

4. *Über neue Methoden und Apparate zur Messung von Erderschütterungen kleinster Periode;*

(nach gemeinsam mit Hrn. Dr. Franz Weidert ausgeführten Untersuchungen)

von *Leo Grunmach.*

[Aus den Sitzungsber. der Kgl. Akad. der Wissensch. zu Berlin, in erweiterter Form mitgeteilt vom Verfasser.¹⁾]

Vor 23 Jahren habe ich in der Berliner Physikalischen Gesellschaft²⁾ über einige von mir angewandte Versuchsmethoden zur Messung der Stärke und Fortpflanzung kleiner künstlich hervorgerufener periodischer Erderschütterungen, z. B. solcher, die infolge regen Fabrikbetriebes oder bei lebhaftem Straßenverkehr oder durch eine fahrende Lokomotive erzeugt werden, berichtet, von denen nur eine, auf der Gauss-Poggendorffschen Spiegelablesung beruhende, einigermaßen sichere numerische Werte der zu messenden Größen lieferte. Obschon diese Versuche dem damaligen Stande der Seismometrie gemäß mit recht primitiven Mitteln ausgeführt worden waren, boten sie doch den Anlaß, daß mir vor nunmehr drei Jahren seitens der Provinzialverwaltung Schlesiens folgende interessante, für die moderne Bauingenieurwissenschaft wichtige Untersuchung übertragen wurde:

Es sollten die Felsschwingungen gemessen werden, die an der Queistalsperre (bei Marklissa in Schlesien) durch den Absturz größerer Wassermassen hervorgerufen werden.

1) L. Grunmach, Sitzungsber. der Kgl. Akad. der Wissensch. zu Berlin, Gesamtsitzung vom 29. Juli 1909.

2) L. Grunmach, Über Versuche zur Messung kleiner periodischer Erderschütterungen. Verh. der Physik. Gesellsch. zu Berlin 1886. Nr. 8. p. 58—64.

In erster Linie hatte ich in Aussicht genommen, mit Hilfe von speziell für diesen Zweck gebauten seismometrischen Apparaten an einer größeren Anzahl von Punkten der Sperrmauer und des Felsens Kurven aufzunehmen, welche analog den Erdbebendiagrammen die Lage eines bestimmten Boden- und Felsteilchens als Funktion der Zeit angeben. Als wichtigster Teil der Untersuchung war aber die Aufgabe gestellt worden, die Erschütterungen des Felsens auch unmittelbar an derjenigen Stelle des Umlaufstollens zu messen, die von dem durch die Abfallschächte herabstürzenden Wasser direkt getroffen wird, da hier naturgemäß die größten Erschütterungen erwartet werden mußten. Durch diese Forderung wurde aber die Untersuchung zu einer höchst komplizierten und schwierigen, da diese Stelle bei gefülltem Staubecken nicht mehr zugänglich ist, so daß die Apparate im Innern des Felsens wasserdicht eingebaut werden mußten und nur aus der Ferne zu beobachten waren, wofür allein elektrische Methoden in Frage kommen konnten.

Nachdem diese Untersuchungen, die ich gemeinschaftlich mit Hrn. Dr. Franz Weidert ausgeführt habe, vor kurzem zum Abschluß gekommen sind, möge es mir gestattet sein, an dieser Stelle in Kürze über die von uns angewandten Methoden und Apparate zu berichten, da durch sie zum ersten Male die Möglichkeit geboten ist, Bodenerschütterungen kleinster Periode bei sehr geringer Amplitude¹⁾ in exakter Weise zu messen.

Die nach unseren Angaben von Hrn. Mechaniker Paul Stückrath in Friedenau für diese Untersuchung angefertigten Apparate waren:

1. ein *Apparat zur Messung der maximalen Werte der auftretenden Beschleunigungen* in drei zueinander senkrechten Richtungen (*Dreipendelapparat*),
2. ein *Horizontaltapendel* zur Messung der Verschiebungen der Felsteilchen in horizontaler Richtung, und zwar mit *mikrophotographischer Registrierung* für oberirdische Beobachtungen

1) Die gefundenen Perioden der Felserschütterungen betrugen 0,029 bis herunter zu 0,0025 Sek., während die zugehörigen Amplituden zwischen 0,001 und 0,00005 mm schwankten.

und mit *magneto-induktiver Registrierung* für Messungen an unzugänglicher Stelle.

I. Apparat zur Messung der maximalen Werte der auftretenden Beschleunigungen.

Das Prinzip der Meßmethode besteht darin, daß der zu messende maximale Wert der auftretenden Beschleunigungen mit einer meßbar einzustellenden, also bekannten Beschleunigung verglichen wird, und läßt sich durch folgende einfache Betrachtung erläutern.

Greift an einem auf ebener Unterlage ruhenden Körper von der Masse M außer der Schwere noch eine nach oben gerichtete Federkraft F an, so ist die Kraft P_0 , mit der der Körper auf der Unterlage aufliegt,

$$P_0 = Mg - F,$$

wo g die Erdbeschleunigung bedeutet. Wird die Unterlage mit einer Beschleunigung b nach unten bewegt, so ist die Kraft, mit der der Körper dann aufliegt, nur noch

$$P = M(g - b) - F.$$

Wird nun die Beschleunigung b immer größer, so wird die Auflagekraft P immer kleiner, und wenn P gleich Null geworden ist, findet eben noch zwischen dem Körper und seiner Unterlage Kontakt statt, der aber momentan unterbrochen wird, sobald b noch weiter wächst. Diese kritische Beschleunigung

$$b = g - \frac{F}{M}$$

kann durch Veränderung der Federkraft F auf beliebige Werte zwischen Null und der Erdbeschleunigung g eingestellt werden.

Um nun den *Maximalwert* der bei einer auf- und niedergehenden Bewegung der Unterlage auftretenden Beschleunigungen zu messen, stellt man die Feder zunächst auf eine solche Kraft F ein, daß der Körper mit seiner Unterlage sicher in Kontakt bleibt, und vergrößert dann allmählich die Federkraft bis zu dem Momente der Kontaktunterbrechung. Sind die zu messenden Beschleunigungen größer als g , so läßt man die Federkraft nach unten wirken.

Die Einrichtung und Wirkungsweise des Apparates zur Messung der maximalen Beschleunigungen läßt sich am einfachsten an dem einen horizontal liegenden Pendel des in Fig. 1 abgebildeten Dreipendelapparates erläutern. Der die stationäre Masse M tragende Hebel H ist bei A drehbar gelagert und ruht mit der Kugel K auf der plan geschliffenen Fläche des vertikal verstellbaren Ambosses C auf. Der Druck, mit dem die Kontaktkugel des Hebels auf der Unterlage aufliegt, kann in seiner Größe verändert werden durch die größere oder

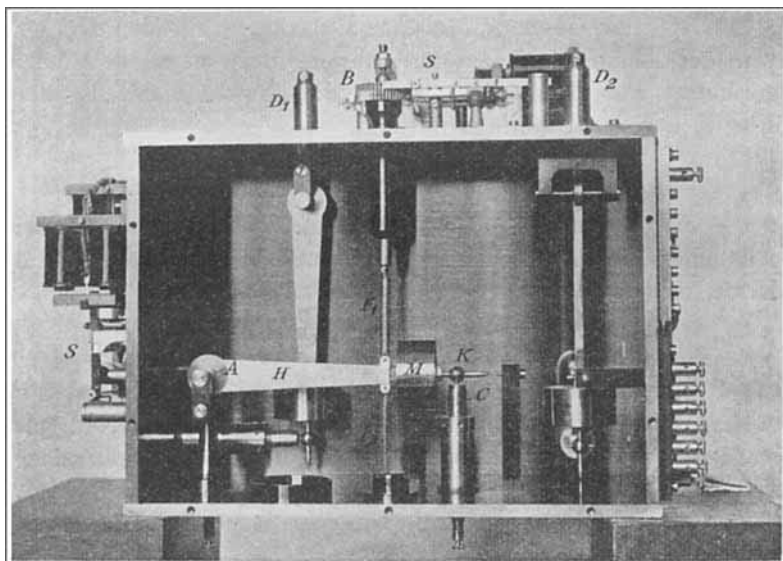


Fig. 1.

geringere Spannung der Federn F_1 bzw. F_2 , von denen die erstere durch die Mikrometerschraube B gespannt werden kann. Die Bewegung der Mikrometerschraube in dem einen oder anderen Sinne erfolgt für jedes der drei Pendel durch je ein Sperrklinkenwerk S , welches auf elektromagnetischem Wege von der oberirdisch gelegenen Beobachtungsstation aus betätigt wird, und dessen jeweilige Stellung an einem dort befindlichen, synchron arbeitenden Anzeigeapparat abgelesen werden kann. Die Reibung der Achse A in ihrem Lager

wird bei diesem horizontal liegenden Pendel dadurch unschädlich gemacht, daß die Feder genau in seinem Schwerpunkt angreift, bei den beiden anderen vertikal hängenden Pendeln dadurch, daß ihr Gewicht durch je eine in den Hülzen D_1 bzw. D_2 befindliche Entlastungsfeder aufgehoben ist. Der Moment der Kontaktunterbrechung zwischen der Kugel K und der ebenen Auflagefläche des Ambosses C wurde in dem etwa 300 m von der Einmauerungsstelle entfernten Laboratorium mittels eines Saitengalvanometers beobachtet, weil dies vor anderen Galvanometern bekanntlich den Vorzug besitzt, momentanen Stromstößen schnell und sicher zu folgen. Zu diesem Zwecke ist der Amboß C von dem Gehäuse isoliert und mit einer Klemmschraube versehen, während die Kontaktkugel

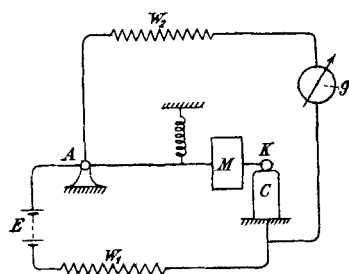


Fig. 2.

durch den Hebel und die Federn mit einer am Gehäuse befindlichen Klemme in Verbindung steht. Zur Messung wird nun an jene beiden Klemmen, wie aus Fig. 2 ersichtlich, einerseits die Batterie E mit einem Vorschaltwiderstand W_1 angelegt, dessen Größe so zu wählen ist, daß die Klemmenspannung am Erschütterungsapparat keine zu große wird, und andererseits, also diesem Stromkreis parallel, das Einthovensche Saitengalvanometer g in der kleineren Edelmanschen Form.¹⁾

Solange nun die Kontaktkugel auf ihrer Unterlage aufliegt, geht der Strom der Batterie E vorzugsweise durch den äußerst kleinen Widerstand des Hebels und Ambosses, während durch den Galvanometerkreis infolge des sehr hoch gewählten Vorschaltwiderstandes W_2 kein meßbarer Strom hindurchgeht. Wird aber der Kontakt, wenn auch nur auf ganz kurze Zeit, unterbrochen, so geht der ganze Strom der Batterie E durch das Galvanometer und lenkt dessen Faden während der Dauer der Kontaktunterbrechung ab.

Als geeignetstes Material für die Kontaktflächen erwies

1) M. Edelmann, Physik. Zeitschr. 7. p. 115. 1906.

sich schließlich, nachdem längere Versuche mit verschiedenen Platin-Iridium-Legierungen, sowie mit Spiegelmetall und Stahl weniger günstige Resultate ergeben hatten, eine von W. C. Heräus in Hanau hergestellte Legierung von 50 Proz. Osmium mit 50 Proz. Iridium. Dieser Kontakt gewährleistet infolge der außerordentlichen Härte des Osmium-Iridiums eine vollkommene Unveränderlichkeit gegen mechanische Einwirkungen und hat sich auch in bezug auf seine Beständigkeit gegen atmosphärische Einflüsse auf das glänzendste bewährt.

Die *Theorie des Apparates* läßt sich im Anschluß an die obigen Betrachtungen folgendermaßen entwickeln: Es sei l die Entfernung des Schwingungsmittelpunktes, L die des Kontaktpunktes vom Drehungspunkt A des Pendels; ferner sei J das Trägheitsmoment des Pendels in bezug auf die durch A gehende Achse.

Solange keine Erschütterungen stattfinden, sei wieder die Kraft, mit der die Kontaktkugel aufliegt, gleich P_0 . Bei dem horizontal liegenden Pendel wird diese durch die gemeinschaftliche Wirkung von Federkraft und Pendelgewicht hervorgerufen, bei den vertikal hängenden Pendeln durch die Wirkung der Federkraft allein. Bewegt sich nun der Boden und mit ihm der ganze Apparat mit der Beschleunigung b in der Richtung von Kontaktkugel nach Amboß, so ergibt sich nach einfacher Betrachtung die Auflagekraft zu

$$P = P_0 - \frac{Jb}{lL},$$

also wenn — bei der Kontaktunterbrechung — P gleich Null wird,

$$b = \frac{lL}{J} P_0.$$

Da l , L und J nur von den Dimensionen des Pendels abhängen, kann man auch schreiben

$$b = C P_0,$$

wobei

$$C = \frac{lL}{J}$$

die *Konstante* des Instrumentes bedeutet.

Die Auflagekraft P_0 wurde bei jedem der drei Pendel für mehrere Stellungen der Mikrometerschraube mittels einer auf den Apparat zu diesem Zweck aufzuschraubenden Wagevorrichtung unmittelbar experimentell bestimmt, um so Eichungskurven für die einzelnen Meßfedern zu gewinnen. In welcher Weise dies geschieht, ist aus Fig. 3 ersichtlich, die die Wagevorrichtung in Verbindung mit dem für unsere ersten

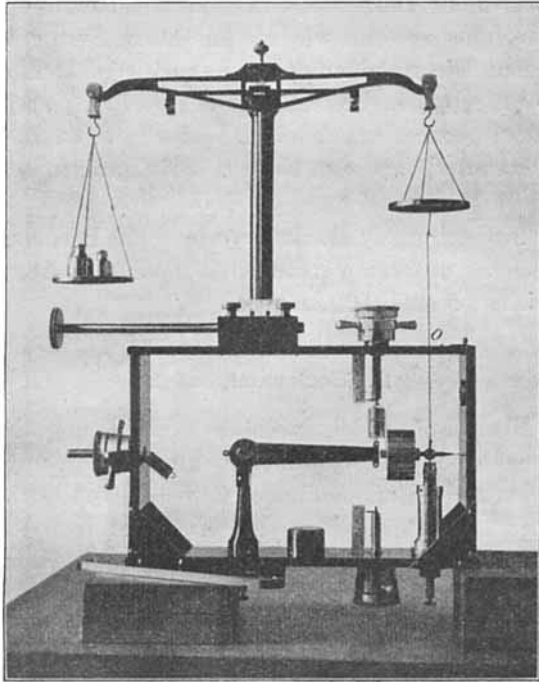


Fig. 3.

Vorversuche gebauten einfachen Pendelapparat darstellt. An der einen Wageschale ist nämlich ein Draht befestigt, der durch die Öffnung O hindurchgeht und an seinem unteren Ende eine kleine Gabel zur Aufnahme eines genau mitten durch die Kontaktkugel gehenden Stahlstiftes trägt. Durch Auflegen von Normalgewichten auf die andere Wageschale läßt sich dann bei horizontaler Lage des Hebels die Kraft P_0 direkt

bestimmen. Um auch bei vertikaler Lage des Hebels für die verschiedenen Federn und deren verschiedene Spannungen die Kräfte P_0 zu erhalten, muß man von den bei horizontaler Lage des Hebels gemessenen Auflagekräften noch die Kraft abziehen, mit der die Kontaktkugel in horizontaler Lage des Hebels vermöge seines Gewichtes allein auf dem Amboß aufliegt, da bei vertikaler Lage des Hebels die auf ihn wirkende Schwerkraft durch die Achse A hindurchgeht, ein Drehmoment von ihr also nicht ausgeübt wird. Ist demnach die Konstante des Instrumentes sowohl wie P_0 im C.G.S.-System gemessen, so erhält man die Beschleunigung in cm/sec^2 . Den maximalen Wert der auftretenden Beschleunigungen erhält man also, wenn man in der oben beschriebenen Weise die Kraft der Meßfeder und damit P_0 bis zum Eintritt der Kontaktunterbrechung ändert.

Die beobachteten Maximalwerte der Beschleunigungen schwankten bei unseren Versuchen je nach den Abflußverhältnissen zwischen 5 und 130 cm/sec^2 .

II. Horizontalpendel.

Das Horizontalpendel, welches zur Messung der wahren Bodenbewegungen in horizontaler Richtung dient, unterscheidet sich von den zu seismometrischen Zwecken gebräuchlichen im wesentlichen durch die Art der Aufzeichnung der Pendelschwingungen. Während nämlich bei den zur Registrierung von Erdbeben gebräuchlichen Seismographen wegen der längeren Perioden der Erdbodenschwingungen, die etwa eine Sekunde bis zu einer Minute und darüber betragen, die Aufzeichnung der Wellen mittels Hebelübertragung und Schreibstift auch für die stärksten Vergrößerungen ausreicht, würde bei den durch den Wasserabsturz hervorgerufenen Felterschütterungen von sehr kurzer Periode (0,029 bis herunter zu 0,0025 Sek.) diese Registrierungsart wegen der Trägheit und Elastizität des Hebelwerkes vollkommen versagen. Für solche schnellen Schwingungen käme deshalb in erster Linie eine *optische* Methode in Betracht. Die gewöhnlich angewandte *photographische* Registriermethode ist jedoch in der bei den Seismographen gebräuchlichen Form, bei der ein Lichtstrahl durch einen am

Pendel befestigten Spiegel abgelenkt wird, nur bei schwachen und mittleren Vergrößerungen mit Vorteil zu verwenden, während zur Erzielung stärkerer (z. B. 1000 facher Vergrößerungen) ein ungewöhnlich großer Registrierabstand erforderlich wäre, wodurch die Schärfe der Bilder beeinträchtigt würde, ganz abgesehen davon, daß ein so großer Abstand zwischen Spiegel und lichtempfindlichem Papier bei ähnlichen Untersuchungen in der Praxis kaum zu Gebote stehen dürfte. Zwar kann man unter anderem den erforderlichen Registrierabstand dadurch verkleinern, daß man die Drehungen des Pendels durch einen Hebelmechanismus schon in vergrößertem Maße auf den Spiegel selbst überträgt. In diesem Falle wären jedoch wieder bewegliche Zwischenglieder notwendig, die, wie vorhin erwähnt, die Sicherheit der Registrierung so schneller Schwingungen in hohem Maße gefährden.

Das Horizontalpendel wurde deshalb zunächst mit *mikrophotographischer* Registrierung ausgerüstet, dergestalt, daß die Bewegungen einer an der stationären Masse angebrachten Marke durch ein Projektionsmikroskop in jeder beliebigen Vergrößerung auf dem mit konstanter Geschwindigkeit bewegten lichtempfindlichen Papier aufgezeichnet werden können.

Für die Messungen an den unterirdisch gelegenen unzugänglichen Stellen im Innern des Felsens kam zur Anwendung eine *magneto-induktive* Registrier- und Messungsmethode, indem die Induktionsströme, die durch die Relativbewegungen der stationären Masse gegen den Erdboden in einer in einem starken Magnetfeld befindlichen Spule erregt werden, durch ein Kabel nach oben geleitet und hier mit Hilfe eines Saitengalvanometers aufgezeichnet wurden. Diese Induktionsströme liefern unmittelbar nur die *Geschwindigkeitskurve*, aus der in der später zu beschreibenden Weise die Größe der Bewegung selbst abgeleitet wird.

Um die nötigen Untersuchungen über die Brauchbarkeit sowohl der mikrophotographischen wie der magneto-induktiven Registriermethode an einem und demselben Pendel anstellen zu können, wurde das Horizontalpendel deshalb zunächst so ausgeführt, daß die Registrierung sowohl auf dem einen wie auf dem anderen Wege erfolgen konnte.

Figg. 4 und 5 stellen das Instrument mit *mikrophotographischer Registrierung* von der Seite und von vorn gesehen

Fig. 4.

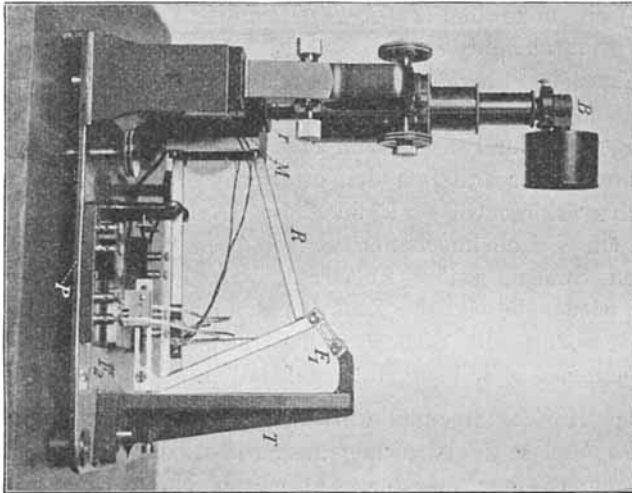
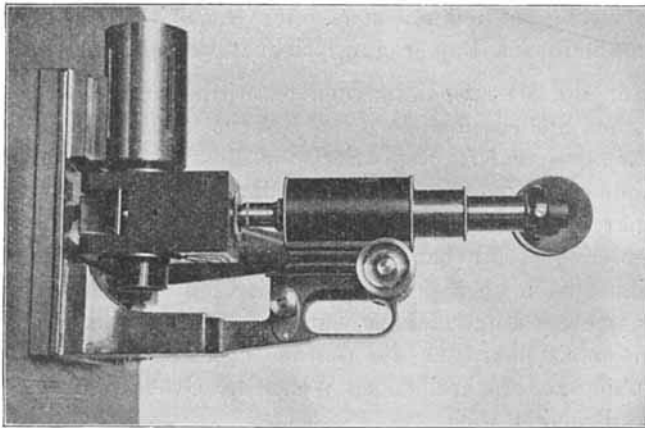


Fig. 5.



dar. An einer mittels Libelle und Stellschrauben¹⁾ nivellierbaren versteiften Grundplatte *P* ist der solide Träger *T* für

1) Die in der Figur sichtbaren Stellschrauben kamen nur bei den Vorversuchen im Laboratorium zur Anwendung; bei den eigentlichen Versuchen war die Grundplatte wie auf p. 964 angegeben, durch drei starke Bolzen mit dem Boden des Eisenkastens verschraubt.

das Horizontalpendel aufgeschraubt. An diesem Träger ist mittels der beiden Blattfedern F_1, F_2 der dreieckartige Rahmen R aufgehängt, der an seinem vorderen Ende die etwa 2 kg schwere parallelepipedische stationäre Masse M trägt, so daß diese in einer nahezu horizontalen Ebene frei hin- und herschwingen kann. Zur Herstellung einer geeigneten Schwingungsdauer des Horizontalpendels läßt sich der untere Drehpunkt desselben verlegen und damit die Neigung seiner Drehungsachse verändern. Über die Herstellung der erforderlichen Dämpfung vgl. später p. 964.

Die stationäre Masse M ist vertikal der Länge nach durchbohrt. Am oberen Ende der Durchbohrung befindet sich in einem aufschraubbaren Ring r die zu projizierende Marke, bestehend aus einem zwischen zwei Deckgläschen mittels Kanadabalsam eingekitteten 0,015 mm dicken Silberdraht. Daß die Marke nicht im Schwerpunkt der stationären Masse angebracht ist, geschah aus konstruktiven Gründen, nämlich, um das ganze Instrument recht eng zusammenbauen zu können. Diese Anordnung ist hier zulässig, da keine Reibungs- oder Trägheitskräfte eines Schreibhebelwerkes an der Masse angreifen, die diese in schlingende Bewegung bringen könnten. Die Beleuchtung der Marke erfolgt in der Art, daß die auf einen im unteren Teil der stationären Masse befindlichen geneigten Spiegel horizontal auffallenden Strahlen einer Bogenlampe senkrecht nach oben reflektiert und durch ein als Hilfskondensor dienendes Mikroskopobjektiv in der Objektebene gesammelt werden.

Zur Projektion der Marke dient das auf einen Messingklotz N aufgeschraubte Mikroskopoberteil des Zeißschen mikrophotographischen Stativs I, auf welches das Bildumkehrprisma B aufgesetzt ist, um das in vertikaler Richtung aus dem Mikroskop austretende Lichtbündel in horizontaler Richtung zum Registrierapparat zu leiten. Durch passende Wahl des Mikroskopsystems, des Projektionsokulars, sowie des Projektionsabstandes läßt sich die Vergrößerung auf jede beliebige Zahl bringen. Verwendet man an Stelle der Projektionsokulare die stärkeren Kompensationsokulare, so läßt sich der für eine bestimmte Vergrößerung erforderliche Projektionsabstand noch außerordentlich reduzieren. So sind z. B. zur Erzielung einer

1000fachen Vergrößerung mit Apochromat $f = 4$ mm bei Kompensationsokular 12 nur etwa 33 cm Abstand zwischen Okular und lichtempfindlichem Papier erforderlich. Man ersieht hieraus, wie sehr man den Registrierabstand bei Anwendung mikro-photographischer Registrierung verkürzen kann.

Die Registrierung der auf diese Weise vergrößerten Bewegung der Marke erfolgte mittels eines Edelmannschen Registrierapparates¹⁾ mit Uhrwerksantrieb, den wir für unsere Zwecke derart umbauen ließen, daß die Registrierung auf Papierbändern bis zu 20 m Länge erfolgen konnte.

Die Zeitmarkierung erfolgte durch den zwischen Magnesiumspitzen überspringenden elektrischen Funken eines Induktors mit parallel geschalteter Leydener Flasche unter Vermittlung eines Pendels, das auf eine Schwingungsdauer von genau 0,2 Sek. reguliert war und bei jeder Schwingung momentan einen im Primärkreis des Induktors liegenden Quecksilberkontakt schloß.

Daß sich in vielen Fällen die Anwendung dieser mikro-photographischen Registriermethode mutatis mutandis auch für die Zwecke der praktischen Seismometrie sehr wohl eignet, wird an anderer Stelle ausführlicher erörtert werden. Hier sei nur hervorgehoben, daß man dann bei Verwendung der üblichen Registriertrommeln als Lichtzeiger an Stelle des dunklen Bildes der Marke auf hellem Grund das Bild eines beleuchteten Punktes auf dunklem Grund benutzt, weil der Papierersparnis halber hier die Kurven meist in spiralförmigen Linien auf der Registriertrommel verzeichnet werden.

Abgesehen von den Vorzügen, die die mikrophotographische Registriermethode vor den üblichen photographischen besitzt, nämlich die Möglichkeit, auf leichte Weise den Registrierabstand zu verkürzen und die stärksten Vergrößerungen zuzulassen, hat sie auch vor der mechanischen Registriermethode, der sie übrigens bezüglich der Schärfe der Kurven nahekommt, den nicht zu unterschätzenden Vorteil, daß, wie bei allen optischen Registriermethoden, wegen des Wegfalls jeglicher Reibungs- und Trägheitswiderstände auch für starke Vergrößerungen die stationäre Masse des Seismographen sehr

1) M. Edelmann, Physik. Zeitschr. 7. p. 115. 1906.

klein gewählt werden darf, und daß man bei einem und demselben Instrument durch Auswechselung des projizierenden Objektivs leicht und rasch von einer Vergrößerung zur andern übergehen kann.

Um nun aber auch außer dieser mikrophotographischen Registrierung die eingangs erwähnte *elektrische Registrierung aus der Ferne* zu ermöglichen, ist die Herstellung eines künstlichen magnetischen Feldes erforderlich, innerhalb dessen das Horizontalpendel, an dessen stationärer Masse zu diesem Zwecke zwei Induktionsspulen angebracht sind, seine Schwin-

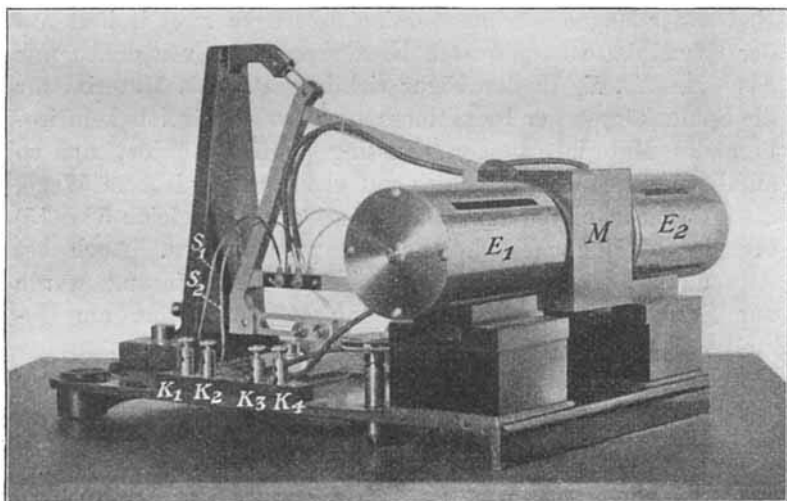


Fig. 6.

gungen ausführt. Diese Induktionsspulen sind konaxial an den beiden Seitenflächen der stationären Masse so angeschraubt, daß ihre Achsen parallel zur Schwingungsrichtung des Pendels liegen und durch dessen Schwingungsmittelpunkt hindurchgehen. Die oben beschriebene durchbohrte stationäre Masse wird jetzt durch eine massive parallelepipedische ersetzt (Fig. 6).

Die Enden der Wicklungen der Induktionsspulen stehen unter Vermittelung je zweier schmaler, nur 0,02 mm dicker Silberstreifen S_1 und S_2 , die in unmittelbarer Nähe der Drehungsachse angebracht sind, mit je einem auf der Grundplatte iso-

liert aufgesetzten Klemmenpaar in Verbindung, von denen in der Figur nur das eine Paar K_1, K_2 sichtbar ist.

Diese an der stationären Masse befestigten beiden Induktionsspulen schwingen frei mit sehr geringem Zwischenraum in dem radial verlaufenden Feld je eines der aus bestem schwedischen Schmiedeeisen gefertigten Elektromagnete E_1, E_2 (Topfmagnete), die nach Entfernung des Projektionsmikroskops und seines Fußes N symmetrisch zu beiden Seiten der stationären Masse angebracht sind. Um eine gute Ventilation der von den Eisenzylindern umschlossenen Erregungsspulen zu erzielen, sind in diese je vier Längsschlitzte eingefräst. Die Enden der Magnetisierungsspiralen führen zu zwei isoliert auf der Grundplatte aufgesetzten Klemmenpaaren, von denen nur das eine K_3, K_4 in der Figur sichtbar ist. Als Material für die Spulenkörper der Induktionsspulen ist absichtlich kein isolierendes Material, sondern Messing gewählt worden, um so auf bequemste Weise, nämlich auf elektromagnetischem Wege, die erforderliche Dämpfung (Dämpfungsverhältnis gleich 5 bis 15) für die Schwingungen des Pendels zu erreichen. Auch bei Anwendung der mikrographischen Registrierung wurde zur Erzielung passender Dämpfung stets der eine am Gestell verbleibende Elektromagnet erregt.

Die Aufzeichnung der Ströme, die infolge der Bewegung der mit dem Felsen in starrer Verbindung stehenden Elektromagnete gegen die von der stationären Masse getragenen Induktionsspulen in diesen induziert werden, erfolgte mittels eines Elektromagnet-Saitengalvanometers, dessen Platinfaden mit Rücksicht auf die Kürze der Perioden der zu registrierenden Schwingungen auf eine Eigenschwingungsdauer von etwa 0,0015 Sek. eingestellt war.

Für die Untersuchung der Erschütterungen des Felsens im Umlaufstollen waren der Dreipendelapparat sowie das Horizontalpendel mit magneto-induktiver Registrierung in einem gußeisernen, wasserdicht verschließbaren Kasten nach ihrer Justierung unverrückbar angeschraubt und durch ein 16adriges Kabel mit der etwa 300 m entfernten, auf der anderen Seite der Talsperre gelegenen Beobachtungsstation verbunden. Der Kasten war $1\frac{1}{2}$ m hinter der Wand des Umlaufstollens in den Fels auf das sorgfältigste allseitig einbetoniert, so daß Apparate

und Fels ein einheitlich zusammenhängendes starres Ganzes bildeten. Die Lage des Kastens im Felsen ist aus der in Fig. 7 wiedergegebenen Blitzlichtaufnahme zu erkennen, die den Kasten nach dem Einbau und der Justierung der Instrumente vor dem endgültigen Aufschrauben des Deckels dar-

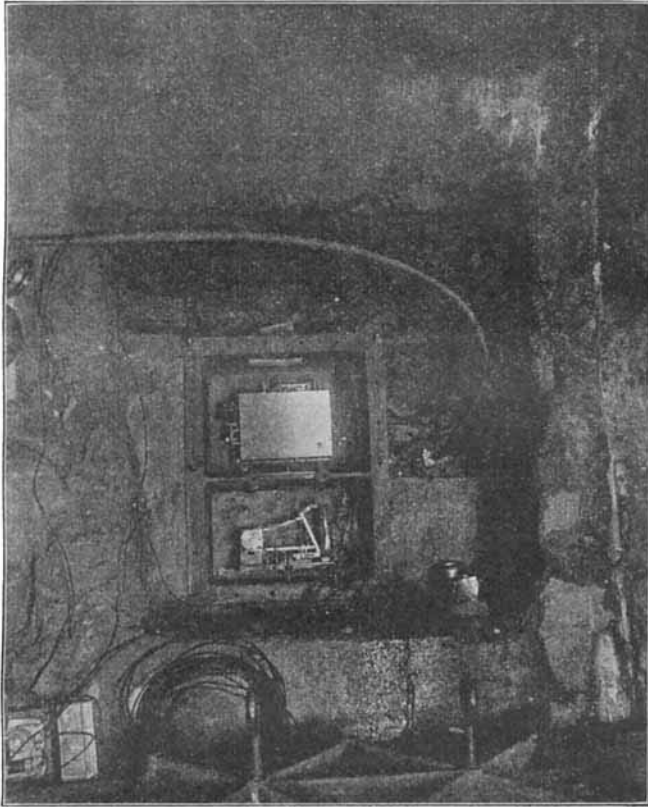


Fig. 7.

stellt. Im oberen Teile sieht man den Dreipendelapparat mit seinem abgeschlossenen Gehäuse, im unteren Teil das Horizontalpendel. Der Deckel selbst ist in der Photographie vorn vor der Höhlung auf dem Gerüst liegend sichtbar. Auf der rechten Seite sieht man die Einführung des Kabels in den Kasten.

Theorie der magneto-induktiven Registriermethode. Bei der Bewegung der Induktionsspulen im magnetischen Feld wird in ihnen eine elektromotorische Kraft induziert, die in jedem Augenblick der Relativgeschwindigkeit des Bodens gegen die Mitte der Spule proportional ist. Unter der Voraussetzung, daß die Eigenperiode der Saite des Saitengalvanometers gegenüber der der zu messenden Schwingungen zu vernachlässigen ist, das Saitengalvanometer also genau den Momentanwert des induzierten elektrischen Stromes verzeichnet, sowie unter der weiteren für unser Instrument fast genau zutreffenden Voraussetzung, daß die Spulennachse durch den Schwingungsmittelpunkt des Horizontalpendels geht, gestaltet sich die Berechnung der registrierten Kurven in der Hauptsache folgendermaßen. Es bedeuten:

- t die Zeit in Sekunden,
- s die Ablenkung eines Bodenteilchens aus seiner Ruhelage zur Zeit t , ausgedrückt in Millimetern,
- α den zu registrierenden Galvanometeraussschlag in Millimetern,
- i die diesem Ausschlag entsprechende Stromstärke in Ampere,
- c die Galvanometerkonstante, d. h. die Stromstärke in Ampere, die im Diagramm einer Ordinate von 1 mm entspricht,
- W den Widerstand des aus Induktionsspule, Leitung und Galvanometer gebildeten Stromkreises,
- E den Momentanwert der durch die Bodenbewegungen in den Windungen der Induktionsspule induzierten elektromotorischen Kraft,
- N die Windungszahl der Induktionsspule,
- l die Länge einer beliebigen Windung der Induktionsspule,
- H die Feldstärke des Elektromagneten an dem Orte dieser Windung.

Da bei unserer Anordnung das Feld der Elektromagnete radial verläuft, also die Feldstärke von innen nach außen in konzentrischen Schichten umgekehrt proportional dem Durchmesser derselben abnimmt, und da andererseits die Länge einer Windung in demselben Verhältnis von innen nach außen zunimmt, so ersieht man leicht, daß bei einer bestimmten Erregerstromstärke für jeden Punkt des Feldes das Produkt $H \cdot l$ denselben Wert besitzt. Die Bestimmung des Wertes $H \cdot l$ in Funktion der Erregerstromstärke erfolgte mit Hilfe eines ballistischen Galvanometers und einer besonders gestalteten Induktionsspirale.

Ist nun zur Zeit t die Relativgeschwindigkeit eines Fels-
teilchens gleich ds/dt in mm pro Sekunde, also in cm pro
Sekunde gleich $ds/dt \cdot 10^{-1}$, so wird in diesem Moment in den
 N Windungen der Induktionsspule eine elektromotorische Kraft
induziert von der Größe

$$E = H l N \frac{ds}{dt} 10^{-1} \text{ (C.G.S.)},$$

oder in Volt gemessen von

$$E = H l N \frac{ds}{dt} 10^{-9} \text{ Volt}.$$

Die das Galvanometer durchfließende Stromstärke i hat
also den Momentanwert

$$i = \frac{H l N}{W} \frac{ds}{dt} 10^{-9} \text{ Amp.}$$

Da nun $i = c \alpha$ ist, so folgt für den Galvanometeraus-
schlag α zur Zeit t

$$\alpha = \frac{H l N}{W c} \frac{ds}{dt} 10^{-9}.$$

Hieraus ergibt sich

$$ds = \frac{W c \alpha}{H l N} dt 10^9$$

und durch Integration

$$s = \frac{W c}{H l N} 10^9 \int_0^t \alpha dt.$$

Nun ist aber $\int_0^t \alpha dt$ nichts anderes als die Fläche F der vom
Saitengalvanometer registrierten Kurve in Quadratmillimetern,
die leicht durch Planimetrierung bestimmt werden kann, zur
Zeit t . Es folgt also schließlich für die Größe der Boden-
verschiebungen

$$s = \frac{W c}{H l N} 10^9 F.$$

Rechnet man W in Ohm, c in Amp./mm, t in Sek., $H \cdot l$ in
C.G.S.-Einheiten, so ergibt sich s in mm.

Wesentlich einfacher gestaltet sich natürlich die *rech-
nerische Auswertung reiner Sinusschwingungen* — wie sie sich
aus den bei unseren Versuchen an der Talsperre gewonnenen
Diagrammen in der Regel ergeben haben —, weil dann auch

das Saitengalvanometer eine Sinusschwingung aufzeichnet, bei der allein die Amplitude und die Periode ausgemessen zu werden braucht, während ein Planimetrieren überflüssig wird. Für eine Sinusschwingung gilt bekanntlich die Beziehung

$$s = s_0 \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right).$$

Hierin bedeuten s die Ausweichung eines Felsteilchens zur Zeit t , s_0 seine Amplitude und T die in Sekunden gemessene Periode der Felsschwingungen. Durch Einführung dieses Wertes von s in die Gleichung auf voriger Seite ergibt sich

$$s_0 \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) = \frac{Wc}{HlN} 10^9 \int_0^t \alpha dt$$

und durch Differentiation

$$\alpha = \frac{HlN}{Wc 10^9} s_0 \frac{2\pi}{T} \cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right).$$

Die *größten* numerischen Werte α_0 des Galvanometerausschlages treten auf zu den Zeiten, für die

$$\cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right) = \pm 1$$

ist. Dann wird

$$\alpha_0 = \frac{HlN}{Wc 10^9} s_0 \frac{2\pi}{T},$$

und hieraus folgt schließlich

$$s_0 = \frac{Wc}{HlN} \frac{T}{2\pi} 10^9 \alpha_0.$$

Ist die Periodenzahl der zu messenden Schwingungen, wie dies tatsächlich bei unseren Versuchen der Fall war, so groß, daß sie sich der Eigenperiodenzahl des Galvanometerfadens nähert, oder daß Kapazität und Selbstinduktion in den Leitungen und Induktionsspulen nicht mehr vernachlässigt werden dürfen, dann ist diese Endformel für s_0 nicht mehr streng richtig, sondern bedarf einer Korrektur, deren exakte Anbringung erhebliche rechnerische und experimentelle Schwierigkeiten bereiten würde, wenn die zu messenden Felsbewegungen eine ganz beliebige unregelmäßige Schwingungsform hätten. Da nun aber, wie bereits erwähnt, die Schwingungen des Felsens in der Regel sinusförmige sind (wenn auch manchmal die Schwingungsform

auf den ersten Blick nicht als eine sinusoidale erscheint, so rührt dies, wie die nähere Betrachtung zeigt, nur daher, daß mehrere sinusförmige Schwingungen übereinander gelagert sind), so läßt sich diese Korrektur in sehr einfacher Weise berücksichtigen. An Stelle des Ohmschen Widerstandes W ist nämlich dann in der obigen Ableitung der von der Periode T der schnellen Schwingungen abhängige Wechselstromwiderstand W' des Stromkreises zu setzen, durch dessen Einführung Selbstinduktion und Kapazität berücksichtigt werden.

Ferner wird bei sehr schnellen Felsschwingungen der Galvanometerfaden nicht mehr den Momentanwert der Stromstärke anzeigen, sondern einen größeren oder kleineren, je nachdem die Periode der zu messenden Schwingungen mit der Eigenperiode des Galvanometerfadens mehr oder weniger übereinstimmt. Die dem Faden durch die induzierten Wechselströme aufgezwungenen Sinusschwingungen erscheinen also je nach der Periode T in ihrer Amplitude vergrößert oder verkleinert. Dies ist aber im Effekt dasselbe, als ob das Galvanometer den Strömen unmittelbar folgte, jedoch eine andere Konstante c' besäße. c' ist also dann ebenso wie W' von der Periode T der Felsschwingungen abhängig, und in der Formel für s_0 tritt an Stelle von $W \cdot c$ nunmehr das Produkt $W' \cdot c'$, dessen Wert auf experimentellem Wege in folgender Weise direkt bestimmt wurde.

Schaltet man eine Wechselspannung vom Effektivwert e , deren Periode bekannt ist, auf den aus Induktionsspulen des Horizontalpendels, Leitung und Galvanometer gebildeten Stromkreis, so ist der Effektivwert des das Saitengalvanometer dann durchfließenden Stromes

$$i = \frac{e}{W'}.$$

Ferner ist nunmehr

$$i = c' \cdot \alpha,$$

wobei aber jetzt in analoger Weise unter α der Effektivwert der Ordinate der unter diesen Umständen durch den Galvanometerfaden aufgezeichneten Sinuslinie zu verstehen ist. Durch Elimination von i aus diesen beiden Gleichungen folgt also das gesuchte Produkt

$$W' c' = \frac{e}{\alpha}.$$

Während nun der Effektivwert e der Wechselspannung mittels eines Wechselstromvoltmeters direkt abgelesen werden kann, läßt sich aus der vom Galvanometerfaden aufgezeichneten Sinuslinie der Effektivwert α nicht unmittelbar entnehmen, wohl aber der Maximalwert α_0 . Deshalb ist es einfacher, anstatt der Effektivwerte e und α die zu ihnen in konstantem Verhältnis ($\sqrt{2}$) stehenden entsprechenden Maximalwerte e_0 und α_0 einzuführen. Alsdann geht die letzte Gleichung über in

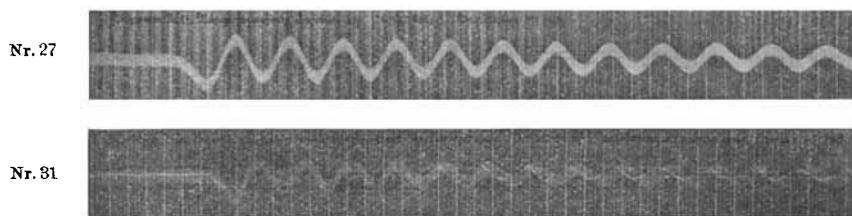
$$W' c' = \frac{e_0}{\alpha_0} = \frac{e \sqrt{2}}{\alpha_0}.$$

Zur experimentellen Bestimmung dieses Produktes $W' c'$ in Abhängigkeit von der Periode T diente eine durch einen Elektromotor angetriebene Wechselstromsirene. Die Periode T der von ihr gelieferten Ströme konnte innerhalb weiter Grenzen durch Verändern der Tourenzahl des Motors auf eine bestimmte Größe eingestellt und die an ihren Polklemmen mittels eines Elektrodynamometers gemessene Spannung durch Abzweigen so unterteilt werden, daß sie der Größenordnung nach mit der von den Felsschwingungen in den Induktionsspulen des Horizontalpendels induzierten Wechselspannungen übereinstimmte. Die so unterteilten Wechselströme von der Spannung e wurden durch die Kabelleitung und die Induktionsspulen des Horizontalpendels nach dem Saitengalvanometer geleitet und von diesem in bekannter Weise registriert. Da gleichzeitig mittels des Pendelunterbrechers eine Zeitmarkierung stattfand, konnten aus den so gewonnenen Diagrammen nicht nur direkt die Amplituden α_0 , sondern auch die jeweiligen Perioden T der angewandten Wechselströme entnommen werden.

Durch Variieren der Wechselstromperiode T ließ sich also eine Kurve für die Abhängigkeit des in der Endformel für s_0 vorkommenden Produktes $W' c'$ von der Periode T des Wechselstromes, also auch von der der Felsschwingungen aufstellen.

Zum Schlusse mögen der Anschaulichkeit wegen aus der großen Anzahl der bei den Versuchen gewonnenen Diagramme, deren eingehende Diskussion an anderer Stelle erfolgen wird, hier nur vier reproduziert werden: Die ersten beiden sind bei den Vorversuchen im Physikalischen Institut der Technischen Hochschule erhalten worden; hierbei war das Horizontalpendel

auf einem starken Tische aufgestellt, der auf einem isoliert fundierten Steinpfeiler ruhte. Diagramm Nr. 27 (Fig. 8) stellt die mittels der *mikrophotographischen* Registriermethode aufgenommenen Erschütterungen des Tisches dar, die dadurch künstlich hervorgerufen wurden, daß gegen die Tischkante mit dem Finger ein ganz leiser Stoß in horizontaler Richtung ausgeführt wurde; auf Diagramm Nr. 31 (Fig. 8) ist dieselbe Erschütterung *gleichzeitig* sowohl mittels der *mikrophotographischen*, wie mittels der *magneto-induktiven* Methode auf demselben

Fig. 8 ($\frac{1}{4}$ nat. Größe).Fig. 9 ($\frac{3}{4}$ nat. Größe).

Papierband aufgezeichnet. Da die nach der magneto-induktiven Methode aufgezeichnete Kurve die Geschwindigkeit der Bewegung darstellt, eilt sie der anderen Kurve, wie aus der Figur deutlich ersichtlich, um eine Viertelperiode voraus. Die Registriergeschwindigkeit sowie die Vergrößerung der auf mikrophotographischem Wege gewonnenen Kurven sind auf beiden in $\frac{1}{4}$ natürlicher Größe reproduzierten Diagrammen angegeben. Fig. 9 gibt in $\frac{3}{4}$ natürlicher Größe ein Bild von zwei an der Talsperre bei verschiedenen Abflußverhältnissen gewonnenen

Diagrammen, und zwar stellt Diagramm Nr. 151 eine Fels-schwingung von der Periode $T = 0,008$ Sek. und der Amplitude $s_0 = 0,00045$ mm und Diagramm Nr. 157 eine solche von der Periode $T = 0,0290$ Sek. und der Amplitude $s_0 = 0,0019$ mm dar. Die schwarzen Querstreifen sind die vom 0,2-Sekundenpendel verzeichneten Zeitmarken.

Eine eingehendere Diskussion der erhaltenen Kurven wird erst später bei der Veröffentlichung des gesamten Beobachtungsmaterials an anderer Stelle gegeben werden, wo auch genauere Angaben über alle Einzelheiten der Messungen gemacht werden sollen.

Hier möge vorläufig nur mitgeteilt werden, daß es sich bei den durch den Wasserabsturz hervorgerufenen Erschütterungen nicht um aufgezwungene, sondern im wesentlichen um *freie elastische Schwingungen* des Felsmassivs handelt, die durch den Aufprall des Wassers ausgelöst werden. Beobachtet wurden Schwingungen von zehn verschiedenen Perioden, die häufig übereinander gelagert waren und bisweilen Schwebungen bildeten, und von denen je nach der Art des Wasserabflusses bald die einen, bald die anderen mehr oder weniger hervortraten.

Die Anwendbarkeit unserer Methoden auf Probleme der eigentlichen Seismometrie¹⁾ wird in einer besonderen Abhandlung gezeigt werden.

Durch die an der Talsperre bei Marklissa ausgeführte Untersuchung, die vom *Kgl. Preußischen Landwirtschafts-Ministerium* und der *Provinzialverwaltung Schlesiens* gemeinsam angeregt und ermöglicht wurde, ist der Nachweis geliefert, daß mit den hier beschriebenen Methoden und Apparaten zum

1) Unser Horizontalpendel mit magneto-induktiver Registrierung war bereits angefertigt und längere Zeit in Gebrauch, als ich davon Kenntnis erhielt, daß auch Fürst B. Galitzin die magneto-induktive Registrierung anwende. Aus seiner im Dezember des Jahres 1907 mir freundlichst von ihm übersandten Abhandlung „Die elektromagnetische Registriermethode“, Petersburg 1907, Sonderabdr. aus den Nachrichten der seismischen Kommission, Bd. III, Lieferung 1 ersah ich aber, daß seine Versuchsanordnung, besonders wegen Anwendung der langsam schwingenden Drehspulengalvanometer, ausschließlich für sinusförmige Erdbebenwellen längerer Periode anwendbar, dagegen für Schwingungen so kleiner Periode, wie sie bei unseren Versuchen in Frage kamen, nicht brauchbar ist.

erstenmal die Möglichkeit geboten ist, Bodenerschütterungen kleinster Periode bei sehr geringer Amplitude in exakter und sicherer Weise zu messen. Die Ausführung von Untersuchungen ähnlicher Art wird sich im modernen Verkehrsleben häufig als wünschenswert oder notwendig erweisen, z. B. zur Messung der Erschütterungen, die hervorgebracht werden beim Fahren eines Stadtbahnzuges oder beim Durchfahren eines Eisenbahnzuges durch einen Tunnel oder über eine Brücke, oder zur Messung der Erschütterungen, die an einer Quaimauer durch den Wogenanprall bewirkt werden, oder endlich zur Messung der Erschütterungen, wie sie z. B. auf der Insel Helgoland durch das Abfeuern schwerer Küstengeschütze hervorgerufen werden.

Ich erfülle schließlich eine angenehme Pflicht, wenn ich dem Bauleiter der Talsperre, Hrn. Wasserbauinspektor Bachmann, für das rege Interesse, das er der ganzen Arbeit entgegenbrachte, sowie für sein dauerndes freundliches Entgegenkommen auch an dieser Stelle meinen verbindlichsten Dank ausspreche.

Berlin-Charlottenburg, Physik. Institut d. Kgl. Techn.
Hochschule.

(Eingegangen 19. Oktober 1909.)
