

Meridionale Schichtung und Tiefenzirkulation in den Westhälften der drei Ozeane.

Von

Georg Wüst.

(Institut für Meereskunde an der Universität Berlin).

I. Vorbemerkungen.

Durch die Arbeiten von A. MERZ (1—4) und die von ihm angeregten Untersuchungen (5—8) ist die Bearbeitung des Hauptproblems der Meereskunde, das der ozeanischen Zirkulation, so weit fortgeschritten, dass der Versuch gewagt werden kann, Schichtung und Tiefenzirkulation der drei Ozeane auf Grund neuer Längsschnitte der Temperatur und namentlich des Salzgehalts vergleichend zu betrachten und damit das Problem der allgemeinen ozeanischen Zirkulation in Angriff zu nehmen. Zwar müssen wir diesen Versuch heute noch beschränken auf eine qualitative Beurteilung der meridionalen Komponenten in den Westhälften der drei Ozeane. Aber selbst bei dieser Beschränkung des Themas kann es sich in dem folgenden knappen Überblick nur um die Herausarbeitung der Hauptzüge handeln.

Die Grundlage für unsere Betrachtung bilden die Längsschnitte, die der Verfasser für den Pazifischen (7) und Atlantischen Ozean (6), für den letzteren im wesentlichen auf Grund des »Meteor«-Materials, und L. MÖLLER (8) für den Indischen Ozean entworfen haben. Die Lage dieser Westschnitte ergibt sich aus der Karte (Abb. 1). Der atlantische Schnitt läuft annähernd der Küste parallel und verbindet die tiefsten Punkte der westatlantischen Mulde. Die Verteilung des Beobachtungsmaterials im Pazifischen und Indischen Ozean gestattet eine solche Berücksichtigung des Reliefs bei Anlage der Schnitte nur in einem beschränkten Umfange.

Immerhin können die Profile in erster Annäherung als korrespondierend angesprochen werden. Um sie besser vergleichen zu können, ist es erforderlich, alle Stationen auf einen Meridian zu projizieren und die zonalen Komponenten, die in den Schnitten stecken, zu vernachlässigen.

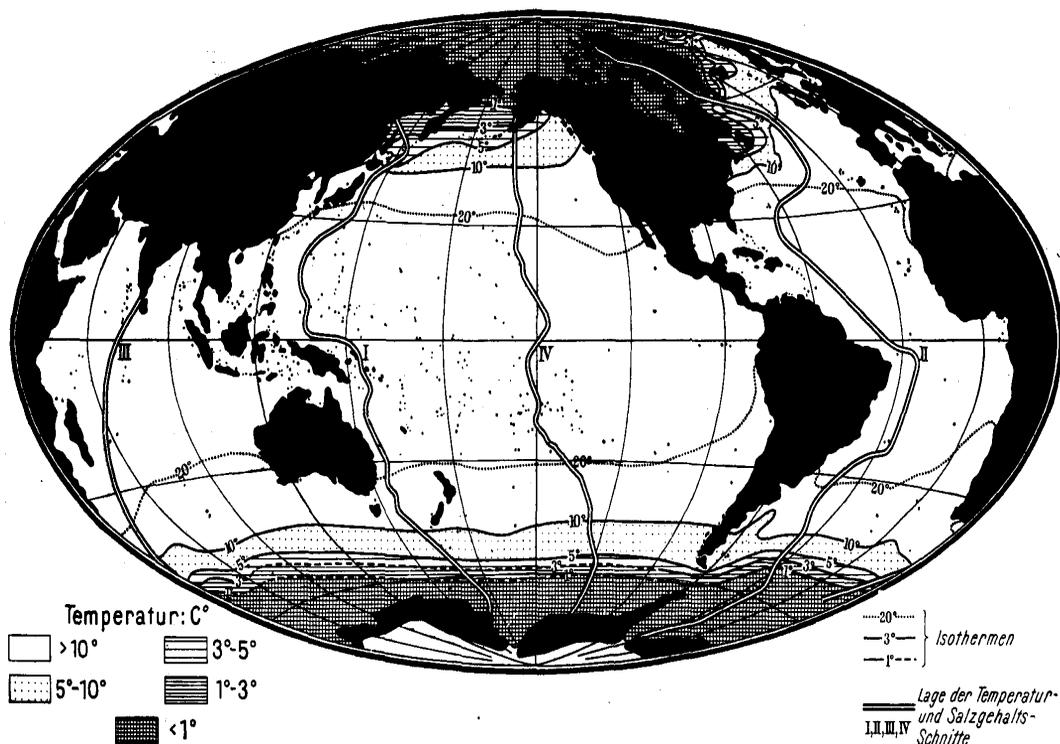


Fig. 1. Ausdehnung von Troposphäre (weiss) und Stratosphäre (schraffiert) an der Meeresoberfläche (Jahresdurchschnitt) und Lage der Längsschnitte.

Bei dieser Sachlage und dem noch vielfach hypothetischen Charakter der pazifischen Schnitte darf unsere Betrachtung den feineren Zügen des Aufbaus kein grosses Gewicht beilegen, sondern muss sich auf die Hauptwasserarten beschränken¹⁾. Diese werden begrenzt durch die Isothermen für 1°, 3°, 5° und 10° und durch die Isohalinen für 34,4, 34,6, 34,8 und 35,0 ‰. Indem wir die fünf Wasserarten verschieden schraffieren — und zwar entsprechen die dunkelsten Flächen den niedrigsten Werten von Temperatur und Salzgehalt, die weissgelassenen den höchsten — bringen die Diagramme die Unterschiede im meridionalen thermischen und halinen Aufbau zwischen den drei Ozeanen zwischen 80° N und 80° S klar zur Anschauung (Fig. 2 und 3).

Kennzeichnend für den vertikalen Aufbau des Ozeans ist die Zerteilung in eine seichte Warmwasser-Deckschicht und eine gewaltige Kaltwasser-Tiefenschicht. Die Deckschicht, die DEFANT (9) »ozeanische Troposphäre« nennt, ist zugleich salzreich, die Tiefenschicht, welcher er den Namen »ozeanische Stratosphäre« gibt, salzarm. War dieser Gegensatz naturgemäss längst bekannt, so hat erst DEFANT (9, 10) die Bedeutung der die beiden Schichten trennenden Grenzfläche für die Zirkulationsvorgänge in ihrem vollem Umfange erkannt. Diese Grenzfläche wird gebildet durch das untere Ende der Sprungschicht von Temperatur und Salzgehalt, das etwa mit der 10°-Isotherme und der 34,8—35,0 ‰-Isohaline zusammenfällt. Die weissgelassenen Flächen unserer Schnitte bezeichnen also die vertikale Ausdehnung der Troposphäre.

Die Grenzfläche steigt polwärts zur Oberfläche an, schneidet diese schliesslich, sodass in den subpolaren und polaren Zonen die Oberflächenschichten der Stratosphäre angehören. An der Meeresoberfläche ist die Grenzfläche identisch mit der Polarfront, jener wichtigen Stromkonvergenz, welche die vorwiegend zonalen Oberflächeströmungen der Troposphäre von den vorwiegend meridional gerichteten der Stratosphäre trennt. Sie ist in den modernen Stromdarstellungen (vgl. die Stromkarten in 6, 7, 8 und 11) an den Grenzen der Antarktis und Arktis über weite Strecken deutlich als eine Konvergenz der Stromrichtung zu ver-

¹⁾ Die ausführliche Diskussion der einzelnen Schnitte ist in den unter Nr. 6, 7 und 8 des Literaturverzeichnisses genannten Abhandlungen enthalten. In der Abhandlung 7 habe ich bereits die Abbildungen 2, 3, 5 und 6 dieses Aufsatzes veröffentlicht und in ähnlicher Weise vergleichend betrachtet.

Eine ausgezeichnete, von theoretischen Betrachtungen ausgehende Darlegung des Wesens der ozeanischen Zirkulation gibt A. DEFANT im VIII. Kapitel seiner »Dynamischen Ozeanographie« (Berlin, J. Springer, 1929), wobei er sich ebenfalls auf die neuen Längsschnitte der Temperatur und des Salzgehaltes von L. MÖLLER und des Verfassers stützt. Die vorliegenden Ausführungen beabsichtigen, die Ausführungen DEFANTS nach der beschreibenden und vergleichenden Seite zu ergänzen.

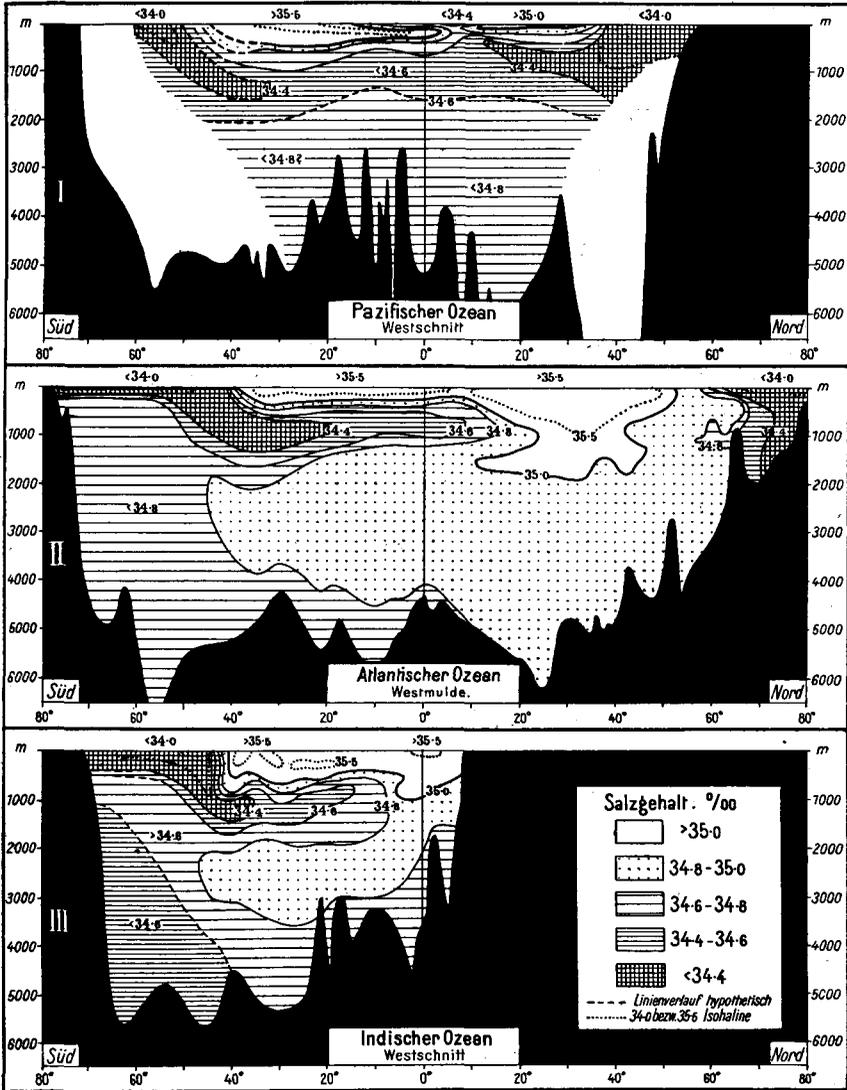


Fig. 3. Längsschnitte des Salzgehaltes durch die Westhälften der drei Ozeane.
 Atlantischer und Pazifischer Schnitt nach Wüst (1928 und 1929).
 Indischer Schnitt nach MÖLLER (1929).

hat, durch eine Drängung der Isothermen, d. h. einen Temperatursprung in meridionaler Richtung, und zwar im antarktischen Wasserring als eine geschlossene Kaltwasserfront ausgeprägt, während sie in der Verteilung des Oberflächensalzgehaltes (13) nur streckenweise als eine schärfere Begrenzung zu erkennen ist.

Wir haben in unserer Übersichtskarte (Abb. 1) die für die Kaltwasserfront typischen Isothermen von 1° , 3° , 5° und 10° , dieselben Isothermen, die wir für die Abgrenzung der Hauptwasserarten in den Vertikalschnitten (Fig. 2, 3, 5 u. 6) verwendet haben, eingezeichnet und die Temperaturstufen in gleicher Weise wie in den Längsschnitten schraffiert¹⁾. Die weissen Flächen in unserer flächentreuen Karte bezeichnen also die horizontale Ausdehnung der Troposphäre an der Meeresoberfläche, die schraffierten geben im wahren Verhältnis dazu die Erstreckung der Stratosphäre (im Jahresdurchschnitt).

So gewaltig die horizontale Ausdehnung der Troposphäre an der Oberfläche des Weltmeeres, so verschwindend ist ihre vertikale Entwicklung: Wie eine flache Linse ist sie in unseren Schnitten den vertikal mächtig ausgedehnten stratosphärischen Wassermassen eingelagert, die ihrerseits an der Oberfläche jedoch nur kleine Einzugsgebiete besitzen. Schon diese Tatsache beweist, dass die beiden Schichten verhältnismässig stark gegeneinander abgeriegelt sind und dass in jedem der Ozeane zwei im wesentlichen in sich geschlossene Kreisläufe, die Warmwasser- und die Kaltwasserzirkulation, existieren.

II. Die troposphärische Zirkulation.

Die Triebkräfte der troposphärischen Zirkulation sind in der Hauptsache einerseits die Luftströmungen, welche starke zonale Oberflächenströmungen hervorrufen, und andererseits die meridionalen Dichteunterschiede, welche durch die Unterschiede der Strahlung und des Verhältnisses Verdunstung und Niederschlag in jeder Hemisphäre bedingt sind. Die Oberflächenströmungen greifen indirekt in den meridionalen Kreislauf ein, indem sie Anlass zur Ausbildung von Konvergenz- und Divergenzlinien geben, welche auf- und absteigende Bewegungen hervorrufen. Im wesentlichen bestimmen die drei Unstetigkeiten: Polarfront, subtropische Konvergenz und äquatorialer Gegenstrom²⁾ die Umkehrpunkte der meridionalen Zirkulation der Troposphäre, die wir schematisch für den Fall eines symmetrischen Aufbaus dargestellt haben (Fig. 4): Oberflächlich fliessen die warmen und salzarmen — also aus doppeltem Grunde leichten — Wassermassen vom Äquator zu den subtropischen Konvergenzen, auf dem Wege infolge zunehmender Verdunstung und abnehmender Niederschläge ihren Salzgehalt erhöhend, um in 30° N

¹⁾ Der Verlauf dieser Isothermen, die wir den bekannten Karten von SCHOTT entnommen haben, ist besonders im antarktischen Wasserring noch vielfach hypothetisch, da die Beobachtungen in der überwiegenden Zahl aus dem Südsommer stammen.

²⁾ In Fig. 4 sind diese Unstetigkeiten mit P, K u. A bezeichnet.

und S an diesen — d.h. vornehmlich aus dynamischen Ursachen — in die Tiefe zu sinken und in geringer Tiefe langsam ansteigend als salzreiche und kühlere subtropische Unterströme zum Äquator zurückzukehren, wo sich der Kreislauf durch eine kaum 200 m mächtige Aufstiegsbewegung schliesst. Polwärts der subtropischen Konvergenz finden wir in beiden Hemisphären einen kleinen Kreislauf im umgekehrten Sinne.

Bei der Verschiedenheit der orographischen und klimatischen Bedingungen in der Nord- und Südhemisphäre und der ungleichen Aus-

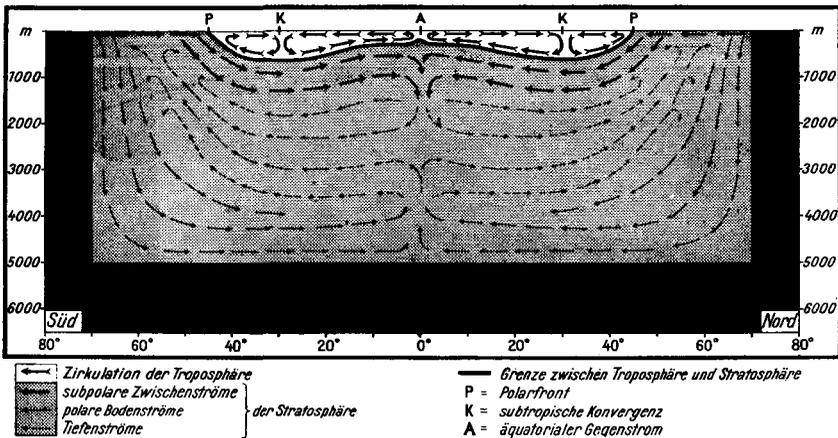


Fig 4. Die meridionalen Komponenten der Tiefenzirkulation in einem symmetrisch aufgebautem Ozean. (Schematische Darstellung).

bildung des zonalen Wind- und Stromsystems können wir eine so vollendete Symmetrie der troposphärischen Zirkulation in den einzelnen Ozeanen nicht erwarten. Entsprechend der Verschiebung des ozeanischen Äquators liegen die Umkehrpunkte zwischen 5° und 10° N. Die stärkste Einschnürung der Troposphäre weist in 8° N der Pazifische Ozean auf, in dem wir auch den äquatorialen Gegenstrom in schärfster Entwicklung finden. Hier besitzt die Troposphäre eine vertikale Mächtigkeit von nur 100—150 m. Zum Teil aus dieser Nordwärtsverlagerung der Symmetriepunkte, zum anderen aus der stärkeren Ausbildung des südlichen Konvergenzgebietes erklärt sich die grossartige Entwicklung des südlichen subtropischen Unterstromes, die wir im pazifischen Salzgehaltsschnitt beobachten. Einen völlig unsymmetrischen Aufbau zeigt die atlantische Troposphäre, verursacht durch die gewaltige Entwicklung des subtropischen Konvergenzgebietes im Norden. Hier reichen zwischen 30° und 40° N die warmen Wassermassen bis 1000 m, ja im

wie NANSEN (14) überzeugend nachgewiesen hat, geknüpft an bestimmte Monate und begrenzte Regionen. Es entsteht in den Zentren zyklonischer Bewegung nahe der Packeisgrenze infolge Ausstrahlung, sinkt bei günstiger vertikaler Temperaturverteilung — Herbst und Vorwinter — konvektiv bis zum Boden, hierbei einer Vermischung mit salzreicheren Wassermassen der Ausläufer des Tiefenstromes unterliegend, und speist den arktischen bzw. den antarktischen Bodenstrom, der sich infolge der hohen Dichte seiner Wassermassen in enger Abhängigkeit vom Relief am Meeresboden ausbreitet.

Diesen beiden polaren Wasserversetzungen muss innerhalb einer

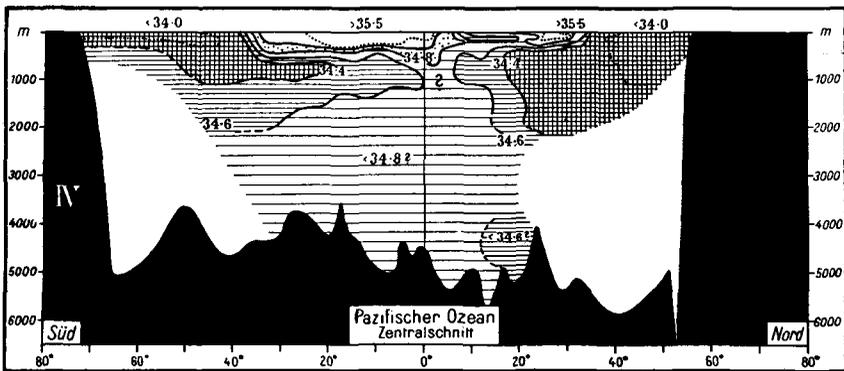


Fig. 6. Längsschnitt des Salzgehaltes durch den Zentralpazifischen Ozean.

jeden Hemisphäre aus Gründen der Kompensation in den mittleren Schichten der Stratosphäre eine polwärts gerichtete Wasserversetzung entsprechen, das ist der Tiefenstrom, der das Tiefenwasser verfrachtet.

So entstehen bei einem völlig symmetrischen Aufbau der Ozeane zwei in sich geschlossene Kreisläufe, ein arktischer und ein antarktischer, und es greifen keine vertikalen Stromzweige von der Troposphäre auf die Stratosphäre über (Fig. 4).

Ehe wir die Entwicklung der drei Hauptglieder der Tiefenzirkulation in den Westhälften der drei Ozeane miteinander vergleichen, wollen wir einen Blick auf die Verhältnisse des Zentralpazifischen Ozeans werfen, die dem idealen Fall eines symmetrischen Aufbaus am nächsten kommen (Fig. 5 u. 6). Wir erkennen im Salzgehaltsschnitt die annähernd symmetrische Entwicklung der Zwischenströme, stellen aber fest, dass, obwohl keine vertikalen Stromzweige von der Troposphäre zur Stratosphäre übergreifen, der Salzgehalt in der Achse der beiden Zwischenströme in Richtung zum Äquator zunimmt, was nur durch Beimen-

gungen mit salzreicherem troposphärischen Wasser zu erklären ist. Dieser Vorgang beruht auf dem Austausch. Infolge der bei ungeordneter Bewegung auftretenden Turbulenzprozesse vollzieht sich durch die Grenzfläche zweier verschieden bewegter Wasserkörper hindurch ein mehr oder minder starker Austausch von Wasserteilchen, mit dem auch ein Ausgleich der Eigenschaften, also des Salzgehaltes und der Temperatur, verknüpft ist (15). Im Zentralpazifischen Ozean bewirkt dieser Vorgang, dass im Konvergenzgebiet beider Ströme die salzarme Zwischenschicht wahrscheinlich unterbrochen ist, und dass hierdurch die Bedingungen für ein Absinken wärmerer und salzreicherer Wassermassen gegeben sind. Und in der Tat lässt unser Temperaturschnitt aus der Abbiegung der 3°- und 5°-Isotherme schön die absteigende Bewegung der Wassermassen erkennen, die die Theorie erfordert. Also selbst in dem Fall, dass die Tiefenzirkulation in beiden Ozeanhälften symmetrisch entwickelt ist, gilt das alteingewurzelte LENZ'sche Schema (unter dem Äquator aus grosser Tiefe bis zur Oberfläche aufsteigende Bewegung) nicht, dessen Unhaltbarkeit für den asymmetrisch aufgebauten atlantischen Ozean zuerst durch MERZ (1—4) erkannt wurde. Theorie und Beobachtung lehren, dass in diesem Fall die stratosphärischen Wassermassen dicht unter der Deckschicht ab 500 m Tiefe eine sinkende Tendenz besitzen.

1. Antarktische Komponenten.

Innerhalb des antarktischen Meeres, das als ein geschlossener Wasserring die Erde umgibt, sind in den einzelnen Ozeanen die Bedingungen für die Bildung der antarktischen Komponenten der stratosphärischen Zirkulation die ähnlichen, und dementsprechend zeigen unsere Schnitte in Bezug auf diese in den grossen Zügen ein übereinstimmendes Bild.

Wir erkennen im Salzgehalt deutlich in allen drei Ozeanen den subantarktischen Zwischenstrom, dessen Wassermassen allenthalben in ähnlicher chemisch-physikalischer Zusammensetzung — nämlich mit einem Salzgehalt von 34,0—34,2 ‰ und einer Temperatur von 1°—3° — vor der südlichen Polarfront zur Tiefe sinken und im Niveau von rund 1000 m weit nach N vordringen. Jedoch im einzelnen ergeben sich Unterschiede in der Tiefenlage, Mächtigkeit und Reichweite dieser grossartigen Wasserversetzung, die letzten Endes in den orographischen Verhältnissen begründet liegen. Entsprechend der hohen südlichen Lage der Polarfront scheint im Pazifischen Ozean der Zwischenstrom bereits zwischen 50° und 60° S zu entstehen, während in den beiden anderen Ozeanen das Sinken des Polarwassers in der Zone zwischen 40° und 50° S stattfindet. Die Achse des Stromes senkt sich von der südlichen Polar-

front allenthalben zwischen 30° und 40° S am tiefsten herab, auf rund 1000 m im Atlantischen, 1200—1300 m im Pazifischen und Indischen, um zum Äquator auf etwa 800 m emporzusteigen. Am stärksten dringt er im Atlantischen nach Norden vor, wo seine letzten Ausläufer noch in einem intermediären Salzgehaltsminimum in 20° — 30° N zu erkennen sind. In den beiden anderen Ozeanen liegt die Nordgrenze bereits in der Nähe des Äquators. Seine grösste vertikale Mächtigkeit besitzt das subpolare Zwischenwasser im Pazifischen, wo die salzarme Schicht zwischen 30° und 40° S bis 2000 m herabreicht, und in Übereinstimmung damit stehen die ausserordentlich geringen Änderungen des Salzgehaltes, welche besonders im Zentralpazifischen in der Achse des Stromes auftreten. Alle Anzeichen sprechen dafür, dass wir es im Pazifischen mit einer vertikal besonders mächtigen, aber horizontal sehr langsamen Erfüllung der oberen Stratosphäre mit subantarktischem Wasser zu tun haben, während in den beiden anderen Ozeanen, insbesondere im Atlantischen, diese Wasserversetzung mehr den Charakter einer scharfbegrenzten stromartigen Ausbreitung besitzt.

Sind auch die Bedingungen für die Bildung des antarktischen Bodenstroms im antarktischen Wasserring die ähnlichen, so hängt seine Ausbreitung in erster Linie vom Relief des Meeresbodens ab. Die günstigsten Verhältnisse scheinen wiederum im Atlantischen vorzuliegen, dessen Westmulde eine durchgehende und tiefreichende Verbindung von der Antarktis bis in den Nordatlantischen hinein darstellt. So ist hier das antarktische Bodenwasser in seinen letzten Ausläufern noch jenseits des Äquators in der Zone zwischen 10° und 20° N nachgewiesen. Der stromartige Charakter dieser Ausbreitung ist schon im Verlauf der Isohalinen und Isothermen zu erkennen, die wie Stromlinien sich über den Aufragungen des Bodens aufwölben und in den Mulden senken. Auch im Indischen scheint der Bodenstrom ansehnlich ausgebildet zu sein. Er ist hier im Entstehungsgebiet durch einen besonders niedrigen Salzgehalt gekennzeichnet und schiebt sich bis zur äquatorialen Zone vor. Aus dem Schnitte, der nicht der tiefsten Mulde des Indischen folgt, gewinnen wir den Eindruck, dass die letzten Ausläufer des Stromes in der Nähe des Äquators aufsteigen, ein Vorgang, welcher der Theorie entspricht und durch die morphologischen Verhältnisse stark begünstigt wird. Im Pazifischen endlich scheint auch diese Wasserversetzung entsprechend der gewaltigen zonalen Verbreiterung des Ozeans am wenigsten den Charakter eines Stromes zu besitzen, wenngleich in den mit dem Südpolarbecken in tiefer Verbindung stehenden Tiefseebecken noch jenseits des Äquators ihre Ausläufer festgestellt sind.

2. Arktische Komponenten.

Ganz allgemein treten entsprechend den orographischen Verhältnissen die arktischen Komponenten hinter den antarktischen zurück. Im Indischen fehlen sie naturgemäss völlig. Während es sich aber in Bezug auf die antarktischen Glieder nur um graduelle Unterschiede zwischen den 3 Ozeanen handelt, bestehen in der Entwicklung der arktischen die grössten Gegensätze zwischen Atlantischen und Pazifischen. Im letzteren ist der subarktische Zwischenstrom in ansehnlicher vertikaler Mächtigkeit bis zur äquatorialen Zone zu verfolgen, im Atlantischen ist er lediglich zwischen 50° und 60° N durch ein Salzgehaltsminimum angedeutet. Dies liegt hauptsächlich darin begründet, dass das Einzugsgebiet der polaren Schmelzwässer im Atlantischen so ausserordentlich klein ist, während es im Pazifischen ausgedehntere Meeresgebiete und zwei sehr kalte und salzarme Randmeere, das Ochotskische und das Beringmeer, umfasst. Nicht minder bedeutungsvoll ist die bereits erwähnte gewaltige Entwicklung des nordatlantischen Konvergenzgebietes, die letzten Endes in dem steten Übertritt südhemisphärischer Wassermassen auf die Nordhalbkugel im Südäquatorialstrom ihre Ursache hat.

So gewaltig die Bildung polaren Bodenwassers in der Antarktis ist, so verschwindend ist demgegenüber der Vorgang in der Arktis. Arktisches Bodenwasser ist in den Tiefen der nordhemisphärischen Meere nur in verhältnismässig geringen Beimengungen vorhanden. Im Pazifischen dringen noch in mässigem Umfange über die Schwellen des Ochotskischen Meeres, wie unser Temperaturschnitt lehrt, kalte Wassermassen in den offenen Ozean ein. Im Atlantischen hingegen fehlt dieses Glied der stratosphärischen Zirkulation fast völlig, da hochaufragende Schwellen die kalten Bodenwässer der arktischen Becken fast gänzlich abriegeln.

3. Tiefenströme.

Die verschiedenartige Entwicklung der polaren Komponenten muss naturgemäss tiefgreifende Unterschiede in der Ausbildung der Tiefenströme zur Folge haben. Die zusammenhängende salzarme Zwischenschicht riegelt im Pazifischen die Stratosphäre nach oben ab. Wenn gleich bei der gewaltigen zonalen Ausdehnung des Ozeans erst systematische Beobachtungen abgewartet werden müssen, um endgültiges zu sagen, so besitzt unsere in den Schnitten zum Ausdruck gebrachte Auffassung, nämlich dass Tiefen- und Bodenstrom sich im Salzgehalt so wenig unterscheiden, dass sie in den Grenzen unserer Darstellung als einheitliche Wassermasse erscheinen, ein hohes Mass von Wahrscheinlichkeit. Hiermit im Einklang steht auch das Fehlen einer Temperatur-

Inversion, welche für den atlantischen und indischen Tiefenstrom so bezeichnend ist. Im Vergleich zu diesen ist der pazifische Tiefenstrom sehr kalt, wie sich aus dem Verlauf der 2°- und 3°-Isotherme ergibt.

Die starke Asymmetrie der polaren Komponenten führt im Atlantischen zu einer grossartigen Entwicklung des nach S setzenden Nordatlantischen Tiefenstromes. Im Grenzgebiet der Zwischenströme zwischen 25° und 45° N werden in bedeutendem Ausmasse salzreiche und warme Wassermassen der atlantischen Stratosphäre zugeführt. Diese ausserordentliche Verstärkung des Mischungsvorganges erklärt sich aus dem Zusammenwirken verschiedener Umstände: es fällt das Konvergenzgebiet der beiden Zwischenströme mit dem an und für sich stark ausgeprägten Konvergenzgebiet der Oberflächenströmungen zusammen. Dies gibt Anlass zur Auflösung der Grenzfläche und zu einem Einbruch salzreichen und warmen Wassers bis in grosse Tiefen. Wesentlich wird dieser Vorgang verstärkt durch den salzreichen und warmen Unterstrom, der durch die Strasse von Gibraltar aus dem Mittelmeer in den Atlantischen setzt. Hierdurch ist nun aber ein starker meridionaler Gegensatz der Temperatur und namentlich des Salzgehaltes zwischen dem Südpolaregebiet und den nördlichen Subtropen vorhanden. In diesem meridionalen Salzgehaltsgefälle ist die kräftige Entwicklung des Tiefenstromes begründet, der am stärksten zwischen 1600 und 2000 m nach S setzt. Aber auch die schwachen arktischen Glieder erfordern eine Kompensation nach N. Und in der Tat zeigt unser Salzgehaltsschnitt eine schwache Ausbildung eines nach N setzenden Tiefenstromes. Dieser erhöht die Temperatur und den Salzgehalt des nordatlantischen Bodenstromes, der, leichter als der antarktische, sich über den letzteren hinweg schiebt und die unteren Schichten jener mächtigen salzreichen Tiefenschicht speist, die man einheitlich als Tiefenstrom bezeichnet. Auch in der Temperatur ist diese mächtige Wasserversetzung durch eine meridional und vertikal ausgedehnte Inversion gekennzeichnet. Zwischen 40° und 50° S steigt, wie die Theorie es erfordert, der Tiefenstrom an, in 50° S liegt seine Achse in 1000 m Tiefe. Seine letzten Spuren sind im Südpolarmeer in einer etwas wärmeren und salzreicheren Zwischenschicht zu erkennen, welche durch Vermischung mit absinkendem Oberflächenwasser den antarktischen Bodenstrom bildet und seinen relativ hohen Salzgehalt bedingt.

Im Indischen ist naturgemäss nur ein nach S setzender Ast vorhanden. Dieser indische Tiefenstrom liegt zwischen 2000 und 3000 m, besitzt also die halbe vertikale Mächtigkeit des atlantischen und ist durch eine salzreiche Tiefenschicht und eine ausgeprägte Temperaturinversion gekennzeichnet. Südlich von 40° S steigt er wie im Atlantischen

steil auf, um ebenfalls mit seinen Ausläufern in die Antarktis einzudringen. Die ansehnliche Entwicklung des Indischen Tiefenstromes liegt nicht allein in dem Kompensationsbedürfnis der Antarktis begründet, sondern wesentlich ist sie mitbedingt durch die Unterströme, welche aus den salzreichen und warmen Nebenmeeren des Arabischen Golfes, dem Roten Meere und dem Persischen Golfe, troposphärisches Wasser in die indische Kaltwassersphäre ergiessen. Hierdurch werden die Salzgehaltsunterschiede in der Stratosphäre wesentlich verstärkt, und diese Verstärkung muss sich in einer Beschleunigung des stratosphärischen Kreislaufs im Indischen äussern.

IV. Zusammenfassung.

Die meridionale Zirkulation des Weltmeeres gehorcht im Prinzip dem grossen Gesetze, das durch das Schema der allgemeinen Zirkulation (Fig. 4) ausgedrückt ist. Jedoch bestehen namentlich in den beiden stratosphärischen Kreisläufen, dem arktischen und dem antarktischen, tiefgreifende Unterschiede zwischen den drei Ozeanen. Diese Unterschiede liegen in erster Linie begründet in den orographischen und morphologischen Verhältnissen der Ozeane, die zu einer verschiedenartigen, asymmetrischen Entwicklung der polaren Einzugsgebiete führen (Fig. 1). Während im Indischen und Pazifischen Ozean der antarktische Kreislauf im wesentlichen auf die Südhemisphäre beschränkt bleibt, greift er im Atlantischen weit auf die Nordhemisphäre über, sodass die Umkehrpunkte der stratosphärischen Zirkulation hier in etwa 30° N gelegen sind (Fig. 2 u. 3). Sind die Zustandsänderungen an der Oberfläche der Polarmeere die primären Triebkräfte der Kaltwasserzirkulation, so wird sie im Atlantischen und Indischen wesentlich gefördert durch die salzreichen und warmen troposphärischen Wassermassen, welche aus den salzreichen Nebenmeeren bzw. aus den nördlichen subtropischen Konvergenzgebieten in die Stratosphäre eindringen. Im Pazifischen ist die Stratosphäre stärker gegen die Troposphäre abgeriegelt, und es fehlen in ihm die salzreichen Nebenmeere, welche einen Tiefenstrom speisen könnten. Es ist daher anzunehmen, dass die stratosphärische Zirkulation, was ihre meridionalen Komponenten anlangt, am schwächsten im Pazifischen entwickelt ist.

Abgeschlossen 20. Januar 1930

Literaturverzeichnis.

1. MERZ, A. und G. WÜST. Die atlantische Vertikalzirkulation. Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde, Berlin 1922.
 2. MERZ, A. Temperaturschichtung und Vertikalzirkulation im Südatlantischen Ozean nach den »Challenger«- und »Gazelle«-Beobachtungen. Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde, Berlin 1922.
 3. MERZ, A. und G. WÜST. Die atlantische Vertikalzirkulation. 3. Beitrag. Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde, Berlin 1923.
 4. MERZ, A. Die Deutsche Atlantische Expedition auf dem Vermessungs- und Forschungsschiff »Meteor«. Sitzber. Preuss. Akad. d. Wiss., Phys.-Math. Kl. XXXI Berlin 1925.
 5. MÖLLER, L. Methodisches zu den Vertikalschnitten längs 35,4° S und 30° W im Atlantischen. Veröff. Inst. f. Meereskunde. N. F. Reihe A, Heft 15, Berlin 1926.
 6. WÜST, G. Der Ursprung der atlantischen Tiefenwässer. Jubiläums-Sonderbd. d. Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde, Berlin 1928.
 7. WÜST, G. Schichtung und Tiefenzirkulation des Pazifischen Ozeans auf Grund zweier Längsschnitte. Veröff. Inst. f. Meereskunde. N. F. Reihe A, Heft 20, Berlin 1929.
 8. MÖLLER, L. Die Zirkulation des Indischen Ozeans auf Grund von Temperatur- und Salzgehaltstiefenmessungen und Oberflächenstrombeobachtungen. Veröff. Inst. f. Meereskunde. N. F. Reihe A, Heft 21, Berlin 1929.
 9. DEFANT, A. Die systematische Erforschung des Weltmeeres. Jubiläums-Sonderbd. d. Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde, Berlin 1928.
 10. DEFANT, A. Dynamische Ozeanographie (Bd. III der Einführung in die Geophysik), Berlin, J. Springer, 1929.
 11. WILLIMZIK, M. Die antarktischen Oberflächenströmungen zwischen 50° E und 110° E. Veröff. Inst. f. Meereskunde. N. F. Reihe A, Heft 17.
 12. MEINARDUS, W. Meteorologische Ergebnisse der Deutschen Südpolar-Expedition 1901 bis 1903. Die Seefahrt des »Gauss«. (Deutsche Südpolar-Expedition 1901 bis 1903. III. Bd. Meteorologie I. Bd. I. Hälfte.) Berlin 1923.
 13. SCHOTT, G. Die Verteilung des Salzgehaltes im Oberflächenwasser der Ozeane. Ann. d. Hydrogr. u. mar. Met. 1928, Heft V, Berlin 1928.
 14. NANSEN, Fr. Das Bodenwasser und die Abkühlung des Meeres. Internat. Revue d. gesamten Hydrobiologie u. Hydrographie, Leipzig 1912.
 15. DEFANT, A. Stabile Lagerung ozeanischer Wasserkörper und dazu gehörige Stromsysteme. Veröff. Inst. f. Meereskunde. N. F. Reihe A, Heft 19. Berlin 1929.
-