

Werk

Titel: Neue Anschauungen über das nordatlantische Stromsystem

Autor: Merz, Alfred

Ort: Berlin

Jahr: 1915

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?391365657_1915 | LOG_0036

Kontakt/Contact

[Digizeitschriften e.V.](#)
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

✉ info@digizeitschriften.de

vervollkommen. Während dieser Frist ist sie aber ebenfalls immer den gleichen Gefährdungen ausgesetzt. Gleichwohl sind auf diese Weise vereinzelte Windungen nicht ausgeschlossen, aber schon der Umstand, daß sie nicht gleichzeitig sich zu entwickeln brauchen wird, abgesehen von ihrer geringen Zahl, verhindern, daß man von einem gewundenen Tale sprechen kann. Die Möglichkeit einer gelegentlichen Windung wird besonders dort gegeben sein, wo zwei der Voraussetzungen der Blockdiagramme von Davis zutreffen, nämlich: das ursprüngliche Vorhandensein einer Krümmung, die zwar nicht die Amplitude der späteren Mäander, wohl aber ungefähr deren Wellenlänge besitzt, und das Fehlen benachbarter Seitenbäche. Diese sind in der vorgeführten Ableitung nicht berücksichtigt. Ihre Gerölle können oft den Einfluß von Rutschungen haben. Überdies können sie durch Heranführung größerer Blöcke den Stromstrich des Flusses, ähnlich wie in Klammern, so beeinflussen, daß seine Anschmiegung an die vorhandenen Krümmungen des Laufes lange nicht stattfindet, wodurch ebenfalls deren Ausbildung zu Windungen mit Übertragung auf die Talrichtung unterbleibt.

Angesichts dessen, was früher über den Einfluß der Massenbewegungen in ausgeglichenen und bereits gewundenen Tälern gesagt wurde, ist ihnen bei Betrachtung jugendlicher Flußwirkungen gewiß kein übertriebener Einfluß zuerkannt worden. Aber auch, wo sie in festem Gestein ganz selten sind, bevor die Ausgleichung des Gefälles erfolgt, konnte, wie gezeigt wurde, bis dahin die Heranbildung von Windungen als gewöhnliche Erscheinung abgelehnt werden. Vielmehr wird das Tal an Stelle verschwundener ursprünglicher Krümmungen neue, ebenso unregelmäßige und nur manchmal auch eine Art Windung besitzen. (Schluß folgt.)

Neue Anschauungen über das nordatlantische Stromsystem.

Von Alfred Merz.

Das Problem der Meeresströmungen hat die Ozeanographen stets lebhaft beschäftigt, ohne daß es bisher gelungen ist, es vollständig zu lösen und damit den Widerstreit der Meinungen endgültig zu beseitigen. Während eine Gruppe von Forschern in erster Linie die Dichteunterschiede für die Strömungen des Weltmeeres verantwortlich machte, trat eine andere ebenso lebhaft für die Winde als Hauptursache ein.

In neuerer Zeit hatte besonders Zöppritz die Windtheorie entwickelt und zu zeigen versucht, daß die bewegende Kraft des Windes durch Reibung allmählich bis auf die tiefsten Wasserschichten übertragen werden müßte. Im Anschluß an seine Ausführungen hatten viele Forscher sich die Vorstellung gebildet, daß nicht nur die Oberflächenströmungen, sondern auch die Bewegungen der Tiefenschichten direkt durch den Wind hervorgerufen

würden. Es ist ein besonderes Verdienst von Nansen darauf hingewiesen zu haben, daß die ablenkende Kraft der Erdrotation diese Tiefenwirkung verhindern müsse. W. Ekman hat dann in grundlegender Weise Art und Ausmaß ihres Einflusses dargelegt. Es sollte aber nicht außer Acht gelassen werden, daß er für die Zwecke der mathematischen Behandlung wesentlich einfachere Verhältnisse zugrunde gelegt hat als in den irdischen Ozeanen vorhanden sind. Die daraus resultierenden Abweichungen der Rechnungsergebnisse von den Verhältnissen in der Natur können wir noch gar nicht übersehen. Strommessungen werden darüber in erster Linie aufklären können.

Durch die Wirkung der Erdrotation werden die Oberflächenströmungen des Weltmeeres wie alle Bewegungen auf der Erde gegenüber der Richtung der bewegenden Kraft, also in unserem Falle gegenüber dem Winde abgelenkt. Die Ablenkung erfolgt bekanntlich auf der nördlichen Halbkugel nach rechts, auf der südlichen Halbkugel nach links von der Richtung des Bewegungsimpulses. Der Betrag dieser Ablenkung ist der Geschwindigkeit der Strömung und dem Sinus der geographischen Breite proportional, da für die ablenkende Kraft A der Erdrotation die Gleichung gilt

$$A = 2 v \omega \sin \varphi$$

worin v die Geschwindigkeit der Strömung, ω die Winkelgeschwindigkeit der Erde und φ die geographische Breite bedeutet. Die tiefer liegenden Wasserschichten erhalten ihren Bewegungsimpuls nicht unmittelbar, sondern nur indirekt vom Winde, indem die oberen Schichten ihre Bewegung durch Reibung auf sie fortpflanzen. Für die unteren Wasserschichten ist demnach die Bewegung der jeweils überlagernden Schicht die wirkende Kraft und sie werden wieder gegen diese abgelenkt erscheinen. Es wird demnach die Ablenkung mit der Tiefe immer mehr zunehmen und zugleich die Geschwindigkeit abnehmen, da ihr in jeder Schicht vom neuen die Reibung entgegenwirkt. Die Tiefe, in der die Strömung die entgegengesetzte Richtung wie an der Oberfläche und nur mehr sehr geringe Geschwindigkeit hat, bezeichnet Ekman als die Reibungstiefe. Ihre absolute Tiefenlage kennen wir nicht, da wir das Ausmaß der Widerstände, die sich bei solchen Bewegungen aus der inneren Reibung ergeben, nicht zu bestimmen vermögen. Nur soviel können wir sagen, daß die Reibungstiefe in einem unbegrenzten Ozean am Äquator unendlich sein soll, da dort $\sin \varphi$ und damit die ablenkende Kraft der Erdrotation gleich Null ist. Mit zunehmender Entfernung vom Äquator muß dann die Reibungstiefe anfangs rasch, dann langsam ansteigen, bis sie an den Polen den geringsten Wert erreicht. Theoretisch sollten daher am Äquator Windströmungen bis zum Boden des Weltmeeres reichen, wie es Zöppritz irrtümlich für alle Breiten angenommen hat. Die tatsächlichen Verhältnisse am Äquator entsprechen aber diesen theoretischen Ableitungen nicht und können mit ihnen schon wegen des allgemeinen Zusammenhanges der gesamten ozeanischen Wasserbewegung nicht übereinstimmen.

Ekman gelang es auch, die Modifikationen mathematisch zu behandeln, die seine Ableitungen für beschränkte Tiefe, für geschichtetes Wasser, bei seitlicher Begrenzung durch eine Küste oder eine anders gerichtete Strömung erleiden. Aus allen seinen Erörterungen geht aber hervor, daß die Bedeutung der Winde für die Erzeugung von Meeresströmungen mit zunehmender geographischer Breite abnehmen muß. Denn in hohen Breiten ist die ab-

lenkende Kraft der Erdrotation am größten und in Zusammenhang damit die Reibungstiefe am kleinsten.

Da einige meteorologische und hydrographische Faktoren im selben Sinne wie die Erdrotation wirken, so wird dadurch der Einfluß der Winde auf die Meeresströmungen in höheren Breiten noch mehr vermindert und der Gegensatz zu den Verhältnissen in niederen Breiten nicht unbeträchtlich verschärft. So werden die Hauptwinde der niederen Breiten, die Passate, viel eher regelmäßige und kräftige Oberflächenströmungen zu erzeugen vermögen als die Winde der höheren Breiten. Denn infolge ihrer hervorragenden Stabilität üben sie den Impuls auf die Meeresoberfläche fast ununterbrochen im selben Sinne aus und ihre Arbeit beschränkt sich fast ganz darauf, die eingeleitete Wasserbewegung im Gange zu halten. Dagegen sind die Winde der höheren Breiten durch Unstetigkeit in Richtung und Stärke charakterisiert, wengleich auch hier meist eine bestimmte Windrichtung vorherrscht. Die zahlreichen Zyklonen, welche diese Gebiete, vielfach auf bestimmten Bahnen, durchqueren, verursachen einen häufigen Wechsel gerade der kräftigsten Winde. Dadurch wird die einmal hervorgerufene Wasserbewegung immer wieder gestört und der Gesamteffekt muß viel geringer als im Bereich der stetigen Passate sein. In den Polargebieten bietet ferner die Vereisung der Meeresräume ein Hemmnis für die Übertragung der Kraft des Windes auf die Meeresoberfläche, denn die Reibung an den glatten Eisflächen kann nur gering sein, es sei denn, daß viele eingeschlossene Eisberge die Übertragung begünstigen.

So nimmt es nicht Wunder, daß besonders die nordischen Ozeanographen immer wieder gegenüber den Trifttheorien die Einwirkung der Dichteunterschiede betont haben. Sie mußten dazu umso mehr bewegt werden, als gerade in ihren Hauptarbeitsgebieten, in der Ostsee und im Europäischen Nordmeer, große Dichteunterschiede auf engem Raume auftreten und ihre Wirkung auf die Meeresströmungen eine augenscheinliche ist. Den norwegischen Forschern ist es aber nicht nur gelungen die Bedeutung der Dichteunterschiede für die Meeresströmungen in den angrenzenden Meeresgebieten klarzulegen, sie haben, wie oben ausgeführt, darüber hinaus nachzuweisen vermocht, daß ganz allgemein der Einfluß der Winde auf die Meeresströmungen kleiner sein muß als man früher angenommen hatte.

Aber es will uns andererseits erscheinen, als ob die Norweger auf Grund ihrer vorzüglich in den nordischen Meeren gewonnenen Erfahrungen geneigt wären, diese Wirkung des Windes doch allzu gering einzuschätzen. Wir haben schon einmal an dieser Stelle anläßlich des Referates über Helland-Hansens Bericht von der atlantischen „Michael Sars“-Expedition (1910) darauf hingewiesen und eine Reihe von Punkten hervorgehoben, die von der bedeutsamen Einwirkung der Winde auf die Meeresströmungen zeugen. (Vgl. 1913, S. 377 ff.) Wie Helland-Hansen in seinem Bericht im allgemeinen äußerte, daß wir über die Beziehungen zwischen Meeresströmungen und Wind mangels geeigneter Beobachtungen nur sehr wenig wüßten, so hat nunmehr Nansen in seiner bedeutsamen Studie über den nordostatlantischen Ozean¹⁾ im speziellen sich ebenso skeptisch über die Gesichtspunkte aus-

¹⁾ F. Nansen, *The Waters of the North-eastern North Atlantik*. Intern. Rev. d. ges. Hydrobiol. u. Hydrogr., Hydrogr. Suppl. zu Bd. IV (1913). 139 S., XVII Taf.

gelassen, die zur Annahme der Golfstromtrift quer über den Ozean und zur Konstruktion des Kanariensstromes geführt haben, der an der Westseite der Iberischen Halbinsel nach Süden setzt. Nansen schreibt in bezug auf letzteren: „Diese Gesichtspunkte, die zur Annahme des Kanariensstromes führten, waren auf Beobachtungen der Oberflächendrift, die Verteilung der Oberflächentemperaturen, die Lufttemperatur, die vorherrschenden Winde usw. gegründet, und „mögen vielleicht“ in einem gewissen Ausmaß hinsichtlich der Zirkulation des Oberflächenwassers richtig sein, aber es ist keinesfalls gerechtfertigt, diese Schlüsse auf die Zirkulation der tieferen Schichten auszudehnen.“

Aus unseren bisherigen Ausführungen ergibt sich unmittelbar, daß wir dem Schlußsatze Nansens vollständig zustimmen müssen: aus den Oberflächenströmungen darf nicht ohne weiteres auf die Bewegung der Tiefenschichten geschlossen werden. Dagegen vermögen wir den Worten Nansens, daß die Grundlagen auch für die Konstruktion des Oberflächenstromes nur „vielleicht richtig sein mögen,“ nicht beizutreten. Denn abgesehen von allen anderen Grundlagen beruht die Konstruktion hier wie bei den meisten Oberflächenströmungen zum größten Teil auf der Auswertung von Driften und besonders einer großen Zahl von Schiffsversetzungen.¹⁾ Es ist aber nicht einzusehen, warum diese so zweifelhaften Resultate ergeben sollten. Auch Nansen begründet seine Skepsis nicht auf dem Nachweis, daß den Schiffsversetzungen kein Vertrauen geschenkt werden kann, sondern sein Zweifel kommt dadurch zustande, daß ihm neue Beobachtungen über die Verteilung des Oberflächensalzgehaltes gegen die Ergebnisse zu sprechen scheinen, die aus den Schiffsversetzungen abgeleitet werden. Solange aber die Unrichtigkeit aller anderen, älteren Beobachtungen keineswegs dargetan ist, erscheint es uns nicht gestattet, eine Erklärung anzunehmen, die ihnen direkt widerspricht. Es muß vielmehr der Versuch gemacht werden, die Erscheinungen so zu erklären, daß allen Beobachtungen Genüge geschieht. Ehe wir aber diesen Versuch wagen, wollen wir im Zusammenhang die Vorstellungen darlegen, die Nansen auf Grund eigener Untersuchungen und von Literaturstudien über die Wasserbewegung im nordostatlantischen Ozean gewonnen hat.

Schon 1871 hat Carpenter erkannt daß die Salzgehalts- und Temperaturverteilung in dem der Straße von Gibraltar benachbarten Gebiet des atlantischen Ozeans durch den Ausfluß warmen, salzreichen Wassers aus dem

1) Gerade für das hier in Frage kommende Gebiet zwischen 35—45° nördl. Br. und 10—20° westl. L. besitzen wir die „Quadrathette“ der Seewarte, in denen 1720 Stromversetzungen verzeichnet sind. Nach Krümmels Zusammenstellung weisen 66.5 %, also zwei Drittel aller Versetzungen, nach den beiden südlichen Quadranten. Solange diese Beobachtungstatsachen nicht wiederlegt sind, müssen wir an der Anschauung festhalten, daß der resultierende Strom hier nach Süden setzt. Daß daneben der Strom — mit einem Drittel aller Beobachtungen — zeitweise in andere Richtungen setzt, ist selbstverständlich zuzugeben. Ob diese Nordversetzungen gleichmäßig über das Jahr verteilt oder ob sie vielleicht in der kalten Jahreszeit häufiger sind — dies ist nach dem jährlichen Gange der Windrichtung sogar sehr wahrscheinlich —, ist noch nicht untersucht. Vgl. Krümmels Handbuch II. Aufl., Bd. II, S. 586.

Mittelmeer beeinflusst ist. Infolge seines hohen Salzgehaltes ist es schwerer als das atlantische Wasser gleichen Niveaus und sinkt daher vom Boden der Straße von Gibraltar allmählich in Tiefen von 800—1400 m ab wo es sich in Wasser gleicher Dichte aber tieferer Temperatur und niedrigeren Salzgehaltes einordnet. Die späteren Expeditionen haben diese warme, salzreiche Mittelschicht wieder vorgefunden und in den letzten Jahren die Grenzen ihrer Verbreitung ziemlich sicher festgelegt. Darnach reicht sie mit einem Salzgehalt von 35.50‰ im Süden noch nicht an die Kanaren heran, dehnt sich im Westen bis an die Azoren aus und reicht im Norden über den Meerbusen von Biscaya mindestens bis an die Südwestseite von Irland heran. Nansen meint sogar, daß sie bis in den Rockhallkanal zwischen dem Nordwestende von Irland und der Rockhallbank vordringt, da er dort bei eigenen Untersuchungen im Juli 1910 in Tiefen von 1900 bis 2000 m etwas salzreicheres und wärmeres Wasser als in den darüber liegenden Schichten gefunden hat. Aber gegen diese Annahme sprechen mehrere Gründe. So hat keine andere der zahlreichen neuen Untersuchungen in diesem Gebiet entsprechende Beobachtungen beibringen können und Nansens eigene Diagramme lassen das salzreichere wärmere Tiefenwasser des Rockhallkanals von der eigentlichen Mittelmeerschicht im Süden ganz losgelöst erscheinen. Auch kann sich Nansen bei dem Nachweis dieses Tiefenwassers nur auf zwei Beobachtungen stützen.

Die eigenartige Ausbreitung des Mittelmeerwassers führt Nansen auf die vereinigte Wirkung der Erdrotation und des Bodenreliefs zurück. Durch die erstere wird es nach seinem Austritt aus der Straße von Gibraltar nach rechts abgelenkt, aber die submarinen Bänke, die an die portugiesische Küste bei Cabo São Vicente anschließen und sich bis Madeira südwestwärts erstrecken, nötigen einen großen Teil des Wassers, ihrem Abfalle zu folgen und erst um Madeira herum nach Norden abzuschwenken. Auf diese Weise wird die weite Ausdehnung nach Westen verständlich. Den Einwurf, daß diese submarine Schwelle im größten Teile ihrer Erstreckung gar nicht in die Ausbreitzungszone des Mittelmeerwassers emporragt, begegnet Nansen mit der Bemerkung, daß auch anderer Orten submarine Erhebungen die Wasserbewegung weit über ihr Niveau hinaus beeinflussen. Indem Nansen die neueren Salzgehaltsbeobachtungen entlang dem europäischen Kontinentalabhang zu einem meridionalen Diagramm verbindet, vermag er in ausgezeichneter Weise zu zeigen, wie das Mittelmeerwasser durch die Einwirkung der Erdrotation längs dieses Abhanges nach Norden geführt wird wobei es durch Mischung mit den über- und unterlagernden Wasserschichten allmählich verdünnt und abgekühlt wird.

Nansen nimmt nun an, daß nicht nur die durch das intermediäre Salzgehaltsmaximum ausgezeichnete Wasserschicht von 800—1500 m, sondern auch die darüber befindlichen Wassermassen bis wenigstens 150 m unter dem Meeresspiegel in gleicher nordwärts gerichteter Bewegung begriffen seien. Er nimmt damit einen von J. Carpenter bereits 1871 ausgesprochenen aber seither wieder vergessenen Gedanken auf und stützt ihn durch mehrere Gründe. So zeigen die Querprofile über den nordatlantischen Ozean sowohl in 35° wie in 50° nördl. Br. ein Absinken der Isothermen von der atlantischen Schwelle gegen den europäischen Kontinentalabfall bei allen Tiefen zwischen rund 200—1500 m. Da nun im Weltmeer die Linien gleicher Dichte (die

Isopyknen im allgemeinen dem Verlauf der Isothermen folgen so schließt Nansen daraus auf einen in diesen Tiefen entlang dem europäischen Kontinente nach Norden verlaufenden Tiefenstrom.

Dieser Schluß beruht auf folgender Erwägung, die gerade von den norwegischen Forschern für die Erkenntnis der Meeresströmungen besonders fruchtbar gemacht worden ist. Herrscht in einer Wassermasse seitliches Gleichgewicht, mit anderen Worten, sind Dichteunterschiede nur in der Vertikalen vorhanden und befindet sich die Wassermasse in Ruhe, so haben die Isopyknen allenthalben eine horizontale Lagerung. Wird aber die Wassermasse infolge eines Druckunterschiedes entlang einer Küste bewegt, so stellen sich die Isopyknen unter der Einwirkung der Erdrotation schräge, da die schneller bewegten, spezifisch leichteren Oberflächenschichten entsprechend der oben gegebenen Formel stärker als die langsam bewegten Tiefenschichten abgelenkt werden. Befindet sich auf der nördlichen Halbkugel die Küste an der rechten Seite der Strömung, so werden die oberen Schichten stärker an sie herangedrängt als die tieferen und die Isopyknen fallen gegen die Küste hin ab. Liegt die Küste an der linken Stromseite, so werden die Oberschichten stärker abgedrängt und die Isopyknen steigen gegen die Küste an. Da nun auf der europäischen Seite des nordatlantischen Ozeans die Isothermen in 200—1500 m Tiefe gegen die Küste abfallen, so nimmt Nansen hier einen nordwärts setzenden Strom an. Diese Annahme ist sehr gewinnend, doch müssen wir uns bewußt bleiben, daß sie drei noch nicht als richtig erwiesene Voraussetzungen hat. Sie wird nämlich nur dann völlig zutreffen, wenn in diesem Gebiet in der Tat seitliches Gleichgewicht vorhanden ist, wenn infolge der Salzgehaltsverteilung die Isopyknen nicht wesentlich von den Isothermen abweichen und wenn endlich die Geschwindigkeit der Strömung mit der Tiefe tatsächlich abnimmt. Nansens Annahme wird aber noch durch die zweite Tatsache bestärkt, daß die Dichte des Meereswassers in diesem Gebiet im allgemeinen nach Norden zunimmt. Daraus ergibt sich eine Zirkulationskraft, die das Bestreben haben muß, das Wasser nordwärts zu führen. Es ist dies derselbe Vorgang, der auch das leichtere Ostseewasser gegen die Nordsee herausströmen läßt. Allerdings scheint es uns, als ob die Art der Dichtezunahme mit der Tiefe, die nach Nansens Diagrammen, im größten Teil des Gebietes mit gut ausgesprochenen Sprüngen (z. B. bei 120 m und 600 m vor sich geht, dieser einfachen Annahme gewisse Schwierigkeiten bieten dürfte.

Nansen geht noch weiter, indem er die Annahme ausspricht, daß nicht nur die Wasserschichten unterhalb 200 m, sondern auch die Oberflächenschichten nach Norden bewegt werden. Er gründet diese Hypothese auf die Verteilung des Oberflächensalzgehaltes. Denn diese zeige nach den neueren von der Internationalen Meeresforschung gesammelten Beobachtungen deutlich eine Ausbuchtung der Isohalinen von Süden her gegen den Meerbusen von Biscaya und von dort ein weiteres zungenförmiges Vordringen gegen den Kanal und die Irische See. Eine solche Salzgehaltsverteilung müsse aber auf eine Oberflächenströmung zurückgeführt werden, die entgegen den bisher angenommenen südwärts setzenden Kanariensstrom nordwärts gerichtet sei. Nach Nansens Auffassung wird also die gesamte Wassermasse von der Oberfläche bis mindestens 1500 m Tiefe entlang dem europäischen Kontinentalabhang nordwärts geführt und dringt

dann an der Westseite von Irland und Schottland gegen das Europäische Nordmeer vor. Diese Wassermasse bildet nach ihm den Hauptanteil am Irischen Strom und an seiner Fortsetzung, dem Atlantischen Strom des Europäischen Nordmeeres. Letztere seien demnach nur in geringem Ausmaß eine Fortsetzung der den Ozean querenden Golfstromtrift. Diese Trift sei nur eine schwache oberflächliche Strömung, die nach der Vereinigung mit jener gewaltigen Wasserversetzung nur einen bescheidenen Anteil am Irischen Strom habe. Mit Unrecht werde der Irische Strom als Fortsetzung des Golfstromes betrachtet und nicht letzterer, sondern die tiefreichende nördliche Wasserbewegung von der spanischen See her bestimme die Gunst des europäischen Klimas.

Die Hauptmasse des Golfstromwassers stößt nach Nansen nicht nordöstlich gegen die europäischen Gestade vor, sondern schwenkt teilweise nach rechts gegen die Sargassosee ein, teilweise biegt sie aber zwischen Azoren und Madeira nach Nordosten um und vereinigt sich hier mit seiner großen Nordströmung. Durch die Annahme dieser Vereinigung wird der Unterschied zwischen der neuen und der alten Auffassung, der im ersten Moment so außerordentlich groß erscheint, etwas vermindert. Denn die Hauptwassermasse des Irischen Stroms entstammt nun doch dem Golfstrom, nur quert sie bloß zum geringen Teil direkt in ostnordöstlicher Richtung den Ozean, der größte Teil geht vielmehr südlich um die Azoren herum und schlägt erst dann, vereinigt mit der viel schwächeren Mittelmeerströmung, eine nördliche Richtung ein. Der Kanarienstrom bleibt auch nach Nansens neuer Auffassung bestehen und erhält nach seiner eigenen Zeichnung ebenso wie bisher Zufluß vom Golfstromwasser, nur liegen seine Wurzeln nicht, wie bisher angenommen, westlich der iberischen Halbinsel, sondern südlich der Kanaren.

Diese Auffassung Nansens hat viel Anziehendes, denn sowohl das ausgiebige Einschwenken von Golfstromwasser gegen die Sargassosee, das auch von den deutschen Ozeanographen stark betont wurde, wie die unregelmäßige und schwache Entwicklung der direkt den Ozean querenden Oberflächentrift, die besonders Krümmel hervorgehoben hat, steht im Einklang mit allen sonst uns vorliegenden Beobachtungen. Selbst ein so lebhafter Anhänger der Windtheorie im allgemeinen und der Einheitlichkeit des Golfstromes im speziellen wie W. W. Campbell Hepworth, der Vertreter der Ozeanographie am Meteorological Office in London mußte noch in jüngster Zeit zugeben, daß wir über den Zusammenhang zwischen dem eigentlichen Golfstrom, der bis in die Gegend der Neufundlandbank reicht, und der den Ozean querenden West-Osttrift noch sehr im Unklaren sind.¹⁾ Allerdings lassen die neueren Karten des Oberflächensalzgehaltes diese Trift doch wesentlich stärker hervortreten, als man nach Nansens Ausführungen anzunehmen geneigt wäre. Wir verweisen diesbezüglich namentlich auf die Karten für November 1907 und 1908. (Bull. trimestriel

¹⁾ W. W. Campbell Hepworth: The Gulf Stream. Geogr. Jour., Vol XLIV (1914), S. 448. Seine an dieser Stelle zusammengefaßten Beweise für den Zusammenhang zwischen Wind und Strom erscheinen uns in keiner Weise überzeugend. Vgl. auch seine Originalarbeiten: „Contributions to the Study of the North-East and South-East Trade Winds“, Met. Office London, 1910 und „The Effect of the Labrador Current upon the Surface Temperature of the North Atlantic“. Ebd. Geophys. Mem. Nr. 1 (1912).

1907/8 u. Bull. hydr. 1908/9), die in außerordentlich klarer Weise das zungenförmige Vorstoßen des salzreichen Wassers quer über den Ozean gegen die Westseite Großbritanniens zeigen. Auch die Annahme für eine Nordströmung an der europäischen Küste erscheint für die Tiefen zwischen 200—1500 m, wie bereits oben auseinandergesetzt, mit wichtigen Gründen belegt, wenn gleich wir den sicheren Nachweis erst von der endgültigen Verarbeitung der zahlreichen modernen norwegischen Beobachtungen in diesem Gebiet erwarten dürfen.

Dagegen wurde schon oben ausgeführt, daß man der Hypothese nicht ohne weiteres zu folgen vermag, wonach auch die Oberflächenströmung westlich der iberischen Halbinsel nordwärts gerichtet sei. Denn diese Hypothese steht in Widerspruch mit anderen Beobachtungen, deren Unrichtigkeit nicht erwiesen wird. Wir glauben vielmehr, daß der hohe Salzgehalt in diesem Gebiet auch beim Festhalten an den bisherigen Anschauungen über die Oberflächenströmungen hinreichend erklärt werden kann, wenn man beachtet, daß die Salzgehaltsverteilung nicht ausschließlich durch die Strömungen, sondern auch durch die klimatischen und Witterungsverhältnisse bestimmt wird.

Nach den bisherigen Anschauungen dringen in dieses Gebiet von Westen her Stromfäden aus der salzreichen Golfstromtrift ein und biegen dann teils in der spanischen See in den Kanarienstrom nach Süden um, teils dringen sie in die Biscaya, den Kanal und die Irische See vor. Da sie auf diesem ostwärts gerichteten Wege, wie Supans Karte der Niederschlagsverteilung auf dem atlantischen Ozean zeigt, aus regenreicheren Gebieten in regenärmere mit ziemlich hoher Verdunstung kommen, so ist ohne weiteres verständlich, daß der Salzgehalt, abgesehen von der unmittelbaren Küstennähe hoch bleibt, ja unter günstigen Witterungsumständen sogar gesteigert wird. Da aber im östlichen Teile der nordatlantischen Golfstromtrift Witterung und Stromversetzung außerordentlich variabel sind, so brauchen wir uns nicht zu wundern, wenn die für verschiedene Monate entworfenen Salzgehaltskarten ein recht verschiedenes Aussehen gewähren. Wenn man auf diesen Karten gelegentlich findet, daß zwischen der bisher angenommenen nordöstlichen Golfstromtrift und der spanischen See von Nordosten her salzärmeres Wasser sich einbuchtet, so kann dies noch nicht als ein Beweis gegen den Zusammenhang der Wasserbewegung in beiden Gebieten betrachtet werden, denn dann müßte diese Erscheinung stets und nicht nur gelegentlich vorhanden sein. Gerade das gelegentliche Auftreten salzärmeren Wassers zwischen den beiden Gebieten deutet darauf hin, daß wechselnde Witterungserscheinungen und nicht konstante Strömungen die Ursache sind.

Nansen führt für seine Auffassung noch den Umstand an, daß das Vordringen salzreichen Wassers von Süden gegen die Biscaya gerade zur Zeit der stärksten Abkühlung, im Frühjahr, am besten entwickelt sei. Diese eigenartige Tatsache werde nämlich erklärlich, wenn der Oberflächenstrom in Übereinstimmung mit dem Tiefenstrom nordwärts gerichtet, ja nichts anderes als dessen schwächeres Abbild sei. Denn der Tiefenstrom, der das salzreiche Wasser nordwärts führe, müsse gerade zur Zeit der größten Abkühlung am kräftigsten bis zur Oberfläche durchgreifen, weil dann infolge der winterlichen Konvektion die Dichteunterschiede in den Oberschichten ausgeglichen sind. Es beruht diese Überlegung demnach auf der Anschauung,

daß das Durchgreifen von Strömungen durch die Verminderung der Dichteunterschiede begünstigt wird. Dieser Anschauung können wir vollkommen beipflichten, denn abgesehen von theoretischen Gründen, haben die Arbeiten des Instituts für Meereskunde in der Nordsee (Veröff. d. Inst. f. M., N. F., Reihe A, Heft 3, S. 99ff) zahlenmäßig die Beziehungen zwischen der Abnahme der Stromgeschwindigkeit mit der Tiefe und dem Maße der Dichtezunahme erwiesen. In der Limnologie sind ähnliche Anschauungen schon seit längerer Zeit mit Erfolg durch Beobachtungen bestätigt worden (Hamburg, Birge, Wedderburn). Doch glauben wir, daß in Anbetracht des Widerspruches, den ein nordwärts setzender Strom durch unwiderlegte Beobachtungen erfährt, die eben erwähnten Beziehungen zwischen Strom und vertikalen Dichtedifferenzen in anderer Weise mit der Salzgehaltsverteilung verknüpft werden müssen als dies durch Nansen geschieht.

Wir gehen demgemäß bei unseren Überlegungen von den Oberflächenströmungen aus, wie sie auf Grund noch nicht entkräfteter Beobachtungen bestehen und suchen ihre Einwirkung auf den Salzgehalt sowohl unter Berücksichtigung der eben vorgetragenen Beziehung wie mit Rücksicht auf die klimatischen Verhältnisse darzulegen. Jeder Oberflächenstrom wird demgemäß unter sonst gleichen Umständen umso tiefer greifen, je geringer die vertikalen Dichteunterschiede sind, er wird umso seichter sein, je größer diese Differenzen sind. Je tiefer der Strom greift, umso geringer wird die Oberflächengeschwindigkeit sein, je seichter er ist, umso rascher wird er fließen, da ja dann einer kleineren Wassermasse dasselbe Bewegungsmoment zugeführt wird. Da nun zur Zeit der höchsten Erwärmung die Dichtedifferenzen am größten sind, so werden die Oberflächenströmungen dann am seichtesten sein und am raschesten fließen, zur Zeit der größten Abkühlung werden sie umgekehrt am tiefsten greifen und am langsamsten fließen.

Man könnte gegen diese Überlegung einwenden, daß hierbei der jährliche Gang der Windgeschwindigkeit übersehen wird. Da die Winde im Winter stärker als im Sommer sind, so müßte auch der Strom im Winter schneller laufen. Wenn dieser Zusammenhang zwischen Strom und Wind für unser Gebiet auch nicht nachgewiesen sei, so könnte man ihn doch aus den bereits festgestellten analogen Beziehungen im Bereich der Äquatorialströme mit größter Wahrscheinlichkeit folgen. Wir heben gegenüber einem solchen Einwand im Voraus hervor, daß wir natürlich nicht bezweifeln, daß unter gleichen Umständen, d. h. bei gleicher Dichtezunahme mit der Tiefe, dem stärkeren Wind der schnellere Strom entspricht. Da im Gebiet der Äquatorialströme die Dichtezunahme das ganze Jahr hindurch ziemlich gleich bleibt, so muß dort, wie festgestellt, dem stärkeren Winde der schnellere Strom entsprechen. In unserem Gebiete dagegen, wo im Winter infolge der Abkühlung eine etwa 150 m mächtige homogene Deckschicht vorhanden ist, im Sommer dagegen die Dichte schon in geringer Entfernung von der Oberfläche stark zunimmt, dürfte eine Zunahme der Stromgeschwindigkeit mit der Zunahme der Windstärke vom Sommer zum Winter nicht vorhanden sein. Eine rohe Abschätzung führt uns vielmehr zu der oben dargelegten Annahme, daß hier der jährliche Gang der vertikalen Dichteverteilung für die Zu- und Abnahme der Stromgeschwindigkeit im Jahreslaufe ausschlaggebend ist und daß der im entgegengesetzten Sinne wirkende jährliche Gang der Windstärke die Erscheinungen zwar abschwächen aber nicht verkehren kann.

Wir haben nunmehr die Wirkung zu untersuchen, die in unserem Gebiete das raschere Fließen der Strömung im Sommer und die Herabminderung der Geschwindigkeit im Winter auf den Salzgehalt ausüben muß. Diese Wirkung wird je nach den klimatischen Verhältnissen ganz verschieden sein. Führt die Strömung durch sehr niederschlagsreiche Gebiete hindurch, so wird das schnelle Fließen zur Zeit der höchsten Erwärmung die Wirkung haben, daß dann die aussüßende Wirkung der Niederschläge weniger zum Ausdruck gelangt, das Oberflächenwasser also salzreicher bleibt. Da nun die bisher angenommene Golfstromtrift den Ozean in einem äußerst niederschlagsreichen Gebiete quert, so wird man nun verstehen, warum die Salzgehaltskarten gerade im Herbst öfters ein verstärktes Vorstoßen des salzreichen Wassers über den atlantischen Ozean zeigen (z. B. Herbst 1907 u. 1908). Wir wollen auch nicht übersehen, daß dieser sommerliche Vorstoß salzreichen Wassers über den Ozean noch dadurch begünstigt wird, daß die Sommermonate in diesem Gebiete viel weniger niederschlagsreich wie die Wintermonate sind. — Führt umgekehrt die Strömung durch sehr trockene Gebiete hindurch, in denen die Verdunstung den Niederschlag überwiegt, so wird das langsame winterliche Fließen für die Erhaltung und Vermehrung des Salzgehaltes besonders günstig sein. Wir müssen demnach in Übereinstimmung mit den Beobachtungen in der verdunstungsreichen Spanischen See und in der Biscaya besonders gegen Ende des Winters eine starke Ausbreitung des salzreichen Wassers erwarten. Daß dieses salzreiche Wasser dann öfters deutliche Auslappungen nach Norden aufweist, mag wohl damit zusammenhängen, daß hier im Winter der Strom in Übereinstimmung mit den Winden öfters durch längere Zeit nach Norden setzen kann. (Vgl. S. 114, Anm. 1.) Keineswegs dürfen wir aber deswegen auf einen dauernden Nordstrom schließen.

Wir haben hiermit den Versuch gemacht, dieselben Tatsachen in anderer Weise wie Nansen zu erklären. Unsere Auffassung läßt uns aber auch ohne weiteres verstehen, warum die Vierteljahrskarten der Salzgehaltsverteilung in den einzelnen Jahren so verschiedenes Aussehen zeigen, daß von einer durchgehenden Regel nicht gesprochen werden kann. Denn wir ersehen aus unseren Darlegungen, daß die Salzgehaltsverteilung von einer ganzen Reihe von Faktoren, von der Schnelligkeit der Strömungen, vom Niederschlag und von der Verdunstungskraft des Klimas abhängig ist. Erst aus dem nicht leicht zu überschauenden Resultat, das sich aus dem Zusammenwirken aller dieser Faktoren ergibt, wird die jeweilige Salzgehaltsverteilung verständlich. Alle diese Faktoren sind aber ihrerseits wieder vom Wechsel der Witterung beeinflusst. Es wäre vielleicht keine uninteressante Aufgabe, die hier angedeuteten Beziehungen zwischen Salzgehaltsverteilung, Stromstärke und Witterungsverhältnissen näher zu verfolgen.

Schließlich möchten wir noch darauf hinweisen, daß gegen Nansens Auffassung von einem an der Westseite der iberischen Halbinsel nordwärts

¹⁾ Nur nebenbei bemerken wir, daß die von Nansen wieder aufgeworfene Frage, ob die Biscaya von der Strömung nach rechts oder links (alter Rennelstrom) umkreist wird, in dieser allgemeinen Betrachtung nur eine sekundäre Bedeutung hat. Geht sie nach links herum, wie Nansen wieder annimmt, so würde dadurch der Verlauf der Isohalinen in der Tat besser erklärt werden können wie im entgegengesetzten Fall.

gerichteten Oberflächenstrom auch der Verlauf der Isothermen in den oben erwähnten atlantischen Querprofilen spricht. Der Abfall gegen die Küste, der auf einen nordwärts gerichteten Strom hinweist, macht sich, wie Nansen selbst bemerkt, erst von etwa 150 m Tiefe bemerkbar. Oberhalb sieht man in Schotts Profil (35° N) deutlich einen Anstieg der Isothermen gegen die Küste, der unter den oben gegebenen Voraussetzungen, nur bei einem südwärts fließenden Strom verständlich ist.

Es bietet uns demnach der Verlauf der Isopyknen in diesem wie in manchem anderen Fall ein Hilfsmittel zur Beurteilung der Fragen, ob der Strömungsimpuls von der Oberfläche ausgeht oder auf Dichteunterschieden beruht und bis in welche Tiefe die Oberflächentrift wirksam ist. Wenn die Schräglage der Isopyknen erst in größerer Tiefe beginnt, dann müssen wir annehmen, daß nicht der Wind, sondern Dichteunterschiede die Wasserbewegung hervorrufen. Wir vermögen dann unter der Voraussetzung, daß der Zustand stationär ist, sogar die Geschwindigkeit und das Volumen der an der Küste entlang bewegten Wassermassen zu bestimmen. Denn die Neigung der Isopyknen gegen die Küste ist dann von der ablenkenden Kraft der Erdrotation bestimmt und diese muß im stationären Zustand gleich dem senkrecht zur Küste wirksamen Druckgradienten sein. Der Druckgradient läßt sich aber direkt aus den Dichtedifferenzen innerhalb des Stromquerschnitts bestimmen. Dieses von Nansen zuerst angewendete, von Bjerknes exakt ausgebildete und von Helland-Hansen praktisch weiter entwickelte Verfahren ist von großer Bedeutung zur Beurteilung des Problems, ob eine Meeresströmung zeitlichen Schwankungen unterworfen ist, ob sie auf ihrem Wege durch Abzweigungen oder Zufluß an Masse verliert oder gewinnt. Oft kann man allerdings schon durch den Anblick der Isopyknen diese Probleme angenähert entscheiden. Andererseits darf man, wie auch Nansen betont, nicht erwarten, daß man selbst bei sorgfältiger Durchrechnung mehr als angenäherte Werte erhält. Denn es ist Voraussetzung für die Rechnung daß die Neigung der Isopyknen ausschließlich durch die Erdrotation bewirkt wird, daß also weder irgend ein Windstau mitwirkt, noch etwa das seitliche Gleichgewicht gestört ist, wie es etwa der Fall ist, wenn verschieden dichte Wassermassen verschiedener Herkunft an einander vorbeibewegt werden. Beides trifft aber wohl niemals völlig zu. Auch wird der Verlauf der Isopyknen im einzelnen durch interne Wellen und Wirbelbildungen modifiziert, ohne daß wir diese Abweichungen in der Rechnung berücksichtigen können.

Anders liegt aber das Problem, wenn die Isopyknen bereits in den obersten Schichten eine Neigung gegen die Küste besitzen und den Sinn dieser Neigung bis in größere Tiefe beibehalten, wie es z. B. an den tropischen Ostküsten Amerikas der Fall zu sein scheint. Dann ist nicht ohne weiteres zu entscheiden, wie groß der Einfluß der Erdrotation und wie groß der Einfluß auf- oder ablandiger Winde auf die Neigung der Isopyknen ist. Besonders interessant werden aber die Erscheinungen, wenn unterhalb einer scharf ausgeprägten Sprungschicht die Neigung der Isopyknen sich verkehrt, wie dies in den küstennahen Tropengebieten der Fall zu sein scheint. Denn dann wäre die Möglichkeit gegeben, daß die Ursache in indirekter Windwirkung läge, die durch Reibung unterhalb der Sprungschicht ein zweites Zirkulationssystem erregt, das in entgegengesetzter Richtung wie das obere verläuft. Es wäre eine interessante Aufgabe, diese Frage eingehender zu