

JAN 25 1901

Sitzungsberichte

der

mathematisch-physikalischen Classe

der

k. b. Akademie der Wissenschaften

zu München.



1900. Heft I.

München.

Verlag der K. Akademie.

1900.

In Commission bei G. Franzmann, Verleger in Berlin.

Periodische Seespiegelschwankungen (Seiches), beobachtet am Starnberger See.¹⁾

Von **H. Ebert.**

(Eingeliefert 10. Dezember.)

Am Genfer See wurde bekanntlich zuerst eine Erscheinung beobachtet, deren allgemeinere Bedeutung für die Binnenseen überhaupt man erst allmählich erkannte. Man fand, dass sich am Rhoneausfluss bei Genf der Wasserspiegel rhythmisch in regelmässigen Perioden hebt und senkt und zwar um Beträge, die daselbst gelegentlich mehr als Meterhöhe erreichen können. Diese auch für den Wasserabfluss aus dem See, der in Genf grosse Turbinenwerke speist, wichtige Erscheinung nennt man nach einer Lokalbezeichnung „Seiches“, ein Name, der für analoge Phänomene an anderen Seen allgemein angenommen wurde.

Eine einfache Vermehrung oder Verminderung der gesamten Wassermasse in Folge periodisch gesteigerten oder geschwächten Wasserzuffusses konnte diese Seiches nicht erzeugen; denn ihre Periode beträgt am Genfer See 73 Minuten und es war von vornherein unwahrscheinlich, dass innerhalb so kurzer Zeitintervalle sich die Wasserführung der Speisewässer um so erhebliche Beträge ändern sollte; vor allem wäre die vollständig regelmässige Wiederkehr des Anwachsens und

¹⁾ Die vorliegende Untersuchung wurde ermöglicht durch eine von dem Präsidium der kgl. bayerischen Akademie der Wissenschaften gewährte Geldunterstützung aus den Renten der Münchener Bürger-Stiftung für das Jahr 1900.

Sinkens des Seespiegels nach je 73 Minuten vollständig unverständlich geblieben. F. A. Forel, der sich zuerst eingehender mit dem Seichesproblem beschäftigte, fand vielmehr, dass die gesammte Wassermasse des Sees bei fast unveränderter Gesamtmenge regelmässige Pendelschwingungen ausführt, derart, dass diese Wassermasse periodisch bald gegen das westliche, Genfer Seeende andrangt und dort den Wasserspiegel hebt, bald gegen das Ostende, also gegen den Rhoneeeinfluss zuruckflutet, und zwar innerhalb 73 Minuten dasselbe Spiel fast das ganze Jahr unausgesetzt wiederholend; denn feinere Beobachtungsinstrumente liessen bald erkennen, dass das Seichesphänomen beinahe niemals erlischt, sondern zu jeder Tages- und Jahreszeit vorhanden ist, wenn so grosse Seespiegelschwankungen, wie die oben genannten, auch nur ausnahmsweise zu Stande kommen. Um näher in die feineren Einzelheiten dieser überraschenden Erscheinung einzudringen, construirte Forel einen selbstregistrirenden Pegel, sein „Limnimeter“, welches von Plantamour und namentlich von Ed. Sarasin verbessert wurde. Letzterer richtete das Instrument so ein, dass es verhältnismässig leicht transportabel wurde und der Reihe nach an verschiedenen Punkten des Seeufers aufgestellt werden konnte („Limnimètre enregistreur transportable“). Als er seinen Apparat in La Tour de Peilz bei Vevey in der Näher des Ostendes des Sees schreiben liess, während gleichzeitig der Apparat von Plantamour in Sécheron bei Genf, also am Westende, der von Forel in Morges nahe der Mitte des langgestreckten Seebeckens arbeitete, wurde durch den Vergleich der mit genauen Zeitmarken versehenen Registrircurven unzweifelhaft festgestellt, was Forel bereits früher wahrscheinlich gemacht hatte, dass man in den Seiches eine stehende Pendelschwingung vor sich habe. Wenn der Seespiegel bei Vevey sich hob, senkte er sich in der gleichen Zeit bei Genf und umgekehrt. Dagegen blieben die Amplituden der Seespiegelschwankung bei Morges fast die ganze Zeit über nahezu gleich Null. Hier in der Näher ging also eine sog. „Knotenlinie“ quer über den See. Solche Schwingungen mit

einem Knoten in der Mitte, sog. Schwingungsbäuchen an den Enden, nennt man „*uninodale*“ Schwingungen. Sie entsprechen vollkommen den Schwingungszuständen bei den stehenden Seilwellen oder den Schwingungen in der Mitte festgeklemmter Stäbe, oder den durch einen Steg zur Bildung eines Knotens gezwungenen Saitenschwingungen in der Akustik. Ausser dieser uninodalen Grund- und Hauptschwingung wurde noch eine Oberschwingung von der kürzeren Periode von 35 Minuten entdeckt, die sich der ersteren überlagert. Diese veranlasste ein gleichzeitiges Ansteigen der Wassermassen an den beiden Enden des Sees, ein Herabgehen des Spiegels nahe der Mitte in der einen Phase der stehenden Schwingung, dagegen ein Sinken an den Enden, ein Anschwellen der Wassermasse in der Mitte der Längserstreckung des Sees in der entgegengesetzten Phase der Schwingung. Hier müssen sich zu beiden Seiten der Mitte zwei Zonen finden, in denen der Seespiegel relativ ruhig ist. Es ist dies daher eine zweiknotige, „*binodale*“ Schwingung.

Wie man sieht stehen die Schwingungszeiten beider Systeme nicht in einem einfachen harmonischen Verhältnisse zu einander. Zu Zeiten, in denen beide Schwingungen deutlich ausgeprägt sind, tritt nun ein eigentümliches Ineinandergreifen der von ihnen an einem Orte erzeugten periodischen Bewegungen ein, wie wir es bei der Durchkreuzung zweier Wellensysteme zu studiren Gelegenheit haben. Man nennt diese Erscheinung in der Wellenlehre Interferenz; bei den Seichesschwingungen hat Forel für diesen Fall des Ineinandergreifens von Grund- und Oberschwingung die Bezeichnung: *dikrote* Schwingungsform eingeführt.

Durch die Arbeiten der genannten Forscher sind die Schwingungsverhältnisse am Genfer See im Laufe der Jahre vollkommen klar gestellt worden. Doch muss es bezüglich der Erklärung des Seichesphänomens im höchsten Grade erwünscht erscheinen, vorerst auch andere Seen genau auf diese Erscheinung hin zu studiren. Denn von der früher wohl gelegentlich geäußerten Vermutung, dass diese periodischen See-

spiegelschwankungen der Binnenseen durch dieselben allgemeinen kosmischen Kräfte der Mond- und Sonnenanziehung veranlasst würden, wie die Gezeiten der oceanischen Wasseransammlungen, kam man bald zurück. Auch das Heranziehen von Erdbeben, sei es lokaler, sei es entfernter, und in ihren Wirkungen sich weit verbreitender seismischer Störungen als Ursache der Seiches musste als aussichtslos fallen gelassen werden. Vielmehr hat man im Laufe der Zeit immer mehr die Ueberzeugung gewonnen, dass es meteorologische Faktoren sind, Windverhältnisse, ungleiche Luftdruckverteilung, welche die hier in Rede stehenden Pendelschwingungen anregen. Sind dieselben einmal geweckt, so vollziehen sie sich nach Gesetzen, welche durch die Grösse, Gestalt und das Tiefenrelief des betreffenden Seebeckens ein für alle Mal eindeutig bestimmt sind. Die limnimetrische Forschung hat daher für jeden See auch nach dieser Richtung hin eine individuelle Bedeutung und erst wenn viele in ihrer Ausgestaltung, Lage, geographischen Beziehung zur Umgebung möglichst verschiedene Binnenseen genau auf Seiches hin untersucht sind, lassen sich allgemeinere Gesichtspunkte erwarten. Darum unternahm es schon Ed. Sarasin selbst mit seinem transportablen Limnimeter die Seespiegelstellungen auch anderer Schweizer Seen genau zu registrieren. Züricher und Neuchateler See lieferten wenig klare Schwingungsbilder; unregelmässige Gestaltung des Untergrundes liess hier offenbar regelmässige Pendelschwingungen der Wassermasse von grösserer Dauer nicht zu Stande kommen. Dagegen zeigten sich in dem östlichen Teile des Vierwaldstätter Sees ausserordentlich regelmässig verlaufende Seiches, die in dem bei Fluelen stationirten Instrumente klare und regelmässige Aufzeichnungen ergaben. Auch der Bodensee zeigt das Phänomen. Ausserhalb des Schweizergebietes sind Seicheschforschungen in Oesterreich, England und Amerika im Gange.¹⁾

¹⁾ Bezüglich der Litteratur verweise ich auf das umfassende Handbuch der Geophysik von S Günther, 2. Aufl., II. Bd., 1899. Sechste Abteilung, Kapitel IV, § 7, p. 456 ff. Die Entwicklung der Seiches-

Auffallend zurück stand in dieser Beziehung seither noch Deutschland; ausser am Bodensee hat meines Wissens noch an keinem der deutschen Binnenseen die eigentliche Seichesforschung eingesetzt. Wenn auch der Wasserstand der Seen, — wie hier in Bayern durch das hydrotechnische Bureau als einer Abteilung der Obersten Baubehörde im kgl. Staatsministerium des Innern, — einer unausgesetzten Controle unterworfen, und von dieser Behörde in dankenswertester Weise schätzbarstes Material an regelmässigen Pegelablesungen, an einigen Orten sogar mit Hilfe selbstregistrierender Pegelapparate, geliefert wird, so haben diese Bestimmungen doch ihrer ganzen Natur nach einen anderen Zweck vor Augen; es soll in erster Linie der absolute Seespiegelstand unter Anschluss an genau mit dem Netze der Landesvermessung in Beziehung gesetzte Fixpunkte in der Umgebung für jeden Tag festgesetzt und die Wasserführung im Allgemeinen unter Controle gehalten werden. Die Seichesmessungen dagegen haben zunächst nur Relativbestimmungen des Spiegelstandes zum Ziele, sollen dagegen vor allem den schnellen, sich innerhalb weniger Minuten vollziehenden kleinen Seespiegelschwankungen möglichst bis in alle Einzelheiten hinein folgen. Angesichts des herrlichen Seenmaterials, welches die Natur gerade unserem Bayernlande zur Verfügung gestellt hat, musste es daher im höchsten Grade erwünscht erscheinen, diese Messungen auch hier in Angriff zu nehmen und zwar womöglich mit Hilfsmitteln, welche den bei den Schweizer Seen angewendeten in jeder Hinsicht entsprechend sind, damit die erhaltenen Resultate möglichst direkt mit denen der Schweizer Seenforschung vergleichbar werden. Es ist daher als überaus dankenswert zu begrüssen, dass das Hohe Präsidium der kgl. bayerischen Akademie der Wissenschaften zu München bereitwilligst

forschung findet man in Forels Monographie „Le lac Léman“. Bd. II, p. 39—213, Lausanne 1895. Ueber die auf schweizerischem Gebiete gemachten Fortschritte giebt der dem internationalen Congress für Paris 1890 von den Herren F. A. Forel und Ed. Sarasin erstattete Bericht eine treffliche Uebersicht.

die Mittel zur Anschaffung zweier Limnimètre enregistreur transportable, System Sarasin, zur Verfügung stellte, und ich möchte nicht verfehlen auch öffentlich meinen ergebensten Dank für diese Förderung auszusprechen.

Die Apparate wurden bei der Société genèvoise pour la construction d'instruments de physique bestellt. Herr Ed. Sarasin hatte sich in liebenswürdigster Weise bereit erklärt die Anfertigung und Justierung der Instrumente selbst zu überwachen und alle seine bei seiner langjährigen Thätigkeit auf diesem Gebiete gesammelten reichen Erfahrungen den neuen beiden Apparaten zu Gute kommen zu lassen. Auch ihm möchte ich für seine rastlosen Bemühungen und zahlreichen Ratschläge und Winke bei dieser Untersuchung meinen herzlichsten Dank aussprechen.

Hervorzuheben ist noch der Umstand, dass zu gleicher Zeit ein gleicher Apparat auch von der italienischen Regierung bestellt wurde und von Italien aus mit diesem die Erforschung der südalpinen Seen in Angriff genommen werden wird; es ist klar, dass gleichzeitige Untersuchungen der süd- und nordalpinen Seen mit Instrumenten, die an Empfindlichkeit, Construction, Handhabung u. s. w. einander vollkommen gleichen und direkt vergleichbare Angaben liefern, interessante Aufschlüsse über den etwaigen Einfluss weitgreifender meteorologischer Faktoren, wie z. B. Föhnbewegungen u. dergl., auf die Seicheseregungen in Aussicht stellen. Ein Zusammengehen mit dem italienischen Forscher auf diesem Gebiete ist in Aussicht genommen.

Einer der Apparate traf im Juli dieses Jahres hier ein und wurde zunächst einer weitgehenden Prüfung unterworfen, die ihn nach einigen kleinen Abänderungen als ausserordentlich zuverlässiges Instrument erwies.

Eine ausführliche Beschreibung des Instrumentes unterlasse ich an dieser Stelle und verweise auf die kurzen Angaben, die Herr Sarasin über sein älteres Modell macht.¹⁾ Ich möchte

¹⁾ Ed. Sarasin, Arch. des scienc. phys. et nat. (3). 2. Nr. 12. Dec. 1879.

bezüglich unseres Apparates nur noch folgendes bemerken: Der aus Zinkblech gefertigte, als Schwimmer dienende Hohlkörper hat 26 cm Durchmesser und 14 cm Höhe, also 7,4 Liter Displacement bei völligem Eintauchen, einem Auftriebe von 7,4 kg entsprechend. Beim Heben und Senken des Wasserspiegels wird er also mit grosser Sicherheit mitgenommen. Der Schwimmer ist unten an einer Stahlstange befestigt, welche oben durch eine Führung hindurchgeht. Seitlich an derselben ist ein nach oben gehendes Kupferband befestigt, welches über eine mit Rand versehene Messingscheibe geht und am anderen Ende durch ein Bleigewicht gespannt ist. Beim Auf- und Abgehen des Schwimmers wird dadurch die Messingscheibe mitgenommen und die Vertikalbewegung des Seespiegels in eine Drehbewegung umgesetzt. Diese wird durch eine mit zwei Universalgelenken versehene Stange in das Innere des eigentlichen Registrierapparates übertragen. Die Stange dreht eine mit Zähnen versehene Scheibe, in welche eine darüber liegende und durch eine zweite Messingscheibe horizontal getragene Zahnstange eingreift, die den in einer Hülse vertikal beweglichen Schreibstift führt. Wenn der Seespiegel auf und niederschwankt, wird der Stift um gleiche Beträge horizontal hin und her geführt. Dabei gleitet er quer über einen Papierstreifen ohne Ende von 25 cm Breite, der von einem Walzenpaare, das von einem sehr kräftigen Genfer Federuhrwerke betrieben wird, seiner Länge nach unter dem Stifte durchgezogen wird. Der Stift schreibt in dieser Weise Curven auf, deren Ordinaten die Seespiegelschwankungen selbst sind. Gleichzeitig zeichnet ein zweiter an einem ruhenden Arm in einer vertikalen Hülse leicht auf und ab beweglicher Schreibstift eine der Längskante des Papierstreifens parallel verlaufende gerade Linie, welche zur Markierung des mittleren Pegelstandes dient. Durch das Uhrwerk wird der Arm nach jeder Stunde ein wenig abgelenkt; auf der Geraden entsteht dadurch eine Zeitmarke. Diese Zeitmarkierungen gestatten den zu jedem Spiegelstand gehörigen Moment zu bestimmen; jedesmal beim Aufziehen des Werkes, was nur alle zwei Tage zu geschehen

braucht, wird ausserdem zur Controle die Zeit an die gerade unter den Schreibstiften befindlichen Stellen des Papierstreifens geschrieben.

Da die Streifenbreite nur 25 cm beträgt, der Seespiegel im Laufe der Jahreszeiten im allgemeinen aber um grössere Beträge sinkt oder steigt, so muss von Zeit zu Zeit das Instrument wieder neu eingestellt werden. Dies geschieht dadurch, dass man die Verbindung der den Schwimmer unten tragenden Stahlstange mit der Führung derselben löst und die Stange weiter durch die Führung, an der das Kupferband befestigt ist, nach unten durchschiebt oder nach oben emporzieht und dann Stange und Führung wieder mit einander in einer solchen gegenseitigen Stellung verschraubt, dass der Schreibstift etwa in der Mitte des Papierstreifens spielt. —

Als erstes Objekt für die bayerischen Seiches-Untersuchungen wurde der Starnberger See in's Auge gefasst. Er empfiehlt sich in erster Linie durch seine einfache Gestalt. Als langgestreckte schmale Rinne von 19,6 km Länge und 4,7 km maximaler Breite, erstreckt er sich mit seiner Längsachse ziemlich genau von Süden nach Norden mit einer schwachen Krümmung, deren concave Seite nach Osten gekehrt ist. Seine Tiefenverhältnisse sind von Dr. Alois Geistbeck¹⁾ genauer festgestellt worden. Bei mittlerem Stande liegt der Seespiegel 586 m über dem Meere; er bedeckt ein Areal von 55,9 Quadratkilometer. Seine Maximaltiefe wurde von Geistbeck zu 114 m bestimmt, die mittlere Tiefe des Gesamtbeckens zu 52 m berechnet. Der See fasst 2 912 000 000 Cubikmeter Wasser und sein Tiefenrelief hat einen mittleren Böschungswinkel von 3,5 Grad, nach der von Herrn Professor Finsterwalder eingeführten präzisen Bestimmung dieses für die Oroplastik so wichtigen Begriffes.²⁾ Wenn die Geistbeck'schen

¹⁾ Alois Geistbeck, Die Seen der Deutschen Alpen. Herausgegeben von dem Verein für Erdkunde zu Leipzig. 1885.

²⁾ S. Finsterwalder, Ueber den mittleren Böschungswinkel und das wahre Areal einer topographischen Fläche. (Sitzungsber. Münchener Akademie. Math.-phys. Cl. 20. 1. p. 35, 1890). Die Zahlen stammen aus Penck, Morphologie der Erdoberfläche, Bd. 2. p. 823. Stuttgart 1894.

Messungsergebnisse nach den neuesten Forschungen des verdienten Limnologen Prof. W. Ule in Halle auch im Einzelnen vielfach der Verbesserung bedürfen, so stellen sie doch das allgemeine Tiefenrelief des Sees für unsere Zwecke genau genug dar, so dass wir uns an seine Zahlen halten können, bis die Ule'schen genaueren Werte in extenso publiciert sein werden. Danach besteht der Starnberger See aus einer schmaleren und tieferen Nordrinne, in deren Mitte Tiefen bis zu 114 m gelotet werden und einem breiteren und flacheren Südbecken. Dort, wo auch schon an der äusseren Unfrandung des Seespiegels selbst am Westufer eine Art Abgrenzung bemerkbar wird, in der Verlängerung des zwischen Unter-Zaismering und Bernried am sog. Karpfenwinkel hervortretenden Ufervorsprungs, läuft eine sanft ansteigende Bodenschnelle quer unter dem See nach dem östlichen Ufer hinüber. Dieselbe trennt das Seebecken in zwei Teile, deren Längen sich ungefähr wie 1 zu 2 verhalten, so dass das längere nördliche Becken etwa $\frac{2}{3}$ von der Gesamtlänge des ganzen Sees umfasst.

Die Längsachse des Sees liegt angenähert parallel der Streichrichtung der die nördliche Kalkalpenkette an dieser Stelle durchbrechenden Querthäler, der Senke des Kesselbergjoches zwischen Walchen- und Kochelsee einerseits, des von Partenkirchen-Garmisch über Murnau herabkommenden Loisachthales andererseits. Es konnte von vornherein keinem Zweifel unterliegen, dass, wenn der Starnberger See überhaupt das Seichesphänomen zeigt, derselbe längs seiner nord-südlichen Hauptachse zu Pendelschwingungen von einigermaßen nachweisbarer Amplitude erregt werden würde.

Forel weist auf eine Formel hin, die schon 1828 von R. Merian¹⁾ für die Periodendauer der stehenden Pendelschwingungen abgeleitet wurde, welche Wassermassen in flachen Gefässen von bestimmten einfachen Profilen vollführen, wenn sie längs eines Schnittes durch diese Gefässe in Bewegung ge-

¹⁾ R. Merian, Ueber die Bewegung tropfbarer Flüssigkeiten in Gefässen. Basel 1828.

setzt werden. Bedeutet l die Länge der Spiegellinie des Profils, h seine mittlere Tiefe, so ist die Dauer einer einfachen Schwingung

$$t = \frac{l}{\sqrt{gh}}$$

wo g die Beschleunigung durch die Erdschwere (9,81 m/sec²) bedeutet. Eine ganze aus Hin- und Hergang bestehende Schwingung, wie wir sie hier in Deutschland im Gegensatz zur französischen Zählung bei oscillatorischen Vorgängen zu zählen pflegen, wird also in der Zeit

$$T = \frac{2l}{\sqrt{gh}}$$

ausgeführt.

Geistbeck hat auf Tafel VII des zu seinem Werke gehörigen Atlas das Längenprofil des Starnberger Sees im Massstab 1 : 50 000 für die Horizontalerstreckungen, 1 : 10 000 für die Tiefen construiert. Hieraus liess sich die zu erwartende Periode für die Längsschwingung des Sees, die zugleich seine Haupt- und Grundschiwingung sein musste, auf Grund der Merian'schen Formel berechnen, wenn man die mittlere Profiltiefe h nach dem Geistbeck'schen Diagramm ermittelte. Dazu wurde in folgender Weise verfahren:

Das Profil wurde auf einen starken Carton abgezeichnet, aber mit Verzehnfachung aller Tiefenwerte, und das so vergrösserte Längsprofil des Sees ausgeschnitten. Aus demselben Carton wurde ein Rechteck von 200 cm² Fläche geschnitten und darauf beide Flächenstücke gewogen. Als Gewichte ergaben sich 7,395 bzw. 4,925 gr, so dass die Profilfläche 300,2 cm² umfasste, was mit Rücksicht auf den Massstab der Zeichnung einen Mittelwert für die Profiltiefe von 75,7 m ergibt.

Wie man bemerkt ist dieser Wert nicht unerheblich grösser, als die mittlere Seetiefe. Dies ist nicht zu verwundern; denn unser Wert giebt an, wie breit ein Flächenstreifen sein muss, welcher bei einer Länge gleich der Seelänge von

19,6 km dieselbe Fläche wie das Längenprofil des Sees hat; der oben angegebene Mittelwert von 52 m dagegen stellt die Tiefe dar, welche ein überall gleich tiefes Becken von der Grösse des Sees haben müsste, das dieselbe Wassermasse wie dieser selbst fasst; namentlich die breiten und flachen Partien des Südendes verkleinern diesen Tiefenwert gegenüber dem von uns bestimmten mittleren Tiefenwert der Längsrieme.

In unsere Formel haben wir die Tiefe des Schnittes einzuführen, längs dessen die zu untersuchende Schwingung stattfindet. Aus dem gefundenen Wert für h ergibt sich T zu rund 24 Minuten.

Wie wir später sehen werden, stimmt der so berechnete Wert so genau mit dem wirklich für diese Schwingung gefundenen Wert (25 Minuten) überein, als man nur erwarten kann. Denn einmal ist es ja von vorn herein gar nicht sicher, ob der von Geistbeck gezeichnete Schnitt wirklich genau mit der Fläche zusammenfällt, längs deren sich die Wasserteilchen bei der longitudinalen Grundschiwingung bewegen; ferner aber hängt, wie nicht anders zu erwarten, die Periodendauer von der Gesamtwasserführung des Sees ab, so dass bei anderer Pegelstellung etwas andere Schwingungsdauern resultieren. Genaue Uebereinstimmung kann endlich bei der Angenähertheit des ganzen Verfahrens überhaupt nicht erwartet werden.

Daher liefern die erhaltenen Zahlen immerhin eine schöne Bestätigung der Forel'schen Theorie des Seichesphänomens, welche sich auf die Merian'sche Formel stützt.

Bei der Auswahl des Punktes, an welchem das Limnimeter zunächst aufgestellt werden sollte, war der Gesichtspunkt leitend, dass es sich ja vor der Hand in erster Linie darum handelte, den Nachweis zu führen, ob ein so kleines Seebecken, wie das in Rede stehende, überhaupt im Stande sei, Seiches von merklichem Betrage zu zeigen. Aus diesem Grunde musste dem Nordende für die Aufstellung der Vorzug gegeben werden. Denn wenn die Wassermassen im See von Norden nach Süden und umgekehrt hin- und herschwanken, so musste sich die

Flut in dem engeren, tiefem Starnberger Nordende höher zusammen stauen, als in dem breiteren und flacheren Seeshaupter Südende. In Starnberg selbst oder in der unmittelbaren Nachbarschaft den Apparat zu montieren, empfahl sich nicht, weil er hier erheblichen Störungen durch Badende, Rudernde und vor allem durch den starken Dampfschiffverkehr ausgesetzt gewesen wäre. Ihn am Nordende selbst, am Ausfluss der Würm oder bei Percha aufzustellen, schien gleichfalls nicht günstig, da der See hier in eine sehr seichte, von Schilf dicht bewachsene Untiefe ausläuft und es nicht unwahrscheinlich ist, dass die periodischen Bewegungen des Tiefenwassers sehr stark gedämpft werden, wenn sie auf solches Flachterrain auslaufen. Am geeignetsten erschien ein Platz am Nordostufer unterhalb des Dorfes Kempfenhausen, dort, wo das steilere Höhenufer wieder dicht an den See herantritt und schon in geringer Entfernung vom Ufer beträchtliche Tiefen sich finden.

Auch legen hier die Dampfer nicht an, sondern sie fahren weit vom Ufer entfernt direkt von Starnberg nach Berg hinüber, so dass die durch sie verursachten Wasserbewegungen, wie direkte Vorversuche zeigten, nur wenig merklich sind.

Hier steht ein neugebautes, sehr solid fundiertes Badehaus, dessen Eigentümer, Herr Lehrer Hartlmaier in Wangen bei Starnberg in freundlichster Weise gestattete, dass das Limnimeter an der Aussen-Gallerie seines Badehauses montiert werde. Ein 56 m langer Steg führt vom Ufer zu dieser Gallerie hinaus; am Orte, wo der Apparat befestigt wurde, fand sich im Juli über 2 m Wassertiefe. Noch war es nötig den Schwimmer vor den gewöhnlichen Wellen der Wasseroberfläche so zu schützen, dass er gleichwohl den Bewegungen der gesammten Wassermassen leicht und schnell folgen konnte. Wir haben zu dem Zwecke eine oben offene grosse Holzkiste zur unteren Hälfte im Wasser so unterhalb des Schwimmers befestigt, dass selbst hohe Wellen nicht von oben her in das Innere, das immer einen ruhigen Spiegel zeigte, hineinschlagen konnten; in den Boden der Kiste war eine Anzahl 2 cm weiter Löcher gebohrt, durch die das Innere mit dem See communicierte. Dadurch

war der in das Wasser tauchende Apparat zugleich gegen das Anfahren von Booten genügend geschützt.

Herr Ingenieur und Bezirkstechniker für das kgl. Bezirksamt München II, Franz H. Haertinger, hatte die Güte, den von mir gewählten Aufstellungspunkt einzunivellieren und an die Höhengoten der Landesvermessung anzuschliessen. Gleichzeitig wurde an dem Badehaus selbst ein Punkt genau markiert, der gegen einen, durch einen grossen, am Ufer eingegrabenen Stein versicherten Höhenpunkt einnivelliert wurde. Hierdurch war es möglich, jederzeit zu kontrollieren, ob nicht etwa eine Senkung des Aufstellungsterrains stattgefunden hatte und zweitens war ein direktes Beziehen der Limmimeterangaben zu den Würmseepegelablesungen dadurch ermöglicht, dass der genannte Punkt gegen den Nullpunkt dieses Pegels einnivelliert wurde.

Der Apparat bedurfte namentlich im Anfange einer regelmässigen Ueberwachung und da das Uhrwerk alle zwei Tage aufgezogen werden musste, so war ausser der natürlich öfter wiederholten, von München aus unternommenen Kontrolle, die Inanspruchnahme anderweitiger freundlicher Unterstützung notwendig. Der genannten Mühewaltung haben sich Herr und Frau Kaufmann Hartlmaier aus München, sowie Herr stud. Seitz aus München unterzogen; ich möchte allen Genannten für ihre Mühe auch öffentlich hierdurch meinen besten Dank aussprechen, sowie vor allem Herrn Lehrer Hartlmaier auch dafür, dass er den Apparat noch über die ursprünglich in Aussicht genommene Zeit auf seinem Besitze beherbergt und uns die Fortsetzung der Messungen an dem genannten Orte, der sich als überaus günstig erwiesen hat, in zuvorkommendster Weise gestattet hat. Endlich gebührt auch dem kgl. Bezirksamte München II, sowie den Behörden, Bürgermeistereien wie Gendarmerien Dank, welche das Instrument unter ihren Schutz nahmen.

Der Apparat ist seit dem 7. Juli am genannten Orte in Thätigkeit, allerdings nicht ununterbrochen, da eine grössere Reparatur und einige kleine Abänderungen eine Pause zwischen

19. Juli und 1. August nötig machten. Vom 7.—19. Juli arbeitete er mit langsamem Streifengang ($1^h = 2$ cm), da vorerst festgestellt werden sollte, ob das Seichesphänomen überhaupt vorhanden ist.

Schon als der Apparat zu schreiben begann, zeichnete der Schreibstift unzweifelhafte Seicheskurven, reine Sinusschwingungen von ca. 25 Minuten Periodendauer und mehreren Centimetern Amplitude auf, d. h. am Nordende des Starnberger Sees hebt sich die gesammte Wassermasse während $12\frac{1}{2}$ Minuten um einige Centimeter über die mittlere Höhe, um in den darauffolgenden $12\frac{1}{2}$ Minuten um ebenso viel wieder zu sinken. Diese periodische Bewegung stellt sich ebenso gut in der Nacht wie am Tage und zu jeder Stunde ein, sie kann daher nicht etwa von den Dampferbewegungen, wechselndem Zu- oder Abfluss oder sonstigen Störungen herrühren. Selbstverständlich verbindet sich diese pendelnde Bewegung, die einer Atembewegung des Sees gleicht, mit dem Steigen des Wassers bei Regengüssen, ebenso wie mit dem Sinken bei anhaltender Trockenheit, dem sie sich überlagert.

Nachdem der Beweis erbracht war, dass auch im Starnberger See das Seichesphänomen heimisch ist und sich mit dem verwendeten Hilfsmittel trefflich studieren lässt, wurde vom 1. August an zu rascher Streifenbewegung übergegangen ($1^h = 6$ cm, 1 mm = 1 Minute), wodurch die Zacken, welche der Apparat schrieb, länger ausgezogen wurden, so dass zahlreiche interessante Einzelheiten im zeitlichen Verlaufe der Erscheinung zu Tage traten.

Im Folgenden soll nur das Beobachtungsmaterial diskutiert werden, welches in den ersten beiden Monaten (7. Juli bis 10. September) am Apparate erhalten wurde. So kurz diese Zeitspanne auch ist, so lassen sich doch schon die wesentlichsten Züge des Phänomens, wie es unserem See eigentümlich ist, unzweifelhaft erkennen. Späteren Arbeiten soll die Diskussion längerer Beobachtungsreihen überlassen bleiben, welche wichtige Ergänzungen und neue Einzelheiten in Aussicht stellen. —

Beim Durchsehen der erhaltenen Registrierkurven ergibt

sich als erstes Resultat, dass der Zustand regelmässiger pendelnder Bewegung für die Gesamtwassermasse des Starnberger Sees die Regel bildet; der Zustand vollkommener Ruhe hat in der genannten Zeit nur während weniger Stunden angehalten, und auch hier kann man fragen, ob das Fehlen jeglicher Bewegung in der erhaltenen Kurve wirklich einem absoluten Fehlen der Seichesbewegung zuzuschreiben ist, oder nicht vielmehr einer gewissen vorübergehenden Trägheit des Schwimmers, die ihn verhinderte, den feinsten Bewegungen der Wassermasse nachzugehen. Die überaus zahlreichen periodischen Bewegungen, die bald nur eben angedeutet sind, bald Seespiegelschwankungen bis zu 8 cm Niveaudifferenz anzeigen, lassen nun unzweifelhaft erkennen:

1) eine Haupt- oder Grundschwingung der Wassermassen. Die Periode derselben stimmt genau genug mit der oben nach der Merian-Forel'schen Formel S. 445 zu 24 Minuten berechneten überein, dass es keinem Zweifel unterliegen kann, dass wir hier die longitudinale Hauptschwingung vor uns haben, an der die Gewässer des Sees als Ganzes Teil nehmen, und welche dem Längsschnitt des Beckens entlang von Norden nach Süden hin und umgekehrt erfolgt. Da es die uninodale Schwingung in dem Seite 437 angegebenen Sinne ist, so wird der Seespiegel durch dieselbe an Starnberger Ende gehoben in demselben Augenblicke, wo er sich am Seeshaupter Ende senkt; nach halber Schwingungsdauer findet das Umgekehrte statt; die Wassermassen fluten vom Nordende zurück und stauen sich nach Süden immer höher und höher an. Dazwischen liegt, etwa in der Mitte des Sees, vielleicht zwischen Tutzing und Ammerland eine Zone, wo sich der Seespiegel unter dem Einflusse dieser Schwingung weder hebt noch senkt, die „Knotenlinie“ der Schwingung. Daraus dürfen wir freilich nicht schliessen, dass sich hier die Wassermassen selbst etwa in Ruhe befinden; im Gegenteil: der Transport so gewaltiger Wassermassen, wie sie einem Steigen des Sees an einem Ende um mehrere Centimeter entsprechen und die Umlagerung dieser Massen in der Zeit von wenigen Minuten,

muss sehr starke Strömungen, und da nach der Theorie die gesamte Wassermasse bis zum Boden hin in diese Pendelung hineingezogen wird, vor allem starke Unterströmungen in dem im Vergleich zu seiner Länge schmalen Seebecken hervorrufen. Höchst wahrscheinlich hängt hiermit die seit langem bekannte und gefürchtete Erscheinung des sog. „Rinnens“ unseres Sees zusammen, das heftige Strömen der Wassermassen und das Auftreten grosser Verschiedenheiten in der Strömungsgeschwindigkeit der übereinander liegenden Schichten selbst bei ganz ruhigem Wetter, das so heftig werden kann, dass den Fischern die Netze fortgerissen werden. Aus Zu- und Abfluss am Seebecken lässt sich diese Erscheinung keineswegs erklären, sie dürfte durch das Studium der Seiches so vollkommen aufgeklärt werden können, dass man die Periode dieser Miniaturzeiten des Sees für die einzelnen Monate wird voraus berechnen können.

Um die Periodendauer der Hauptschwingung möglichst genau zu bestimmen, wurde aus den häufig auf den Streifen notierten Zeitmarken (S. 442) zunächst der wahre Streifengang ermittelt. Er ergab sich bei der kleinen Uebersetzung zu

$$1 \text{ Millimeter} = 3,042 \text{ Zeitminuten,}$$

bei der grossen und dem rascheren Streifengange zu

$$1 \text{ Millimeter} = 1,019 \text{ Zeitminuten.}$$

Wurde dann die Gesamtlänge einer bestimmten Anzahl von Wellenbergen in dem Diagramm gemessen, so ergab sich durch Division durch die Anzahl der einzelnen Spiegelschwankungen ein Mittelwert für die Periodendauer. Aus den Aufzeichnungen wurden verschiedenen Zeiten entsprechend Gruppen einer grösseren oder kleineren Anzahl deutlich ausgeprägter aufeinander folgender Hauptschwingungen herausgegriffen und in dieser Weise zur Ableitung einer mittleren Schwingungsdauer für das benutzte Zeitintervall verwendet. In der folgenden Tabelle ist das so erhaltene Zahlenmaterial zusammengestellt. In derselben bedeuten die Zahlen der letzten Colonne die für die

genannten Zeiten geltenden Mittelwerte der Differenzen aus höchstem und tiefstem Spiegelstande. Sie geben also ein ungefähres Mass der Amplituden der Pendelschwingungen, wenn dieselben auch im allgemeinen für ein solches Zeitintervall, welches durch besonders gut ausgeprägte Schwingungen ausgezeichnet ist, durchaus nicht für jede Schwingung gleich gross sind. (Die mitgeteilten Werte stellen also das Doppelte von dem dar, was der Physiker als Amplitude in den mathematischen Ausdruck für die Schwingung einführen würde.) Die Horizontalstriche begrenzen die Beobachtungen einer, auf je einem Streifen enthaltenen Beobachtungsreihe.

Periodendauer der Hauptschwingung.

Tag	Dauer T in Minuten	Zahl der gemessenen Schwingungen	Mittlere Seespiegelschwankung
7. Juli	24,79	10	18 mm
8.	25,00	9	10
9.	24,82	18	12
10.	24,79	15	10
10.	25,04	10	10
11.—12.	24,91	44	10
13.	24,61	6	7
14.	24,79	12	6
17.	24,94	37	11
19.	24,97	12	5
2. August	25,06	11	20
3.	24,84	10	14
5.	25,24	4	22
6.	24,96	8	—
8.—9.	25,37	10	—
9.—10.	25,00	50	—
10.—11.	25,38	8	—
13.	25,04	5	14
13.—14.	25,11	43	—
14.—16.	25,15	109	10
18.—19.	24,76	20	6
19.	24,96	14	10
20.—21.	25,04	37	22

Pendelschwingung zu thun haben, wird die Seelänge gerade von einer halben Wellenlänge ausgefüllt. Die Länge der studierten Welle beträgt also ca. 39 km.

Diese Grundschiwingung fehlt fast nie. Oft ist sie in ununterbrochenem Zuge mehrere Tage lang herrschend. So reihen sich die ihr entsprechenden Maxima und Minima der Spiegelhöhe vom 14. August Abends 7 Uhr an bis zum 16. August Nachmittags 4 Uhr, also während beinahe 48 Stunden ohne Unterbrechung aneinander, über 100 einzelne Perioden voll zum Ausdruck bringend! Selbst wenn der Seespiegel ganz ruhig liegt und die Limnimetercurve fast eine gerade Linie darstellt, ist die Hauptperiode durch kleine Zacken angedeutet. Wenn sie allein und ungestört ausgebildet ist (vergl. weiter unten), so ist der Curvenverlauf ein rein sinoidaler, d. h. es tritt nicht etwa ein langsames Ansteigen und dann schnelleres Fallen oder umgekehrt ein, sondern die Schwingung ist rein harmonisch, wie man sich in der Akustik ausdrücken würde, die entsprechende Seichescurve vollkommen symmetrisch nach beiden Seiten hin. —

Ausser dieser langsamen Grundschiwingung tritt aber sehr häufig noch

II) eine Oberschiwingung von kürzerer Periode auf, welche als eine Teil- oder Partialschiwingung aufgefasst werden muss. Die Amplitude dieser Schwingung ist meist kleiner als die der Hauptschiwingung. Oft ist sie ganz allein ausgebildet und dann beherrscht sie augenscheinlich das ganze Seebecken. Auch hier handelt es sich nicht um ein gelegentliches Auftreten einzelner Zacken; ist diese Schwingungsform einmal zur Herrschaft gelangt, so kann sie viele Stunden lang ununterbrochen andauern; so wurde sie am 23. August von früh 6 Uhr bis abends 10 Uhr, also während 16 Stunden ununterbrochen vom Schwimmerstift registriert. Die genauere Periodendauer ersieht man aus der beifolgenden Tabelle:

Periodendauer der Oberschwingung.

Tag	Dauer in Minuten	Zahl der gemessenen Schwingungen	Mittlere Seespiegel- schwankung
12. Juli	15,73	30	3 mm
8. August	15,42	15	—
14.	15,87	60	—
20.	15,90	10	3
20.	15,97	6	8
21.	15,93	8	4
23. August	15,83	49	20
3. September	15,91	21	24
9.	15,60	20	8

Eine Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Amplitude ist auch bei dieser Schwingung nicht vorhanden. Eine Zunahme der Schwingungsdauer mit der Zeit ist nicht bemerklich. Als Mittelwert aus den 219 Einzelmessungen, welche zur Ableitung der Periodendauer verwendet wurden, ergibt sich

$$T_1 = 15,78 \text{ Minuten oder } 15 \text{ Minuten } 47 \text{ Sekunden.}$$

Die Dauer ist also wesentlich kürzer, die Schwingung selbst daher höher in der Sprache der Tonlehre als die Grundschwingung, und zwar verhalten sich die Schwingungszahlen wie 1,00 zu 1,58. Das musikalisch harmonische Verhältnis von Grundton zu Quinte (C:G) weist ein Schwingungszahlenverhältnis von 2:3 oder 1,00:1,50, das des Grundtones zur Sext (C:A) von 3:5 oder 1,00:1,67 auf. Unsere Oberschwingung liegt also zwischen den Intervallen der Quinte und Sext und würde etwa dem musikalischen schon weniger einfachen Intervall C:Gis oder C:As der übermässigen Quinte oder kleinen Sext entsprechen. Wir sehen, dass Grundschwingung und erste Oberschwingung des Starnberger Sees nicht in einem einfachen, musikalisch reinen Intervallenverhältnisse zu einander stehen,

die Oberschwingung ist etwas höher als die Quinte, etwas niedriger als die Sext.

Wir können nicht daran zweifeln, dass wir die binodale Schwingung S. 437 des Sees vor uns haben. Dementsprechend würde sich der Seespiegel gleichzeitig am Nord- und am Südeinde heben, in der Mitte senken und umgekehrt, wenn diese Oberschwingung den See beherrscht. Dazwischen würden wir zwei Knotenlinien haben. Der Schwingungsdauer von 947 Sekunden entspricht eine reducierte Pendellänge von 223 km und eine Wellenlänge von 25 km; 12,4 km würde der Abstand der beiden Knotenlinien von einander betragen und wir können daher dieselben einerseits etwa zwischen Possenhofen und Leoni, andererseits zwischen der nach Osten vorspringenden Halbinsel südlich von Bernried und Schallenkamm auf der gegenüberliegenden Uferhöhe annehmen. Wir dürften nicht irren, wenn wir annehmen, dass die S. 443 erwähnte unter dem Seespiegel bei Unter-Zaismering querüber laufende Bodenschwelle, welche das Seebecken gewissermassen in zwei ungleich lange Rinnen unterteilt, die Ursache für die erwähnte Schwingungsunterteilung des ganzen Sees bilde. Der See wird dadurch wie eine schwingende Saite durch einen Steg unterteilt und wir hätten in der Oberschwingung von der Periode $T_1 = 15,8$, welches ungefähr gleich $\frac{2}{3} T$ [$T = 25,0$; $\frac{2}{3} T = 16,7$ Minuten], demnach die Eigenschwingung des durch den unterseeischen Rücken abgegrenzten nördlichen Beckens vor uns. —

Im Allgemeinen sind nun immer beide Schwingungen gleichzeitig ausgebildet und dadurch entsteht mitunter ein ziemlich verwickeltes Curvenbild. Dasselbe wird indessen leicht entziffert, wenn man die Perioden der beiden zusammentretenden Schwingungssysteme bereits kennt und auf sie die Gesetze der physikalischen Interferenz periodischer Bewegungen in Anwendung bringt. Dabei ergibt sich zunächst Folgendes: Auch bei den überaus langsamen Schwingungen, denen Wellenlängen von vielen Kilometern entsprechen, gilt das in der Physik der Erklärung der Interferenzerscheinungen zu Grunde gelegte Princip der Coexistenz der Schwingungsbe-

wegungen: Bei dem Zusammentreten behalten die Einzelschwingungen ihre Perioden bei; die resultierende Seespiegelschwankung ist einfach gleich der Summe der von jeder einzelnen Schwingung herbeigeführten Spiegelverlegung. Gewöhnlich ist zunächst die Grundschiwingung ausgebildet; das Hinzutreten der Oberschwingung stört dann die Dauer der Grundschiwingung nicht. Aber freilich werden nun je nach der Phasendifferenz in der Ausbildung, mit der die beiden harmonischen Schwingungen zusammentreffen und je nach dem Amplitudenverhältnisse beider die mannichfachsten Abänderungen der Hauptcurve resultieren. Sind die Amplituden der Oberschwingung gegenüber denjenigen der Hauptschiwingung klein, so bemerkt man das Auftreten der ersteren zunächst nur an beginnenden Asymmetrien der Hauptcurve; die Maxima folgen sich nicht mehr äquidistant, in regelmässiger Folge zeigen sie sich in ihrer Höhe vermindert und an anderen Stellen entsprechend überhöht. Wird die Oberschwingung kräftiger, so flacht sie die Maxima der Hauptcurve ab dort wo Maxima der ersten Curve mit Minimis der anderen zusammentreffen; dort wo Maxima auf Maxima treffen ist die resultierende Curvenhöhe die Summe beider Amplituden. Dazwischen erscheinen die Curvenzacken einseitig ausgebaucht, ähnlich wie im Profilbilde einer Bergkette, wenn einem Hauptgipfel ein Nebengipfel vorgelagert ist. Es sind dies die „dikroten“ Schwingungen Forels vgl. S. 437. Aber immer vermag man in der grossen Mannigfaltigkeit von Curvenbildern mit Hilfe des Interferenzprincipes die beiden einfachen Schwingungen, deren Betrachtung wir vorangestellt haben, wieder zuerkennen. Man kann das Verhältnis ihrer Schwingungsdauern natürlich auch aus dem Interferenzbilde, also aus Aufzeichnungen, bei denen sie beide beteiligt sind, ableiten. Da dieses Verhältnis aber, wie wir sahen, kein einfaches harmonisches ist, so ist dies nicht so leicht. Die Aufgabe ist streng nur durchführbar durch eine sog. harmonische Analyse, welche den periodischen Vorgang dann durch eine Fourier'sche Reihe, die nach Sinus und Cosinus der ganzzahligen Vielfachen eines bestimmten

Bogens fortschreitet, darstellen lässt. Diese Entwicklung liefert auch die Phasenverschiebung und das Amplitudenverhältnis der mit einander interferierenden periodischen Bewegungen und lässt durch die höheren Glieder derselben auch erkennen, ob eventuell noch höhere Oberschwingungen bei dem Prozesse beteiligt sind. Das mathematische Seminar der kgl. technischen Hochschule besitzt einen sog. mechanischen Analysator neuester Construction, der die angedeutete nicht ganz unerhebliche rechnerische Arbeit durch einen rein mechanischen Integrations-Process zu ersetzen gestattet. Mit demselben sollen demnächst Analysen besonders charakteristischer Curvenstücke vorgenommen werden. —

Zum Schlusse noch einige Bemerkungen über meteorologische Einflüsse auf die Seicheserregungen: Um eventuelle Beziehungen zu plötzlichen Luftdruckänderungen genauer verfolgen zu können, wurde in dem Badehaus, auf dessen Aussengallerie das Limnimeter montiert war, ein selbstregistrierendes Aneroid-Barometer, das Herr Baron von und zu Aufses gütigst zur Verfügung stellte, in Betrieb gesetzt. Wenn dasselbe auch keine sehr grosse Empfindlichkeit hatte, so zeigte es doch z. B. die vor einem Gewitter eintretenden, so überaus charakteristischen, als sog. „Gewitternasen“ bekannten Luftdruckänderungen deutlich an.

Dadurch liess sich nun konstatieren, dass, wenn der See fast vollkommen ruhig war, plötzlich eintretende Luftdruckänderungen das Eintreten kräftiger Seichesbewegungen sehr häufig im Gefolge hatten. Ein ganz besonders charakteristischer derartiger Fall ereignete sich am 21. August. Am 21. und 22. zeigen die Wetterkarten ein engbegrenztes, lokales Luftdruckmaximum über der Münchener Gegend. Der Tag war schwül und klar. Plötzlich, gegen Abend zeigt das Registrierbarometer ein allmähliches Herabgehen, dann ein schnelleres Ansteigen des Druckes an, das von einigen kleinen Zacken gefolgt wird, verzeichnet also eine typische Gewitternase. Die Limnimeterkurve war noch am Nachmittag des 21. August sehr ruhig; die Hauptschwingung war schwach angedeutet. Plötzlich 10 Uhr

abends fängt der Seespiegel an um 24 mm zu sinken, ausserordentliche Spiegelschwankungen um das mittlere Niveau setzen ein, welche schon um 10¹/₂ Uhr Amplituden von über 80 mm erreichen. In der Nacht entlud sich ein heftiges Gewitter. Die Seiches dauerten noch den nächsten ganzen Tag an und klangen erst am 23. aus. Während anfangs nur die Hauptschwingung vorhanden war, trat am 22. früh 3^h die Oberschwingung hinzu. Es folgte eine lange Reihe deutlich markierter Interferenzen, bis am 23. früh 6 Uhr die Oberschwingung die Oberhand gewann, die dann allein noch bis zum Abend dieses Tages den See beherrschte. —

Die Oberschwingung klingt schneller ab als die Grundschwingung. Die Dämpfungen, welche die Schwingungen erfahren, müssen mit den Reibungskräften, die sich den Pendelbewegungen entgegen stellen, auf's innigste zusammenhängen. Diese wieder sind bedingt ausser durch die Zähigkeit des sich bewegenden Mediums von dem Untergrunde, der Gestalt des Seebeckens und seiner Gesamtfläche. Bei einer grossen Reihe von Schwingungen, welche augenscheinlich einem einmaligen Bewegungsimpulse ihr Entstehen verdanken, ist auf den erhaltenen Curvenstreifen eine deutliche und sehr regelmässige Abnahme der aufeinanderfolgenden Amplituden zu erkennen, so dass sich hier ein Dämpfungsverhältnis und damit ein logarithmisches Decrement wie bei einer gedämpft schwingenden Magnetsnadel für die Seicheschwingungen bestimmen liesse.

Hierdurch würde eine neue, vielleicht nicht unwichtige charakteristische Constante für eine in einem Seebecken angesammelte Wassermasse gewonnen. Indessen erachte ich es noch für verfrüht auf die Art und die Ursachen der Erregungen, welche die Seichesbewegungen im vorliegenden Falle auslösen, sowie die Gesetze, nach denen dieselben wieder abklingen und auf die Faktoren, welche ihre allmähliche Dämpfung bedingen, schon jetzt näher einzugehen.

Dagegen möchte ich als bereits festgestellte Ergebnisse dieser Untersuchung die folgenden bezeichnen:

1) Das Seichesphänomen ist am Starnberger See in unzweifelhafter Weise und in durchaus typischer Form ausgeprägt.

2) Die Schwingungen, welche die gesamte Wassermasse fast ununterbrochen ausführt, sind reine d. h. einem Sinusgesetze folgende, harmonische Pendelschwingungen und zwar stehende Schwingungen im Sinne der Forel'schen Theorie.

3) Vorhanden ist zunächst eine Haupt- oder Grundschwingung von rund 25 Minuten voller Periodendauer (Hin- und Hergang). Es ist die Längsschwingung des ganzen Sees; sie ist einknotig, uninodal und erzeugt immer entgegengesetzte Schwingungsphasen an den beiden Seeenden. Die Knotenlinie dürfte etwa bei Tutzing quer über den See laufen.

4) Die aus dem Längsprofil mit Zugrundelegung der Merian'schen Formel berechnete Schwingungsdauer (24 Minuten) stimmt so genau mit der wirklich gefundenen überein, dass die Forel'sche Theorie durch die vorstehende Untersuchung eine neue Bestätigung erhält.

5) Das „Rinnen“ des Starnberger Sees, welches sich besonders durch eine auffallend starke Unterströmung in beiden Richtungen geltend macht, scheint mit dem grossen Deplacement erheblicher Wassermassen bei der Seichesbewegung im engsten Zusammenhange zu stehen.

6) Ausser der Grundschwingung ist noch eine Oberschwingung von etwas weniger als $\frac{2}{3}$ Schwingungsdauer der Grundschwingung vorhanden; die genaue Periodendauer beträgt $15\frac{3}{4}$ Minuten. Das Intervall beider Schwingungen ist demnach kein einfaches harmonisches, sondern liegt zwischen Quinte und Sext.

7) Bei beiden Schwingungen ist die Schwingungsdauer unabhängig von der Amplitude; das Gesetz des Isochronismus der Pendelschwingungen gilt also auch hier.

8) Beide Schwingungssysteme machen sich meist gleichzeitig geltend, freilich mit sehr wechselnden Amplitudenverhältnissen und den mannigfachsten Phasenverschiebungen. Es

entstehen „dikrote Schwingungen“ der verschiedensten Art. Sie sind aber immer in ihre beiden Componenten auflösbar und zeigen dann, dass das Princip der Coexistenz elementarer Schwingungsbewegungen auch noch bei der Interferenz dieser 39 bezw. 25 km grossen Wellenlängen gilt.

9) Von meteorologischen Einflüssen, welche unmittelbar kräftige Seichesschwingungen erregen können, sind bisher besonders plötzlich eintretende Luftdruckänderungen (z. B. Gewitternasen) hervorgetreten.

Es wird sowohl in geophysikalischer, wie rein physikalischer, geographischer, geologischer, meteorologischer und vielleicht auch technischer Hinsicht von Wichtigkeit sein, die Seichesforschung an den bayerischen Seen weiter zu führen. Zunächst bietet sich am Starnberger See selbst noch eine Fülle weiterer Fragen. Vor allem wird die genauere Fixierung der Knotenlinien und damit die gesamte Configuration des ganzen Schwingungssystems festzustellen sein, wozu gleichzeitig mit zwei an verschiedenen Punkten des Sees registrierenden Limnometern gearbeitet werden muss.

Ferner sind die Beziehungen der absoluten Spiegelstände selbst, also der wirklichen Wasserführung zu den Seiches näher zu studieren. Weiter wird ein Studium darüber, wie sich verschiedene meteorologische Erscheinungen in der Erregung der Wassermasse zu Pendelschwingungen widerspiegeln, sehr fruchtbar sein. Dass es in hygienischer Hinsicht für das organische Leben im und am See von grösster Wichtigkeit ist, dass die gesamte Wassermasse nicht stagniert, sondern bis zum Grunde hin in fortwährender lebendiger Bewegung erhalten wird, ist ein neuer Gesichtspunkt, welcher die Seichesforschung von ganz anderer Seite her empfiehlt. Beobachtungen über die im See auftretenden, oft sehr heftigen Strömungen und Unterströmungen werden, wenn sie mit den regelmässig erfolgenden Aufzeichnungen des Limnimeters verglichen werden, über die

Mechanik dieser Bewegungen Neues und Interessantes lehren. Endlich kann es kaum einem Zweifel unterliegen, dass sich die Seichesbewegungen bis zu einem gewissen Grade in den Grundwasserständen der umliegenden Ortschaften, namentlich an den beiden Enden des Sees, sowie in den Abflussmengen der Würm widerspiegeln werden. Sollte dies der Fall sein, so würde den Aufzeichnungen des Apparates auch ein unmittelbar praktisch-technisches Interesse beizumessen sein.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der mathematisch-physikalischen Klasse der Bayerischen Akademie der Wissenschaften München](#)

Jahr/Year: 1900

Band/Volume: [1900](#)

Autor(en)/Author(s): Ebert Hermann

Artikel/Article: [Periodische Seespiegelschwankungen \(Seiches\), beobachtet am Starnberger See 435-462](#)