

Werk

Jahr: 1933

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:9

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0009

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0009

LOG Id: LOG_0017

LOG Titel: Die Gezeitenströme und die innere Gezeitenwellen des Atlantischen Ozeans

LOG Typ: article

Übergeordnetes Werk

Werk Id: PPN101433392X

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

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

Terms and Conditions

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

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

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

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

Contact

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

Vielfach sind die Wirkungen, die vom Erdboden selbst ausgehen. Man muß mit pharmakologisch wirkenden Exhalationen von Sumpf- und Humusböden im Gegensatz zu Sand- und Felsböden rechnen. Radioaktive Emanationen und Strahlungen des Bodens werden auf ihre biologische Bedeutung untersucht. Den Heilwässern, die aus der Tiefe, also aus hohem Druck und hoher Temperatur heraus ans Tageslicht kommen, haftet der Nimbus bisher ungeklärter physikalischer Kräfte an, die neben den chemischen bestehen sollen. Ganz besonders aktuell sind die rätselhaften „Erdstrahlen“, die bisher nur mit der Wünschelrute nachgewiesen werden können. Man wäre an sich geneigt, auf Grund der vielfachen Belege die Möglichkeit solcher bisher unbekannter physikalischer Strahlungen zuzugeben, wenn nicht von denselben Wünschelrutengängern behauptet würde, daß mit einfachen Konstellationen verschiedener Metalle diese „Erdstrahlen“ auf weite Entfernung paralytisiert werden könnten. Das verstößt aber gegen alle physikalischen Gesetze. Die kosmische Höhenstrahlung wird nicht nur zur Erklärung dieser hypothetischen Erdstrahlen, sondern auch sonst zu beobachteten Fernwirkungen biologischer Natur herangezogen. Eine ganze Literatur gruppiert sich um den Namen *Lakowski*, dessen Hypothesen jedoch auf falschen physikalischen Voraussetzungen beruhen und abzulehnen sind.

Der Geophysiker sollte an diesen Fragen, die das große Publikum interessiert, nicht vorübergehen, sondern zur Aufklärung von sichergestellten Einflüssen und zur Abwehr von irrtümlichen Vorstellungen nach Kräften beitragen.

Die Gezeitenströme und die inneren Gezeitenwellen des Atlantischen Ozeans*)

Von **A. Defant**, Berlin — (Mit 6 Abbildungen)

Im Programm der Deutschen Atlantischen Expedition des „Meteor“ waren eine Anzahl von Ankerstationen auf großen Wassertiefen vorgesehen, auf denen mit Hilfe des Strommessers Beobachtungsmaterial über den Gezeitencharakter der Meereströmungen, insbesondere in den Kernschichten der Tiefenzirkulation gewonnen werden sollte, um nach Elimination der periodischen Änderungen verlässliche Werte über Richtung und Geschwindigkeit der wahren Bewegung im Raume zu erhalten. Tatsächlich wurden auf der Expedition 1925—1927 nur neun solche Stationen und eine auf der Vorexpedition, in einer mehr oder minder zufälligen, von äußeren Bedingungen abhängigen geographischen Verteilung ausgeführt. Die dadurch entstandene Lücke in den Strommessungen

*) Kurzer Auszug eines auf der Tagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft in Leipzig, Oktober 1932, gehaltenen Vortrags über die Ergebnisse der auf den Ankerstationen des „Meteor“ gewonnenen Strom- und Serienmessungen.

haben die Ozeanographen der Expedition dadurch auszufüllen versucht, daß in den tropischen und subtropischen Breiten an jeder Station regelmäßige Wiederholungen der ersten, bis 250 m reichenden Serie im Intervall von 3 bis 6 Stunden gewonnen und außerdem dadurch, daß im Arbeitsprogramm der Ankerstationen systematische Untersuchungen der Schwankungen von Temperatur und Salzgehalt aufgenommen wurden. Der Hauptzweck dieser beträchtlichen Arbeitsvermehrung war, für die oberste Meeresschicht, die der Sitz bedeutender periodischer und unperiodischer Schwankungen ist, besser fundierte Grundlagen für die dynamische Berechnung der ozeanischen Zirkulation zu gewinnen; eine ins Einzelne gehende Verfolgung dieser Schwankungen war aber nicht beabsichtigt, das Zirkulationsproblem stand als Hauptaufgabe der Expedition stets im Vordergrund.

Das auf den Ankerstationen gewonnene Beobachtungsmaterial an Strommessungen und Wiederholungsserien ist sehr groß. Ich habe mich entschlossen, es einer eingehenden Verarbeitung zu unterziehen und zwar sowohl in bezug auf die im freien Ozean noch völlig unbekanntes Gezeitenströme, als auch in der Richtung einer Aufklärung des viel umstrittenen Problems der internen Gezeitenwellen. Es stellte sich bald heraus, daß, trotzdem die Messungen in erster Linie nicht zur Verfolgung dieser Fragen angestellt worden sind und die Verteilung der Stationen nicht gerade zweckmäßig zu nennen ist, die Ergebnisse der Verarbeitung doch so vielseitig und neuartig sind, daß durch sie das Verständnis der Gezeiten des Atlantischen Ozeans und der mit ihnen verknüpften inneren Gezeitenwellen in wesentlicher Weise gefördert wird. Diese Verarbeitung des ganzen zur Verfügung stehenden Beobachtungsmaterials ist im Band VII/1 der „Wissenschaftlichen Ergebnisse der Deutschen Atlantischen Expedition auf dem Meteor 1925—27“ enthalten*). Es ist natürlich unmöglich, in dem engen Rahmen einer Zeitschrift von jeder Ankerstation das auf ihr gewonnene Material und seine Reduktion zu besprechen, wenn auch manches in methodischer Hinsicht sehr interessant wäre und jede Station für sich etwas charakteristisches darstellt. Ich muß mich beschränken, das an allen Stationen Gemeinsame hervorzuheben und insbesondere die Ergebnisse der Zusammenfassung der Teilresultate der einzelnen Ankerstationen zu besprechen; für Spezialfragen muß ich auf obige große Veröffentlichung verweisen.

Die auf den Ankerstationen ausgeführten Strommessungen haben in ihrer Bearbeitung gezeigt, daß an allen Stationen und in allen Tiefen der halbtägige und teilweise auch der ganztägige Gezeitenstrom klar und deutlich in Erscheinung tritt, und daß auf den einzelnen Stationen beim halbtägigen Strom, weniger beim ganztägigen im großen und ganzen einheitliche Verhältnisse sowohl was die Richtung und Phase als auch was die Stärke des Gezeitenstromes betrifft, herrschen. Bei allen Stationen ließen sich für alle Tiefenniveaus, für die Strom-

*) A. Defant: Die Gezeiten und inneren Gezeitenwellen des Atlantischen Ozeans. Ergebnisse der Strom- und Serienmessungen auf den Ankerstationen des „Meteor“. Bd. VII/1 der „Wiss. Ergebn. d. D. A. E. auf dem Forschungs- und Vermessungsschiff „Meteor“ 1925—1927.

beobachtungen vorliegen, die Stromfiguren, die über den zeitlichen Verlauf des Gezeitenstromes Auskunft geben, ableiten. Durch die Kenntnis dieser Elemente des Gezeitenstromes an einzelnen Punkten des Ozeans läßt sich dann ein Bild der Gezeitenströme im Atlantischen Ozean zwischen 30° N und 30° S gewinnen. Einer solchen Darstellung kommt insofern eine gewisse Bedeutung zu, als es das erstemal ist, daß wir genauere Kenntnis der Gezeitenströme eines freien Ozeans erhalten. Da es unmöglich erscheint, den vertikalen Gezeitenhub im freien Ozean über bedeutende Wassertiefen zu bestimmen, besteht die einzige Möglichkeit, die Gezeiten der freien Ozeanflächen zu erfassen in der Ermittlung der Gezeitenströme und im Studium ihres Ablaufes in vertikaler wie horizontaler Richtung. Die durch den „Meteor“ erwiesene Möglichkeit der Verankerung von Schiffen auf großen Tiefen und der Ausführung von Strommessungen auf freier See hat diese Arbeitsmethode praktisch verwertbar gemacht und die Ergebnisse der Ankerstationen des „Meteor“ sind die erste Frucht dieser Bemühungen. Die wenigen Stationen, die bisher zur Verfügung stehen, können die Verteilung der Gezeitenströme natürlich nur in groben Zügen geben, aber der Anfang ist damit gemacht, folgende Untersuchungen werden Verbesserungen bringen.

Für die zehn Ankerstationen des „Meteor“ und für drei Stationen der „Blake“*), sowie für drei Stationen, deren Analyse den Untersuchungen und vorläufigen Mitteilungen von B. Helland-Hansen und W. Ekman**) entnommen wurden, lassen sich zunächst für den halbtägigen Gezeitenstrom die Grundelemente angeben: 1. Die Hauptrichtung, die maximale Stärke (Amplitude) und die Eintrittszeit (Phase, in Mondstunden nach Meridiandurchgang des Mondes in Gr.) dieses Stromes; 2. das Verhältnis der kleinen und großen Achse der Stromellipse und 3. der Umlaufsinn derselben (cum sole oder contra solem). Diesen Grundwerten bzw. einer Eintragung der Werte in eine geographische Karte des Atlantischen Ozeans kann man zunächst entnehmen, daß der halbtägige Gezeitenstrom im wesentlichen der Längsachse des Atlantischen Ozeans folgt. Die Hauptachse der Stromfigur verläuft zumeist von Nordwest bzw. Nordost nach Südost bzw. Südwest; Abweichungen davon sind selten. Auch auf der Vertikalen an den einzelnen Stationen sind die Schwankungen nicht groß, was auf eine gewisse Stabilität der halbtägigen Gezeitenströmung in vertikaler Richtung hinweist. Die meridionale Verteilung der Phasen läßt einen allmählichen Übergang von etwa 3^h im Süden bei Tristan da Cunha über 4, 6, 8, 10, 0 auf 3^h etwa bei den Azoren erkennen. Natürlich sind die Abweichungen auf den einzelnen Stationen innerhalb der verschiedenen Tiefen manchmal recht groß, aber trotzdem ist diese gesetzmäßige Änderung längs der Längsachse des Atlantischen Ozeans unbestreitbar als Grunderscheinung vorhanden. Sie tritt auch klar und deutlich hervor, wenn wir Gesamtmittel der Phasenzeit für jede Station bilden, wie es folgende Tabelle zeigt.

*) Siehe hierzu: Ann. d. Hydrogr. u. mar. Meteorol. 1932, S. 378.

**) Report of the scientific results of the „Michael Sars“ North Atl. Deep-sea Exp. 1910. Vol. I. Phys. Oceanography S. 106 und Kungl. fysiogr. sällsk. i Sound förhandl. Bd. I. 1. Mai 1931.

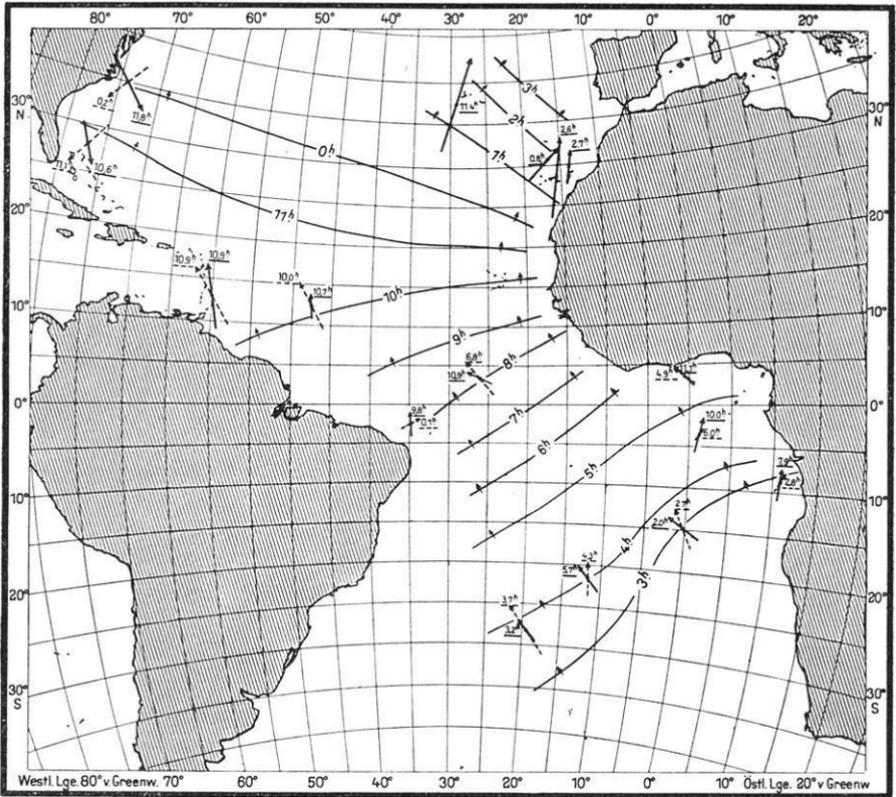


Fig. 1. Hauptrichtung des halbtägigen Gezeitenstromes auf den Ankerstationen (ausgezogene Pfeile: Oberflächenschichte bis 50 m, gestrichelte Pfeile: größere Tiefen), sowie Phasen des maximalen Gezeitenstromes. Die Länge der Pfeile gibt die maximale Gezeitenstromstärke. Die Linien sind Linien gleicher Stromphase

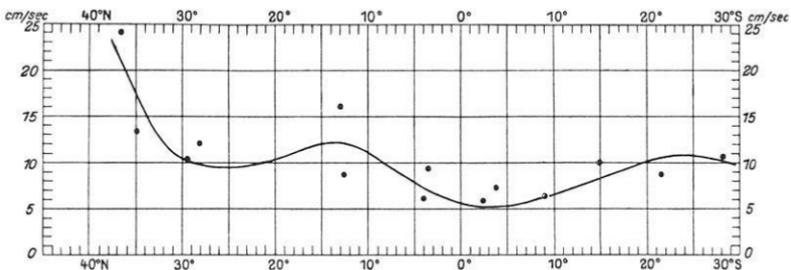


Fig. 2. Mittlere meridionale Verteilung der Geschwindigkeitsamplitude des halbtägigen Gezeitenstromes im Atlantischen Ozean

Man kann sich auch durch Linien gleicher Phasenzeit das Fortschreiten des halbtägigen Gezeitenstromes im Atlantischen Ozean veranschaulichen; Fig. 1 gibt eine solche Darstellung, die völlig neu ist, und zeigt, wenn auch in rohen Zügen, wie die halbtägige Welle von Süden kommend den Atlantischen Ozean durchheilt. Wegen der geringen Zahl der Werte sind die Isochronen möglichst gleichmäßig über den ganzen Ozean verteilt worden; es ist nicht unwahrscheinlich, daß an einzelnen Stellen eine Zusammendrängung, an anderen ein weiterer Abstand der Linien gleicher Phase vorhanden ist; mit den wenigen Werten können solche Details nicht erfaßt werden.

Ankerstation	5	31	5 ^B	58	<i>DE</i> Vorex.	288	229
Geographische Breite	36° N	28°	13°	37.6°	29.5°	12.6°	4.0°
Zahl der Werte	5	2	5	1	9	5	7
Mittlere Phase (Mst. Gr.)	0.1h	10.8h	10.7h	11.4h	2.0h	10.4h	7.6h
Mittlere Amplitude (cm/sec)	13.2	12.0	16.0	24.0	10.4	8.7	6.1

Ankerstation	214	254	241	186	147	176	36
Geographische Breite	3.5° N	2.5° S	3.8°	9.0°	15.0°	21.5°	28.1° S
Zahl der Werte	7	4	4	4	4	6	4
Mittlere Phase (Mst. Gr.)	7.9h	10.4h	7.7h	5.3h	2.4h	4.1h	3.5h
Mittlere Amplitude (cm/sec)	9.3	5.9	7.3	6.4	9.9	8.8	10.6

So wie die Phase unterliegt auch die Amplitude des halbtägigen Gezeitenstromes in den verschiedenen Tiefen auf einer Ankerstation großen Schwankungen; aber wie dort, so auch hier: Diese Schwankungen heben sich weg, wenn man einen Mittelwert über mehrere Tiefen bildet, d. h. man erhält eine meridionale Abhängigkeit der Stromamplitude längs des Atlantischen Ozeans, die von den Störungen auf den einzelnen Stationen frei ist. Es scheint, daß in diesem Sinne eine gegenseitige Kompensation der verschiedenen Schichten vorhanden ist, die nicht zufällig ist, sondern in Verbindung mit dem Aufbau des Meeres (Sprungflächen) für den Ablauf der Gezeit dynamisch notwendig ist. Die meridionale Verteilung der mittleren Geschwindigkeitsamplitude ist in Fig. 2 gegeben. Wir kommen darauf noch zurück.

Die dritte Erscheinung, die zu besprechen ist, ist der Umlaufsinn der Stromellipse. Von den 60 Fällen zeigen 51 Fälle einen Umlaufsinn cum sole oder alternierend, 9 einen solchen contra solem; aber in 4 von diesen ist die Ellipse so schmal, daß eine Änderung von nur 0.2 Stunden in der Phase den Umlaufsinn umkehrt. Zählt man diese Fälle noch zu den ersteren, dann ist der Umdrehungssinn in 92% der Fälle cum sole. Die Ursache dieser Erscheinung liegt in der ablenkenden Kraft der Erdrotation. Auch das Verhältnis der kleinen zur großen Achse der Stromellipse hängt davon ab und in theoretischer Hinsicht müßte es für fortschreitende halbtägige Gezeitenwellen der Beziehung $1.033 \sin \varphi$ folgen. Inwieweit dies der Fall ist, zeigt Fig. 3.

Alle diese Tatsachen führen zum Schluß, daß die halbtägigen Gezeiten des Atlantischen Ozeans sich wie eine fortschreitende Welle bzw. wie eine Superposition solcher Wellen verhalten. Die Kenntnis der

Verteilung der Gezeitenströme im freien Atlantischen Ozean gibt natürlich neue Grundlagen für die Theorie der Gezeiten dieses Meeres. Die bisherigen Theorien von mir und R. Sterneck haben zwar in vielen Punkten eine Erklärung der Grundtatsachen der atlantischen Gezeiten, soweit sie durch Beobachtungen an den Küsten und Inseln festgestellt sind, gegeben, aber nicht überall haben diese Erklärungsversuche befriedigt; ein wesentlicher Umstand ist in diesen Arbeiten nicht berücksichtigt worden, der für das schließliche Bild der Atlantischen Gezeiten sehr mitbestimmend sein dürfte. Es ist die Vernichtung eines großen Teiles der Gezeitenenergie auf den ausgedehnten Schelfen und an der Eisbedeckung des Arktischen Meeres. Diese enorme Dissipation an Energie im innersten Teil des Atlantischen Ozeans wirkt sich für die atlantischen Gezeiten, wie man an theoretisch leicht überblickbaren einfachen Modellen*) nachweisen kann, so aus, daß die Gezeiten sich im wesentlichen darstellen lassen als eine Überlagerung zweier stehender Wellen, deren Phase sich um ein Viertel der Periode, also um 3 Stunden

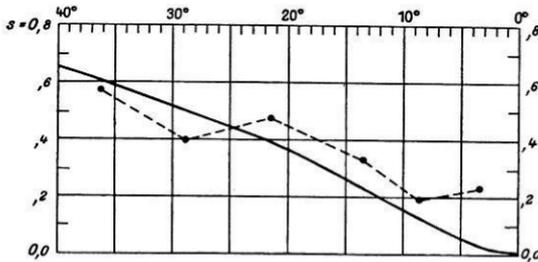


Fig. 3. Verhältnis der kleinen zur großen Achse der Stromfigur des halbtägigen Gezeit in Abhängigkeit von der geogr. Breite. (Ausgezogene Kurve: theoretischer Verlauf)

unterscheidet und in der Längsachse des Meeres gegeneinander um etwa ein Viertel der Wellenlänge verschoben sind. Dieses theoretische Ergebnis gibt die Möglichkeit, auch für den komplizierten morphologischen Bau des kanalförmigen Atlantischen Ozeans diese beiden Wellen schrittförmig theoretisch zu berechnen, wenn wenigstens für zwei Stellen die Gezeit durch Beobachtung fest gegeben ist. Die Kenntnis des Energiebetrages, der im Arktischen Meer durch Reibung verloren geht, ist hierbei nicht notwendig und wird ersetzt durch die verlangte Koinzidenz an zwei Stellen des Kanals. Auch die Wirkung der fluterzeugenden Kräfte läßt sich in Rechnung setzen, so daß alle Umstände Berücksichtigung finden können bis auf einen: Die ablenkende Kraft der Erdrotation vermag, wie wir wissen, die Gezeitenbewegungen in einem Kanal wesentlich zu beeinflussen, aber in der Hauptsache doch nur so, daß zu den Längsschwingungen Querschwingungen hinzutreten. Wir können die Wirkung solcher Querschwingungen abschätzen. Auf der Längsachse des Ozeans werden diese Wirkungen klein bleiben, und wenn wir alles auf diese Achse beziehen, dann können wir in erster Annäherung alles so ansehen,

*) Ann. d. Hydrogr. u. mar. Meteorol. 1928, S. 274.

als ob die Erde ruhen würde. Ob die hier entwickelte Auffassung der Entstehung der atlantischen Gezeiten möglich ist, läßt sich nur aus einem Vergleich zwischen den Ergebnissen der Theorie und der Beobachtungen schließen. Wir können jetzt zu diesem Zweck neben den nicht sehr genauen Beobachtungen der vertikalen Gezeit auf den wenigen Inseln des Atlantischen Ozeans auch die nunmehr wenigstens in groben Zügen bekannte Verteilung der Gezeitenströme heranziehen. Dieser Vergleich zwischen Theorie und Beobachtung ist in den Fig. 4 und 5 durchgeführt. Die Fig. 4 gibt die Verteilung der Amplituden der 1^h- und der 4^h-Wellen auf der Mittel-

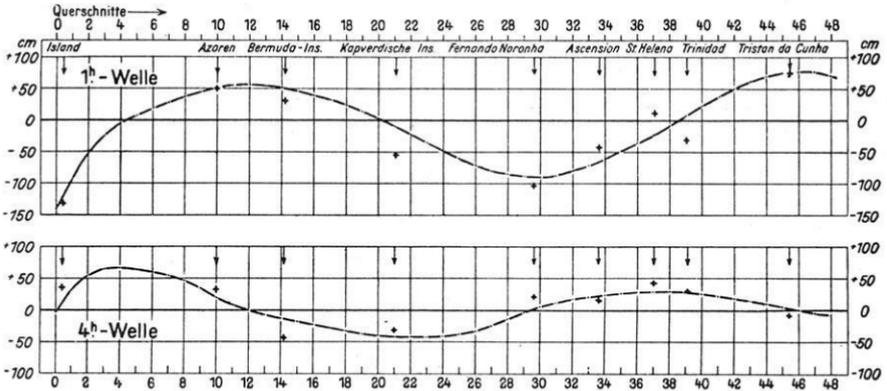


Fig. 4. Verteilung der Amplituden der 1^h- und 4^h-Welle auf der Mittelachse des Atlantischen Ozeans und die Gezeitenbeobachtungen auf den Inseln

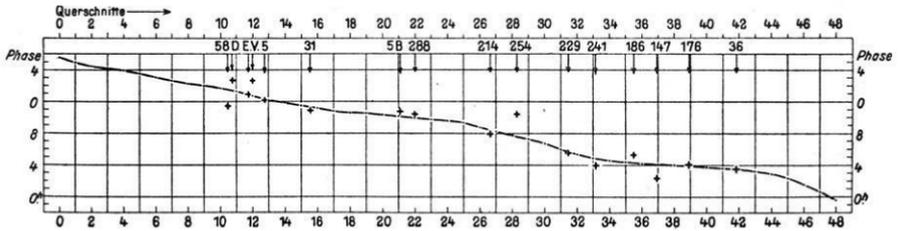


Fig. 5. Phasenzeit des halbtägigen Gezeitenstromes auf der Mittelachse des Atlantischen Ozeans und die Ergebnisse der Strommessungen auf den Ankerstationen

achse des Atlantischen Ozeans nach den für 48 Querschnitte zwischen Island (Querschnitt 0) und Südspitze Afrikas—La Plata-Mündung (Querschnitt 48) berechneten Werten, und die Amplituden dieser zwei Wellen nach den Gezeitenbeobachtungen auf den Inseln durch kleine Kreuze. Der Vergleich fällt recht befriedigend aus, namentlich wenn man bedenkt, daß die Inseln von der Mittelachse des Ozeans doch um erhebliche Beträge abstehen und die Beobachtungswerte immerhin Anteile von Querschwingungen enthalten können. Fig. 5 gibt die theoretische Phasenzeit des halbtägigen Gezeitenstromes auf der Mittelachse des Ozeans und die Phasenzeit nach den Strombeobachtungen der Ankerstationen. Auch hier ist die Überein-

stimmung nicht schlecht und zeigt, wie der theoretische Verlauf gleichsam einen Ausgleich der beobachteten Werte gibt. Auch die theoretische Verteilung der Amplitude des Gezeitenstromes deckt sich in der Hauptsache mit den bei den Ankerstationen beobachteten Werten, wenn man davon absieht, daß die ablenkende Kraft der Erdrotation an sich eine Zunahme dieser Amplitude polwärts bedingt.

Dieselben Rechnungen und Vergleiche, die hier für die halbtägige Gezeit besprochen wurden, lassen sich auch für die ganztägige Welle ausführen und auch in diesem Fall ist die Übereinstimmung gut. Diese Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtung führt zum zwingenden Schluß, daß die gegebene Erklärung der atlantischen Gezeiten im wesentlichen das richtige trifft:

Die atlantischen Gezeiten sind unter Mitwirkung der fluterzeugenden Kräfte stehende Mitschwingungszeiten der Wassermassen dieses langgestreckten Ozeans mit den periodischen Impulsen, die sie von Süden empfangen. Aber diese Mitschwingungszeiten werden modifiziert erstens durch den großen Energieverlust, den die Gezeitenwelle im Arktischen Meere erleidet und der auf die Ausbildung der Gezeitenwelle im Atlantischen Ozean zurückwirkt, zweitens durch die ablenkende Kraft der Erdrotation, die durch Querschwingungen namentlich die Gezeiten der Küsten, weniger jene der Mittelachse beeinflusst. Alles dies wirkt zusammen, der halbtägigen Gezeit des Südatlantischen Ozeans in der Hauptsache den Charakter einer von Süden nach Norden fortschreitenden Welle zu geben.

Ergebnisse der Bearbeitung der ozeanographischen Wiederholungsserien. Bei der Bearbeitung der auf den Ankerstationen gewonnenen Wiederholungsserien hat sich bei allen Stationen übereinstimmend gezeigt, daß in den Schwankungen aller ozeanographischen Elemente die halbtägige und, soweit die Beobachtungen ausreichen, auch die ganztägige Gezeitenperiode vorhanden sind.

Besonders an Sprungflächen von Temperatur, Salzgehalt und Dichte treten diese Perioden mit großer Amplitude hervor, überragen hier in den meisten Fällen die kleineren unperiodischen Änderungen der Elemente und werden so zur Haupterscheinung. Der ganze Ablauf dieser Schwankungen erweckt an allen Ankerstationen den Eindruck, daß die Diskontinuitätsfläche selbst der Träger wellenartiger Verlagerungen mit Gezeitenperiode ist; denn aus Beobachtungen aus der meist homogenen Deckschichte in einiger Entfernung von der Sprungfläche oder aus Beobachtungen unterhalb der Sprungschichte erkennt man, daß die Amplitude rasch auf kleine Werte herabgeht und schließlich nahezu verschwindet.

Diese periodischen Änderungen der ozeanographischen Elemente lassen sich als Folge vertikaler Verlagerung der Wassermassen beim Vorübergang der Gezeitenwelle deuten; die horizontalen Verschiebungen sind, wie in dem Falle der Ankerstation 288 besonders nachgewiesen wurde, nicht imstande, solche große Änderungen hervorzurufen und treten hier gegenüber den vertikalen zurück, und es ist klar, daß die periodischen Änderungen an Ort und Stelle um so größer ausfallen müssen, je stärker das vertikale Gefälle des betreffenden Elementes ist. Das Verhältnis Amplitude der Schwankung:vertikales Gefälle

gibt ein Maß für die Größe der vertikalen Verlagerung der Wassermassen in den verschiedenen Tiefen, die beim Vorübergang der Gezeitenwelle die beobachteten Änderungen der ozeanographischen Elemente hervorrufen. Die Durchführung dieser Reduktion ergab das auffallende Ergebnis, daß die Tiefe, in der die Diskontinuitätsfläche (größtes vertikales Gefälle) liegt, sich nicht mehr besonders auszeichnet und für alle Tiefen, soweit die Ermittlung möglich ist, die Größenordnung der vertikalen Verlagerung der Wassermassen beim Vorübergang der Gezeitenwelle gleich ist. Einheitlich werden somit alle Wasserschichten von dieser periodischen Bewegung erfaßt und schwingen auf und nieder, aber unsere Apparate können sie nur dort verzeichnen, wo kräftige Schwankungen der ozeanographischen Elemente damit verknüpft sind und das ist dort, wo der vertikale Gradient im Aufbau des Meeres sich in Sprungschichten zu großen Werten steigert. Nur so wird die Diskontinuitätsfläche scheinbar zum Träger der Schwankungen mit Gezeitencharakter. Die Phase dieser vertikalen Verlagerungen ist in den verschiedenen Tiefen innerhalb der möglichen Fehler der Bestimmung gleich, gleichgültig ob sie aus den Schwankungen der Temperatur, des Salzgehaltes, der Dichte oder des Sauerstoffgehaltes abgeleitet worden ist. Auch dies weist auf die Einheitlichkeit der Erscheinung in den beobachteten Wasserschichten des Meeres (meistens bis 200 oder 250 m) hin.

Diese inneren Gezeitenwellen der verschiedenen ozeanographischen Elemente — auch beim Sauerstoffgehalt und beim Planktongehalt des Meerwassers kehren sie wieder — müssen selbstverständlich mit dem Ablauf der Gezeitenwelle, insbesondere mit den Gezeitenströmen innerlich verknüpft sein. Dieser Zusammenhang läßt sich zunächst an jeder Station für sich untersuchen, und da stellte es sich sofort heraus, daß er für Ankerstationen in der Nähe der Küste (Nr. 229 und 186) etwas anders liegt als für Ankerstationen im freien Ozean. An den Küstenstationen steht die Lage der im Aufbau des Meeres vorhandenen Sprungschicht zum Anstau des Wassers an der Küste in gesetzmäßiger, leicht überblickbarer Beziehung. Wahrscheinlich vollführt die Sprungschicht durch die Gezeitenströme erzwungene stehende Wellen, deren Phase von der des Gezeitenstromes der Deckschicht um ein Viertel der Periode verschieden ist.

Bei den Stationen im freien Ozean ist die Verknüpfung mit dem Gezeitenstrom anders; in den allermeisten Fällen ist der Phasenunterschied entweder nahe bei Null oder nahe bei der Hälfte der Periode, d. h. die vertikale Verlagerung der Wassermassen mit der Sprungschicht geht parallel oder invers mit dem horizontalen Gezeitenstrom.

Zum Verständnis dieses auffallenden Zusammenhanges war es notwendig, einige theoretische Untersuchungen auszuführen, die eine Klärung der Frage des Auftretens innerer Gezeitenwellen fördern sollten:

1. Man kann sich zunächst die Frage vorlegen: Können die fluterzeugenden Kräfte innere Gezeitenwellen an einer Diskontinuitätsfläche eines zweigeschichteten Meeres hervorrufen? Für vereinfachte Verhältnisse (unendlich ausgedehntes Meer, Nichtberücksichtigung der Erdrotation und Reibung, homogene Wasser-

massen) ließ sich die Frage beantworten: Interne, durch die fluterzeugenden Kräfte erzwungene Grenzwellen sind nur möglich, wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser Wellen kleiner ist als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit freier Wellen an der Grenzfläche. Da diese Forderung aber bei den halb- und ganztägigen Wellen nie erfüllt sein kann (Größenordnung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gezeitenwellen etwa 180 m/sec, der freien Wellen etwa 2m/sec) sind direkte interne Gezeitenwellen an den Sprungflächen des Meeres in dieser einfachen Form kaum möglich.

2. Es ist der Nachweis möglich, daß innere Wellen in einem unendlich langen rotierenden Kanalaufreten können. Sie haben eine Form entsprechend der Lord Kelvinschen Wellen der Oberfläche, unterscheiden sich von diesen nur insofern, als die Abnahme der Wellenamplitude quer zur Kanalrichtung so stark ist, daß die innere Welle sich praktisch nur auf die eine Seite des Kanals beschränkt. Auch in einem zweifach geschichteten, unbegrenzten rotierenden Meer sind innere Wellen möglich; diese Wellenart entspricht wieder ganz den freien Oberflächenwellen, die H. U. Sverdrup für ein homogenes Meer gefunden hat.

3. Auch Trägheitsschwankungen der Grenzfläche und des Stromfeldes mit der Periode eines halben Pendeltages sind möglich; sie stellen sozusagen freie Schwingungen des ganzen Systems dar; sie würden auftreten, wenn die Gleichgewichtslage einmal gestört, sich selbst überlassen wird. Es ist nicht ausgeschlossen, daß solche Trägheitspendelungen von Grenzflächen tatsächlich vorkommen.

4. Es wurde nachgewiesen, daß auch die Turbulenzreibung im wesentlichen nicht imstande ist, eine derartige Verschiebung der Wellenamplituden hervorzurufen, daß interne Wellen dadurch vorgetäuscht werden. Die verschiedene Beeinflussung der Deckschicht gegenüber der Unterschicht kann eine Verstärkung der Amplituden an der Grenzfläche bedingen, aber sie kann nie so groß sein, daß die Amplitude der Oberflächenwelle kleiner wird als die der Grenzwellen.

5. Diesen mehr verneinenden Untersuchungen steht eine positiv erklärende gegenüber. Die hydrodynamischen Bewegungsgleichungen für ein zweifach geschichtetes Meer zeigen, daß ein Unterschied in der Amplitude und Richtung des Gezeitenstromes bei gleicher Phase in beiden Schichten notwendigerweise mit Verlagerungen der Grenzfläche mit bestimmter Phase und Amplitude verknüpft ist. Auch bei beliebiger Dichteverteilung in der Vertikalen und Horizontalen gilt natürlich dasselbe, und man findet, daß, wenn der Gezeitenstrom durch $u = u_0 \sin \sigma t$ und $v = v_0 \cos \sigma t$ und u_0, v_0 von der Tiefe z abhängen, die Dichteänderungen den Beziehungen folgen:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\sigma}{g} \left[s \frac{\partial \rho v_0}{\partial z} - \frac{\partial \rho u_0}{\partial z} \right] \cos \sigma t, \quad \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\sigma}{g} \left[\frac{\partial \rho v_0}{\partial z} - s \frac{\partial \rho u_0}{\partial z} \right] \sin \sigma t,$$

worin $s = 2 \omega \sin \varphi / \sigma$ ist. Die Dichteverteilung und damit auch alle anderen ozeanographischen Elemente unterliegen dann periodischen Schwankungen, die wesentlich von der vertikalen Verteilung der Gezeitenströme im Ozean ab-

hängen. Insbesondere ergibt sich, daß bei Zunahme der Stromamplitude mit der Tiefe die Phase der Verlagerung der Grenzfläche identisch mit der Phase des Gezeitenstromes ist, der Phasenunterschied ist 0^h , während bei Abnahme der Stromamplitude mit der Tiefe der Phasenunterschied eine halbe Periodenlänge, bei der halbtägigen Welle somit 6 Stunden beträgt; der Zusammenhang zwischen Gezeitenstrom und Schwankungen der ozeanographischen Elemente ist in diesem Fall invers.

Die Gegenüberstellung dieser theoretischen Ergebnisse und des gefundenen Zusammenhanges zwischen Gezeitenstrom und vertikaler Verlagerung der Wassermassen führt zum Schluß, daß wir in den beobachteten vertikalen Schwankungen der Wassermassen es mit internen Wellen zu tun haben, die durch den Vorübergang der normalen Gezeitenwelle erzwungen sind und mit diesen eng gekoppelt erscheinen. Die Inhomogenitäten im Aufbau des Gezeitenstromes sind charakteristische Begleiterscheinungen dieser internen Wellen; beide Erscheinungen stehen zueinander nicht in der Beziehung von Ursache und Wirkung, sondern stellen wechselseitige Beziehungen, die sich gegenseitig bedingen, dar. Insofern sind die abgeleiteten Gezeitenwellen der ozeanographischen Elemente, die in den Sprungschichten zu großer Entfaltung gelangen, sicherlich interne Wellen. Die obigen theoretischen Untersuchungen haben gezeigt, daß bei der Deutung des Zusammenhanges dem Phasenunterschied Strom—vertikale Verlagerung eine Bedeutung zukommt. Es ist ganz auffallend, daß sich die Werte dieses Unterschiedes auffallend um die zwei Hauptwerte 0 und 6 Stunden herumgruppieren:

Auf die drei Unterschiedsintervalle:

— 2 bis + 1 Std. entfallen 46% aller Fälle mit einem Mittel: — 0.8 Std.
 + 5 „ + 8 „ „ 38% „ „ „ „ „ : + 6.9 „

Auf die sechs Unterschiedsintervalle:

+ 8 bis + 10 Std. } entfallen nur 16% aller Fälle.
 + 1 „ + 5 „ }

Das Hervortreten der beiden ersten Gruppen ist klar und deutlich und muß mit der Dynamik der Erscheinung in innigem Zusammenhang stehen. Bei diesen inneren Gezeitenwellen ist somit mit großer Annäherung der Fall einer fortschreitenden Gezeitenwelle realisiert, wo theoretisch die Koppelung mit dem Gezeitenstrom gerade 0 oder 6 Stunden sein soll. Die Spaltung 0 oder 6 Stunden Phasenunterschied soll theoretisch davon abhängen, ob die Amplitude des Gezeitenstromes mit der Tiefe zu- oder abnimmt. Auch diese Forderung kann man prüfen. Man findet sie in den wenigen Fällen, die eine Prüfung zulassen, wie Fig. 6 zeigt, vollauf bestätigt. Auch für das Amplitudenverhältnis Strom—vertikale Verlagerung, das nach den Beobachtungen der Größenordnung nach etwa $1.5 \cdot 10^{-2}$ ist, ergibt sich eine ausreichende, in qualitativer Richtung wenigstens ausreichende Erklärung; quantitativ läßt dieses Verhältnis eine Prüfung nur zu, wenn eine volle theoretische Lösung des Problems interner Gezeitenwellen vorliegt.

Fassen wir die Ergebnisse der Untersuchung der inneren Gezeitenwellen zusammen, so können wir konstatieren, daß diese inneren Gezeitenwellen eine Erscheinung ganz allgemeiner Natur sind und erzwungene Verlagerungen der Wasserschichten beim Vorübergang der Gezeitenwelle, an der sie festgekoppelt sind, darstellen. Durch die Verlagerungen wird der Aufbau des Meeres wesentlich in Mitleidenschaft gezogen, insbesondere dort, wo Sprungschichten der ozeanographischen Elemente und anderer, dem Wasser fest anhaftende Eigenschaften (Gasgehalt, Plankton usw.) vorhanden sind. Diese Verlagerungen der Wasserschichten sind geknüpft an Inhomogenitäten im vertikalen Aufbau des Gezeitenstromes: Schichten mit stärkeren und schwächeren Gezeitenströmen lagern im Meere übereinander und im Rhythmus ihrer Periode wechselt auch die Dicke dieser Schichten. Es ist nicht von der Hand zu weisen, daß dieses ganze

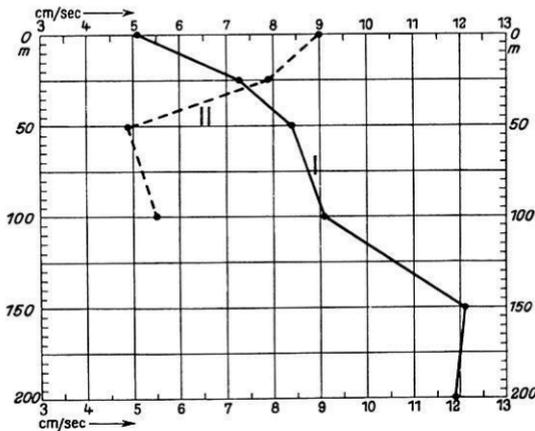


Fig. 6. Vertikale Verteilung der Amplituden des halbtägigen Gezeitenstromes
 Gruppe I: Phasenunterschied Strom—Verlagerung — 0.2 Std.
 „ II: „ „ „ „ + 6.9 „

zusammengehörige System von vertikalen Verlagerungen der Wassermassen und inhomogenem Gezeitenstrom zu internen Gezeitenwellen gehört, die einer allgemeinen homogenen Gezeitenströmung überlagert sind. Die beobachtete vertikale Inhomogenität des Gezeitenstromes würde dann zustande kommen aus der Summe eines konstanten Gezeitenstromes und eines oberhalb und unterhalb der Sprungschicht mit entgegengesetzter Phase auftretenden periodischen Zusatzstrom. Dieser letztere erfüllt dann die Bedingungen, die für interne Wellen notwendig sind. Daß die dazugehörigen vertikalen Verlagerungen, wie die Beobachtungen zeigen, keine Abnahme mit der Entfernung von der Sprungfläche zeigen, hätte seinen Grund darin, daß wir es mit „langen“ Wellen zu tun haben, wo solche Differenzen völlig zurücktreten. Auf jeden Fall steht fest, daß die beobachteten internen Schwankungen der Ausfluß einer gewissen großen Turbulenz im vertikalen Aufbau der Gezeitenströme des freien Ozeans darstellen.