  die Zähigkeit und  $Q$  die Durchflußmenge/sec darstellen.

Die Bedingungen für laminaren Fluß sind von PRANDTL [1944] und CORRENS [1941] angegeben.

Die Durchflußmenge/sec  $Q_i$  durch ein  $i$ -tes Porenkanälchen mit dem Radius  $r$ , der Länge  $D$ , bei einem Druckgradienten  $\Delta p/D$  und einer Zähigkeit  $\eta$  der Flüssigkeit ist nach HAGEN/POISEUILLE

$$Q_i = \frac{\Delta p \cdot \pi r^4}{8 \eta d}. \quad (23)$$

Für  $N$  Porenkanälchen gilt:

$$Q = i \sum Q_i = \frac{N \cdot \pi r^4 \Delta p}{8 \eta D}. \quad (24)$$

Vergleicht man Gleichung (22) mit (24), so erhält man für die Permeabilität (bis auf einen Dimensionsfaktor)

$$k = \frac{n\pi r^4}{8T} = 0,392 \cdot n r^4 \cdot T^{-1}, \quad (25)$$

$k$  ist eine Funktion von  $r$ ,  $n$  und  $T$ .

Betrachtung der Permeabilität unter Beachtung der oben eingeführten Gesteinstypen ergibt:

a)  $n$ -Typ

$$k = k(n) = \left( \frac{\pi}{8} r^4 \cdot T^{-1} \right) n \quad (26)$$

mit Gleichung (7) erhält man

$$k = \frac{r^2}{8T^2} \Phi = c^* \Phi. \quad (27)$$

Die Permeabilität ist für den Fall des konstanten Radius und einer konstanten Tortuosität proportional zur Porosität.

b)  $t$ -Typ

$$k = k(T) = \left( \frac{\pi}{8} r^4 n \right) \cdot T^{-1}. \quad (28)$$

Unter Verwendung von Gleichung (9) ergibt sich

$$k = \frac{n^2 \pi^2 r^6}{8} \cdot \Phi^{-1} = c^{**} \cdot \Phi^{-1}, \quad (29)$$

d. h. die Permeabilität ist bei konstantem  $r$  und  $n$  proportional zum reziproken Wert von  $\Phi$ .

c)  $r$ -Typ

$$k = k(r) = \left( \frac{\pi}{8} n \cdot T^{-1} \right) r^4. \quad (30)$$

Mit (11) erhält man

$$k = \frac{1}{8T^3 n \pi} \cdot \Phi^2 = c^{***} \Phi^2. \quad (31)$$

Bei konstantem  $n$  und  $T$  ist die Permeabilität proportional zum Quadrat der Porosität.

Die Permeabilität in ihrer Abhängigkeit von der Porosität bietet somit eine Möglichkeit zur Einteilung eines Gesteins in eine der drei Gruppen.



**1.4 Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Permeabilität.**

**Berechnung der konstanten Gesteinsparameter**

Man kann nun noch einen Schritt weitergehen und für jeden der drei Typen einen Zusammenhang zwischen der Gesteinsleitfähigkeit und der Permeabilität aufsuchen. Man erhält nach leichter Umrechnung folgende Ergebnisse:

a) *n*-Typ

Unter Verwendung der Formeln (16) und (26) ergibt sich

b) *t*-Typ  $\sigma_G \sim k$

Die Kombination der Gleichungen (18) und (28) ergibt:

c) *r*-Typ  $\sigma_G \sim k$

Gleichung (20) und (30) ergeben:

$$\sigma_G \sim k^{0.5}.$$

Hier läßt sich der *r*-Typ klar von den beiden anderen Typen unterscheiden.

Weiterhin bietet sich die Möglichkeit, aus den Proportionalitätsfaktoren die konstanten Gesteinsparameter zu berechnen.

a) *n*-Typ

$$T = \sqrt{\frac{\sigma_w}{c'}} \quad (32)$$

$$r = \sqrt{\frac{8 \sigma_w c^*}{c'}} \quad (33)$$

b) *t*-Typ

$$r = \sqrt{\frac{8 \sigma_w c^{**}}{c''}} \quad (34)$$

$$n = \frac{c''}{8 \pi \sigma_w c^{**}} \sqrt{\frac{c'''}{\sigma_w}} \quad (35)$$

c) *r*-Typ

$$T = \sqrt{\frac{\sigma_w}{c'''}} \quad (36)$$

$$n = \frac{1}{8 \pi c^{***}} \sqrt{\left(\frac{c'''}{\sigma_w}\right)^3} \quad (37)$$

In der folgenden Tabelle sollen kurz die wichtigsten theoretischen Ergebnisse zusammengestellt werden.

Tabelle 1: Charakterisierung der Gesteinstypen.

<i>n</i> -Typ	<i>t</i> -Typ	<i>r</i> -Typ
$r, T = \text{const.}$	$n, r = \text{const.}$	$n, T = \text{const.}$
$\Phi \sim n$	$\Phi \sim T$	$\Phi \sim r^2$
$\sigma_G \sim \Phi$	$\sigma_G \sim \Phi^{-1}$	$\sigma_G \sim \Phi$
$k \sim \Phi$	$k \sim \Phi^{-1}$	$k \sim \Phi^2$
$\sigma_G \sim k$	$\sigma_G \sim k$	$\sigma_G \sim k^{0.5}$

## 2. Experimentelle Ergebnisse

Mit der schon erwähnten Kapazitäts-Verlustfaktor-Brücke wurde für Sandsteine, Dolomit und Siderit die Leitfähigkeit als Funktion der Frequenz gemessen. Es zeigte sich bei 100%iger Wassersättigung ein leichter Frequenzgang der Gesteine. Zum Vergleich wurden die Werte bei 10 kHz ausgewählt, da bei dieser Frequenz Elektrodeneffekte ausgeschaltet werden konnten. Die Porosität  $\Phi$  und die Durchlässigkeit  $k$  wurden mit der von den Verfassern [BITTERLICH 1967, WÖBKING 1968] angegebenen Apparatur ermittelt, die der von DÜRBAUM [1961] angegebenen Meßeinrichtung entsprach. Die Meßfehler von  $\Phi$  liegen bei maximal  $\pm 7\%$ , der maximale Fehler von  $k$  beträgt  $\pm 8\%$ .

Da von den Gesteinen nur wenige Proben vorlagen, können die experimentellen Ergebnisse allenfalls Hinweise auf die geschilderte Typisierung geben. Um die Gültigkeit eines solchen Einteilungsprinzips exakt nachzuweisen, bedürfte es eines sehr umfangreichen Untersuchungsmaterials.

Für Siderite (Fundort Siegerland) wurde folgender Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Porosität gemessen:  $\sigma_G \sim \Phi^{0,9}$ . Hier wäre u. U. eine Zuordnung zum  $n$ - oder  $r$ -Typ möglich.

Für Dolomite aus dem Schwespatbergbau Großkogel Reith bei Brixlegg erhält man folgende Ergebnisse:

$$\text{roter Dolomit: } \sigma_G \sim \Phi^{1,6}$$

$$\text{weißer Dolomit: } \sigma_G \sim \Phi^{1,8}$$

$$\text{gelber Dolomit: } \sigma_G \sim \Phi^{1,4}$$

Eine Zuteilung zu den drei Typen ist hier kaum möglich. Am ehesten käme eine Zugehörigkeit zum  $n$ - oder  $r$ -Typ in Frage. Allerdings muß erwähnt werden, daß diese Dolomitproben sehr viele Spalt- und Haarrisse aufweisen, wodurch wahrscheinlich die Meßergebnisse verfälscht werden.

Für hellen Dolomit des Bergbaues Falkenstein/Schwarz in Tirol ergab sich:  $\sigma_G \sim \Phi^{-0,8}$ . Hier könnte man von einem  $t$ -Gestein sprechen.

Sandsteine aus St. Odile/Vogesen ergaben:  $\sigma_G \sim \Phi$ . Es liegt ein  $n$ - oder  $r$ -Gestein vor.

An Sandsteinen aus Herrenalb/Schwarzwald konnte die Leitfähigkeit als Funktion der Permeabilität bestimmt werden:  $\sigma_G \sim k^{0,3}$ ; man könnte von einem  $r$ -Typ sprechen.

Für Sandsteine aus Galzein/Tirol wurde gefunden:  $\sigma_G \sim \Phi^{-1,4}$ , was etwa einer Zuordnung zum  $t$ -Typ entspräche.

Vergleicht man die theoretischen Forderungen mit den experimentell erhaltenen Ergebnissen, so zeigt sich, daß in einigen Fällen die Theorie recht gut durch die Experimente bestätigt wird, in anderen Fällen, z. B. bei den Dolomitproben, liefert die Theorie allenfalls eine qualitative Deutung. Die Abweichung von Theorie und Experiment wird darauf zurückzuführen sein, daß ein Gestein mit der eingangs erwähnten Idealisierung seines Gefüges in der Natur nicht oder nur selten vorkommt.

## Schlußfolgerungen

Die theoretischen Forderungen konnten durch die experimentellen Ergebnisse nur zum geringen Teil verifiziert werden. In bezug auf die Übereinstimmung von Experiment und Theorie sind zwei Hauptprobleme zu diskutieren.

1. Das den Betrachtungen zugrunde gelegte sehr einfache Modell wird kaum das Porengefüge eines natürlichen Gesteins auch nur näherungsweise richtig wiedergeben. Andererseits sollte die Einteilung der Gesteine nur über die Messung der elektrischen Leitfähigkeit, der Permeabilität und der Porosität erfolgen, wodurch die Verwendung eines derart einfachen Gesteinsmodells notwendig wurde.
2. Die Anzahl der Messungen ist sehr gering, so daß eine Entscheidung zu Gunsten oder Ungunsten des Gesteinsmodells und des Einteilungsprinzips nicht getroffen werden kann.

Vielleicht wird es sich als günstiger erweisen, jeweils zwei der Größen  $n$ ,  $T$  und  $r$  zu variieren; dann aber ist es notwendig, einen weiteren Gesteinsparameter, der abhängig ist von  $n$ ,  $T$  und  $r$  — vielleicht eine kapillare Größe oder die innere Porenfläche — meßtechnisch und theoretisch zu erfassen.

## Anmerkung

Die in diesem Aufsatz beschriebenen Forschungsarbeiten wurden z. T. von der Regierung der Vereinigten Staaten von Amerika und vom Fond zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Österreich, unterstützt.

This research has been sponsored in part by the United States Government under US-Contract No. F61052-69-C-0007.

## Literatur

- BITTERLICH, W.: Jahresbericht 1967 des VLF-Forschungsprojektes. Contract 61(052)–902
- CORRENS, C. W.: Die Messung der Durchlässigkeit der Gesteine. Öl und Kohle 41, 1247 bis 1253, 1942
- DÜRBAUM, H. J.: Porosität und Durchlässigkeit von Gesteinen. In: Lehrbuch der angewandten Geologie, 1. Band, von A. BENTZ, Stuttgart 1961
- ENGELHARDT, W. v., und H. PITZER: Über die Zusammenhänge zwischen Porosität, Permeabilität und Korngrößen bei Sanden und Sandsteinen. Heidelberger Beiträge zur Mineralogie und Petrographie 2, 477–491, 1951
- PRANDTL, L.: Führer durch die Strömungslehre. Braunschweig 1944
- SCHOPPER, J. R.: A Theoretical Investigation on the Formation Factor/Permeability/Porosity Relationship Using a Network Model. Geophysical Prospecting 24, 301–341, 1966
- WÖBKING, H.: Über den Frequenzgang der Dielektrizitätskonstante und der elektrischen Leitfähigkeit bei Gesteinen und über die Bedeutung der elektrischen Gesteinsparameter für die Bestimmung gefügekundlicher Größen. Dissertation Innsbruck 1968