

## Werk

**Jahr:** 1957

**Kollektion:** fid.geo

**Signatur:** 8 Z NAT 2148:23

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

**Werk Id:** PPN101433392X\_0023

**PURL:** [http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X\\_0023](http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0023)

**LOG Id:** LOG\_0007

**LOG Titel:** Heft 1

**LOG Typ:** issue

## 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 there 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)

# **ZEITSCHRIFT**

**FÜR**

# **GEOPHYSIK**

Herausgegeben im Auftrage der

**Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft**

von

**B. Brockamp, Münster i. W.**

unter Mitwirkung von **A. Defant**, Innsbruck — **W. Dieminger**, Lindau b.  
Northeim — **W. Hiller**, Stuttgart — **K. Jung**, Kiel — **O. Meyer**,  
Hamburg — **F. Möller**, Mainz — **H. Reich**, München.

**Jahrgang 23**

**1957**

**Heft 1**



**PHYSICA - VERLAG · WÜRZBURG**

# INHALTSVERZEICHNIS

|                                  |                                                                                                |    |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Reicheneder, K.:</i>          | Zur Neubestimmung der absoluten Schwere in Potsdam                                             | 1  |
| <i>Graf, A.:</i>                 | Über die bisherigen Erfahrungen und Meßergebnisse mit dem Seegravimeter . . . . .              | 4  |
| <i>Buchheim, W.:</i>             | Anwendungen der Methode der induzierten Polarisation an schwedischen Erzlagerstätten . . . . . | 26 |
| <i>Deist, H. J. und G. Dohr,</i> | Untersuchungen über Perioden von Erdbebenwellen in Abhängigkeit von Herdgebiet u. Entfernung   | 34 |
| <i>Burkhart, K.:</i>             | Zur Messung der Inklination mit Klippspule und langperiodischem Galvanometer . . . . .         | 41 |
| <i>Wilckens, F.:</i>             | Elektrokinetische Grenzflächenerscheinungen im Bereich oberflächennaher Erdschichten . . . . . | 46 |

## Die ZEITSCHRIFT FÜR GEOPHYSIK

erscheint in Jahrgängen zu je 6 Heften. Der Bezugspreis beträgt je Jahrgang DM 28.—, Einzelhefte je nach Umfang. Abonnements verlängern sich jeweils um einen Jahrgang, falls keine ausdrückliche Abbestellung zum Ende eines Jahrganges vorliegt.

In der Zeitschrift werden Originalarbeiten, die weder im In- noch im Ausland veröffentlicht wurden, aus dem Gebiet der reinen und angewandten Geophysik, sowie aus den Grenzgebieten aufgenommen.

Die Autoren werden gebeten, die Manuskripte in Maschinenschrift mit handschriftlich eingetragenen Formeln druckfertig einzureichen und gesondert eine „Anweisung für den Setzer“ beizufügen, aus der zu ersehen ist, wie kursiver, gesperrter oder fetter Satz und griechische, gotische oder einander ähnliche Typen und Zeichen kenntlich gemacht sind (z. B. durch farbige Unterstreichungen). Die Vorlagen für die Abbildungen sollen reproduktionsfertig (Tuschezeichnung) möglichst im Maßstab 2:1 eingesandt werden. Die Beschriftung der Abbildungen soll auf einem lose vorgeklebten, durchsichtigen Papier erfolgen. Fußnoten sind fortlaufend zu numerieren und am Ende des Manuskriptes zusammenzustellen; bei Zitaten sind neben Autorennamen, Titel und Zeitschriftentitel auch Bandnummer, Erscheinungsjahr und Seitenzahl anzugeben.

Jeder Arbeit ist eine „Zusammenfassung“ in deutscher und englischer oder französischer Sprache beizufügen.

Der Verfasser liest von der Arbeit in der Regel nur eine Korrektur: etwaige Autorenkorrekturen können nur als Fußnoten bzw. am Schluß des Artikels gebracht werden. Umfangreiche Änderungen bedürfen der Zustimmung des Herausgebers und können nur gebracht werden, wenn sich der Autor bereit erklärt, die Korrekturkosten zumindest teilweise zu tragen.

Von seiner Arbeit erhält der Verfasser 50 Sonderdrucke ohne Umschlag kostenlos. Weitere Sonderdrucke liefert der Verlag gegen Erstattung der Selbstkosten. Eine Honorierung der Beiträge erfolgt nicht.

Für die *Zeitschrift für Geophysik* bestimmte Manuskripte und redaktionelle Anfragen bitten wir an den Herausgeber zu richten:

*Prof. Dr. Bernhard Brockamp, Münster (Westf.) Pferdegasse 3*

*Anschrift der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft:*

**Hamburg 13, Rothenbaumchaussee 80**

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der photomechanischen Wiedergabe u. der Übersetzung, vorbehalten. Druck: fotokop, Darmstadt.

Bekanntmachung lt. Bayr. Pressegesetz: Verlag: PHYSICA-VERLAG Rudolf Liebing K.-G., Würzburg, Rotlöwengasse 2. Pers. haft. Ges.: Rudolf Liebing, Arnulf Liebing u. Hildgund Holler, sämtl. Buchhändler in Würzburg. Kommanditisten: Friedr. Gäbler, Buchhändler u. Charl. Kuhnert, beide Würzburg. Verantwortl. f. d. Anzeigenteil: Arnulf Liebing.



PHYSICA-VERLAG Würzburg 1956.

## Zur Neubestimmung der absoluten Schwere in Potsdam

Von K. Reicheneder, Potsdam <sup>1)</sup>

**Zusammenfassung:** Seit der klassischen Messung im Geodätischen Institut Potsdam sind eine Reihe von Neubestimmungen der Fallbeschleunigung an verschiedenen Orten durchgeführt worden, welche darauf schliessen lassen, daß das Potsdamer Schweresystem um mehr als 10 mgal zu hoch ist, jedoch noch nicht ausreichen, um heute schon einen genauen Wert festzulegen.

Auch in Potsdam arbeitet man gegenwärtig intensiv an einer Neubestimmung der absoluten Schwere nach dem Prinzip des Reversionspendels. Neuartig dabei ist, daß zur Ausschaltung von Stativbewegungen zwei gleichzeitig gegeneinander schwingende Pendel benutzt werden und die Pendel weder zur Längenmessung noch zur Reversion aus dem evakuierten Apparat genommen zu werden brauchen. Bei der Reversion wird nämlich der gesamte Apparat umgedreht, dessen Stativ mit einem oberen und unteren Lager ausgestattet ist. Die Längenmessung wird durch interferometrischen Vergleich mit Quarzendmaßen vorgenommen. Um Einflüsse der Elastizität von Schneide und Lager auszuschalten werden 3 Pendelpaare verschiedener Länge benutzt.

**Abstract:** Since the classical measurement at the Geodätisches Institut Potsdam, a series of modern determinations of gravity acceleration have been made at different places, and they lead to the conclusion that the Potsdam gravity system is too high by more than 10 mgals. However, they are not sufficient to establish already now a precise value.

Also at Potsdam, we are at present intensively occupied in bringing about a new determination of absolute gravity on the principle of the reversible pendulum. The novel feature of it is that in order to eliminate the influence of support movements, two pendulums are used that swing at the same time in opposite directions. These pendulums need not be taken out of the vacuum apparatus neither for the measurement of the length nor for the reversion, the latter being effected by the whole apparatus being turned. For this purpose the support of the apparatus is equipped with an upper and a lower bearing. The lengths are measured by interferential comparison with quartz gauges. In order to keep out the influence of the bearing and the knife edge, three pairs of pendulums of different lengths are applied.

Die am Anfang dieses Jahrhunderts von *Kühnen* und *Furtwängler* durchgeführten Reversionspendelmessungen zur Bestimmung der Fallbeschleu-

---

<sup>1)</sup> Prof. Dr. K. Reicheneder, Potsdam, Geodätisches Institut, Telegraphenberg.  
Der Vortrag wurde auch auf der Geodäten-Konferenz in Budapest (20.9.56) gehalten.

nigung im Pendelsaal des Geodätischen Instituts Potsdam hatten den Wert

$$g = 981,274 \pm 0,003 \text{ gal}$$

ergeben, der sich im Laufe der Jahre als internationaler Bezugswert eingebürgert hat. Als rund 30 Jahre später die wieder mit einem Reversionspendel durchgeführten Absolutmessungen der Schwerkraft in Washington und Teddington Abweichungen von -18,4 bzw. 12,9 mgal gegenüber dem obigen Potsdamer Wert erkennen ließen, wurde das Problem der absoluten Schwere-messung wieder aktuell, besonders als dann *Volet* im Büro des Poids et Mesures in Sèvres bei Paris mit der Methode des frei fallenden Körpers sogar eine Abweichung von -24 mgal, nach einer späteren Korrektur -21 mgal gefunden hatte. *Berroth* überprüfte die alten Berechnungen von *Kühnen* und *Furtwängler*, deckte eine anfechtbare Reduktion wegen des Einflusses der Schneidenelastizität auf und verbesserte den Potsdamer Schwerewert um -12,7 mgal; eine spätere Berechnung von *Jeffreys* ergab -11,2 mgal. Dieser Wert stimmt am besten mit der in jüngster Zeit abgeschlossenen Bestimmung der Fallbeschleunigung im Mendeljeev-Institut in Leningrad zusammen. *Agaletzki* hat dabei drei verschiedene Methoden (Reversionspendel, freier Fall, geführter Fall) angewandt und im Mittel -10,8 mgal erhalten. Von den zur Zeit noch in Gang befindlichen Absolutmessungen der Schwere sind nur vorläufige Ergebnisse bekannt geworden aus Ottawa (-12,7), aus Sèvres (-14,8), aus Buenos Aires (-13,9).

Es besteht also kein Zweifel darüber, daß der Potsdamer Bezugswert um über 10 mgal zu hoch ist, doch ist es zur Zeit wohl noch nicht möglich, einen sicheren Wert anzugeben. Deshalb hat die Internationale Gravimetrische Kommission Anfang September 1956 in Paris einem Antrag *Pariski's* (SU) zugestimmt, Absolutmessungen der Schwere in größerem Umfang durchzuführen und dabei die Versuchsbedingungen zu variieren.

In Potsdam selbst ist man gegenwärtig ebenfalls mit der Neubestimmung der absoluten Schwere beschäftigt, die eine der wichtigsten Aufgaben des Geodätischen Instituts darstellt. Die diesbezüglichen Arbeiten befinden sich bereits in einem vorgeschrittenen Stadium der Entwicklung, da über die Methodik völlige Klarheit herrscht. Ich habe mich wieder für die Methode des Reversionspendels entschieden, obwohl mir ihre Mängel bekannt sind, welche im wesentlichen darin bestehen, daß man den Einfluß der Elastizität von Schneide und Lager und deren gegenseitiges Verhalten nur mit einer gewissen Unsicherheit berücksichtigen kann. Gegenüber dem üblichen Verfahren bisher bekannter Reversionspendelmessungen sind allerdings einige wesentliche konstruktive Verbesserungen beabsichtigt, wovon ich der Internationalen Gravimetrischen Kommission in Paris bereits einen Bericht vorgelegt habe.

Um alle Einflüsse auszuschalten, welche von Bewegungen des Stativs

bzw. Untergrundes herrühren, sind zwei Reversionspendel vorgesehen, die auf gemeinsamem Stativ gleichzeitig gegeneinander schwingen (sog. Prinzip von *Vening-Meinesz*). Dieses für relative Pendelmessungen längst bekannte Verfahren ist bei Absolutmessungen bisher noch nicht angewandt worden.

Wesentlich neu ist die Tatsache, daß die Pendel bei allen erforderlichen Messungen nicht aus dem evakuierten Apparat genommen zu werden brauchen. Es können also sowohl die Beobachtungen der Schwingungsdauer in beiden Pendellagen wie auch die Längenmessungen (Schneidenabstand) unmittelbar hintereinander und in verhältnismäßig kurzer Zeit ausgeführt werden. Dies wird wie folgt erreicht: Das Stativ besitzt eine obere und untere Lagerfläche, deren Abstand etwas kleiner als der Schneidenabstand ist. Durch Umdrehen des ganzen Apparates einschließlich der arretierten Pendel wird die Rolle dieser Lager vertauscht und die Reversion vollzogen.

In jedem Pendel sind 2 Hilfsebenen vorgesehen. Sowohl ihr gegenseitiger Abstand wie auch die Abstände zu einer Lagerfläche werden durch interferometrischen Längenvergleich mit Quarzendmaßen ermittelt, die sich ebenfalls im Innern des Apparates befinden und daraus der gesuchte Schneidenabstand abgeleitet. Während der Längenmessung ruhen die Pendel auf ihrem Lager. Die Einflüsse, welche durch das elastische Zusammenspiel zwischen Schneide und Lager während des Schwingens zu befürchten sind, versuchen wir nach einem Vorschlag von *Berroth* und nach dem Vorbild von *Agaletzki* in Leningrad dadurch zu eliminieren, daß wir 3 Paare von Pendeln verschiedener Längen (25, 50, 75 cm) einsetzen. Bei diesem Verfahren, das im Prinzip auf die Elimination einer unbekannten Länge ähnlich wie beim *Besselschen* Verfahren hinausläuft, wird vorausgesetzt, daß die Verhältnisse zwischen Schneide und Lager, insbesondere der Auflagerdruck, d.h. die Pendelgewichte, in allen Fällen gleich sind. Schneide und Lager sind daher bei allen Pendeln austauschbar, was auch Untersuchungen über den Einfluß der Schneidenschärfe und des Schneidenmaterials erleichtert.

Hinsichtlich der Zeitmessung zur Bestimmung der Schwingungsdauer wird auf bereits bekannte Methoden zurückgegriffen.

Der im Entstehen begriffene neue Apparat mit den beiden Reversionspendeln stellt an die Stabilität der Aufstellung und an die Temperatur des Meßraumes keine größeren Anforderungen wie ein gewöhnlicher Apparat für relative Schweremessungen. Auch die Meßdauer wird durch die zusätzlich notwendige Längenmessung nicht wesentlich verlängert. Man wird das neue Pendelgerät somit als transportablen absoluten Schweremesser bequem an verschiedenen Orten einsetzen können und darin liegt sein besonderer Vorteil.

## Über die bisherigen Erfahrungen und Meßergebnisse mit dem Seegravimeter

Von A. Graf, Lochham <sup>1)</sup>

**Zusammenfassung:** Es wird über die Meßergebnisse von zwei Seegravimeter-Meßfahrten auf dem Starnberger See an Bord der 100-Tonnen großen "Tutzing" und einer Mittelmeer-Meßfahrt an Bord der 5000-Tonnen großen "Messapia" berichtet. Bei der einen Starnberger See-Meßreise legte das Schiff die 4,4 km lange Nord-Südstrecke Starnberg-Leoni fünfmal in beiden Richtungen, bei der anderen die 14,6 km lange Strecke Seehafen-Starnberg-Bernried dreimal mit Kurs 16,5° und viermal mit Kurs 196,5° zurück. Bei der erstgenannten Meßreihe herrschte windstilles Wetter, bei der zweiten starke Gewittertätigkeit mit böigen Winden. Als Reproduzierbarkeit bzw. Genauigkeit einer Einzelmessung wurde ermittelt  $\pm 0,3$  mGal bei der Schönwetterfahrt und  $\pm 0,8$  mGal bei der Schlechtwetterfahrt. Die Mittelmeerreise erstreckte sich auf die Route Venedig-Triest und zurück. Bei der Hinfahrt herrschte Sturm mit 80 km/Std. Windgeschwindigkeit und daher war nur ein kurzes Stück der Meßkurve auswertbar. Bei der Rückfahrt war die See ruhig und glatt. Ein Teil der erhaltenen Schwerewerte konnte mit den Unterwasser-Gravimettermessungen C. Morrellis verglichen werden. Die Übereinstimmung betrug im Mittel etwa  $\pm 2$  mGal, trotzdem der Browneffekt nicht berücksichtigt werden konnte.

**Abstract:** The author reported about the results of two measuring trips on the lake "Starnberg" on board of the 100-ton ship "Tutzing" and a measuring trip on the Mediterranean on board of the 5000 ton-ship "Messapia". At the lake Starnberg it has been found an accuracy of  $\pm 0,3$  mgl under good weather conditions and of  $\pm 0,8$  mgl on a bad weather day. The accuracy of the values in the Adriatic sea compared with the underwater measurements of Morelli was  $\pm 2$  mgl without taking in account the Browneffekt, which could not be determined.

In einer früheren Arbeit [2] war über die ersten Messungen mit dem neu-entwickelten Seegravimeter [1] auf dem Starnberger See berichtet worden. Seitdem wurden drei weitere ganztägige Meßfahrten auf dem nur 100 Tonnen fassenden Motorschiff "Tutzing" und eine Mittelmeerfahrt auf dem 5000 t großen Dampfer "Messapia" von Venedig nach Triest und zurück durchgeführt.

Über die erzielten Meßergebnisse und die gemachten Erfahrungen wird nachstehend berichtet.

---

<sup>1)</sup> Dr. Ing. habil. A. Graf, Lochham b. München, Liebigstr. 4

Um die Genauigkeit eines Seegravimeters zu prüfen, ist es zunächst notwendig, jene Fehlermöglichkeiten, die mit dem Gerät nichts zu tun haben, abzutrennen von jenen, die im Gerät selbst liegen. Zu den ersteren gehören: ungenaue Lagebestimmung des Schiffes, Fehler in der Angabe der Schiffsgeschwindigkeit und des Kurses sowie Vernachlässigung der Brownekorrektur, zu den letzteren: ungenügende Linearität der Anzeige, zu geringe Dämpfung, Fehler der elektrischen Zwischenglieder wie elektrischer Abgriff, Verstärker, Schreiber usw., Einflüsse von Spannungs- und Frequenzschwankungen und alle jene Fehler, die auch bei Landmessungen in Erscheinung treten können, nämlich nicht genügende Reproduzierbarkeit, Arretierungsverzerrungen, Sprünge, nicht kompensierte Druck- und Temperatureffekte etc.

Aus Gründen dieser Fehlertrennung ist bei den bereits veröffentlichten Messungen vom 19. 11. 55 auf der "Seeshaupt" die Meßanordnung so getroffen worden, daß die Meßwerte bei ruhendem und unverankertem Schiff in unmittelbarer Nähe des Landesteges mit jenen verglichen wurden, die auf dem Landesteg mit einem Landgravimeter erhalten worden waren. Es fielen in diesem Falle also nahezu alle Fehler der ersteren Art weg. Ganz war dies allerdings nicht der Fall. Denn es ist nicht möglich, ein Schiff völlig ruhig im Wasser zu halten, es wird immer etwas driften. Bei diesen Messungen war eine Genauigkeit von  $\pm 0,5$  mGal für eine Einzelbeobachtung erzielt worden.

Bei den nun zu diskutierenden Messungen v. 27.4.56 und 11.5.56 wurde Wert darauf gelegt zu erfahren, welche Genauigkeit mit dem Seegravimeter auf einem Binnensee *während der Fahrt* zu erreichen ist.

Bei der Fahrt am 27.4.56 wurde, um den Eötvöseffekt auszuschalten, ein reines Nord-Südprofil ausgewählt, nämlich die Strecke Starnberg-Leoni und diese 5 mal mit der konstanten Geschwindigkeit von 19,5 km/Stunde hin und zurück durchfahren. Die Ortsbestimmung erfolgte aus Uhrzeit und Geschwindigkeit. Diese Methode setzt Windstille und Driftfreiheit voraus. Solche Verhältnisse waren am 27.4.56 gegeben. Das Messprofil war 4,4 km lang, der Untergrund unter der Wasseroberfläche ist stark profiliert und sinkt bis 80 m Tiefe ab. Leider war der Kompaß des Schiffes nicht genügend kompensiert, so daß der Steuermann den Kurs abschätzen mußte, um ohne Kursänderung ans Ziel zu kommen, d.h. in der Nord-Süd-Richtung zu bleiben. Bei der Fahrtrichtung Nord-Süd (Starnberg-Leoni) glückte dies bereits bei der ersten Fahrt, so daß alle 5 Fahrten unter sich vergleichbar sind. Bei der Rückfahrt Leoni-Starnberg dagegen wurde zunächst der Kurs  $207^\circ$  eingestellt. Dabei wurde der Landesteg Starnberg zu weit östlich erreicht und daher bei der zweiten Fahrt  $206,5^\circ$  anvisiert. Auch dieser Wert erwies sich noch zu hoch. Erst der Kurs  $206^\circ$  stimmte genau mit der Richtung zum Landesteg Starnberg (geografisch Nord) überein. Die beiden ersten Reihen in Tabelle 1 mußten daher mit einer kleinen Eötvös-

korrektur versehen werden, um mit den übrigen, die genauen Nord-Süd-Kurs besitzen, verglichen werden zu können. Da wegen der starken Änderung des Bodenprofils die Eötvöskorrektion allein nicht ausreichend ist, sondern noch durch eine topografische ergänzt werden müßte, wurden von den 10 Meßreihen zur Fehlerberechnung die beiden ersten nicht herangezogen. Die Tabellen 1 und 2 enthalten die direkten minütlichen Ablesungen des Registrierstreifens, sowie die Mittelwerte und die Fehlerquadratsummen. Für beide Richtungen errechnet sich ein mittlerer Fehler für die Einzelmessung von  $\pm 0,27$  mGal. Zu dem gleichen Ergebnis gelangt man, wenn

Tabelle 1

| 1                | 2          | 3                | 4          | 5                                                        | 6          | 7                | 8          | 9                | 10         | 11          | 12                  |
|------------------|------------|------------------|------------|----------------------------------------------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|-------------|---------------------|
| Zeit             | Ablg. pars | Zeit             | Ablg. pars | Zeit                                                     | Ablg. pars | Zeit             | Ablg. pars | Zeit             | Ablg. pars | Mittel pars | $\Sigma \delta^2/2$ |
| 10 <sup>02</sup> | 28,0       | 11 <sup>18</sup> | 27,5       | 12 <sup>49</sup>                                         | 28,0       | 14 <sup>11</sup> | 28,3       | 15 <sup>24</sup> | —          | 28,2        | 0,01                |
| 10 <sup>01</sup> | 27,7       | 11 <sup>17</sup> | 27,0       | 12 <sup>48</sup>                                         | 27,5       | 14 <sup>10</sup> | 27,6       | 15 <sup>23</sup> | 27,4       | 27,5        | 0,01                |
| 10 <sup>00</sup> | 27,7       | 11 <sup>16</sup> | 26,9       | 12 <sup>47</sup>                                         | 27,0       | 14 <sup>09</sup> | 27,0       | 15 <sup>22</sup> | 27,2       | 27,1        | 0,02                |
| 9 <sup>59</sup>  | 27,9       | 11 <sup>15</sup> | 27,4       | 12 <sup>46</sup>                                         | 27,5       | 14 <sup>08</sup> | 27,5       | 15 <sup>21</sup> | 27,4       | 27,5        | 0,01                |
| 9 <sup>58</sup>  | 28,2       | 11 <sup>14</sup> | 27,8       | 12 <sup>45</sup>                                         | 28,2       | 14 <sup>07</sup> | 28,7       | 15 <sup>20</sup> | 28,1       | 28,3        | 0,10                |
| 9 <sup>57</sup>  | 28,7       | 11 <sup>13</sup> | 28,7       | 12 <sup>44</sup>                                         | 29,0       | 14 <sup>06</sup> | 29,8       | 15 <sup>19</sup> | 29,0       | 29,3        | 0,22                |
| 9 <sup>56</sup>  | 29,4       | 11 <sup>12</sup> | 29,5       | 12 <sup>43</sup>                                         | 30,1       | 14 <sup>05</sup> | 31,0       | 15 <sup>18</sup> | 30,0       | 30,4        | 0,31                |
| 9 <sup>55</sup>  | 30,6       | 11 <sup>11</sup> | 30,5       | 12 <sup>42</sup>                                         | 31,2       | 14 <sup>04</sup> | 31,8       | 15 <sup>17</sup> | 31,0       | 31,3        | 0,18                |
| 9 <sup>54</sup>  | 31,1       | 11 <sup>10</sup> | 31,3       | 12 <sup>41</sup>                                         | 32,5       | 14 <sup>03</sup> | 32,4       | 15 <sup>16</sup> | 32,0       | 32,3        | 0,07                |
| Kurs-abw.        |            | Kurs-abw.        |            | Mittl. Fehler: $\pm 0,10 = 0,316$ pars = $\pm 0,27$ mGal |            |                  |            |                  |            |             |                     |

Tabelle 2

| 1                | 2          | 3                | 4          | 5                | 6          | 7                | 8          | 9                | 10         | 11          | 12                  |
|------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|-------------|---------------------|
| Zeit             | Ablg. pars | Zeit             | Ablg. pars | Zeit             | Ablg. pars | Zeit             | Ablg. pars | Zeit             | Ablg. pars | Mittel pars | $\Sigma \delta^2/4$ |
| 10 <sup>38</sup> | 33,2       | 11 <sup>55</sup> | 33,6       | 13 <sup>29</sup> | 33,1       | 14 <sup>46</sup> | 33,5       | 16 <sup>14</sup> | 33,0       | 33,3        | 0,09                |
| 10 <sup>37</sup> | 32,5       | 11 <sup>54</sup> | 33,0       | 13 <sup>28</sup> | 32,8       | 14 <sup>45</sup> | 32,4       | 16 <sup>13</sup> | 32,4       | 32,6        | 0,07                |
| 10 <sup>36</sup> | 31,6       | 11 <sup>53</sup> | 31,5       | 13 <sup>27</sup> | 31,8       | 14 <sup>44</sup> | 32,2       | 16 <sup>12</sup> | 31,8       | 31,8        | 0,07                |
| 10 <sup>35</sup> | 30,8       | 11 <sup>52</sup> | 30,7       | 13 <sup>26</sup> | 30,8       | 14 <sup>43</sup> | 31,8       | 16 <sup>11</sup> | 30,8       | 31,0        | 0,21                |
| 10 <sup>34</sup> | 29,8       | 11 <sup>51</sup> | 29,7       | 13 <sup>25</sup> | 29,9       | 14 <sup>42</sup> | 30,9       | 16 <sup>10</sup> | 30,0       | 30,1        | 0,23                |
| 10 <sup>33</sup> | 28,9       | 11 <sup>50</sup> | 29,0       | 13 <sup>24</sup> | 28,8       | 14 <sup>41</sup> | 28,9       | 16 <sup>09</sup> | 28,6       | 28,8        | 0,03                |
| 10 <sup>32</sup> | 28,0       | 11 <sup>49</sup> | 28,3       | 13 <sup>23</sup> | 28,0       | 14 <sup>40</sup> | 27,9       | 16 <sup>08</sup> | 28,2       | 28,1        | 0,03                |
| 10 <sup>31</sup> | 27,1       | 11 <sup>48</sup> | 28,0       | 13 <sup>22</sup> | 28,0       | 14 <sup>39</sup> | 27,7       | 16 <sup>07</sup> | 27,6       | 27,7        | 0,14                |
| 10 <sup>30</sup> | 27,0       | 11 <sup>47</sup> | 27,3       | 13 <sup>21</sup> | 27,5       | 14 <sup>38</sup> | 27,0       | 16 <sup>06</sup> | 27,1       | 27,2        | 0,05                |

Mittlerer Fehler:  $\pm 0,10 = 0,316$  pars =  $\pm 0,27$  mGal

man die zusammengehörenden Werte unmittelbar vor dem Abbremsen und nach der Anfahrtsbeschleunigung des Schiffes aufträgt, wie dies in Abb. 2 geschehen ist, und die Abweichungen vom Mittelwert bildet. Hierbei zeigt sich, daß die Differenz in Richtung Nord (6,1 pars) von jener in Richtung Süd (4,1 pars) verschieden ist. Dies beruht darauf, daß sich die beiden Differenzen nicht auf das gleiche Wegstück beziehen. Beim Anfahren muß mit dem Ablesen solange gewartet werden, bis die Schiffsgeschwindigkeit konstant ist. Dies ist erst nach etwa 1,1 km Fahrt der Fall, so daß die erste Ablesung erst bei Punkt a in Abb. 1 erfolgen kann. Nach 8 Minuten Fahrzeit ist Punkt b erreicht (2,8 km), von wo ab bereits wieder das Schiff verzögert werden muß. Auf der Rückfahrt fällt nun b' nicht mit b zusammen, da sich in b das Schiff noch in der Anfahrtsbeschleunigung befindet. Das Tiefenprofil in Abb. 4 zeigt, daß unter der Strecke a-b die Höhenlinien von 535 m auf 500 m absinken und dann wieder auf 550 m ansteigen, während sie unter der Strecke a'-b' fast gleichmäßig von 500 m auf 580 m zunehmen. Dies kommt noch besser zum Ausdruck, wenn man nunmehr die Mittelwerte in Tabelle 1 und 2 aufträgt (Abb. 3). Es zeigt sich hierbei, daß sich Hin- und Rückprofil gut zur Deckung bringen lassen, wenn man Anfang und Ende der Meßstrecken (a-b bzw. a'-b') jeweils 1100 m bzw. 500 m vom Ziel entfernt annimmt, was sich auch zwanglos aus der bekannten Schiffsgeschwindigkeit errechnen läßt.

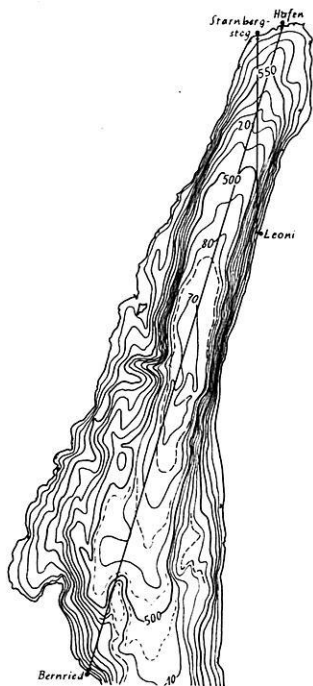


Abb. 1: Skizze des Starnberger Sees mit den beiden Meßprofilen.

In Abb. 4 ist ferner die Bouguerkorrektur eingetragen, die der Wassertiefe proportional ist. Addiert man diese zu den Meßwerten gemäß Abb. 5, so erkennt man, daß die Schwereabnahme von Starnberg nach Leoni fast linear verläuft, also keine lokale Anomalie, die durch das Untergrundrelief bedingt sein könnte, aufweist. Dagegen ist ersichtlich, daß eine zu den Alpen hin ansteigende negative regionale Schwerestörung von 4,3 mGal vorhanden ist, da der Breiteneffekt von der Gesamtdifferenz von 7,8 mGal nur etwa 3,5 mGal ausmacht.

Die hier angenommene Zuordnung der Meßwerte bei der Hin- und Rück-

fahrt und ihre gute Übereinstimmung mit dem aus dem Bodenrelief sich ergebenden Bouguerkorrekturen beweist, daß die errechnete Genauigkeit von  $\pm 0,3$  mGal für die Einzelmessung reell ist. Dieser Betrag stellt aber noch

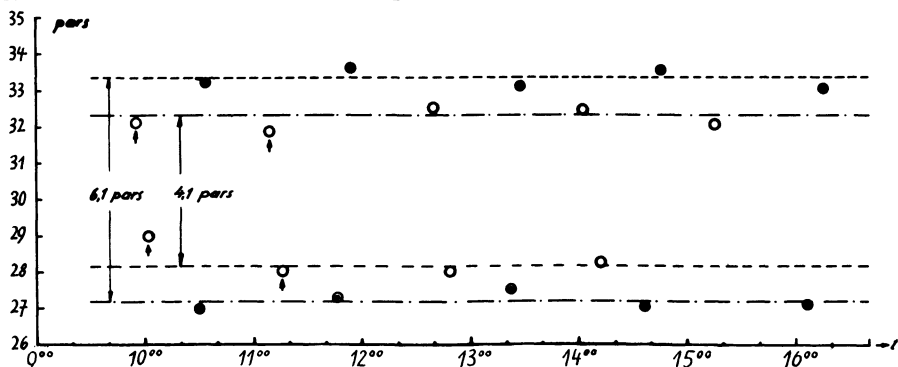


Abb. 2: Die Anfangs- und Endschwerewerte des Meßprofils Starnberg-Leoni bei voller Fahrt des Schiffes (c. 19 km/Std.). Werte in 500 m bzw. 1100 m vom Landesteg bei ca. 20 km/Std. Schiffsgeschwindigkeit.  $\odot$  Werte am Meßpunkt a und b;  $\circ$  Werte am Meßpunkt a' und b' gemäß Abb. 1;  $\circ$  Werte mit Kurskorrektur versehen.

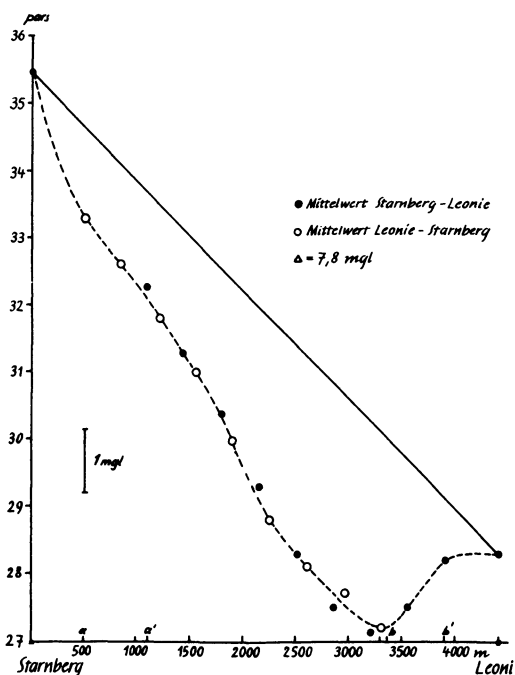


Abb. 3: Gemittelte Schwerewerte des Meßprofils Starnberg-Leoni bei 5-facher Wiederholung.

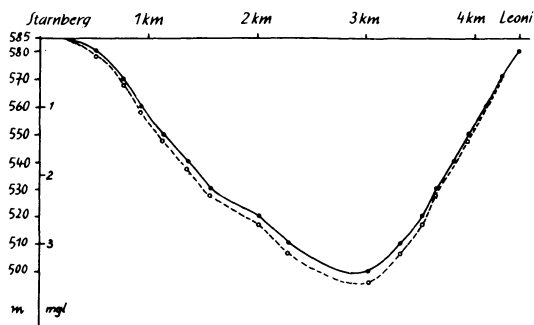


Abb. 4: Tiefenprofil längs der Fahrtroute Starnberg-Leoni und entsprechende Bouguerwerte.

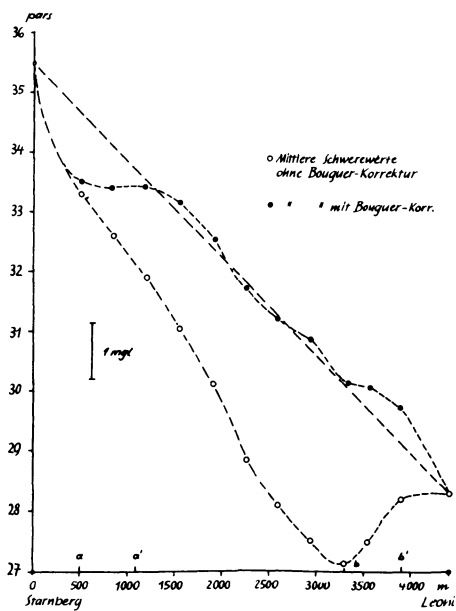


Abb. 5: Nach Bouguer reduzierte mittlere Schwerewerte längs des Meßprofils Starnberg-Leoni.

nicht die untere Grenze dar. Sicherlich hätte sich die Genauigkeit noch etwas steigern lassen, wenn die Fahrtgeschwindigkeit kleiner gewesen und am Kurs noch genauer und starrer festgehalten worden wäre. Schon kleine Kursabweichungen machen sich bei der Messung bemerkbar. Sie ergeben nicht nur einen Eötvöseffekt, sondern möglicherweise auch eine Geschwindigkeitsänderung und damit einen Browneffekt. Ein Schiff, das um einen gegebenen Kurs leicht hin und her pendelt, braucht bei gleicher Tourenzahl der Schrauben länger für eine bestimmte Fahrstrecke als ein Schiff, das den Kurs starr einhält. Die erwähnten Fehlermöglichkeiten sind der Schiffsgeschwindigkeit proportional, gehen also mit ihrer Verringerung entsprechend zurück.

Nachdem nunmehr die Genauigkeit des Seegravimeters bei konstantem Nord-Süd-Kurs ermittelt war, wurde am 11.5.56 eine weitere Meßfahrt mit einer von Nord-Süd abweichenden Fahrtrichtung unternommen und zu diesem Zwecke die Strecke Hafen-Starnberg-Bernried (14,6 km) gewählt. Es traf sich günstig, daß dieses Mal das Wetter schlechter war als bei den früheren Messungen. So konnten auch Erfahrungen bei nicht ganz ruhiger See gewonnen werden. Der Tag war regnerisch, es herrschte teilweise böiger Wind und das Schiff durchkreuzte mehrmals in Seemitte eine Gewitterfront. Die Wellen zeigten Schaumkämme.

Die Abb. 6 enthält wieder die direkten Ablesungen von den Registrierstreifen. Am auffälligsten ist die Punktfolge zwischen 120<sup>4</sup> und 122<sup>4</sup> in

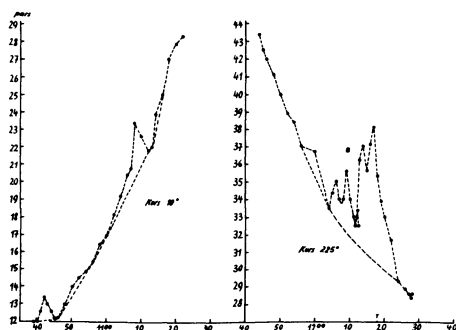


Abb. 6: Schwereregistrierung längs des Profils Hafen-Starnberg-Bernried bei voller Fahrt des Schiffes und unruhiger See.

Abb. 6, wo starkes Gewitter herrschte und ein nicht unbeträchtlicher Seegang. Die Schwankungen des Schiffes waren stark spürbar, wenn auch von einem Sturm nicht gesprochen werden kann. Leider stand mir kein brauchbarer Horizontalbeschleunigungsmesser zur Verfügung, so daß der Browneffekt nicht berechnet werden konnte. Letzterer betrug etwa 11 mGal maximal. Um 11<sup>36</sup> kreuzte die "Bayern" den Kurs der "Tutzing". Die erzeug-

ten Wellen brachten das Schiff in eine Schaukelbewegung um die Längsachse und erzeugten einen Browneffekt von mehreren mGal.

Um die einzelnen Meßprofile miteinander vergleichen zu können, muß hier zunächst der Eötvöseffekt berechnet werden. Er betrug in Fahrtrichtung Bernried 14,63 mGal = 9,5 pars und in entgegengesetzter Richtung mit etwas Gegenwind 13,85 mGal = 9,0 pars. Hieraus errechnet sich ein Eichwert von 1,54 mGal pro pars, was mit früheren Skalenwertbestimmungen gut übereinstimmt. Zieht man von allen Profilen Hafen-Bernried 9,5 pars ab und addiert man zu allen Profilen Bernried-Hafen 9,0 pars, so ergeben sich die Zahlenwerte in Tabelle 3 und 4. Bildet man wieder die Mittel-

Tabelle 3

| 1                | 2    | 3                | 4    | 5                | 6    | 7      | 8                         | 9                                |
|------------------|------|------------------|------|------------------|------|--------|---------------------------|----------------------------------|
| Zeit             | pars | Zeit             | pars | Zeit             | pars | Mittel | $\frac{\sum \delta^2}{2}$ | $\sqrt{\frac{\sum \delta^2}{2}}$ |
| 11 <sup>44</sup> | 34,9 | 14 <sup>00</sup> | 34,5 | 16 <sup>14</sup> | 35,5 | 35,0   | 0,25                      | 0,50                             |
| 11 <sup>46</sup> | 33,5 | 14 <sup>02</sup> | 33,0 | 16 <sup>16</sup> | 35,0 | 33,8   | 1,03                      | 1,02                             |
| 11 <sup>48</sup> | 32,1 | 14 <sup>04</sup> | 32,5 | 16 <sup>18</sup> | 33,5 | 32,7   | 0,52                      | 0,72                             |
| 11 <sup>50</sup> | 32,0 | 14 <sup>06</sup> | 31,2 | 16 <sup>20</sup> | 32,3 | 31,8   | 0,33                      | 0,58                             |
| 11 <sup>52</sup> | 30,4 | 14 <sup>08</sup> | 29,9 | 16 <sup>22</sup> | 31,6 | 30,6   | 0,76                      | 0,87                             |
| 11 <sup>54</sup> | 30,7 | 14 <sup>10</sup> | 29,5 | 16 <sup>24</sup> | 30,5 | 30,2   | 0,21                      | 0,46                             |
| 11 <sup>56</sup> | 28,5 | 14 <sup>12</sup> | 28,5 | 16 <sup>26</sup> | 30,0 | 29,0   | 1,00                      | 1,00                             |
| 11 <sup>58</sup> | 28,3 | 14 <sup>14</sup> | 27,3 | 16 <sup>28</sup> | 29,7 | 28,4   | 1,45                      | 1,20                             |
| 12 <sup>00</sup> | 28,2 | 14 <sup>16</sup> | 26,6 | 16 <sup>30</sup> | 29,4 | 28,0   | 1,98                      | 1,40                             |
| 12 <sup>02</sup> | 26,6 | 14 <sup>18</sup> | 24,8 | 16 <sup>32</sup> | 28,5 | 26,6   | 3,42                      | 1,85                             |
| 12 <sup>04</sup> | 25,0 | 14 <sup>20</sup> | 25,5 | 16 <sup>34</sup> | 27,5 | 26,0   | 1,75                      | 1,36                             |
| 12 <sup>06</sup> | 26,5 | 14 <sup>22</sup> | 23,8 | 16 <sup>36</sup> | 26,7 | 25,6   | 2,63                      | 1,62                             |
| 12 <sup>08</sup> | 25,5 | 14 <sup>24</sup> | 22,7 | 16 <sup>38</sup> | 26,5 | 24,9   | 3,89                      | 1,97                             |
| 12 <sup>10</sup> | 25,5 | 14 <sup>26</sup> | 24,2 | 16 <sup>40</sup> | 26,4 | 25,3   | 1,25                      | 1,12                             |
| 12 <sup>12</sup> | 24,9 | 14 <sup>28</sup> | 22,3 | 16 <sup>42</sup> | 24,7 | 23,9   | 2,10                      | 1,45                             |
| 12 <sup>14</sup> | 28,5 | 14 <sup>30</sup> | 22,0 | 16 <sup>44</sup> | 24,3 | 24,9   | 10,86                     | 3,30                             |
| 12 <sup>16</sup> | 28,6 | 14 <sup>32</sup> | 21,6 | 16 <sup>46</sup> | 24,3 | 24,8   | 12,45                     | 3,63                             |
| 12 <sup>18</sup> | 26,8 | 14 <sup>34</sup> | 21,3 | 16 <sup>48</sup> | 23,5 | 23,8   | 7,67                      | 2,77                             |
| 12 <sup>20</sup> | 24,5 | 14 <sup>36</sup> | 20,7 | 16 <sup>50</sup> | 22,3 | 22,5   | 3,64                      | 1,91                             |
| 12 <sup>22</sup> | 23,2 | 14 <sup>38</sup> | 20,9 | 16 <sup>52</sup> | 22,5 | 22,2   | 1,39                      | 1,18                             |
| 12 <sup>24</sup> | 20,8 | 14 <sup>40</sup> | 20,3 | 16 <sup>54</sup> | 22,2 | 21,1   | 0,55                      | 0,74                             |
| 12 <sup>26</sup> | 20,4 | 14 <sup>42</sup> | 20,5 | 16 <sup>56</sup> | 22,0 | 21,0   | 0,21                      | 0,46                             |

mit

Gang-  
korrekt.Mittlerer Fehler =  $31,10 : 22 = 1,415 \text{ pars} = \pm 2,2 \text{ mGal}$ 

werte und die Abweichungen von diesen, so ergibt Tabelle 3 ohne Rücksichtnahme auf Gang und die vom Unwetter verursachten Abweichungen einen mittleren Fehler von  $\pm 2,2 \text{ mGal}$  und Tabelle 4 einen solchen von  $\pm 1,2 \text{ mGal}$ . Die Mittelwerte sind in Abb. 7 aufgetragen. Eine solche Auswertung ist aber zu summarisch und verschlechtert das Meßergebnis. Denn

Tabelle 4

| 1                | 2    | 3                | 4    | 5                | 6    | 7                | 8    | 9              | 10                          | 11                                 |
|------------------|------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|----------------|-----------------------------|------------------------------------|
| Zeit             | pars | Zeit             | pars | Zeit             | pars | Zeit             | pars | Mittel<br>pars | $\frac{\Sigma \delta^2}{3}$ | $\sqrt{\frac{\Sigma \delta^2}{3}}$ |
| 10 <sup>40</sup> | 21,0 | 12 <sup>52</sup> | 21,1 | 15 <sup>07</sup> | 21,7 | 17 <sup>14</sup> | 22,0 | 21,4           | 0,23                        | 0,48                               |
| 10 <sup>42</sup> | 22,4 | 12 <sup>54</sup> | 21,5 | 15 <sup>09</sup> | 22,0 | 17 <sup>16</sup> | 21,7 | 21,9           | 0,17                        | 0,41                               |
| 10 <sup>44</sup> | 21,6 | 12 <sup>56</sup> | 21,0 | 15 <sup>11</sup> | 22,2 | 17 <sup>18</sup> | 21,7 | 21,6           | 0,24                        | 0,49                               |
| 10 <sup>46</sup> | 21,2 | 12 <sup>58</sup> | 21,3 | 15 <sup>13</sup> | 22,0 | 17 <sup>20</sup> | 23,0 | 21,9           | 0,69                        | 0,83                               |
| 10 <sup>48</sup> | 22,0 | 13 <sup>00</sup> | 22,2 | 15 <sup>15</sup> | 22,3 | 17 <sup>22</sup> | 23,5 | 22,5           | 0,70                        | 0,84                               |
| 10 <sup>50</sup> | 23,0 | 13 <sup>02</sup> | 22,9 | 15 <sup>17</sup> | 23,7 | 17 <sup>24</sup> | 25,5 | 23,8           | 1,45                        | 1,20                               |
| 10 <sup>52</sup> | 23,5 | 13 <sup>04</sup> | 23,0 | 15 <sup>19</sup> | 24,7 | 17 <sup>26</sup> | 25,5 | 24,2           | 1,29                        | 1,13                               |
| 10 <sup>54</sup> | 23,9 | 13 <sup>06</sup> | 24,2 | 15 <sup>21</sup> | 24,7 | 17 <sup>28</sup> | 26,0 | 24,7           | 0,86                        | 0,93                               |
| 10 <sup>56</sup> | 24,5 | 13 <sup>08</sup> | 24,2 | 15 <sup>23</sup> | 25,0 | 17 <sup>30</sup> | 25,4 | 24,8           | 0,28                        | 0,53                               |
| 10 <sup>58</sup> | 25,5 | 13 <sup>10</sup> | 24,6 | 15 <sup>25</sup> | 25,6 | 17 <sup>32</sup> | 26,2 | 25,5           | 0,44                        | 0,66                               |
| 11 <sup>00</sup> | 26,0 | 13 <sup>12</sup> | 25,3 | 15 <sup>27</sup> | 26,9 | 17 <sup>34</sup> | 27,2 | 26,5           | 0,81                        | 0,90                               |
| 11 <sup>02</sup> | 27,2 | 13 <sup>14</sup> | 26,4 | 15 <sup>29</sup> | 28,0 | 17 <sup>36</sup> | 28,0 | 27,6           | 0,64                        | 0,80                               |
| 11 <sup>04</sup> | 28,2 | 13 <sup>16</sup> | 27,0 | 15 <sup>31</sup> | 28,6 | 17 <sup>38</sup> | 29,5 | 28,3           | 1,08                        | 1,04                               |
| 11 <sup>06</sup> | 29,4 | 13 <sup>18</sup> | 28,4 | 15 <sup>33</sup> | 29,1 | 17 <sup>40</sup> | 31,0 | 29,5           | 1,20                        | 1,10                               |
| 11 <sup>08</sup> | 32,4 | 13 <sup>20</sup> | 29,3 | 15 <sup>35</sup> | 29,8 | 17 <sup>42</sup> | 31,1 | 30,6           | 1,94                        | 1,39                               |
| 11 <sup>10</sup> | 31,6 | 13 <sup>22</sup> | 30,9 | 15 <sup>37</sup> | 30,5 | 17 <sup>44</sup> | 32,0 | 31,2           | 0,46                        | 0,68                               |
| 11 <sup>12</sup> | 30,8 | 13 <sup>24</sup> | 31,8 | 15 <sup>39</sup> | 31,3 | 17 <sup>46</sup> | 33,0 | 31,5           | 0,96                        | 0,98                               |
| 11 <sup>14</sup> | 32,9 | 13 <sup>26</sup> | 33,0 | 15 <sup>41</sup> | 32,3 | 17 <sup>48</sup> | 34,1 | 33,1           | 0,56                        | 0,75                               |
| 11 <sup>16</sup> | 34,0 | 13 <sup>28</sup> | 34,0 | 15 <sup>43</sup> | 33,8 | 17 <sup>50</sup> | 35,0 | 34,2           | 0,29                        | 0,54                               |
| 11 <sup>18</sup> | 36,0 | 13 <sup>30</sup> | 35,7 | 15 <sup>45</sup> | 34,8 | 17 <sup>52</sup> | 36,0 | 35,6           | 0,32                        | 0,56                               |
| 11 <sup>20</sup> | 36,9 | 13 <sup>32</sup> | 36,4 | 15 <sup>47</sup> | 36,3 | 17 <sup>54</sup> | 37,8 | 36,8           | 0,47                        | 0,68                               |
| 11 <sup>22</sup> | 38,3 | 13 <sup>34</sup> | 37,7 | 15 <sup>49</sup> | 37,8 | 17 <sup>56</sup> | --   | 37,9           | 0,10                        | 0,32                               |

Mittlerer Fehler: 17,24 : 22 = 0,785 pars = ± 1,2 mGal

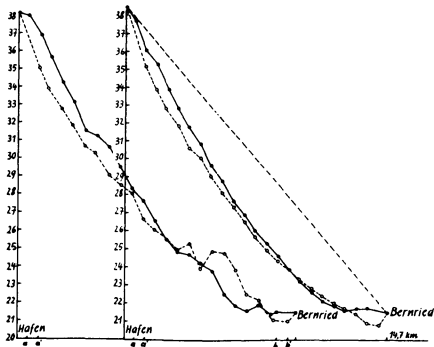


Abb. 7: Mittelwerte bei drei-vierfacher Wiederholung ohne Rücksicht auf Gang und windbedingte Browne-Effekte (links). Mittelwerte bei drei-vierfacher Wiederholung mit Gangkorrektur und roher Eliminierung des Browne-Effektes (rechts).

die Abb. 6 lässt deutlich erkennen, daß die plötzlichen Abweichungen keine Untergrundanomalien, sondern durch die Schwankungen des Schiffes bedingte Browneffekte sind. Letztere sind aber immer positiv und es ist daher keine Willkür, wenn man sie in der Weise näherungsweise eliminiert, daß man stets die tiefsten Meßwerte miteinander verbindet bzw. interpoliert, wie dies in Abb. 6 angedeutet ist. Die auf diese Weise neuermittelten Werte sind in den Tabellen 5 und 6 eingetragen und vom Gravimetergang befreit worden. Abb. 7 zeigt rechts die neuen Mittelwerte. Ein Vergleich mit den früheren (links) läßt erkennen, daß dieses Verfahren berechtigt ist und zu bedeutend besseren Ergebnissen führt. Der mittlere Fehler geht bei dieser Auswertemethode für beide Profile von  $\pm 2,2$  mGal bzw.  $\pm 1,2$  mGal auf  $\pm 0,77$  bzw.  $\pm 0,75$  mGal zurück. Daß die beiden Profile am Anfang etwas divergieren, liegt nicht an der Messung, sondern an der nicht völligen Konstanz der Schiffsgeschwindigkeit infolge von Windböen bzw. von Drehungen der Windrichtung. Die Mittelwerte aus den Hin- und

Tabelle 5

| 1                | 2    | 3                | 4    | 5                | 6    | 7                               | 8                               | 9                              | 10                        | 11                               |
|------------------|------|------------------|------|------------------|------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Zeit             | pars | Zeit             | pars | Zeit             | pars | Zeile 2<br>m. Gang-<br>korrekt. | Zeile 4<br>m. Gang-<br>korrekt. | Mittel<br>Zeile 6,<br>7,8 pars | $\frac{\sum \delta^2}{2}$ | $\sqrt{\frac{\sum \delta^2}{2}}$ |
| 11 <sup>44</sup> | 33,9 | 14 <sup>00</sup> | 34,5 | 16 <sup>16</sup> | 35,0 | 35,4                            | 35,0                            | 35,1                           | 0,06                      | 0,24                             |
| 11 <sup>46</sup> | 33,0 | 14 <sup>02</sup> | 33,0 | 16 <sup>18</sup> | 33,5 | 34,5                            | 33,5                            | 33,8                           | 0,34                      | 0,58                             |
| 11 <sup>48</sup> | 31,6 | 14 <sup>04</sup> | 32,5 | 16 <sup>20</sup> | 32,3 | 33,1                            | 33,0                            | 32,8                           | 0,19                      | 0,44                             |
| 11 <sup>50</sup> | 30,5 | 14 <sup>06</sup> | 31,2 | 16 <sup>22</sup> | 31,6 | 32,0                            | 31,7                            | 31,8                           | 0,05                      | 0,22                             |
| 11 <sup>52</sup> | 29,5 | 14 <sup>08</sup> | 29,9 | 16 <sup>24</sup> | 30,5 | 31,0                            | 30,4                            | 30,6                           | 0,11                      | 0,33                             |
| 11 <sup>54</sup> | 28,9 | 14 <sup>10</sup> | 29,5 | 16 <sup>26</sup> | 29,8 | 30,4                            | 30,0                            | 30,1                           | 0,10                      | 0,32                             |
| 11 <sup>56</sup> | 27,5 | 14 <sup>12</sup> | 28,5 | 16 <sup>28</sup> | 29,0 | 29,0                            | 29,0                            | 29,0                           | 0,00                      | 0,00                             |
| 11 <sup>58</sup> | 26,5 | 14 <sup>14</sup> | 27,3 | 16 <sup>30</sup> | 28,4 | 28,0                            | 27,8                            | 28,1                           | 0,10                      | 0,32                             |
| 12 <sup>00</sup> | 25,5 | 14 <sup>16</sup> | 26,6 | 16 <sup>32</sup> | 27,8 | 27,0                            | 27,1                            | 27,3                           | 0,19                      | 0,44                             |
| 12 <sup>02</sup> | 24,7 | 14 <sup>18</sup> | 25,7 | 16 <sup>34</sup> | 27,1 | 26,2                            | 26,2                            | 26,5                           | 0,27                      | 0,52                             |
| 12 <sup>04</sup> | 24,0 | 14 <sup>20</sup> | 24,5 | 16 <sup>36</sup> | 26,5 | 25,5                            | 25,0                            | 25,7                           | 0,59                      | 0,77                             |
| 12 <sup>06</sup> | 23,3 | 14 <sup>22</sup> | 23,5 | 16 <sup>38</sup> | 25,8 | 24,8                            | 24,0                            | 24,9                           | 0,81                      | 0,90                             |
| 12 <sup>08</sup> | 22,8 | 14 <sup>24</sup> | 22,8 | 16 <sup>40</sup> | 25,2 | 24,3                            | 23,3                            | 24,3                           | 0,90                      | 0,95                             |
| 12 <sup>10</sup> | 22,3 | 14 <sup>26</sup> | 22,3 | 16 <sup>42</sup> | 24,7 | 23,8                            | 22,8                            | 23,8                           | 0,90                      | 0,95                             |
| 12 <sup>12</sup> | 21,9 | 14 <sup>28</sup> | 21,9 | 16 <sup>44</sup> | 24,0 | 23,4                            | 22,4                            | 23,3                           | 0,70                      | 0,84                             |
| 12 <sup>14</sup> | 21,5 | 14 <sup>30</sup> | 21,7 | 16 <sup>46</sup> | 23,3 | 23,0                            | 22,2                            | 22,8                           | 0,30                      | 0,58                             |
| 12 <sup>16</sup> | 21,0 | 14 <sup>32</sup> | 21,3 | 16 <sup>48</sup> | 22,8 | 22,5                            | 21,8                            | 22,4                           | 0,27                      | 0,52                             |
| 12 <sup>18</sup> | 20,7 | 14 <sup>34</sup> | 21,0 | 16 <sup>50</sup> | 22,3 | 22,2                            | 21,5                            | 22,0                           | 0,29                      | 0,54                             |
| 12 <sup>20</sup> | 20,3 | 14 <sup>36</sup> | 20,7 | 16 <sup>52</sup> | 22,0 | 21,8                            | 21,2                            | 21,7                           | 0,18                      | 0,42                             |
| 12 <sup>22</sup> | 20,0 | 14 <sup>38</sup> | 20,4 | 16 <sup>54</sup> | 21,9 | 21,5                            | 20,9                            | 21,4                           | 0,25                      | 0,50                             |
| 12 <sup>24</sup> | 19,7 | 14 <sup>40</sup> | 20,2 | 16 <sup>56</sup> | 20,7 | 21,2                            | 20,7                            | 20,9                           | 0,09                      | 0,30                             |
| 12 <sup>26</sup> | 19,4 | 14 <sup>42</sup> | 20,5 | 16 <sup>58</sup> | 20,4 | 20,9                            | 21,0                            | 20,8                           | 0,11                      | 0,33                             |

Mittlerer Fehler: 0,50 pars =  $\pm$  0,77 mGal

Tabelle 6

| 1                | 2    | 3                | 4    | 5                | 6    | 7                               | 8                        | 9                           | 10                                 |
|------------------|------|------------------|------|------------------|------|---------------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| Zeit             | pars | Zeit             | pars | Zeit             | pars | Zeile 2<br>m. Gang-<br>korrekt. | Mittel<br>zeile<br>4,6,7 | $\frac{\Sigma \delta^2}{2}$ | $\sqrt{\frac{\Sigma \delta^2}{2}}$ |
| 12 <sup>52</sup> | 21,0 | 15 <sup>06</sup> | 21,8 | 17 <sup>12</sup> | 22,0 | 21,7                            | 21,8                     | 0,03                        | 0,17                               |
| 12 <sup>54</sup> | 21,0 | 15 <sup>08</sup> | 21,7 | 17 <sup>14</sup> | 21,7 | 21,7                            | 21,7                     | 0,00                        | 0,00                               |
| 12 <sup>56</sup> | 21,0 | 15 <sup>10</sup> | 21,7 | 17 <sup>16</sup> | 21,4 | 21,7                            | 21,6                     | 0,03                        | 0,17                               |
| 12 <sup>58</sup> | 21,3 | 15 <sup>12</sup> | 21,8 | 17 <sup>18</sup> | 21,7 | 22,0                            | 21,8                     | 0,03                        | 0,17                               |
| 13 <sup>00</sup> | 21,5 | 15 <sup>14</sup> | 22,1 | 17 <sup>20</sup> | 22,1 | 22,2                            | 22,1                     | 0,01                        | 0,10                               |
| 13 <sup>02</sup> | 22,0 | 15 <sup>16</sup> | 22,6 | 17 <sup>22</sup> | 22,6 | 22,7                            | 22,6                     | 0,01                        | 0,10                               |
| 13 <sup>04</sup> | 22,5 | 15 <sup>18</sup> | 23,1 | 17 <sup>24</sup> | 23,2 | 23,2                            | 23,2                     | 0,01                        | 0,10                               |
| 13 <sup>06</sup> | 23,2 | 15 <sup>20</sup> | 23,7 | 17 <sup>26</sup> | 23,8 | 23,9                            | 23,8                     | 0,01                        | 0,10                               |
| 13 <sup>08</sup> | 23,9 | 15 <sup>22</sup> | 24,5 | 17 <sup>28</sup> | 24,7 | 24,6                            | 24,6                     | 0,01                        | 0,10                               |
| 13 <sup>10</sup> | 24,6 | 15 <sup>24</sup> | 25,1 | 17 <sup>30</sup> | 25,4 | 25,3                            | 25,3                     | 0,03                        | 0,17                               |
| 13 <sup>12</sup> | 25,3 | 15 <sup>26</sup> | 25,7 | 17 <sup>32</sup> | 26,2 | 26,0                            | 26,0                     | 0,06                        | 0,24                               |
| 13 <sup>14</sup> | 26,4 | 15 <sup>28</sup> | 26,4 | 17 <sup>34</sup> | 27,2 | 27,1                            | 26,9                     | 0,19                        | 0,44                               |
| 13 <sup>16</sup> | 27,0 | 15 <sup>30</sup> | 27,2 | 17 <sup>36</sup> | 28,0 | 27,7                            | 27,6                     | 0,17                        | 0,41                               |
| 13 <sup>18</sup> | 28,4 | 15 <sup>32</sup> | 27,9 | 17 <sup>38</sup> | 29,0 | 29,1                            | 28,7                     | 0,45                        | 0,67                               |
| 13 <sup>20</sup> | 29,3 | 15 <sup>34</sup> | 28,8 | 17 <sup>40</sup> | 30,1 | 30,0                            | 29,6                     | 0,53                        | 0,73                               |
| 13 <sup>22</sup> | 30,9 | 15 <sup>36</sup> | 29,7 | 17 <sup>42</sup> | 31,1 | 31,6                            | 30,8                     | 0,97                        | 0,98                               |
| 13 <sup>24</sup> | 31,8 | 15 <sup>38</sup> | 30,8 | 17 <sup>44</sup> | 32,0 | 32,5                            | 31,8                     | 0,76                        | 0,87                               |
| 13 <sup>26</sup> | 33,0 | 15 <sup>40</sup> | 31,6 | 17 <sup>46</sup> | 33,0 | 33,7                            | 32,8                     | 1,15                        | 1,08                               |
| 13 <sup>28</sup> | 34,0 | 15 <sup>42</sup> | 32,9 | 17 <sup>48</sup> | 34,1 | 34,7                            | 33,9                     | 0,84                        | 0,92                               |
| 13 <sup>30</sup> | 35,7 | 15 <sup>44</sup> | 34,0 | 17 <sup>50</sup> | 35,1 | 36,4                            | 35,2                     | 1,44                        | 1,20                               |
| 13 <sup>32</sup> | 36,4 | 15 <sup>46</sup> | 35,0 | 17 <sup>52</sup> | 36,0 | 37,1                            | 36,0                     | 1,10                        | 1,05                               |
| 13 <sup>34</sup> | 37,7 | 15 <sup>48</sup> | 36,7 | 17 <sup>54</sup> | 37,8 | 38,4                            | 37,6                     | 0,75                        | 0,86                               |

Mittlerer Fehler:  $10,63 : 22 = 0,49 \text{ pars} = \pm 0,75 \text{ mGal}$

Rückprofilen sind in Abb. 9 ersichtlich. Dort ist vom Unwetter nicht mehr viel zu sehen. Daß die Werte richtig sind, d. h. den wirklichen Schwerewerten entsprechen, läßt sich wieder wie früher durch Anbringung der Bouguerkorrekturen gemäß Abb. 8 zeigen. Aus der Tatsache, daß sich wieder eine fast lineare Schwereabnahme von Norden nach Süden ergibt wie bei der Schönwettermessung vom 27. 4. 56, darf man schließen, daß die Auswertung in Ordnung und daß die durchfahrene Strecke frei von lokalen Schwerestörungen ist. Der regionale negative Effekt in Richtung auf die Alpen beträgt auch hier ca.  $-1 \text{ mGal}$  pro km wie im oberen Teil des Sees. ( $14 \text{ mGal}$  auf  $14,6 \text{ km}$  gegenüber  $4,3 \text{ mGal}$  auf  $4,4 \text{ km}$ ).

Als Ergebnis der Messungen auf dem *Starnberger See* als dem Repräsentanten eines *Binnensees* wurde gefunden:

- 1) Bei windstillem Wetter ist eine Reproduzierbarkeit der Messungen auf  $0,2$  bis  $0,3 \text{ mGal}$  erreichbar, die durch Wiederholungsmessungen noch gesteigert werden kann. Dabei wurde die Schiffsposition nur durch Uhr, Kompaß und Landmarken ermittelt.

- 2) Bei etwas windigem, aber nicht stürmischem Wetter liegt die Reproduzierbarkeit der Messungen bei etwa 0,8 mGal (mittlerer Fehler der Einzelbeobachtung), sofern man die groben ins Auge fallenden durch den Seegang bedingten Abweichungen in der Weise eliminiert, daß man stets die tiefsten Werte miteinander verbindet und so den Profilverlauf interpoliert. Ein wesentlich genaueres Verfahren wäre die Berechnung der Brownekorrektur an Hand von Horizontalbeschleunigungsmessungen.
- 3) Die unter 1) und 2) gemachten Angaben beziehen sich auf ein 100-Tonnen Schiff und gelten nur für einen Binnensee.

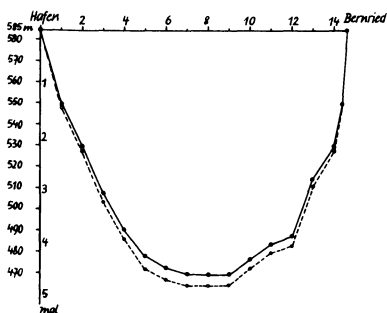


Abb. 8: Tiefenprofil längs der Fahrtroute Hafen-Starnberg-Bernried und entsprechende Bouguerwerte.

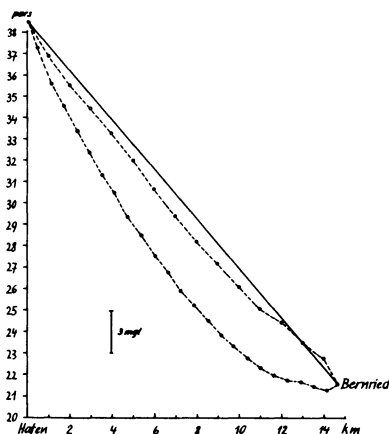


Abb. 9: Nach Bouguer reduzierte mittlere Schwerewerte längs des Meßprofils des Hafen-Starnberg-Bernried.

Nicht so günstig liegen die Verhältnisse auf dem Meere. Zwar kann man dort wesentlich größere und stabilere Fahrzeuge benutzen, aber der Wellengang ist erheblich komplizierter. Bei einem Binnensee fehlt die Dünung und die Wellen klingen schneller wieder ab, wenn die Oberfläche durch Wind oder andere Schiffe in Bewegung geraten ist. Der Seegang dauert also nur solange, als die Ursache wirkt. Auf dem Meere dagegen macht sich ein Sturm, der in einer ganz anderen Gegend stattfindet oder stattgefunden hat, durch seine Fernwirkung bemerkbar, und so kann die Wasseroberfläche auch an ganz windstillen Tagen unruhig sein. Während ein Schiff auf einem Binnensee fast nur Drehschwingungen um beide Hauptachsen ausführt, die im wesentlichen Horizontalbeschleunigungen hervorrufen, kommen auf hoher See Tauchschwingungen hinzu, die von beträchtlichen Vertikalbeschleunigungen begleitet sind. Schon ein periodisches Auf- und Abgetragenwerden des Schiffskörpers auf einer großen Welle um 1 cm verursacht bei einer 6-Sekunden-Periode eine Beschleunigung von 1000 mGal. ( $b = 4\pi^2 \cdot s/T^2$ ). Im Mittelmeer beispielsweise hat sich ge-

zeigt, daß auch bei blauem Himmel Vertikalamplituden von 6000 – 30000 mGal vorhanden sind, die bei Sturm bis 500 000 mGal und darüber anwachsen.

Um zu untersuchen, wie sich das Seegravimeter auf offenem Meere verhält, wurde am 20.5.56 bzw. 23.5.56 eine Meßfahrt auf der Adria an Bord der "Messapia" (5000 t) von Venedig nach Triest und zurück unternommen. Der italienischen Schiffsgesellschaft "Adriatica" und der Schiffsleitung der "Messapia" sei auch an dieser Stelle für ihr großzügiges und liebenswürdiges Entgegenkommen herzlichst gedankt, ebenso Prof. Morelli, der das Unternehmen vorbereitet und bestens unterstützt hat.

Die Apparatur konnte fast in Schiffsmittle nicht weit vom Metazentrum (Drehpunkt) des Schiffes entfernt aufgestellt werden. Während der etwa 5-stündigen Fahrt wurde fortlaufend registriert. Leider konnte nur die Rückfahrt ganz ausgewertet werden, da bei der Hinfahrt schon kurz nach der Abfahrt Sturm mit 80 km/Std. Windgeschwindigkeit aufkam. Nur der letzte Teil der Registrierung vom 20.5.56 ist ruhiger, als das Schiff nach einer Kursänderung senkrecht zu den Wellenfronten gelangte.

Bei der Rückfahrt am 23.5.56 um 7<sup>h</sup> früh hatte die Schiffsleitung einige Arbeiten an Bord vorzunehmen (Kompaßnachjustierungen etc.), die ein 2-stündiges Manövrieren in Hafennähe erforderlich machten. Erst um 9<sup>13</sup> befand sich das Schiff auf dem normalen Kurs in Richtung Venedig, nachdem es kurz vorher von 9<sup>03</sup> bis 9<sup>09</sup> auf offener See stillgestanden hatte (Abb. 18). Die Auswertung der Registrierung konnte daher erst von 9<sup>h</sup> ab erfolgen.

Aus Abb. 10 kann der Schiffsweg für beide Fahrtrichtungen gemäß den Angaben der Schiffsleitung verfolgt werden. Aus den angegebenen Zeiten und Entfernungen lassen sich die Geschwindigkeiten berechnen, wie dies

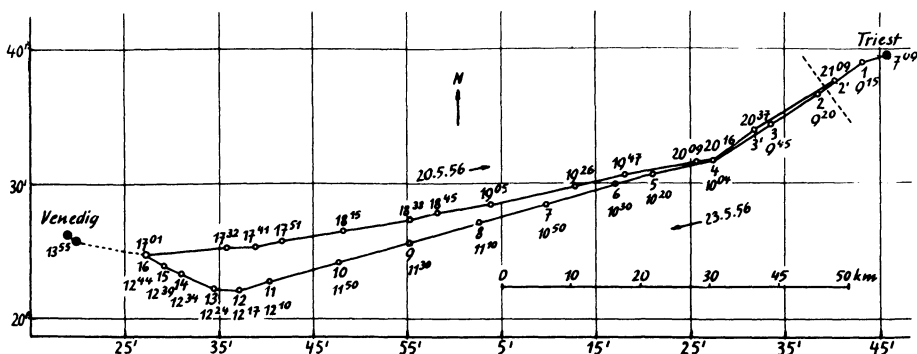


Abb. 10: Kurs der "Messapia" bei der Meßfahrt am 23.5.56 von Venedig nach Triest und 23.5.56 von Triest nach Venedig mit den von der Schiffsführung angegebenen Positionen.

Tabelle 7

| 1                | 2        | 3                      | 4                         | 5      | 6                                                              | 7                                                              |
|------------------|----------|------------------------|---------------------------|--------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Zeit             | Meßpunkt | Entfernungsdiff.<br>km | $v_{\text{km/Std.}}$      | Kurs   | Eötvöseff.<br>mit lokal.<br>Geschwind.<br>$\beta = 45,5^\circ$ | Eötvöseff.<br>mit mittl.<br>Geschwind.<br>$\beta = 45,5^\circ$ |
| 9 <sup>13</sup>  | 1        | 7,52                   | 26,5                      | 235,5° | 67,5 mGal                                                      | 71,0 mGal                                                      |
| 9 <sup>30</sup>  | 2        | 7,85                   | 31,3                      | 235,5° | 67,5 mGal                                                      | 71,0 mGal                                                      |
| 9 <sup>45</sup>  | 3        | 9,30                   | 29,3                      | 235,5° | 67,5 mGal                                                      | 71,0 mGal                                                      |
| 10 <sup>04</sup> | 4        | 8,69                   | 32,5                      | 257,0° | 83,8 mGal                                                      | 83,8 mGal                                                      |
| 10 <sup>20</sup> | 5        | 5,38                   | 32,3                      | 257,0° | 83,8 mGal                                                      | 83,8 mGal                                                      |
| 10 <sup>30</sup> | 6        | 9,90                   | 29,8                      | 254,0° | 82,5 mGal                                                      | 82,5 mGal                                                      |
| 10 <sup>50</sup> | 7        | 9,90                   | 29,8                      | 254,0° | 82,5 mGal                                                      | 82,5 mGal                                                      |
| 11 <sup>10</sup> | 8        | 9,90                   | 29,8                      | 254,0° | 82,5 mGal                                                      | 82,5 mGal                                                      |
| 11 <sup>30</sup> | 9        | 9,90                   | 29,8                      | 254,0° | 82,5 mGal                                                      | 82,5 mGal                                                      |
| 11 <sup>50</sup> | 10       | 9,90                   | 29,8                      | 254,0° | 82,5 mGal                                                      | 82,5 mGal                                                      |
| 12 <sup>10</sup> | 11       | 4,29                   | 36,8                      | 254,0° | 82,5 mGal                                                      | 82,5 mGal                                                      |
| 12 <sup>17</sup> | 12       | 3,60                   | 30,7                      | 274,0° | 84,7 mGal                                                      | 85,5 mGal                                                      |
| 12 <sup>24</sup> | 13       | 4,97                   | 29,8                      | 296,0° | 78,0 mGal                                                      | 77,3 mGal                                                      |
| 12 <sup>34</sup> | 14       | 2,76                   | 33,1                      | 294,0° | 80,3 mGal                                                      | 78,5 mGal                                                      |
| 12 <sup>39</sup> | 15       | 2,62                   | 31,4                      | 294,0° | 80,3 mGal                                                      | 78,5 mGal                                                      |
| 12 <sup>44</sup> | 16       |                        |                           |        |                                                                |                                                                |
| 211<br>Minuten   |          | 106,5 km               | 30,4<br>mittl.<br>Geschw. |        |                                                                |                                                                |

in Tabelle 7 geschehen ist, um hieraus die Eötvöskorrekturen zu berechnen. Letztere rührt bekanntlich davon her, daß im zu messenden  $g$  ein Anteil der Erdflihbesehleunigung enthalten ist. Fährt ein Schiff mit konstanter Geschwindigkeit nach Osten, also mit der Erddrehung, so wird die Fliehbeschleunigung vergrößert und damit ein negativer Schwereeffekt erzeugt, da die zur Erdoberfläche senkrechte Komponente vom Erdmittelpunkt wegweist. Bei einer Fahrt nach Westen wird die Fliehbeschleunigung verkleinert und das Gravimeter zeigt einen zu großen Wert an. Im gegebenen Fall muß bei Fahrtrichtung Triest-Venedig die Eötvöskorrektur vom gemessenen Schwerewert abgezogen werden. Ihr Betrag ist:

$$1) \quad C = 4,04 \cdot v_{\text{km/Std.}} \cdot \cos \phi \cdot \sin \alpha \text{ (mgl)}^{2)}$$

( $\phi$  = geografische Breite,  $\alpha$  = Azimut von Nord über Ost). Berechnet man nun aus Formel 1) die Eötvöskorrektur für die einzelnen Zeitabschnitte, wie dies in Tabelle 1 Spalte 6 geschehen ist, so stößt man bereits auf eine Schwierigkeit, die von grundlegender Art ist. Die in Spalte 4 auf Grund der Angaben von Spalte 1 und 3 ermittelten Geschwindigkeiten können unmöglich an einem windstillen Tag bei konstanter Drehzahl der Schrauben

bis zu 20% schwanken (von 26,5 bis 33,1 km/Std.). Die Toleranzen dürften vielmehr bei den Angaben über die Schiffspositionen liegen. Im gegebenen Fall ist es daher besser mit der mittleren Gesamtgeschwindigkeit von 30,4 km/Std. zu rechnen oder mit den einzelnen Gruppengeschwindigkeiten für die Meßpunkte gleichen Kurses. Bei der hier vorgenommenen Auswertung wurden letztere zu Grunde gelegt, da es immerhin möglich ist, daß die Schiffsgeschwindigkeit etwas von der Fahrtrichtung (von der Lage des Schiffskörpers zu den Wellenfronten) abhängt. Dementsprechend wurde Spalte 6 in Tabelle 7 benutzt.

Eine weitere Schwierigkeit betrifft die Ermittlung der Brownekorrektur; letztere beruht darauf, daß auf einem bewegten Fundament nicht das gleiche  $g$  gemessen wird wie auf einem ruhenden. Ein anfahrendes oder bremsendes Schiff hat eine Horizontalbeschleunigung, die sich zur Erdbeschleunigung geometrisch addiert, den Meßwert also stets vergrößert. Man kann daher eine Seegravimeterregistrierung nur innerhalb des Bereiches zur Auswertung verwenden, wo die Schiffsgeschwindigkeit konstant war (zuzüglich 5 Minuten Wartezeit wegen der starken Dämpfung des Gerätes), es sei denn, daß man die Geschwindigkeitsänderung mißt und berücksichtigt. Macht das Schiff eine Rollbewegung um eine seiner Achsen oder um beide infolge des Seeganges, so entstehen periodische Horizontalbeschleunigungen von der Art:

$$h = h_0 \sin 2\pi t/T = \frac{4\pi^2 s_0}{T^2} \cdot \sin 2\pi t/T, \text{ die über eine Periode integriert}$$

einen Zusatzvektor zu  $g_z$  von der Größe:

$$2) \quad \Delta g = (h_1^2 + h_2^2)/4g$$

ergeben. ( $h_1$  bzw.  $h_2$  sind die Amplituden der Horizontalbeschleunigungen in den beiden Schiffsachsenrichtungen,  $s_0$  der Weg). Die Bestimmung von  $h_1$  und  $h_2$  erfordert ein eigenes Gerät, nämlich einen Horizontalbeschleunigungsmesser bzw.-Schreiber, den es für diesen Zweck in idealer Ausführung noch nicht gibt. Alle derartigen Geräte (Seismometer, Geophone, Erschütterungsmesser, Schwingungsmesser etc.) sind ihrer Natur nach stark neigungsabhängig, da sie sinusempfindlich sein müssen. Bei 1° Neigung des Schiffes zeigen sie (statisch)  $g \cdot \sin \beta = 17500 \text{ mGal}$  an ( $h = g \cdot \sin \beta \pm h_1 \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}$ ) und dieser Betrag ist meist erheblich höher als jener, der gemessen werden soll ( $h_1$  bzw.  $h_2$ ). Hängt man den Horizontalbeschleunigungsmesser aber kardanisich auf, um ihn stets in Lotrichtung zu halten, so versagt er, weil dann das Gehäuse gegenüber der Masse eine Relativbewegung ausführt, die wegen ihrer Reibungsabhängigkeit von den Gelenken keine zuverlässige Zuordnung zum Meßwert erlaubt. Wahrschein-

lich ist die brauchbarste, wenn auch etwas schwerfällige Lösung die Verwendung einer Kreisel-Plattform, auf der der Beschleunigungsmesser richtig anzeigen würde, wenn der oder die Kreisel innerhalb einiger Perioden der Schiffsbewegung ( $c \cdot 6$  Sek.) nicht mehr als 1 Minute weglaufen. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Pendeln mit sehr langer Schwindungsdauer ( $c \cdot 27$  Sek.) gemäß dem Verfahren von *Vening Meinesz*.

Bei der hier zu besprechenden Adriameßfahrt stand mir ein geeigneter Horizontalbeschleunigungsmesser nicht zur Verfügung. Ich hatte zwar ein entsprechendes Gerät gebaut, das auf einem horizontalen Eich-tisch recht gut lineare Ausschläge ergab, aber an Bord konnte ich aus den bereits erwähnten Gründen keine zuverlässigen Werte erhalten. Ich schätze die bei der Rückfahrt vorhanden gewesen  $h$ -Amplituden auf etwa 2000 bis 7000 mGal. Bei der Sturmfahrt am 20.5.56 dagegen dürften sie mehr als 20000 mGal betragen haben. Bezüglich der Abschätzung der Brownekorrektion ohne Meßgerät hat man einige Anhaltspunkte. Die Starnberger See-Messung hatte gezeigt, daß man bei kurzzeitigen Schiffsschwankungen die niedrigsten Schwerewerte miteinander verbinden soll, da der Browneeffekt immer positiv ist und er dadurch in der Wirkung reduziert werden kann. Betrachtet man den Registrierstreifen in Abb. 17 so erkennt man, daß bei einem Schiff die periodischen horizontalen und vertikalen Beschleunigungen miteinander gekoppelt sind (bei einer Drehbewegung erhält man eine Drehbeschleunigung, die sich aus einer vertikalen und einer horizontalen Komponente zusammensetzt) und daß daher bei Zunahme der periodischen Horizontalbeschleunigung auch die periodische Vertikalbeschleunigung anwächst. Die Ausschläge in Abb. 17 entsprechen vertikalen Beschleunigungsänderungen, da ein Gravimeter nur solche direkt anzeigt, sie verraten aber durch die *Größe ihrer Amplitude* auch die Größe der *horizontalen*, die mit ihnen verbunden sind. Macht ein Schiff nur Drehschwingungen, und keine Tauchschwingungen, wie dies meist auf Binnenseen der Fall ist, und benutzt man für die Messungen stets den gleichen Ort auf dem Schiff, so könnte man die *periodischen* Gravimeteramplituden näherungsweise geradezu in *horizontale* Milligal umeichen. Auf hoher See ist eine solche Zuordnung aber wegen der vorhandenen Tauchschwingungen zu ungenau, da dort auch reine Vertikalschwingungen (ohne horizontalen Anteil) vorhanden sind.

Man kann also in erster Näherung schon aus dem Gravimeterschrieb erkennen, ob größere Browneeffekte aufgetreten sind. Ist die Registrierung sehr ruhig, so muß auch die Horizontalbeschleunigung klein gewesen sein. In Abb. 11 sind die periodischen Amplituden auf der Fahrt Triest-Venedig roh skizziert. Man erkennt, daß sie in Küstennähe am geringsten waren, und daher dort auch die Browneeffekte am kleinsten gewesen sein müssen, wie die Übereinstimmung der gefundenen Schwerewerte mit jenen von *Morelli* auch beweist.

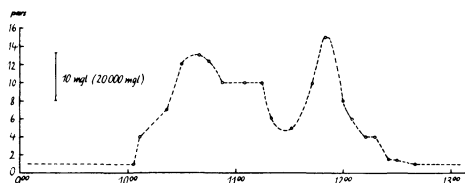


Abb. 11: Größe der Meßausschläge auf der Schwerregistrierung (Amplituden) Triest - Venedig am 23.5.56.

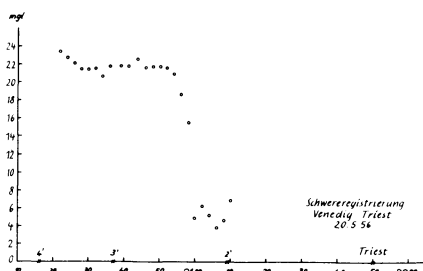


Abb. 12: Schwerewerte am 20.5.56 nach der Kursänderung um 20<sup>16</sup> nach Abzug der Eötvöskorrektion jedoch ohne Berücksichtigung des Browneffektes.

Die plötzliche Zunahme der Amplituden kurz nach 10<sup>h</sup> beruht auf einem Kurswechsel. Die Größe der  $h$ -Beschleunigungen hängt stark von der Stellung des Schiffskörpers zu den Wellenfronten ab, sie sind am kleinsten, wenn die Wellen vom Schiff senkrecht geschnitten werden.

Nun zu den Messungen selbst.

Wie schon erwähnt wurde, herrschte am 20.5.56 sehr starke Windtätigkeit (80 km/Std.). Die dadurch hervorgerufenen  $h$ -Beschleunigungen bewirkten einen Browneffekt von circa 100 mGal, der mangels einer geeigneten Apparatur nicht gemessen, sondern nur grob geschätzt werden konnte. Nur der letzte Teil des Profiles von 20<sup>16</sup> bis 21<sup>09</sup> wurde in Abb. 15 aufgetragen. Infolge einer Kursänderung um 20<sup>16</sup> gelangte das Schiff fast senkrecht zu den Wellen und beruhigte sich dadurch. Der Browneffekt ging, wie ein Vergleich mit der Rückmessung ergab, auf wenige Milligal zurück. Ab 21<sup>09</sup> verminderte das Schiff seine Geschwindigkeit successiv, so daß weitere Meßwerte nicht mehr ermittelt werden konnten außer dem Endwert im Hafen Triest.

Bei der Rückfahrt am 23.5.56 gegen 7<sup>h</sup> früh war das Wetter gut und der Seegang nur gering. Leider hatten sich die Heizakkumulatoren für den Thermostat in der Zwischenzeit entladen, wie ich am 22.5.56 bemerkte, als ich um 18<sup>h</sup> wieder an Bord ging. Die Temperatur war dadurch im Gerät von 38° auf 28° gesunken. Als das Schiff am 23.5.56 morgens den Hafen wieder verließ, war der Thermostat noch nicht wieder ganz eingelaufen, so daß sich ein etwas größerer Gang gegenüber dem normalen zeigte, was jedoch die Messungen nicht wesentlich beeinflusste. Wegen der bereits erwähnten 2-stündigen Manövrierung im Hafengebiet konnte mit der eigentlichen Registrierung erst gegen 9<sup>h</sup> begonnen werden, als sich das Schiff auf dem richtigen Kurs befand (Abb. 21 und 2<sup>o</sup>). Die Meßspindel wurde während der ganzen Fahrt nur zweimal verstellt, nämlich um 9<sup>20</sup> von 154,00 auf 155,01 (34,5 mGal = 18,7 pars) und um 13<sup>03</sup> wieder zurück von 155,01 auf 154,00. Um 10<sup>04</sup>, 10<sup>50</sup>, 12<sup>17</sup>, 12<sup>24</sup> und 12<sup>34</sup> erfolgten Kursänderungen

(Tabelle 7) und um 12<sup>44</sup> wurde die letzte Position bestimmt, ehe das Schiff mit verminderter Geschwindigkeit in die Lagunen Venedigs einfuhr. Wegen der häufigen Kursänderungen in den Kanälen und der nicht konstanten Schiffsgeschwindigkeit konnten die Messungen von 12<sup>44</sup> bis 13<sup>40</sup> nicht mehr ausgewertet werden. Nur der Endpunkt um 13<sup>42</sup> wurde festgelegt, als das Schiff an der Mole der Stazione Marittima festgemacht war. Bei einer Kurs- oder Geschwindigkeitsänderung ist eine Messung erst möglich, wenn der neue Kurs bzw. die neue Geschwindigkeit wenigstens 5 Minuten lang beibehalten wird wegen der langen Einstellzeit des Gravimeters.

Die Abb. 12, 13, und 14 enthalten die auf mGal umgerechneten Meßwerte nach Abzug der Eötvöskorrektion gemäß Tabelle 7 Spalte 6 ohne Brownekorrektur. Zum Vergleich sind die aus der Arbeit von C. Morelli (Rilievo

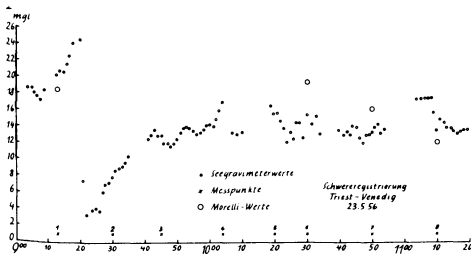


Abb. 13:

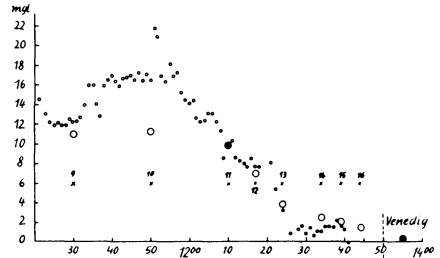


Abb. 14:

Schwerewerte am 23.5.56 nach Abzug der Eötvöskorrektion jedoch ohne Berücksichtigung des Browneeffektes.

gravimetrico dell'Alto Adriatico, Publ. dell' Istituto Nazionale de Geofisica Nr. 286, Roma) interpolierten, auf Meereshöhe bezogenen Schwerewerte (Seite 58, Spalte 5 plus 6) mit eingetragen. Aus Maßstabsgründen sind die Interpolationen aber höchstens auf 1 mGal genau. Man erkennt aus Abb. 12 und 13, daß die Übereinstimmung in Küstennähe, wo die Brownekorrektur klein ist, in Anbetracht der Unsicherheiten bei der Erfassung des Eötvös-

Tabelle 8

| Meßpunkt | Abweichung | Meßpunkt | Abweichung     |
|----------|------------|----------|----------------|
| 1        | + 1,5 mGal | 11       | 0 mGal         |
| 6        | - 5 mGal   | 12       | + 0,5 mGal     |
| 7        | - 2,5 mGal | 13       | 0 mGal         |
| 8        | + 2,5 mGal | 14       | - 1,2 mGal     |
| 9        | + 1,5 mGal | 15       | - 0,5 mGal     |
| 10       | + 5 mGal   | 16       | - 0,5 mGal     |
|          |            | Venedig  | 0 mGal (Basis) |

Mittlere Abweichung 1,7 mGal

effektes recht gut ist und auch in Meeresmitte die Abweichungen 5 mGal nicht übersteigen, ein Betrag, der innerhalb der Brownekorrektion liegt. Für die einzelnen Meßpunkte ergeben sich die aus Tabelle 8 ersichtlichen Abweichungen.

Leider liegen für die Meßpunkte 2, 3, 4 und 5 keine Vergleichswerte vor. Dort wurde eine ungewöhnlich starke Anomalie von ca. 18 mGal gefunden, die der Lage und der Größe nach mit jener bei der Hinfahrt (Abb. 12) beobachteten übereinstimmt, wenn auch bei letzterer der Browneeffekt die Meßwerte um einige mGal nach oben versetzte. Die Störungszone liegt bei 21<sup>05</sup> (am 20.5.56) und bei 92<sup>5</sup> (am 23.5.56), wo das Schiff fast die gleiche Stelle passierte (S. Abb. 10).

Es soll diese Anomalie aber vorerst noch nicht als gesichert gelten, da es durchaus möglich ist, daß die Eötvöskorrektion zu groß angenommen wurde. Würde beispielsweise der erste Wert in Tabelle 7 Spalte 4 richtig sein, so müßte das entsprechende Kurvenstück um 9 mGal nach oben verschoben werden. Außerdem liegt die fragliche Zone so nahe am Anfangs- bzw. Endpunkt der beiden Profile, daß die Möglichkeit besteht, daß das Schiff keine konstante Geschwindigkeit besaß, d.h. sich noch in der Anfahrtsbeschleunigung bzw. bereits in der Bremsverzögerung befand, wodurch natürlich ein Browneeffekt hervorgerufen wird.

Betrachtet man Abb. 11 nochmals in Verbindung mit den Abb. 13 und 14, so zeigt sich, daß zwischen 11<sup>10</sup> und 11<sup>30</sup> die periodischen Registrierausschläge merklich kleiner wurden und um 11<sup>50</sup> stark zunahmen. In Abb. 14 äußert sich diese Stelle so, daß die Übereinstimmung mit den Morelliwerten um 11<sup>30</sup> recht gut, dagegen um 11<sup>50</sup> eine Abweichung um etwa 5 mGal vorhanden ist. Dies bestätigt die Berechtigung der Annahme auf Seite  $\phi$ , wonach die Zu- bzw. Abnahme der periodischen *vertikalen* Amplituden (der periodischen Gravimeterausschläge) auch auf eine Zu- bzw. Abnahme der *horizontalen* Amplituden und damit des Browneeffektes schließen läßt.

Eine Betrachtung der Profilstücke v. 20<sup>h</sup> bis 21<sup>10</sup> am 20.5.56 und v. 9<sup>h</sup> bis 10<sup>04</sup> am 23.5.56 ergibt, daß die entsprechenden Kurven zwar eine (spiegelbildliche) Verwandtschaft zeigen, aber nicht miteinander identisch sind. Dies kann damit begründet werden, daß ein extrem stark gedämpftes Gravimeter auf einem schnell fahrenden Schiff eine Anomalie nicht in gleicher Weise wiedergibt, wenn es sie einmal vom Tief zum Hoch und ein andermal vom Hoch zum Tief überquert. Wegen der starken Dämpfung bleibt im ersteren Fall das Tief länger zurück (23.5.56), im anderen Fall das Hoch (20.5.56). In der Praxis wird man daher, sofern dies möglich ist, die Schiffsgeschwindigkeit an den einzelnen Meßpunkten verringern, und das Schiff senkrecht zu den Wellenfronten eindrehen.

*Folgerungen aus den bisherigen Meßergebnissen:*

Die erste Meßfahrt auf einem Hochseeschiff zeigte, daß es möglich ist,

bei ruhiger See Schweremessungen an Bord mit einer für geodätische Zwecke hinreichenden Genauigkeit auszuführen. Allerdings gilt diese Feststellung vorerst nur für das Mittelmeer bei der geringen Wassertiefe von maximal 30 m. Ob sie auch für die Atlantik und die Pazifik zutrifft, können erst weitere entsprechende Meßfahrten aufzeigen. Die hier besprochenen ersten Hochseemessungen hatten ihrer Anlage und Durchführung nach nur orientierenden Charakter. Zur völligen Ausnutzung der Genauigkeit des Seegravimeters hätten folgende Bedingungen erfüllt sein müssen:

1. Der günstigste Meßort auf dem Schiff wurde hier nur abgeschätzt. Er hätte durch Messungen ermittelt werden müssen.
2. Die Schiffsgeschwindigkeit sollte außer durch Zeit und Ortsbestimmung noch durch ein anderes Meßgerät überwacht werden. Am besten wäre es, wenn sie etwa 10-15 Minuten lang im Bereich der einzelnen Meßpunkte auf wenige Stundenkilometer reduziert werden könnte zwecks Verringerung der Unsicherheiten in der Bestimmung der Eötvöskorrektion. Die Schiffsgeschwindigkeit soll jedoch nicht Null sein, da ein fahrendes Schiff ruhiger im Wasser liegt als ein still stehendes.
3. Das Schiff soll zur Zeit der Messung nach Möglichkeit quer bzw. senkrecht zu den Wellen stehen.
4. Die wichtigste und unablässige Bedingung jedoch ist die fortlaufende Registrierung der *Horizontalbeschleunigung* zur Bestimmung des Browneffektes. Ohne Kenntnis dieser Größe ist die Messung der Schwere an Bord völlig unmöglich.

Zum Schluß sei noch auf einige Ausschnitte der Originalregistrierungen in der Anlage hingewiesen. (Abb. 15-24)

### Literatur

- [1] Graf, A.: Das Problem der Schweremessung auf See mit Gravimetern. Z. f. Geophysik. Jahrg. 20. 1954. H. 4.
- [2] Graf, A.: Beschreibung eines neuentwickelten Seegravimeters und Ergebnisse der ersten Meßfahrt auf dem Starnberger See an Bord der "Seeshaupt". Verlag der Bayr. Akademie d. Wiss. Abh. Neue Folge, Heft 75, Mü. 1956.
- [3] Meissner, O.: Praktische Geophysik. Dresden 1943. Verlag Steinkopff.

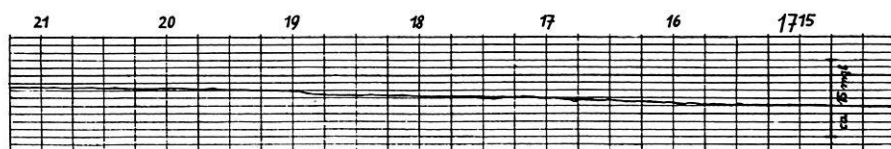


Abb. 15: Originalschwereregistrierung an Bord der "Tutzing" in voller Fahrt bei gutem Wetter, in Seemitte. 27. 4. 56.

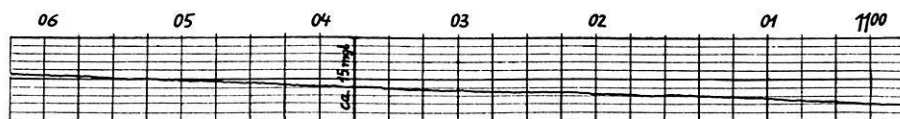


Abb. 16: Originalschwereregistrierung an Bord der "Tutzing" in voller Fahrt bei etwas windigem Wetter in Seemitte. 11. 5. 56.



Abb. 17: Originalregistrierung wie Abb. 19. Die "Bayern" kreuzt den Kurs der "Tutzing" und erzeugt starke Wellen, die das Schiff zum Schaukeln bringen und dadurch einen Browneffekt von mehreren mGal hervorrufen.



Abb. 18: Originalschwereregistrierung an Bord der "Messapia" bei ruhiger See, c. 3 km von Triest entfernt bei still stehendem Schiff.

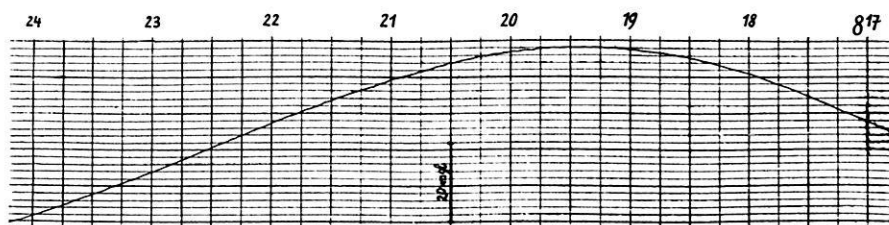


Abb. 19: Originalschwereregistrierung an Bord der "Messapia" bei langsamer Drehung des Schiffes und halber Fahrt in Küstennähe (Abstand etwa 3 km von Triest). Gut sichtbarer Eötvöseffekt.



Abb. 20: Originalschwereregistrierung an Bord der "Messapia" in ruhiger See bei voller Fahrt mit Kurs auf Venedig.

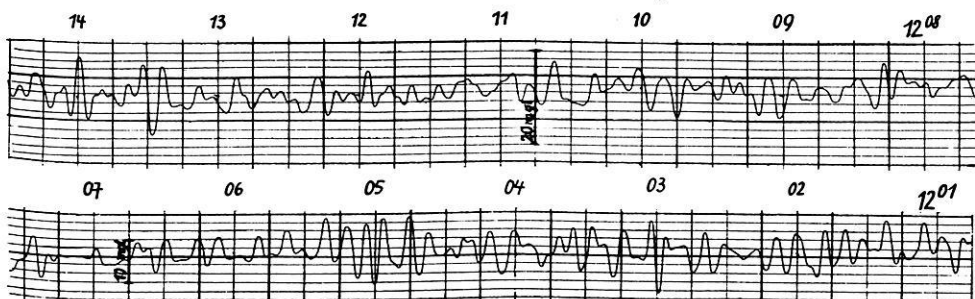


Abb. 21 und 22: Registrierung wie Abb. 23, jedoch in größerer Entfernung von der Küste und ungünstiger Lage des Schiffskörpers zur Wellenfront.

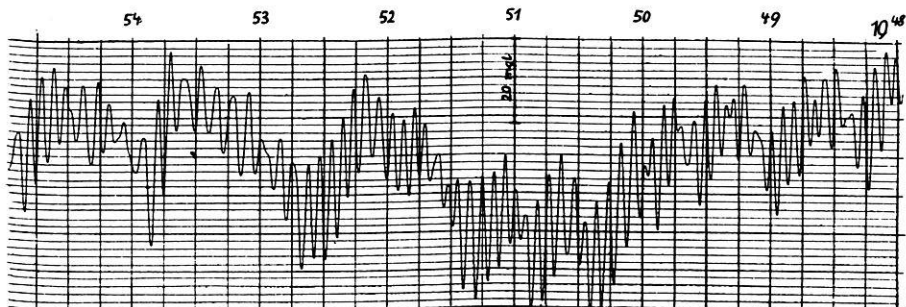


Abb. 23: Original-Schwereregistrierung an Bord der "Messapia" bei Sturm (80 km/Std. Windgeschwindigkeit) in Küstenferne.

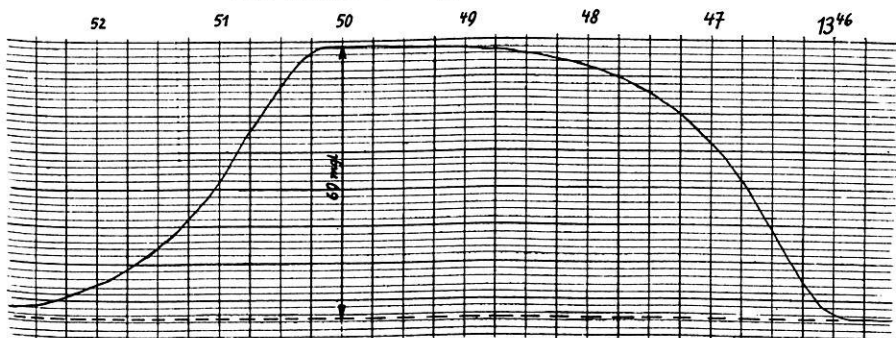


Abb. 24: Eichung an Bord der "Messapia" im Hafen Venedig, Schiff an der Mole. 2 Umdrehungen = 69 mgl = 37,3 Skalenteile.

## Anwendungen der Methode der induzierten Polarisation an schwedischen Erzlagerstätten <sup>1)</sup>

Von W. Buchheim, Freiberg/Sa. <sup>2)</sup>

**Zusammenfassung:** Es werden die theoretischen Grundlagen für die Methode der induzierten Polarisation skizziert und einige empirische Ergebnisse an Gesteinsmodellen und an drei verschiedenen schwedischen Sulfiderzlagern mitgeteilt.

**Abstract:** A brief account on the theoretical foundations of induced polarization is given and some empirical results from rock-models and three different sulphide-ore-deposits in Sweden are communicated.

Seit den Anfängen der geoelektrischen Prospektion, besonders auf Sulfiderze (Pyrit, Magnetkies, Bleiglanz, Kupferkies) steht das Problem vor dem Praktiker, Erzanreicherungen von wirtschaftlichem Interesse im Boden einerseits von solchen ohne ökonomische Bedeutung und andererseits von graphitführenden oder stark elektrolythaltigen Gesteinspartien zu unterscheiden. Alle bisher entwickelten geoelektrischen Prospektierungsmethoden haben den Nachteil, in dieser Hinsicht nicht selektiv zu arbeiten, sondern nur auf elektrische Leitfähigkeit bzw. Leitfähigkeitsunterschiede schlechthin anzusprechen. Bei näherer Prüfung der physikalischen Gesamtsituation zeigt es sich, daß nur ein auf elektrochemischen Effekten beruhendes Verfahren imstande ist, diese Selektion zu ermöglichen. Bekanntlich ist dieser Gedanke nicht neu, sondern bereits C. und M. Schlumberger haben vor Jahrzehnten versucht, die "Polarisation provoquée" zur Auffindung derartiger Erze auszunutzen. Später haben sich M. Müller [1], A. Belluigi [2], O. Weiss [3] u. a. bemüht, die künstliche galvanische Polarisation im Boden allgemein für Prospektionszwecke dienstbar zu machen, doch mit keinem nennenswerten Erfolg. Rückblickend darf man heute vielleicht sagen, daß hieran erstens die Unzweckmäßigkeit der verwendeten Meßanordnung und zweitens die Unklarheit über die physikochemischen Bedingungen bzw. die Größenordnung der Effekte schuld waren. Neuerdings wurden die Versuche unter präziseren Vorstellungen und nach Labormessungen an Gesteinsproben einerseits durch D. H. Bleil [4] unter Verwendung von Gleichstromimpulsen, andererseits durch W. Buchheim [5] und Mitar-

<sup>1)</sup> Verkürzte Fassung eines Vortrages, gehalten auf der Jahrestagung 1956 der Deutschen Meteorologischen und Geophysikalischen Gesellschaft in Hamburg.

<sup>2)</sup> Prof. Dr. W. Buchheim, Freiberg/Sa., Institut für theoretische Physik und Geophysik der Bergakademie

beiter mit Wechselstrom variabler Frequenz fast gleichzeitig wieder aufgenommen. Theoretische Betrachtungen, die andernorts ausführlich dargelegt wurden [6], führten den Verfasser zur Zugrundelegung eines Zusammenhanges zwischen permanentem Elektrolytpotential  $V_0$ , Stromdichte  $j$  und Potentialdifferenz  $V$  zwischen einer "elektrisch aktiven" Mineralphase (Erz, Graphit) eines Gesteins und dem als Kontinuum idealisierten elektrolytisch leitenden Einbettungsmaterial:

$$V(t) = V_0 + r_0 j(t) + \frac{1}{c_p} \cdot \int_{-\infty}^t dt' j(t') N(t-t')$$

wobei  $r_0$  eine Widerstandsgröße,  $c_p$  die Polarisationskapazität pro Einheit der Trennfläche,  $N$  einen Nachwirkungsfaktor bedeuten. Dieser Ansatz führt zu bestimmten Dispersionskurven für das induzierte elektrische Moment kugelförmiger aktiver Teilchen. Für die Out-of-phase-Komponente mit der Amplitude  $M$  ergibt sich z.B. bei Annahme eines Nachwirkungsfaktors

$$N(t-t') = e^{-\frac{t-t'}{T_1}}$$

$$\eta = \frac{3}{2} \cdot \frac{\xi}{1 + \xi^2}$$

mit der Bedeutung

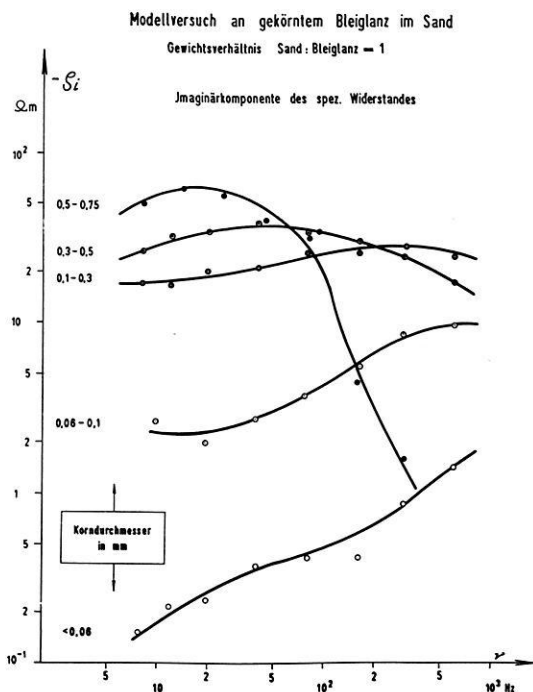
$$\xi = \frac{\omega T_2}{1 + \frac{T_2}{T_1}} \quad \eta = \frac{M}{a^3 E_0} \left( 1 + \frac{T_2}{T_1} \right)$$

$T_2$  ist dann eine zweite charakteristische "Relaxationszeit" der Teilchenpolarisation, die von Teilchengröße und spezifischem Einbettungswiderstand abhängt:

$$T_2 = \frac{a \rho_a c_p}{2}$$

$E_0$  bedeutet die Amplitude des polarisierenden Feldes,  $a$  den Teilchenradius,  $\rho_a$  den spezifischen Widerstand der Einbettung,  $\omega$  die Kreisfrequenz des verwandten Wechselstroms. Diese theoretischen Dispersionskurven, die ein Maximum für  $\xi = 1$  aufweisen, lassen sich mit empirischen vergleichen, die an Gesteinsmodellen aus feuchtem Quarzsand und pulverisiertem Bleiglanz oder Graphit einheitlicher Teilchengröße erhalten werden, wie sie von *M. Schneider* [7] studiert wurden. (Abb. 1). Hierbei ergab sich

eine qualitativ befriedigende Übereinstimmung zwischen Theorie und Modellversuch.



Aus dem Charakter der Dispersionkurve kann sofort entnommen werden, daß es bei Kenntnis der elektrischen Parameter  $r_0$ ,  $c_p$ ,  $N$  und  $\rho_a$  möglich sein muß, aufgrund von Messungen der Out-of-phase-Komponente einer künstlich erzeugten elektrischen Potentialdifferenz an der Oberfläche in Abhängigkeit von der Frequenz einen Anhalt über die Größe der aktiven Teilchen zu gewinnen. Je größer nämlich der Teilchenradius, bei umso niedrigeren Frequenzen tritt das Maximum von  $M$  auf. Hiernach sollte es also möglich sein, mittels des Prinzips der Frequenzvariation bei Anwendung der bekannten 4-Punkt-Methode eine Unterscheidung z.B. zwischen Imprägnations- und Derberzen zu treffen. Wie die Untersuchungen von I. Schrage [8] gezeigt haben, unterscheiden sich die Parameter  $r_0$ ,  $c_p$  und

$$T_1 = \int_0^{\infty} d\tau N(\tau) \text{ für die Sulfiderze und die Kohlesubstanz der elektrisch}$$

gut leitenden schwarzen Schiefergesteine im allgemeinen größenordnungsmäßig nicht sehr voneinander. Daraus ist zu folgern, daß eine geoelektri-

sche Unterscheidung von Imprägnationsvererzung und Graphitisierung nur möglich sein dürfte, wenn der mittlere Teilchendurchmesser um wenigstens 2-3 Zehnerpotenzen verschieden ist.

Diese theoretischen Aussagen wurden in Zusammenarbeit mit Bolidens Gruv A. B. unter freundlicher Unterstützung von Chefgeophysiker Dr. D. Malmqvist unter den fast als ideal zu bezeichnenden geoelektrischen Bedingungen des nordschwedischen Skellefte-Gebietes an dortigen Vorkommen geprüft. Die Meßanordnung gestattete eine Frequenzvariation im Bereiche von 0,16 bis 1000 Hz bei einer Leistungsabgabe von maximal

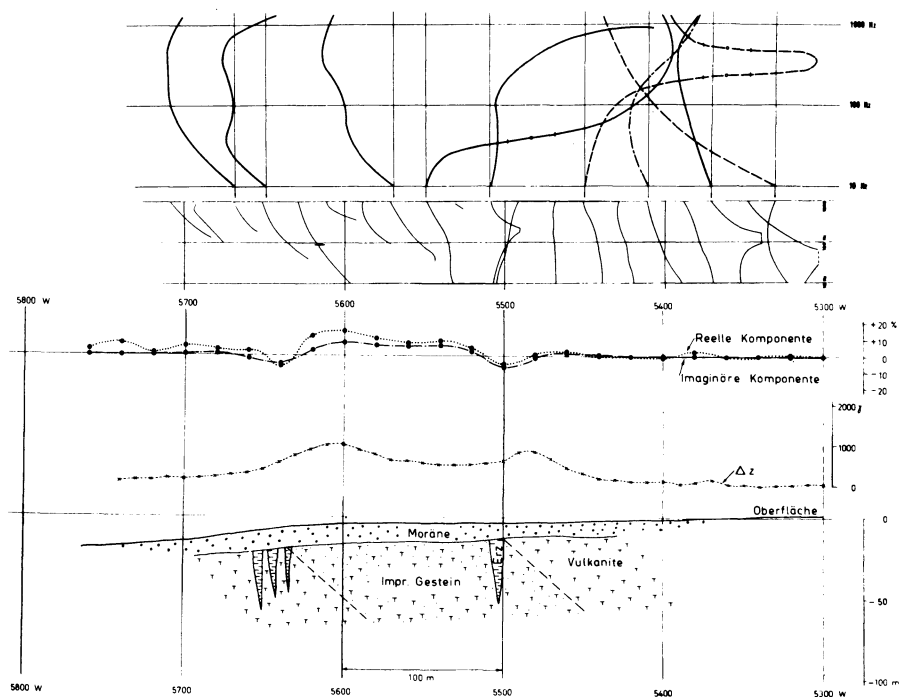


Abb. 2

120 W. Die Out-of-phase-Komponente der Sondenspannung einer 4-Punkt-Anordnung wurde im Bereiche 10-1000 Hz mit einem Elektronenstrahl-Phasenoszillographen, im tieferen Bereich mittels eines Phasenwinkelmessers nach dem Lock-in-Prinzip gemessen. Es wurden auch Versuche angestellt, die in diesem Gebiete zeitweilig sehr stark auftretenden tellurischen Pulsationen auszunutzen. (Eine ausführliche Beschreibung dieser Versuche und der petrografisch-geologischen Verhältnisse siehe [9]).

Die Isolierung des Polarisierungseffektes erfordert aber eine Korrektur der aufgenommenen Dispersionskurven auf Skineffekt, die nicht in jedem Falle eindeutig vorgenommen werden kann. Die Untersuchungen an einer etwa 100 m breiten Pyrit-Imprägnationszone bei Akulla unweit Boliden zeigten deutlich (Abb. 2), daß an den reduzierten Kurven bei Überquerung der Imprägnationszone mit Kartierung bei 60 m Elektrodenabstand eine Verschiebung des Maximums zu tiefen Frequenzen und wieder zurück zu höheren auftrat, was einer Abnahme der Korngröße des Erzes nach den Rändern der Zone hin entspricht.

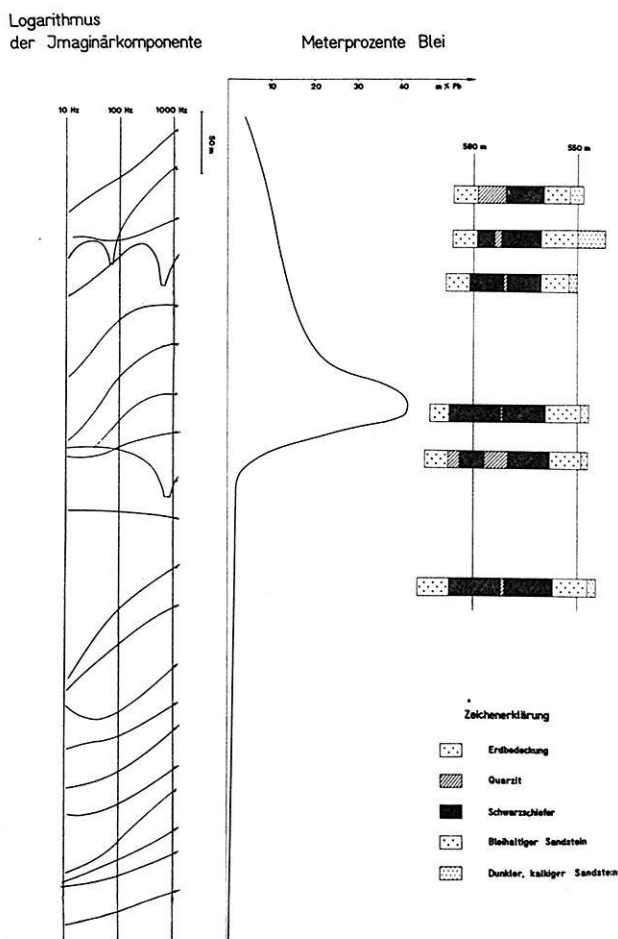


Abb. 3

Sehr umfangliche Untersuchungen wurden an einer Bleiglanz-Imprägnationslagerstätte bei Idre in Dalarne angestellt. Dieses Objekt ist geoelektrisch insofern besonders schwierig, als die erzführende Sandsteininformation von einer Wechsellagerung guter und schlechter elektrischer Leiter (Moräne, Quarzit, Schwarzschiefer z. T. mit eingelagertem Quarzit) 40 bis 50 m hoch überdeckt ist (Vgl. die Bohrprofile Abb. 3). Naturgemäß konnte die in Schweden übliche elektromagnetische Kartierung nach dem Slingram-Verfahren mit 3600 Hz diese Vererzung auch nicht andeutungsweise erfassen. Das Objekt war für die Prüfung neuer Verfahren aber insofern sehr geeignet, als die erzhöfliche Zone durch mehrere hundert Vertikalbohrungen in 50 m Abstand eingehend abgetastet worden war, und eine detaillierte Karte des Meterprozentgehaltes des Erzes vorgelegt werden konnte. Die Anwendung der induzierten Polarisation mittels Frequenzvariation zeigte, daß bei

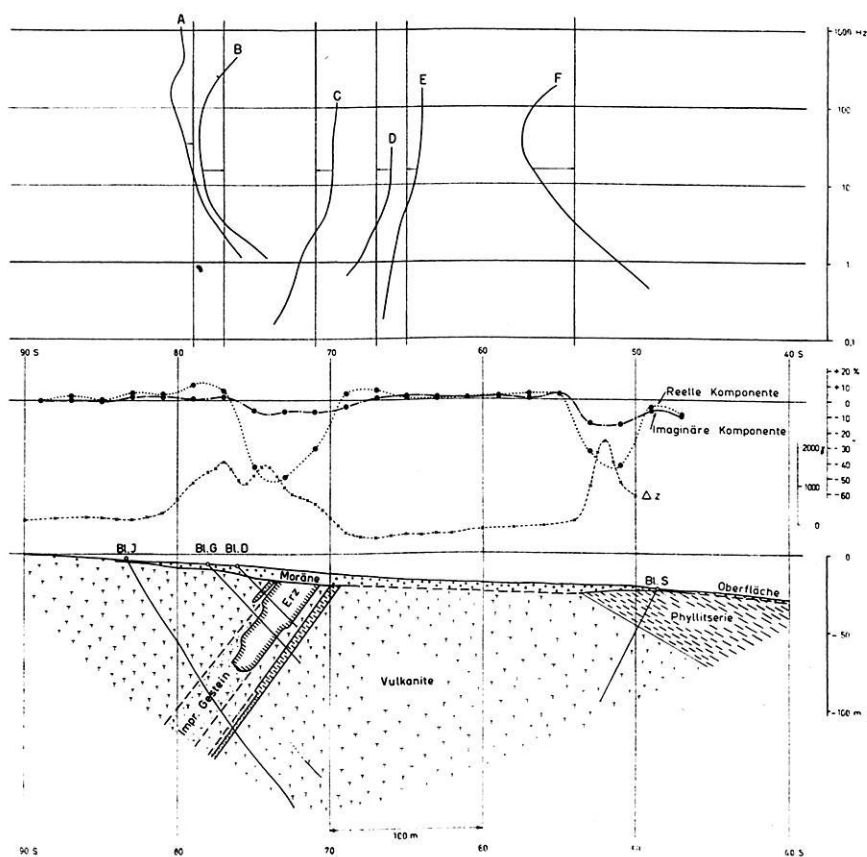


Abb. 4

derartigen Imprägnationserzen mit Verkittungscharakter der Effekt erst im Bereiche zwischen 0,1 und 10 Hz deutlich wird, und das eine Beschränkung auf ein höheres Frequenzband im allgemeinen hier keinen eindeutigen Nachweis höherer Vererzungsgrade ermöglicht. Eine Gegenüberstellung von Dispersionskurven und Meterprozentgehalt an einem ausgewählten Meßprofil zeigt jedoch (Abb. 3), daß im besonderen Falle die Abweichung der Kurven vom Normaltyp (fehlende aktive Gesteinsphase) schon einen deutlichen Zusammenhang mit dem Erzgehalt erkennen läßt.

Ein letztes Beispiel sollte zeigen, daß die Methode der induzierten Polarisation in der angewandten Form geeignet scheint, eine geoelektrische Unterscheidung von Derberzmassen und graphitisierten Schiefen extrem hoher Leitfähigkeit zu treffen, die mittels elektromagnetischer (induktiver) Kartierung grundsätzlich ausgeschlossen ist. Ein solches Beispiel konnte mit einem den Erzkörper von Kankberg bei Boliden und die nördlich ihn streichend begleitende Pyritzone überquerenden Profil gegeben werden. Obgleich die Slingram-Indikationen in reeller und imaginärer Komponente beider elektrischer Störzonen keinen nennenswerten Unterschied zeigten (Abb. 4), sind die Dispersionskurven der Out-of-phase-Komponente bei Orientierung der Elektrodenbasis im Streichen total verschieden, wenn das volle Frequenzband überstrichen wurde.

Die gegebenen Beispiele dürften zeigen, daß es als aussichtsreich angesehen werden kann, mittels des Verfahrens der induzierten Polarisation dem elektrischen Erzprospektor neue Kriterien für das Auftreten von Sulfiderzen an die Hand geben zu können.

### Literatur

- [1] Müller, M.: Die experimentelle Bestimmung der Reaktionsgeschwindigkeit aktiver elektrischer Vorgänge im Erdboden. Zeitschrift f. Geophysik 8, 423-425 (1932).  
Ein neues elektrisches Aufschlußverfahren mit großer Tiefenwirkung. Beitr. z. angew. Geophysik 4, 302-315 (1934).
- [2] Belluigi, A.: The need of revising the apparatus employed in the measurement of an electrochemical effect of the ground. Beitr. z. angew. Geophys. 5, 169-177 (1936).
- [3] Weiss, O.: Electrochemical Method for determining Geological Formations at Great Depths. The World Petroleum Congress. London 1933.
- [4] Bleil, D. F.: Induced Polarization: A Method of Geophysical Prospecting. Geophysics 18, 636 (1953).

- [5] *Buchheim, W.*: Theoretische Betrachtungen und Versuche zur Unterscheidung elektrolytischer von metallischer Stromleitung im Boden beim elektrischen Schürfen auf Sulfiderze. *Geologie*, 3, 1009 (1954).
- [6] *Buchheim, W.*: Zur Theorie der induzierten galvanischen Polarisation elektrisch aktiver Imprägnationserze. *Freiberger Forschungshefte, Reihe C*, Nr. 28 (1956).
- [7] *Schneider, M.*: Bestimmung der Polarisationskapazität von galvanisch-aktiven Phasen am Gesteinsmodell. *Freiberger Forschungshefte, Reihe C*. (erscheint demnächst).
- [8] *Schrage, I.*: Experimentelle Untersuchungen zur induzierten galvanischen Polarisation an Sulfiderzen und graphitführenden Gesteinen. *Freiberger Forschungshefte, Reihe C*, Nr. 28 (1956).
- [9] *Buchheim, W.* und *Malmqvist, D.*: Anwendungen der Methode der induzierten galvanischen Polarisation an Sulfiderzvorkommen des Skellefte-Bezirktes in Nordschweden. Veröffentl. des XX. Internationalen Geologen-Kongresses Mexiko. (Erscheint demnächst).

## Untersuchungen über Perioden von Erdbebenwellen in Abhängigkeit von Herdgebiet und Herdentfernung

Von H. J. Deist und G. Dohr, Hannover <sup>1)</sup>

**Zusammenfassung:** Es wird auf die Wichtigkeit einer Periodenuntersuchung für die Vorgänge in Herdgebieten hingewiesen. Nach einer vorgenommenen Typenanalyse mittelweiter Beben ergibt eine Untersuchung der Perioden der Aufzeichnungen eine gute Übereinstimmung mit den gefundenen Ergebnissen der Typenanalyse. Dabei wird eine Typenzusammengehörigkeit für begrenzte Herdräume aufgezeigt. In gleicher Weise werden großräumige Typenunterschiede zwischen ostasiatischen, nordamerikanischen und Alaskabeben gefunden.

Der Einfluß der Herdentfernung auf die Periodenspektren wird an Hand der Perioden der Hauptwellen an einer Station untersucht.

**Abstract:** The intention of this paper is to show the importance of thorough examination of periods of earthquake-waves whenever proceedings in epicentral-regions are concerned. An analysis of types of earthquake-records, as resulting from intermediate distances, was found to be in good accordance with an examination of periods from seismograms. Within limited epicentral-regions a uniformity of types is produced. In the same way there have been detected regional differences of types regarding earthquakes of the Far-East, North-America and Alasca.

The influence of epecentral distance of the spectra of periods is examined by means of maximum waves of a single station.

In der vorliegenden Arbeit sollen die Ergebnisse zweier unabhängig voneinander durchgeführter Untersuchungen wiedergegeben werden. Unter Benutzung der Aufzeichnungen der Station Hamburg führte *Deist* [1] zunächst eine Typenanalyse durch, wie sie in einer umfangreichen Arbeit schon *Vesanen* [6] mit dem Material der Station Helsinki dargestellt hatte. *Dohr* [2] benutzte die Seismogramme der Göttinger Erdbebenwarte, um zunächst eine Abhängigkeit der in den ersten Vorläufern auftretenden Perioden von der Herdentfernung zu untersuchen. Im Verlauf dieser Arbeiten zeigten sich Unterschiede in den auftretenden Perioden bei verschiedenen Herdgebieten. Sowohl innerhalb begrenzter Herdgebiete als auch in den Großräumen (Amerika – Ostasien) läßt sich eine charakteristische Verteilung der beobachteten Perioden erkennen.

<sup>1)</sup> H. J. Deist und Dr. G. Dohr in Firma Seismos G.m.b.H., Hannover.

Die nachfolgende Darstellung soll einen Überblick über die Methoden und Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen geben.

Um festzustellen, ob gleichartige Seismogrammformen unter den Registrierungen der Station Hamburg vorhanden sind und welcher Zusammenhang zwischen den Epizentren der zugehörigen Beben besteht, wurde von *Deist* [1] eine Typenanalyse mit den Aufzeichnungen des Vertikalseismographen durchgeführt. Die Analyse wurde mit 128 Beben vorgenommen. Diese liegen alle in einem Entfernungsintervall von  $\Delta = 18^\circ - 27^\circ$  (entsprechend 2000 - 3000 km). Das ist nach *K. Strohbach* [5] die erste Zone der maximalen Bebenhäufigkeit für Hamburg. Bei der Analyse wurde jede Aufzeichnung mit jeder bezüglich ihrer Morphologie verglichen. Nach der Ähnlichkeit der Kurvenzüge wurden die Beben dann in Typen eingeteilt. Differenzierung innerhalb eines Types führte zu Untertypen. Ähnliche Typen wurden in Gruppen zusammengefaßt. Die Betrachtung der Epizentren ergab dann, daß die morphologisch gefundenen Typen in geographisch zusammenhängenden Herdgebieten liegen, den sogenannten Typen- oder Gruppengebieten.

Die so, durch die subjektive Anschauung gewonnene Unterteilung in Gruppen konnte aber auch objektiv durch ein "Bauelement" des Kurvenlaufes ausgedrückt werden. Zu diesem Zwecke wurden innerhalb der ersten beiden Minuten nach dem Einsatz die in diesem Zeitraum auftretenden Maxima im Seismogramm des Vertikalseismographen ausgezählt. Diese Werte wurden dann innerhalb jeder Gruppe arithmetisch gemittelt. Als Ergebnis erhält man das Gruppenmittel  $L \pm M$  der Maxima.  $M$  ist dabei der mittlere Fehler des Mittelwertes. Die so gewonnenen Gruppenmittel sind in Abb. 1 in die Gruppengebiete eingetragen.

Die Unterschiede der einzelnen Gruppenmittel sind nicht sehr groß und infolge der nicht sehr zahlreichen Einzelwerte ist es angebracht,  $M$  nicht zu überschätzen. Die Abhängigkeit der Mittel  $L$  vom Herdgebiet ist aber deutlich zu erkennen. Als Beispiel werden die benachbarten Gruppengebiete "Mittelmeer" und "Kleinasien" betrachtet. Beide Gebiete haben im Mittel etwa die gleiche Entfernung zur Station Hamburg. Der Wert  $L$  der Mittelmeergruppe liegt mit  $L = 37,8 \pm 1,0$  außerhalb der Fehlergrenze der Gruppe "Kleinasien".

Es ist jedoch zu beachten, daß die Form einer Aufzeichnung nicht allein von der Anzahl der Maxima in den ersten beiden Minuten abhängig ist. Bei der morphologischen Analyse haben die Formen der Einsätze, die Amplitudenverhältnisse und der sich an diese ersten beiden Minuten anschließende Teil des Wellenzuges das gleiche "Gewicht" wie die Anzahl der Maxima in einem bestimmten Zeitintervall. Daher ist es möglich, daß einzelne Gruppen nahezu gleiche Gruppenmittel besitzen, sich aber dennoch morphologisch unterscheiden.

Besonders auffällig aber ist der Unterschied der Werte der westlichen Gruppen gegenüber den Werten der südöstlichen Gruppen. Da die Untersuchungen mit den Aufzeichnungen des Vertikalseismographen durchgeführt worden sind, werden die Werte sicher richtungsunabhängig sein. Für die Kreta-Gruppe ist der relativ große Wert von  $L = 49,3 \pm 1,2$  morphologisch auch sehr charakteristisch. Die "lebhaften" Formen dieser Registrierungen unterscheiden sich deutlich von denen des anderen Unter-

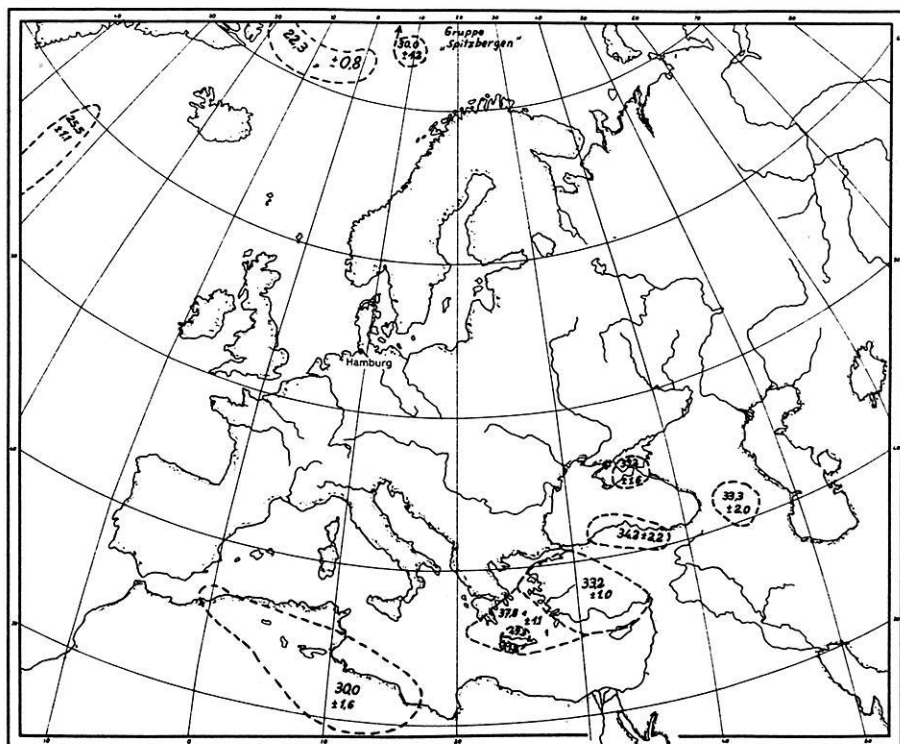


Abb. 1: Gruppenmittel der Seismogrammaxima  $L \pm M$ , ausgezählt in den ersten zwei Minuten nach dem Einsatz.  $M$  = Mittlerer Fehler des Mittelwerts.

suchungsmaterials. Bei der Kaukasus-Gruppe entspricht die Verteilungsdichte des zur Analyse brauchbaren Materials nicht der tatsächlichen Verteilungsdichte. Die Krim-Gruppe zeigt erhebliche Störungen durch Bodenunruhe. Diese beiden zuletzt genannten Gruppen sind daher auch vom Standpunkt der morphologischen Untersuchungen aus nicht sehr repräsentativ. Ihre Gruppenmittel müssen als unsicher bezeichnet werden.

Ein anderes Verfahren wählte Dohr [2] bei der Untersuchung von über 200 Beben aus den Aufzeichnungen der Göttinger Stationsinstrumente.

Hierbei wurden von den einzelnen Beben "Periodenspektren" aufgestellt und innerhalb einer Anzahl von Beben aus gleicher Herdentfernung zu "Gruppenspektren" zusammengefaßt. Über die Durchführung dieser Arbeiten zur Bestimmung der Verteilung der Perioden der P-Wellen in Abhängigkeit von Herdentfernung und Herdlage ist an anderer Stelle bereits berichtet worden. Die charakteristischen Unterschiede in dem Aufbau der Gruppenspektren ostasiatischer und nordamerikanischer Beben kennzeichnen eine großräumige Typenzusammengehörigkeit der Beben in Bezug auf die Perioden in den ersten Vorläufern.

An den Gruppen der nordamerikanischen und ostasiatischen Beben wurde die Auszählung der Gruppenmittel für die Seismogramme des Horizontalpendels und des Vertikalpendels in gleicher Weise wie bei Untersuchungen von *Deist* durchgeführt. Da in diesen Großräumen jedoch noch die verschiedensten Untertypen vorkommen, können in einzelnen Fällen noch beträchtliche Abweichungen vom Mittelwert auftreten. Es ergeben sich folgende Zahlen:

|                       | Gruppenzahl   |                 |        |
|-----------------------|---------------|-----------------|--------|
|                       | amerik. Beben | ostasiat. Beben | Alaska |
| Horizontalseismograph | 17            | 26              | 25     |
| Vertikalseismograph   | 28            | 34              | 34     |

Man erkennt auch hier einen beträchtlichen Unterschied in den Gruppenzahlen beider Großräume. Dabei liegen die Zahlen für die Herdgebiete Ostasien und Alaska in der Größenordnung der Werte, die *Deist* gefunden hat. Dies bestätigt die Annahme, daß die Amerikabeben eine Sonderstellung einnehmen und entspricht dem Ergebnis der Bestimmung der Periodenspektren.

Bei der Untersuchung der Teilgebiete ergeben sich folgende Gruppenzahlen für die Seismogramme des Horizontal- und des Vertikalpendels.

|            | H              | Z              |
|------------|----------------|----------------|
| Alaska     | 27,2 $\pm$ 1,0 | 33,2 $\pm$ 1,1 |
| Kamschatka | 22,0 $\pm$ 0,7 | 31,0 $\pm$ 0,6 |
| N - Japan  | 24,2 $\pm$ 0,8 | 33,4 $\pm$ 0,9 |
| S - Japan  | 31,5 $\pm$ 0,7 | 35,0 $\pm$ 1,3 |
| Formosa    | 26,7 $\pm$ 1,0 | 35,0 $\pm$ 1,1 |

Die Unterschiede in den Gruppenzahlen für die einzelnen Herdgebiete sind offensichtlich.

Schließlich ist noch auf die Stellung der Alaskabeben hinzuweisen. Wie man aus obigen Werten erkennt, liegen deren Gruppenzahlen nahe den

Werten der ostasiatischen Beben. Auch rein typenmäßig – starke kurze Perioden, meist superponierte P-Wellen in den Aufzeichnungen des Vertikalpendels und kräftige Seismogramme des 17-to Pendels – rechnen sie zu der großen Gruppe der ostasiatischen Beben. Auf diese Tatsache wies bereits *Vesanen* [6] hin.

Die Tatsache, daß zwei völlig unabhängig voneinander durchgeführte Untersuchungen bei zwei verschiedenen Methoden prinzipiell die gleichen Ergebnisse liefern, weist auf die Bedeutung der in den Erdbebenseismogrammen auftretenden Perioden für die Vorgänge im Herdgebiet hin. Dies wird besonders deutlich, wenn man bedenkt, daß die Ähnlichkeit zweier Bebenaufzeichnungen und das im Allgemeinen für die Typenanalyse benutzte Gesamterscheinungsbild zum großen Teil durch annähernd gleiche Perioden hervorgerufen wird.

Wir wenden uns nun der Frage zu, inwiefern auch die Herdentfernung allgemein als weiterer Faktor in die Charakteristik der Periodenspektren oder der "Gruppenmittel" eingeht. Wie bereits erwähnt, wächst der Anteil längerer Perioden in den Vorläuferwellen mit zunehmender Herdentfernung. Dies kam bereits bei der Aufstellung der Gruppenspektren [2] zum Ausdruck.

Diese Erscheinung läßt auch noch eine andere Darstellung zu. Bestimmt man in den Periodenspektren aus den Aufzeichnungen einer Station jeweils die Periode der Schwingung mit der größten wahren Bodenbewegung, so kann man bei Mittelung über die Beben einer Gruppe innerhalb derselben eine mittlere Periode der "Hauptwellen" bestimmen.

$$\bar{T} = \sum_n \frac{T(A_{\max})}{n}$$

In Abb. 2 ist diese mittlere Periode der Hauptwellen als Funktion der Herdentfernung aufgetragen. Die wagerechten Striche geben dabei den Entfernungsbereich an, über welchen sich die Beben der betreffenden Gruppe verteilen. Durch die senkrechten Striche ist der mittlere Fehler des oben definierten Mittelwertes dieser "Hauptperioden" angegeben.

Bei der Diskussion dieser Kurve ist zunächst die Frage zu stellen, ob sie nicht allein durch apparative Effekte erklärt werden kann, die den Wirkungen der Absorption überlagert sind. Die Eigenperiode des Göttinger Horizontalpendels liegt bei 11-12 Sekunden; und da außerdem alle den Seismogrammen entnommenen Amplituden unter Verwendung der Resonanzkurve des Instrumentes auf die wahre Bodenbewegung umgerechnet worden sind, könnten sehr wohl noch längere Perioden der Hauptwellen auf-

treten, als dies bei größeren Herdentfernungen tatsächlich der Fall ist. Die Wirkung der Absorption allein würde eine annähernd lineare Zunahme der Perioden bewirken.

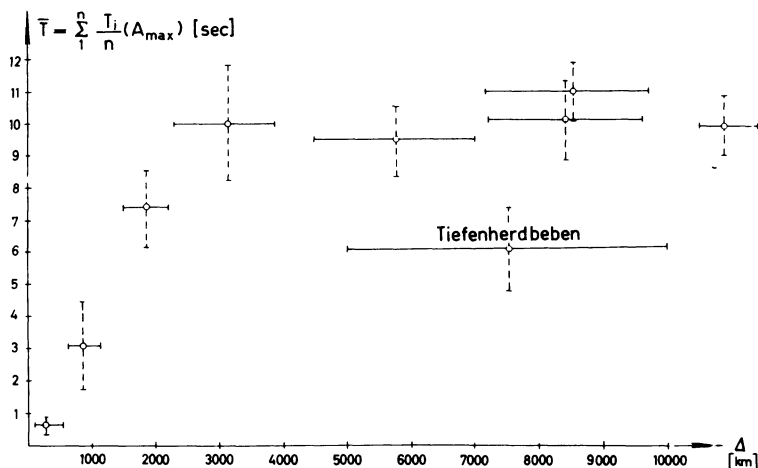


Abb. 2: Mittlere Perioden von Gruppenspektren als Funktion der Herdentfernung. Aufgetragen ist die mittlere Periode der P-Wellen mit der größten Bodenbewegung für jeweils eine Gruppe von B eben aus dem gleichen Entfernungintervall, welches durch die ausgezogenen waagrechten Striche dargestellt ist. Die gerissenen senkrechten Linien geben den mittleren Fehler des Mittelwertes an.

Versucht man, durch die Meßpunkte innerhalb der Fehlergrenzen eine stetige Kurve zu legen, so erhält man eine solche, die sich etwa durch

$$T = a + bt^{1/n}$$

( $t$  = Laufzeit Herd-Station,  $a$  und  $b$  sind Konstanten)

darstellen läßt. Hier erscheint aber die Ähnlichkeit mit jenen Kurven bemerkenswert, wie sie in der angewandten Seismik mehrfach beobachtet und diskutiert worden sind [3, 4], und in denen eine Abhängigkeit der beobachteten Perioden von der Entfernung des Sprengpunktes angegeben ist. Offenbar werden in der angewandten Seismik, d. h. in kleinen Entfernungen und hohen Frequenzen und in der Erdbebenseismik bei großen Entfernungen und tiefen Frequenzen die gleichen Erscheinungen beobachtet. Sie dürften auf einem nicht ideal elastischem Verhalten der Materie beruhen.

Erwähnt sei noch, daß in obiger Formel der Exponent  $1/n$  offensichtlich proportional der mittleren Geschwindigkeit der durchlaufenen Schichten ist. Aus der Betrachtung der Perioden von Registrierungen bei Bohr-

lochversenkmessungen ergibt sich eine etwa lineare Zunahme von  $n$  bei Abnahme der mittleren Geschwindigkeit in den durchlaufenen Schichten. Diese Bemerkung möge jedoch nur als vorläufiges Ergebnis aufgefaßt werden.

Herrn Prof. Dr. *Menzel* danken wir für die Förderung dieser Arbeiten sowie für aufschlußreiche Diskussionen.

### Literatur

- [1] *Deist, H.J.*: Versuch einer Typenanalyse Hamburger Seismogramme. Dipl.-Arbeit am geophys. Observatorium der Universität Hamburg. (nicht veröffentlicht).
- [2] *Dohr, G.*: Perioden der ersten Vorläufer in Göttinger Seismogrammen. Zeitschrift f. Geophysik Jahrgang 21 (1955) Heft 3, p. 165-175.
- [3] *Peterson, Fillipone und Coker*: The Synthesis of Seismograms from Well Log Data. Geophysics, Vol. XX, Nr. 3, (1955), p. 516-538.
- [4] *Ricker, N.*: The Form and Law of the Propagation of seismic Wawelets. Proceedings of the third World Petrol Congress Section 1, Repr. II, 1951, e. J. Brill, Leiden.
- [5] *Strobbach, K.*: Ortsgültige Laufzeitkurven von P und S für Hamburg. Gerlands Beiträge 63 (1954), p. 265-281.
- [6] *Vesanen, E.*: Über die typenanalytische Auswertung der Seismogramme. Diss. Helsinki 1942, Annales Academiae Scientiarum Fennicae, Sarga A, III.

## Zur Messung der Inklination mit Kippspule und langperiodischem Galvanometer

Von K. Burkhart, Fürstenfeldbruck / Obb.<sup>1)</sup>

**Zusammenfassung:** Es gibt zwei Verfahren der Inklinationsmessung mit dem Erdinduktor. Nach der älteren, bereits von *Wilh. Weber* angewandten Methode wird die Spule um  $180^\circ$  gekippt. Eine Stromwendung wie bei der rotierenden Spule ist nicht erforderlich. Die Messung kann aber nur mit einem langperiodischen oder ballistischen Galvanometer durchgeführt werden. Nach der theoretischen Betrachtung werden Beispiele bei *einer* Kippung und nach dem Multiplikationsverfahren berechnet. Als Periode des Galvanometers wurden in beiden Fällen 5 Sekunden angenommen.

**Abstract:** There are two methods for measurements of the inclination with the earth-inductor. The first and more ancient method (by *Wilh. Weber*) is the tilting of the coil about  $180^\circ$ . The commutation of the current as for the rotating coil is not necessary. But the measurements are only possible with long periodical or ballistical galvanometers. After consideration of the theory examples are calculated for one tilting of the coil and if the multiplication-method is used. The period of the galvanometer is 5 seconds in both cases.

Die Inklinationsmessung mit Erdinduktor und Galvanometer konnte sich schon vor Jahren gegenüber der mit dem Nadel-Inklinatorium durchsetzen, weil sie bedeutend genauere und schnellere Resultate liefert. Es gibt zwei Meßmethoden mit dem Induktor: Drehung oder nur Kippung der Spule. Die Kippmethode ist die ältere und wurde bereits von *Wilh. E. Weber* [1] bei seinem ersten selbstgebauten "Induktions-Inklinatorium" angewendet. Da kein Kommutator vorhanden zu sein braucht, kann eine durchgehende, aber flexible Verbindung zum Galvanometer verwendet werden. Damit entfallen die schlecht kontrollierbaren Kontaktfehler, die fast bei allen Induktoren zu finden sind. Während aber bei Geräten mit Kommutatoren fast alle üblichen Galvanometer verwendet werden können, wenn sie nur die entsprechende Empfindlichkeit haben (ca  $10^{-8}$  Amp.), sind bei den Kippspulen langperiodische oder ballistische Instrumente erforderlich. Kippmessungen lassen sich auch mit Spulen durchführen, die Kommutatoren oder Kollektoren besitzen. Im ersten Fall muß dann nur darauf geachtet werden, daß Spu-

---

<sup>1)</sup> Dr. K. Burkhart, Fürstenfeldbruck / Obb., Erdmagnetisches Observatorium.

lenebene und Unterbrecherstege in derselben Ebene liegen. Wenn die ballistischen Galvanometereine nicht zu große Periode besitzen, so läßt sich die bereits von *Weber* erfundene Multiplikationsmethode anwenden, wonach die Galvanometerausschläge durch systematische Vor- und Rückkippung der Spule verstärkt werden können. Nach dieser Methode erreichte *Weber* bereits eine Genauigkeit von  $\pm 2'$ . Wegen dieser augenscheinlichen Vorteile führten *D. La Cour* [2] und *W. Uljanin* [3] durchweg Kippmessungen mit Erinduktoren durch, obwohl diese normalerweise für die Drehung mit Kommutatoren eingerichtet waren.

Der Zweck der Mitteilung soll die theoretische Behandlung des elektrischen und mechanischen Vorganges bei der Kippung sein. Diese entspricht einer halben Umdrehung beim Rotationsinduktor. Hat die Spulenchse ungefähr die Inklinationsrichtung, so ist die induzierte EMK, wenn  $K$  die Spulenkonstante,  $Z$  die Vertikal-,  $H$  die Horizontalintensität,  $\Delta\beta$  die Höhenabweichung vom Inklinationswinkel  $\beta_0$  und  $\Delta\alpha$  die Seitenabweichung vom Meridian bedeuten:

$$1) \quad E = K \omega_s (\Delta\beta \cdot Z \cdot \sin\beta_0 \cdot \sin\omega_s t - \Delta\alpha H \cdot \cos\omega_s t)$$

Schreibt man für  $\Delta\beta \cdot Z \cdot \sin\beta_0 = A$  und für  $-\Delta\alpha H = B$ , so berechnet sich der Strom unter Berücksichtigung des Widerstandes  $(R_{sp} + R_g) = R$  und der Induktivität  $L$  der Spule zu

$$2) \quad I = K \omega_s (P \sin(\omega_s t - (\phi_1 + \phi_2)) + Q \cdot e^{-Rt/L})$$

$$\text{mit } P = ((A^2 + B^2) / (R^2 + (\omega_s L)^2))^{1/2}$$

$$\text{und } Q = (A \omega_s L + BR) / (R^2 + (\omega_s L)^2)$$

$$\text{mit } \tan\phi_1 = B/A \quad \text{und} \quad \tan\phi_2 = \omega_s L/R.$$

Der Ausschlag des Galvanometers gehorcht der Gleichung:

$$3) \quad K\ddot{\phi} + F\dot{\phi} + D\phi = q \cdot I.$$

Hier sind  $K$  das Trägheitsmoment,  $F$  die Reibungskraft,  $D$  die Torsionskraft und  $q$  die Ablenkungsfunktion des Drehspulsystems. Die Anfangsbedingungen lauten  $\phi(0) = \dot{\phi}(0) = 0$ . Sobald nach dem Anschlag der Kippspule (nach  $180^\circ$ -Drehung) wird  $I = 0$  und damit die Gleichung 3) homogen. Sie erhält aber jetzt als Anfangsbedingungen die Endwerte der inhomogenen Gleichung für  $\omega_s t = \pi$ .

Durch Einführung eines neuen Zeitmaßes  $\tau = t \sqrt{D/K} = 2\pi t / T_g =$

$\omega_g t$  mit  $T_g$  als Eigenperiode des Drehspulsystems folgt mit  $I = i f(t)$

$$4) \quad \frac{d^2 \phi}{d\tau^2} + 2c_1 \frac{d\phi}{d\tau} + \phi = c_2 f\left(\frac{\tau}{\omega_g}\right), \text{ wo}$$

$E/2\sqrt{DK} = q^2/2R\sqrt{DK}$  (bei magnetischer Dämpfung)  $= c_1$  und  $i q/D = c_2$ .

Die in  $f(t)$  auftretenden Kreisfunktionen haben  $\omega_g$  als Argument. Es entsteht damit der Quotient  $v = T_g/T_s$ , der für die ballistische Anzeige maßgebend ist. Die Auflösung der Gleichung 4) erfolgt am einfachsten nach der Operatorenmethode getrennt für die Sinus- und Cosinus-Glieder. Es resultiert dann im alten Zeitmaß nach folgenden Zusammenfassungen:

$$c_2 \omega_g K = g; \quad (\Lambda^2 + B^2)^{\frac{1}{2}} = \mathfrak{A}; \quad (R^2 + (\omega_g L)^2)^{\frac{1}{2}} = \mathfrak{R};$$

$$\sigma = \rho / \omega_g = R/L \omega_g; \quad (4v^2 c_1^2 + (1 - v^2)^2)^{\frac{1}{2}} = \mathfrak{Q};$$

$$AR - BL \omega_g = r; \quad AL \omega_g + BR = s; \quad (1 + \sigma^2 - 2\sigma c_1)^{\frac{1}{2}} = \mathfrak{R};$$

und der Phasenwinkel:

$$\phi_1 = \arctg B/A; \text{ (Ph. W. hervorgerufen durch die Achsenlage)}$$

$$\phi_2 = \arctg \omega_g L/R; \text{ (Ph. W. der Spule)}$$

$$\phi_3 = \arctg 2c_1 v/(1 - v^2); \text{ (Ph. W. des Galvanometers).}$$

Für die Dauer der Kippung der Spule die Elongation  $\Psi_1$  des Galvanometers:

$$5) \Psi_1 = \frac{g}{\mathfrak{R} \mathfrak{Q}} \left\{ \mathfrak{A} \sin(\omega_g t - (\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)) + \frac{e^{-c_1 \omega_g t}}{\mathfrak{R} \mathfrak{Q}} \left[ (rv(2c_1 + v^2 - 1) - s(c_1(1 + v^2) - \frac{\mathfrak{Q}^2}{\mathfrak{R}^2}(\sigma - c_1)) \frac{\sin m \omega_g t}{m} + (2rv c_1 - s(v^2 - 1 + \frac{\mathfrak{Q}^2}{\mathfrak{R}^2})) \cdot \cos m \omega_g t \right] + \frac{s \mathfrak{Q}}{\mathfrak{R} \mathfrak{R}^2} e^{-\rho t} \right\}.$$

Die  $\mathfrak{Q}^2$ -Glieder sind so klein, daß sie vernachlässigt werden können. Nachdem die Kippspule den Anschlag erreicht hat, schwingt das Galvanometer im Sinne der homogenen Gl. 3) nach. Ist  $t - t_e = t'$  die Zeit nach dem Anschlag, so resultiert für die Elongation  $\Psi_2$  nunmehr.

$$6) \quad \Psi_2 = e^{-c_1 \omega_g t'} \left\{ \Psi_1(t_e) \left[ \cos m \omega_g t' + \frac{c_1}{m} \sin m \omega_g t' \right] + \dot{\Psi}_1(t_e) \sin m \omega_g t' \right\}$$

Je nachdem in Gl. 5) und 6)  $c_1 \gtrless 1$  ist das Galvanometer überaperiodisch, aperiodisch und periodisch. Für die ballistische Anzeige ist notwendig, daß  $v = T_g / T_s \gg 1$ . Da die Kippung schätzungsweise nur  $\frac{1}{4}$  Sekunde dauert, genügt für die Ablesung ein Drehspulsystem mit einer Eigenperiode von 5 bis 10 Sekunden. *Weber* verwendete Instrumente mit einer Periode von 18 Sekunden.

In Fig. 1 wird das für eine Periode von 5 Sekunden berechnete Beispiel gezeigt. Eingezeichnet wurde ferner in einem anderen Maßstab der bei der Kippung in der Spule induzierte Strom unter Berücksichtigung der Phasenwinkel  $\phi_1$  und  $\phi_2$  (hier  $29.2^\circ$ ). Der Ausschlag der Drehspule beginnt erst, nachdem die Kippung vorüber ist. Im aperiodischen Fall ist die Ablesung nach dem Verlauf einer Sekunde möglich.

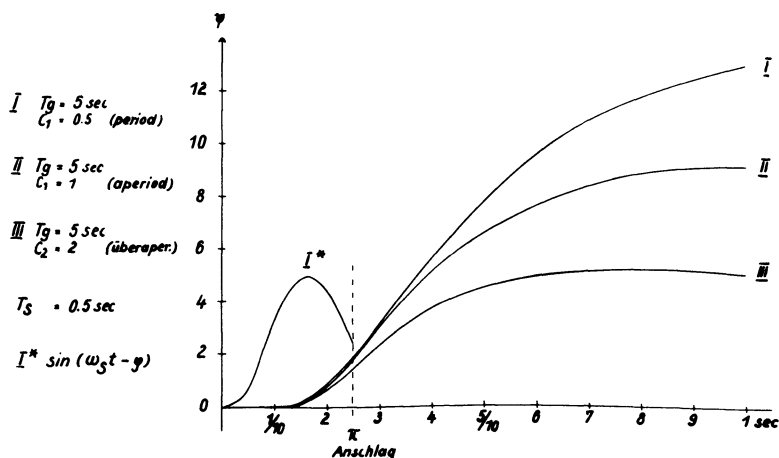


Abb. 1: Galv.-Ausschläge bei versch. Instrumentalkonstanten bei Spulenkippung um  $180^\circ$ .

Fig. 2 zeigt Elongationen nach der Multiplikationsmethode, die nur bei periodischer Anzeige des Galvanometers möglich ist. Die Eigenperiode beträgt hier wie im ersten Beispiel 5 Sekunden. Die gestrichelten Linien bedeuten das Abklingen der Elongationen, wenn keine weiteren Kippungen vorgenommen werden.

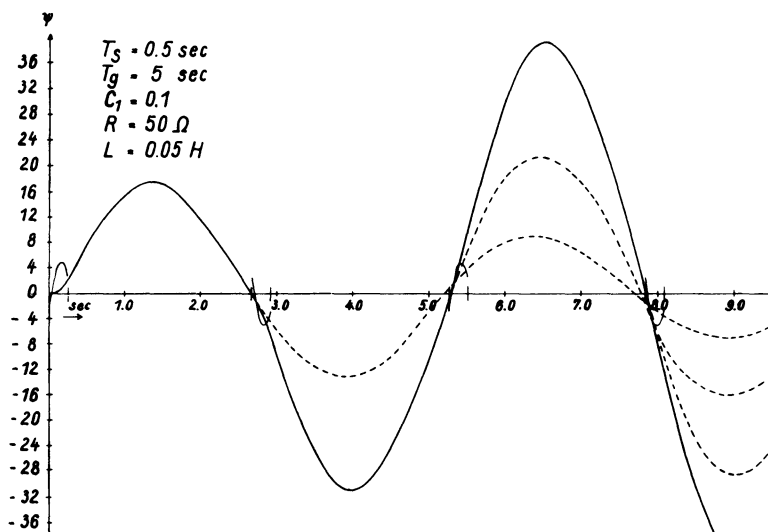


Abb. 2: Galv.- Ausschläge nach der Multiplikationsmethode bei der Kippspule.

Einen Teil der numerischen Rechnungen und die Zeichnung der Figuren übernahm Herr *E. Weingärtner*.

### Literatur

- [1] *Weber, W. E.*: Üb. d. Anwend. d. magn. Ind. usf aus dem Bande V d. Abhandlungen d. Königl. Ges. d. Wissensch. zu Göttingen 1853.
- [2] *De la Cour*: A Vertical-Intensity-Magnetometer, Terr. Magn. Vol. 31, 1926.
- [3] *Uljanin, W.*: Eine Universal-Ind.-Magnetometer, Z.f.Geophysik, VI. Jg. 1930.

## Elektrokinetische Grenzflächenerscheinungen im Bereich oberflächennaher Erdschichten

Von F. Wilckens, Bonn <sup>1)</sup>

**Zusammenfassung:** Es werden die elektrochemischen Grundlagen elektrokinetischer Grenzflächenerscheinungen diskutiert. Für den Bereich der angewandten Geophysik sind nur Strömungspotentiale von gewisser Bedeutung, die im Bereich oberflächennaher Erdschichten unter bestimmten Bedingungen entstehen können. Jedoch wird gezeigt, daß es nicht möglich ist, mit den derzeit verwendeten Meßanordnungen der Geophysik Strömungspotentiale exakt zu messen. Da es sich um komplexe Vorgänge handelt, ist eine Beeinflussung der Meßergebnisse sowohl in Bohrlöchern als auch an der Erdoberfläche durch Strömungspotentiale praktisch nicht gegeben.

**Abstract:** Streaming potentials are of limited importance in the field of applied geophysics since they arise only in certain cases in the near-surface beds of the earth. It is, however, impossible to measure exactly streaming potentials by means of the usual elektrode-arrangements in wells and on the surface. Therefore elektrokinetic effects do not affect seriously potential anomalies measured by the self potential method.

Zur Erklärung von Anomalien des elektrischen Erdfeldes sowie der natürlichen elektrischen Potentialdifferenzen, die man in Bohrlöchern mißt, werden in der Literatur in starkem Maße elektrokinetische Vorgänge herangezogen (*Cagniard*, 1956). Es erscheint daher zweckmäßig, eine Übersicht über die elektrochemischen Grundlagen dieser elektrokinetischen Grenzflächenerscheinungen zu geben, an die sich eine kritische Diskussion der möglichen Beeinflussung geoelektrischer Messungen anschließen soll.

### I. Elektrochemische Grundlagen

Bei elektrischen Grenzflächenerscheinungen ist zu unterscheiden zwischen solchen, die an statischen Systemen auftreten, und solchen, die unter die elektrokinetischen Erscheinungen zu rechnen sind, weil eine der beteiligten Phasen relativ zur anderen bewegt ist. Bei letzteren treten folgende vier Fälle auf (*Kortüm*, 1952):

---

<sup>1)</sup> Dr. Friedrich Wilckens, Bonn, Argelanderstr. 9

### *A. Feste Phase bewegt, flüssige Phase ruhend*

1. Elektrophorese oder Kataphorese: Kolloide, Micellen und sonstige größere, in einer ruhenden Flüssigkeit suspendierte Teilchen werden je nach ihrer elektrischen Ladung durch eine an die Flüssigkeit angelegte elektrische Spannung zur Anode oder Kathode bewegt.

2. Elektrophoretisches Potential (Dorn-effect oder sedimentation potential): Umkehrung der Elektrophorese. Bewegen sich in einer Flüssigkeit Kolloide, Micellen oder sonstige größere Teilchen unter dem Einfluß der Schwerkraft, so ist zwischen zwei Elektroden, die in verschiedenen Höhen im Strom der fallenden Partikel angebracht werden, eine Potentialdifferenz festzustellen.

### *B. Feste Phase ruhend, flüssige Phase bewegt*

3. Elektroendosmose oder Elektroosmose (osmose électrique): Eine Flüssigkeit wird durch eine an sie gelegte Spannung durch eine feste, ruhende Phase, ein Kapillarsystem bewegt, das für die Flüssigkeit durchlässig ist.

4. Strömungspotential (streaming potential)<sup>2)</sup>: Umkehrung der Elektroendosmose. Fließt eine Flüssigkeit durch ein ruhendes Kapillarsystem, so entsteht in der Flüssigkeit eine Spannung. —

Diese vier elektrokinetischen Erscheinungen haben eine unterschiedliche Bedeutung im Bereich der Geophysik. Die Elektrophorese ist praktisch bedeutungslos, da die in der Erdkruste vorhandenen elektrischen Feldstärken im allgemeinen sehr gering sind; desgleichen die Elektroendosmose, denn die Bewegung des Grundwassers wird mehr durch mechanische Kräfte als durch den elektroosmotischen Druck des elektrischen Erdfeldes verursacht. Für die Untersuchung des elektrischen Erdfeldes sind Elektrophorese und Elektroendosmose ferner auch deshalb belanglos, weil durch diese elektrokinetischen Phänomene keine zusätzlichen elektromotorischen Kräfte entstehen.

2) Früher war im englischen Schrifttum auch die Bezeichnung "electrofiltration potential" üblich. Entsprechend im Französischen "force électromotrice d'électrofiltration"; "phénomènes d'électrocapillarité" analog zum deutschen "Elektrokapillarität" für zusammenfassende Bezeichnung elektrochemischer Vorgänge in Kapillaren. Es finden sich auch Bezeichnungen wie "Elektrofiltrationspotential" (Militzer, 1953) und "Porositätsspannung" (Fritsch, 1949), die den oben angegebenen, in der Elektrochemie benutzten Begriffen widersprechen und daher tunlichst vermieden werden sollten. Ebenso sollte der Begriff "elektrische Porosität" (Fritsch, 1949) nicht benutzt werden, da er unklar ist und zu dem nicht zutreffenden Schluß führen kann, daß das Strömungspotential eine direkte Funktion der Durchlässigkeit des Kapillarsystems sei (Mounce und Rust, 1943).

Über das Auftreten elektrophoretischer Potentiale finden sich in der geophysikalischen Literatur nur spärliche Angaben. Es ist z. B. daran zu denken, daß in Bohrlöchern, in denen Grundwasser steht, ein elektrophoretisches Potential entstehen kann. *Wyllie* (1949) vertritt jedoch die Ansicht, daß das elektrophoretische Potential wahrscheinlich nicht ernsthaft die in einem Bohrloch nach der derzeitigen Methode gemessene Potentialverteilung beeinflußt.

Von den elektrokinetischen Erscheinungen ist also nur das Strömungspotential als Ursache elektromotorischer Kräfte im Bereich des elektrischen Erdfeldes in Oberflächennähe von gewisser Bedeutung, so daß hier kurz auf wesentliche Einzelheiten eingegangen werden soll. Denn es gilt vor allem festzustellen, ob überhaupt Strömungspotentiale entstehen können. Gerade für Zwecke der angewandten Geophysik ist es wichtig zu wissen, ob infolge der Meßbarkeit von Strömungspotentialen gegebenenfalls Fehlinterpretationen der Meßergebnisse möglich werden.

An Phasengrenzflächen entsteht im Gleichgewicht die *Helmholtzsche* Doppelschicht, die eine Potentialdifferenz, das Phasengrenzpotential  $\epsilon$  zur Folge hat (Fig. 1). Liegt nun eine grobporige Kapillare aus einem Nichtleiter vor, deren Durchmesser größer als etwa  $0,1 \mu$  ist, und in der sich eine ruhende Flüssigkeit befindet, so ist eine Belegung der Doppelschicht fest, die andere in der Flüssigkeit im Sinne der Eigenschaften einer Ionenatmosphäre diffus und von einer gewissen, durch die Wärmebewegung bedingten Dicke. Im Bereich außerhalb dieser Doppelschicht ist also in der Flüssigkeit eine Überschußladung vorhanden, die durch die Bindung eines Teiles der Flüssigkeitsteilchen an der festen Phase entsteht. Zwischen der festen Phase einschließlich dieser anhaftenden Flüssigkeitsschicht einerseits und der Überschußladung in der freien Flüssigkeit andererseits besteht folglich eine weitere Potentialdifferenz, das elektrokinetische oder  $\zeta$ -Potential<sup>3)</sup>.

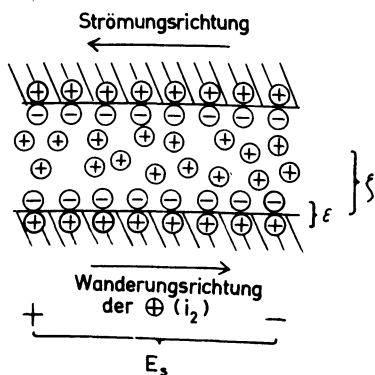


Abb. 1: Schematische Ladungsverteilung in einer Kapillaren, die zur Ausbildung eines Strömungspotentials führt, wenn die Flüssigkeit in der Kapillaren bewegt wird.  $\epsilon$  Grenzflächenpotential,  $\zeta$  elektrokinetisches Potential,  $E_s$  Strömungspotential in der Flüssigkeit.

3) Entgegen der Ansicht von *Wyllie* (1951) sind Phasengrenzflächenpotential und elektrokinetisches Potential durch Ionentrennung bedingt, während das Strömungspotential durch Ionentransport zustande kommt.

Wird nun durch eine mechanische Ursache, den Druck  $p$  die Flüssigkeit in Bewegung gesetzt, so resultiert aus der bewegten Überschußladung ein elektrischer Strom  $i_1$  bzw. eine Potentialdifferenz, das Strömungspotential  $E_s$ . Die durch die Flüssigkeitsmenge transportierte Elektrizitätsmenge ist gegeben durch das Produkt der Überschußladung der freien Flüssigkeit mit der Strömungsgeschwindigkeit. Da aber die Überschußladung eine Funktion des elektrokinetischen Potentials ist, wird der Strom  $i_1$  unter Berücksichtigung der Gesetze von *Stokes* und *Poiseuille* durch folgende Beziehung dargestellt:

$$i_1 = \frac{\zeta \epsilon r^2 p}{4 l \eta},$$

wobei  $r$  der Radius,  $l$  die Länge der grobporigen Kapillare, durch die die Flüssigkeit der Viskosität  $\eta$  und der Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon$  unter dem Druck  $p$  fließt.

Die Ionenwanderung sucht nun wieder im stationären Zustand das entstehende Strömungspotential auszugleichen, so daß ein  $i_1$  entgegen gesetzter Strom  $i_2$  in der freien Flüssigkeit entsteht. Für  $i_2$  gilt nach dem *Ohmschen* Gesetz

$$i_2 = \frac{E_s \sigma \pi r^2}{l},$$

wobei  $\sigma$  die spezifische Leitfähigkeit der Flüssigkeit ist.

Im Gleichgewicht muß gelten

$$i_1 = i_2,$$

woraus für das Strömungspotential  $E_s$  folgt

$$E_s = \frac{\zeta \epsilon p}{4 \pi \eta \sigma}.$$

Mit anderen Worten: im einfachsten Fall ist das Strömungspotential in grobporigen Kapillaren direkt dem Druck und umgekehrt der Leitfähigkeit und der Viskosität der Flüssigkeit proportional (*Kortüm*, 1952).

Diese Ableitung des Strömungspotentials nach der *Helmholtz*schen Theorie trifft für grobporige Kapillaren annähernd zu. Im Falle feinporiger Kapillarsysteme sind andere Voraussetzungen gegeben, da nicht mehr eine im Vergleich zum Porenradius vernachlässigbar dünne elektrische Doppelschicht vorhanden ist (*Schmid*, 1950). Allgemein können die komplizierten Verhältnisse nur näherungsweise rechnerisch erfaßt werden.

Insbesondere blieben die häufig auftretende Adsorption kapillaraktiver Ionen und die dadurch bedingte komplizierte Struktur der Doppelschicht, die innere Beschaffenheit der Kapillarwand sowie die Abhängigkeit von den geometrischen Ausmaßen der Kapillare außer Ansatz. Variationen der Strömungsbedingungen (laminare oder turbulente Strömung) und elektrische Eigenschaften der Kapillarwand beeinflussen ebenfalls die Größe des Strömungspotentials.

## II. Strömungspotentiale im Bereich oberflächennaher Erdschichten

### A. Strömungspotentiale in Bohrlöchern

Strömungspotentiale in Bohrlöchern werden im allgemeinen wie folgt beschrieben (*Doll*, 1948): Durch den hydrostatischen Druck in der Spülung einer Bohrung nach dem Rotary-Verfahren, der größer ist als der Druck in einer durchteuften permeablen Schicht, sickert langsam etwas Bohrlochflüssigkeit durch die an der Bohrlochwand haftende Spülung und die je nach Porösität der Formation verschieden starke Infiltrationszone in die poröse Schicht ein. Dabei entsteht eine elektromotorische Kraft an der Grenzfläche Spülung/poröse Schicht, die elektrokinetischer Natur ist, und zwar primär dort, wo die Druckdifferenz ein Maximum hat, also in der Infiltrationszone. Die elektromotorische Kraft hängt von der Art des Filters und der Flüssigkeit sowie von der Druckdifferenz ab. Sie hat aber nicht nur diese elektrokinetische Komponente, sondern ist auch durch andere elektrochemische Effekte bedingt, worauf noch zurückzukommen ist; jedoch ist es praktisch unmöglich, die Wirkung der verschiedenen Faktoren auf das Resultat der Messung zu trennen, und daher auch, die Größe der elektromotorischen Kraft zu bestimmen. Im einzelnen wird hierzu noch von *Doll* ausgeführt, daß die EMK auch unabhängig vom Wert der Durchlässigkeit sei; die "Elektrofiltrations-EMK" hänge nur von dem Druckunterschied und den Eigenschaften der Spülung ab, welche wiederum selbst diejenigen der Infiltrationszone ("mud cake") bestimmen würden. Diese in der Infiltrationszone entstehende elektromotorische Kraft sei weiter praktisch unbeeinflußt von dem Eindringen der Bohrlochflüssigkeit in die permeable Schicht, ausgenommen im Falle einer Widerstandsänderung im Bereich der Infiltrationszone.

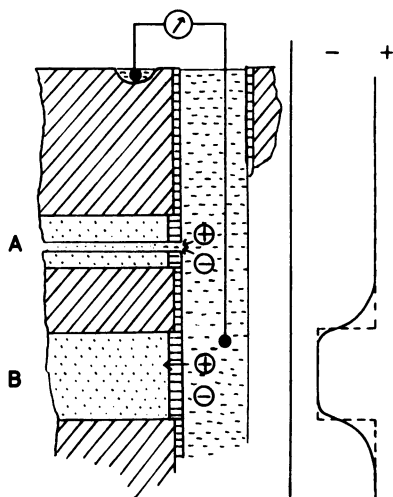
Früher haben *Mounce* und *Rust* (1943) gezeigt, daß das Strömungspotential nur von ganz untergeordneter Bedeutung sein kann ("weniger als 10% des beobachteten Potentials"). *Wyllie* (1951) kommt zu dem Ergebnis, daß unter extremen Verhältnissen die in Bohrlöchern gemessene Eigenpotentialkurve etwa zu 50% des Gesamtwertes durch Strömungspotentiale verursacht werden könne, wobei das Strömungspotential in Bohrungen nach dem Rotary-Verfahren vornehmlich eine Funktion der Eigenschaften der

Spülung und der Infiltrationszone, jedoch nicht der Formation sei. Neuerdings vertritt aber *Cagniard* (1956) wieder die Meinung, daß "die Elektrofiltration dort die wichtigste Rolle" spiele. —

Geht man davon aus, daß die durchlässige Schicht, in die die Spülung hineinsickert, für alle Ionen der Spülung gleich durchlässig ist — eine notwendige Voraussetzung für die Entstehung von Strömungspotentialen —, so wird die Ionenbilanz im Bohrloch nicht einseitig beeinflusst: Im Mittel fließt eine gleiche Anzahl von Ionen beider Vorzeichen aus dem Bohrloch in die permeable Formation. Da dann eine gleiche Anzahl von positiven und negativen Ladungen in derselben Richtung mit der gleichen Geschwindigkeit transportiert wird, kann daraus nicht ein Konvektionsstrom resultieren. Wenn auf diese Weise aber in der Spülung kein elektrischer Strom entsteht, so auch keine elektrische Potentialdifferenz im Bohrloch. Eine Überschußladung eines Vorzeichens tritt erst in der freien Flüssigkeit der Kapillaren der porösen Schicht auf, wenn die Bohrlochflüssigkeit in diese einströmt, und dann entsteht ein Strömungspotential zwischen der Bohrlochflüssigkeit und dem Porenwasser in der permeablen Formation. Voraussetzung zur Messung des in diesen Kapillaren entstehenden Strömungspotentials wäre die Einbringung je einer Sonde in das Bohrloch vor der Kapillaren und hinter derselben in der porösen Schicht. Bei der üblichen Bohrlochmessung aber befindet sich eine Sonde in der Spülung vor der porösen Schicht und die andere im Ansaugbecken, so daß man mit dieser Sondenordnung keine Strömungspotentiale direkt messen kann (Fig. 2).

Abb. 2: Schematische Elektrodenanordnung und Potentialverteilung in einem Bohrloch. Bei A Kapillare, durchlässig für Ionen beider Vorzeichen. Bei B Verkleisterungszone als Membran wirkend, die nur für positive Ionen durchlässig ist. Rechts Potentialverteilung im Bohrloch unter ausschließlicher Berücksichtigung eines Strömungspotentials in der Kapillaren bei A und eines Membranpotentials bei B. Elektrostatische Potentialverteilung gestrichelt, dynamische ausgezogen.

Schräg schraffiert: Tonschiefer; punktiert: poröse Schicht; waagerecht schraffiert: Verkleisterungszone; gestrichelt: Bohrlochspülung.



Die für Strömungspotentiale erforderliche Voraussetzung der gleichen Durchlässigkeit des Kapillarsystems der permeablen Schicht für sämtliche Ionen, die oben gemacht wurde, wird in der Natur vielfach nicht realisiert

sein (Wyllie, 1949). In diesem Falle aber, wenn eine selektive Durchlässigkeit gegeben ist, sind Strömungspotentiale nicht definiert und somit nicht meßbar. —

Mounce und Rust (1943), Doll (1948) und Wyllie (1949) diskutieren die in einem Bohrloch und den angrenzenden Formationen entstehende elektrochemische Kette und ihre EMK ("3-link chain emf"), die von folgendem Aufbau ist:

Spülung / Porenwasser in der porösen Schicht / Tonschiefer / Spülung

Nach Wyllie (1951) herrscht bei einer Rotarybohrung der größte Druckgradient in der Infiltrationszone; folglich sei eine Strömungspotentialkomponente, die in den Gesteinen der Formation selbst existiert, im Vergleich hierzu vernachlässigbar gering.

Demnach würden Strömungspotentiale in erster Linie den Potentialsprung an der Grenzfläche Spülung / Porenwasser in der porösen Schicht beeinflussen können. Eine Veränderung dieser Größe hätte unmittelbar Einfluß auf die mit der üblichen Sondenordnung meßbare Potentialverteilung in der Spülung des Bohrloches, da diese den Spannungsabfall in der eben erörterten elektrochemischen Kette darstellt. Und nur auf diese Weise könnte indirekt eine Messung eines Strömungspotentials erfolgen.

Nun haben die Versuche von Wyllie (1951) ergeben, daß in der Infiltrationszone ein Strömungspotential unabhängig von der Mächtigkeit dieser Zone, aber abhängig von der Temperatur und anderen Faktoren entstehen kann. Eine bei der Erfassung der Vorgänge auftretende Schwierigkeit ist jedoch, daß die Kapillarwand nicht ein reiner Nichtleiter ist, sondern gerade hier zufolge der in ihr enthaltenen hydratisierten Tonteilchen eine gute elektrische Leitfähigkeit besitzt. Dadurch wird der Vorgang, der zu einem Strömungspotential führt, wesentlich beeinflußt, so daß etwaige Strömungspotentiale nicht quantitativ exakt erfaßt werden können. Eine Beeinflussung der Potentialverteilung durch ein Strömungspotential im Bereich Spülung / Porenwasser in der porösen Schicht ist also wenig wahrscheinlich, weil die notwendigen Voraussetzungen für die Entstehung eines Strömungspotentials nicht eindeutig erfüllt sind.

Zusammenfassend ergibt sich mithin, daß mit der üblichen Meßanordnung in Bohrlöchern nach dem Rotary-Verfahren reine Strömungspotentiale direkt nicht gemessen werden können. Eventuelle derartige Potentiale können allenfalls indirekt das Meßergebnis beeinflussen, jedoch ist damit praktisch nicht zu rechnen. Vornehmlich kommt die gemessene Potentialverteilung durch elektrochemische Vorgänge, insbesondere Membranpotentiale zustande (Wyllie, 1949), die zu elektromotorischen Kräften führen, welche sogenannte "Eigenpotentialströme" (Doll, 1948) verursachen.

### B. Strömungspotentiale in oberflächennahen Erdschichten

In der geophysikalischen Literatur werden viele Beispiele für solche Anomalien des elektrischen Erdfeldes gebracht, die auf sogenannte "Elektrofiltrationspotentiale" zurückführbar sein sollen. Hierbei handelt es sich meistens um den topographischen Effekt, den man bei der Messung der Eigenpotentialverteilung an der Erdoberfläche in gebirgigem Gelände findet, und der darin besteht, daß die Bergspitzen im Bezug auf die Täler vielfach ein negatives Potential haben. Der hierbei am Hang gemessene Potentialgradient ist etwa von der Größenordnung  $70 \text{ mV} / 100 \text{ m}$  Höhenunterschied; die Äquipotentiallinien entsprechen etwa den Höhengichtlinien. Diese Potentialverteilung soll ihre Ursache in mehr oder weniger rascher gravitativer Infiltration der Niederschlagswasser haben – vornehmlich in meist trockenen Gebieten mit propylitisierten und silifizierten Gesteinen (Militzer, 1953) – , oder durch Störung des hydrostatischen Gleichgewichts infolge des Berges oder durch Bergwerksanlagen (Cagniard, 1956) bedingt sein.

Auch hier ist nun wiederum zu fragen, ob Strömungspotentiale entstehen können, und wenn ja, ob man sie mit der üblichen Anordnung der Sonden messen kann.

In Böden ist die Entstehung von Kapillaren unter anderem von der Lagerung abhängig: je fester diese ist, um so weniger Kapillaren sind vorhanden. Weiter sind sie eine Funktion der Krümelstruktur und damit der chemischen Umsetzungen im Boden auf Grund des Einflusses der Hydratation. Kies und Sand haben die größten Korngrößen, so daß bei diesen die Kapillaren auch die größten Durchmesser haben.

Je nach Art der zur Verfügung stehenden Hohlräume ist auch die Wasserbewegung im Boden sehr unterschiedlich. Böden mit Korngrößen über  $0,2 \text{ mm}$  enthalten kein Kapillarwasser: das Sickerwasser läuft bei derartigen Kiesen und Sanden schnell in die Tiefe ab. Hingegen halten Lehm, Ton und Humus mit den feineren Kapillaren das Wasser lange fest. Außer dieser Bewegung unter dem Einfluß der Schwerkraft ist aber das Aufsteigen des Wassers im Boden durch die Kapillarkräfte und die Oberflächenwirkung der Teilchen von großer Bedeutung. In den günstigsten Fällen bei Korngrößen von etwa  $0,05$  bis  $0,02 \text{ mm}$  beträgt diese Steiggeschwindigkeit des Wassers  $0,5$  bis  $1 \text{ mm} / \text{Minute}$ , die Steighöhe im Durchschnitt etwa  $70$  bis  $80 \text{ cm}$ .

Während also der Boden das Wasser auf großen Flächen in mehr oder weniger gleichmäßiger Verteilung aufnimmt, sammelt sich das Sickerwasser an einzelnen, bevorzugten Stellen wie Klüften im Gestein an, welches selbst nur von geringer Durchlässigkeit – im Vergleich zum Boden – ist (Koehne, 1948).

Mit der üblichen Anordnung der unpolarisierbaren Sonden bei Eigenpo-

tentialmessungen erscheint es somit zunächst nicht ausgeschlossen, Strömungspotentiale in den Kapillaren des Bodens messen zu können. Eine genaue Erörterung der Umstände wird aber erweisen, daß Strömungspotentiale auf diese Weise nicht eindeutig gemessen werden können.

Aus den oben gemachten Ausführungen hinsichtlich der Bodenwasserbewegungen folgt zunächst, daß man nicht allgemein rasche gravitative Infiltration von Niederschlagswassern als Ursache für "elektrokapillare Reaktionen" angeben kann. Diese Schlußfolgerung ist schon deshalb unzutreffend, weil das Wasser der Niederschläge bei sehr porösem Boden oder Gestein tief und schnell ablaufen kann, so daß die größeren Kapillaren in den oberen Schichten wasserfrei werden und nur die feinsten ihr Wasser behalten. Während der Messung in trockenen Gebieten besteht also keine "Brücke" zwischen strömender Flüssigkeit und Sonde, die theoretisch einwandfrei zu erfassen ist, womit Strömungspotentiale nicht direkt meßbar werden. Die aus der unpolarisierbaren Sonde heraussickernde Lösung (nach *Militzer* (1953) z. B. etwa  $60 \text{ mm}^3 / \text{Stunde}$ ) kann nicht in jedem Falle diese Brücke während der kurzen Dauer der Messungen herstellen.

Strömungspotentiale sind an Kapillaren gebunden, wie bereits ausgeführt. Das Grundwasser bewegt sich aber vornehmlich in Klüften und Spalten – wegen des geringeren Widerstandes –, die nicht mehr als Kapillaren allgemein anzusprechen sind (Durchmesser über 1 mm). Auch treten erst in diesen Hohlräumen Strömungsgeschwindigkeiten auf, die Potentialdifferenzen, wie sie beobachtet werden, erklären könnten. – Die im Gegensatz zur abwärts gerichteten Strömung der Sicker- und Sinkwasser im Kapillarsaum auch auftretende Aufwärtsbewegung bewirkt, daß bei eventuellen Strömungspotentialen die Richtung des Potentialgefälles nicht von vorneherein eindeutig festliegt. – Bei weiten Hohlräumen kann ferner noch Luft zirkulieren, so daß dort gleichzeitig Luft und Wasser vorhanden sind. Für derartige Phasengemische sind aber Strömungspotentiale nicht definiert. – Auch folgt aus der unregelmäßigen Struktur der Böden als Gemisch verschiedener Korngrößen gegenüber den im Gegensatz hierzu relativ leicht zu übersehenden Bedingungen bei Laboratoriumsmessungen ein weiterer Unsicherheitsfaktor für die Erfassung von Strömungspotentialen.

Für die Entstehung von Strömungspotentialen in den Kapillaren des Bodens wäre ferner Voraussetzung, daß die Ionenbilanz in dem Bodenwasser ausgeglichen ist, d. h. praktisch keine Ionen der Flüssigkeit zugeführt werden etwa dadurch, daß sie aus der Kapillarwand austreten. Im Falle des Wassers in den Bodenkapillaren ist es aber gerade so, daß das Bodenwasser mit dem Boden reagiert und z. B.  $\text{Ca}^+$ -Ionen in Lösung gehen. Diese Ionenzufuhr beeinflusst ein eventuelles Strömungspotential, so daß dieses – selbst bei hinreichender Meßmethodik – nicht exakt zu ermitteln ist.

Aber auch die Meßmethodik, wie sie bei Eigenpotentialmessungen ange-

wendet wird, ist unabhängig von den bisherigen Einwendungen nicht geeignet, Strömungspotentiale zu messen. Abgesehen davon, daß es praktisch nicht möglich ist, daß sich die beiden unpolarisierbaren Elektroden am Anfang und Ende einer einzigen Kapillaren befinden, denn dafür ist die Struktur des Bodens allgemein viel zu kompliziert, ist es auch mit den Sonden mit einer Aufsetzfläche von einigen 10 cm<sup>2</sup> unmöglich, Strömungspotentiale exakt zu messen. Die irreguläre Struktur und die geometrische Anordnung der Kapillaren von Boden und Gestein verhindern bereits die exakte Messung eines Strömungspotentials.

Zusammenfassend ist aus diesen Erwägungen der Schluß zu ziehen, daß Strömungspotentiale die an Bergen gefundene Verteilung des Eigenpotentials nicht eindeutig zu erklären vermögen. Dieser topographische Effekt muß im wesentlichen seine Ursache darin haben, daß ein Berg eine galvanische Kette bildet (*Chapman und Bartels, 1940*).

### III. Folgerungen für Eigenpotentialmessungen

Die mit der Eigenpotentialmethode in Bohrlöchern und an der Erdoberfläche gewonnenen Ergebnisse sind nur in sehr beschränktem Maße quantitativ interpretierbar. Dies beruht auf den komplexen kausalen Vorgängen, die zu elektromotorischen Kräften im Bereich oberflächennaher Erdschichten führen (*Wilckens, 1955*). Die hier diskutierten elektrokinetischen Prozesse können jedoch nicht die umfassende Rolle spielen, die ihnen in der Literatur als Ursache erheblicher Anomalien in der Potentialverteilung vielfach zugeschrieben werden. Es sind vielmehr in erster Linie die elektrochemischen Vorgänge an statischen Systemen, die auf Grund von Unterschieden in den physikalischen und chemischen Zuständen und Bedingungen eine anomale elektrische Potentialverteilung in dem betrachteten Raum verursachen. Damit wird der Gesamtkomplex "Ursache elektromotorischer Kräfte" reduziert; jedoch verbleibt eine Fülle von Vorgängen, deren Zusammenspiel nach dem derzeitigen Stand der Kenntnisse der Elektrochemie nur schwer quantitativ zu entwirren sein dürfte. Es entfällt also noch die Möglichkeit, im konkreten Fall eine eindeutige Erklärung für das Meßergebnis zu geben, insbesondere hierzu in erster Linie elektrokinetische Vorgänge heranzuziehen.

## Literatur

- [ 1] *Cagniard, L.*: Electricité tellurique in: Handbuch der Physik, Bd. XLVII, S. 432 ff., Berlin, 1956.
- [ 2] *Chapman, S. und Bartels, J.*, Geomagnetism, Vol. I, Oxford 1940.
- [ 3] *Doll, H.G.*: The S. P. Log: Theoretical Analysis and Principles of Interpretation; AIME Techn. Publ. No. 2463, 1948.
- [ 4] *Frütsch, V.*: Grundzüge der angewandten Geoelektrik; Wien, 1949.
- [ 5] *Koehne, W.*: Grundwasserkunde; Stuttgart, 1948.
- [ 6] *Kortüm, G.*: Lehrbuch der Elektrochemie; Weinheim, 1952.
- [ 7] *Militzer, H.*: Die elektrische Eigenpotentialmethode im Erzbergbau; Bergbau-technik, 3. Jg., S. 444 ff., 1953.
- [ 8] *Mounce, W.D. und Rust, W.M.*: Natural Potentials in Well Logging; AIME Techn. Publ. No. 1626, 1943.
- [ 9] *Schmid, G.*: Zur Elektrochemie feinporiger Kapillarsysteme; Z.f.Elektrochem., Bd. 54, S. 424 ff., 1950.
- [10] *Wilckens, F.*: Die Grundlagen der Eigenpotentialmethode; Z. f. Geophysik, Bd. 21, S. 25 ff., 1955.
- [11] *Wyllie, M.R.J.*: A quantitative Analysis of the electrochemical component of the S. P. curve; AIME Trans., Vol. 186, S. 17 ff., 1949.
- [12] *Wyllie, M.R.J.*: An investigation of the electrokinetic component of the self potential curve; AIME Techn. Publ. No. 2940, 1951.