

Das kalte Druckwasser.

Von E. Witte

I. Bedeutung des kalten Küstenwassers.

Seit langer Zeit ist es bekannt, dass das Wasser der Oceane an manchen Küsten der Kontinente auffallend kalt ist. Dieses kalte Wasser leitete man bis vor etwa 30 Jahren allgemein her von polaren Meeresströmungen. Man nahm an, dass an den Oberflächen der Oceane Strömungen beständen, die das kalte Wasser aus den Eismeeren, zu denen auch das Behringmeer und das Ochotskische Meer zu rechnen sind, zum Aequator führen sollten. Man unterschied also warme und kalte Oberflächenströmungen und verstand unter ersteren solche, die, wie der Golfstrom, warmes Wasser von den Tropen nach höheren Breiten führten, unter letzteren solche, die das Wasser der Eismeere gegen den Aequator brachten. Von diesen war besonders bekannt der an der pacifischen Küste Südamerikas nach Norden setzende mächtige Strom, der das Küstenklima Südamerikas so auffallend beeinflusst, und der als unmittelbar aus dem antarktischen Ocean stammend angesehen und gezeichnet wurde. Ebenso sollte das kalte Wasser an der atlantischen Küste Südafrikas von einer antarktischen Nordströmung stammen, und um das Bild zu vervollständigen, führten manche Karten auch in den Indischen Ocean hinein eine breite Strömung aus dem Eismeere gegen die Westküste Australiens. Aehnliche Strömungen wurden für die nördliche Halbkugel angenommen. Die Globen und Atlanten zeigen bis ins letzte Jahrzehnt hinein solche Ströme, und selbst die neuesten Karten der Meeresströmungen enthalten, wie wir sehen werden, noch Reste dieser Vorstellung.

Das Bild der Meeresströmungen, welches auf diese Weise entstand, zeigte allerdings für die Oceane der südlichen Halbkugel hinlängliche Uebereinstimmung. Ebenso traten in den genauer bekannten Strömungen des Nordatlantischen und des Nordpacifischen Meeres einander entsprechende Züge hervor. Dagegen fehlte zwischen den Strömungen der nördlichen Halbkugel einerseits, denen der südlichen Halbkugel andererseits fast jede Analogie.

So verschieden nun auch die Gestalt der oceanischen Becken der beiden Halbkugeln ist, so bestehen doch gewisse Uebereinstimmungen, die eine Aehnlichkeit hinsichtlich der Strömungen erwarten lassen. Solche Analogien sind in der That vorhanden, und schon eine unbefangene Betrachtung der älteren, aus der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts stammenden Beobachtungen hätte genügt, um dieselben hervortreten zu lassen. Aber diese Beobachtungen fanden, weil sie sich mit den kalten Strömungen nicht vertrugen, keine Beachtung.

Der innere Widerspruch, den das auf solche Weise entworfene Bild der Meeresströmungen zeigte, fand nun seine Lösung in der Entdeckung, dass — mit wenigen Ausnahmen — das kalte Küstenwasser nicht von oberseeischen Strömungen aus polaren Regionen herrührt, dass dasselbe überhaupt keine Strömung im gewöhnlichen Sinne, sondern aus der Tiefe der Meere emporquellendes Wasser ist. Diese Entdeckung löste ferner den Widerspruch, in dem die angenommenen kalten Ströme mit den Gesetzen der Physik standen, beseitigte die zahlreichen Widersprüche, die zwischen der Vorstellung der Geographen über die Meeresströmungen und zwischen zuverlässigen Beobachtungen der erwähnten älteren Forscher herrschten, und fand ihre Bestätigung in dem überaus reichen Beobachtungsmaterial des letzten Dritteljahrhunderts.

Zum Verständnis des kalten Küstenwassers müssen wir uns zunächst die wichtigsten Thatsachen in der Bewegung der oceanischen Gewässer, sowie ihre Begründung vor Augen führen.

2. Die vertikale Cirkulation.

Die Bewegung des Meeres wird an seiner Oberfläche durch mancherlei Einflüsse bedingt, und es war nicht leicht, in der Mannigfaltigkeit der Erscheinungen das Wesentliche vom Unwesentlichen zu trennen. Einen besonders hervorstechenden Zug aber bildete seit der Entdeckung Amerikas das Abfließen des warmen Wassers aus den heissen nach den kälteren Zonen, wie es besonders in dem Golfstrome des Nordatlantischen Oceans hervortritt.

Von dem Wasser in der Tiefe weiss man seit längerer Zeit, dass es auch unter den wärmeren Himmelsstrichen auffallend kalt ist. Genaueres über diese Erscheinung wurde festgestellt von der wissenschaftlichen Expedition unter Kotzebue in den Jahren 1823—26. Diese fand, dass in den warmen Klimaten die Temperatur des Wassers etwa in einer Tiefe von 1000 Metern 4° C. beträgt. Die noch niedrigeren Temperaturen in grösserer Tiefe, welche schon damals und dann auch durch spätere Forschungen gefunden wurden, zweifelte man zunächst vom theoretischen Standpunkte an, weil man auch für Seewasser ein Dichtigkeitsmaximum bei 4° annahm. Jetzt weiss man, dass sich das Seewasser bis unter 0° zusammenzieht, und seit den Untersuchungen der Challenger-Expedition im Anfang der siebziger Jahre steht es fest, dass die Temperatur der Oeane von 1000 Meter Tiefe ab auch in der heissen Zone weiter sinkt, sodass sie bei 4000 m etwa 1° beträgt, in noch grösseren Tiefen bis 0° , stellenweise unter 0° sinkt. Dieses kalte Wasser trägt auch in seinem Salz- und in seinem Gasgehalte deutlich das Gepräge polaren Ursprungs.

Es muss also angenommen werden, dass eine unterseeische Bewegung der Gewässer aus den kalten Regionen zum Aequator besteht. Dieselbe ist bisher direct nicht nachgewiesen, und sie ist vielleicht so langsam, dass sie sich kaum wird nachweisen lassen. Bezweifeln aber lässt sich das unaufhörliche Vordringen des kalten Tiefenwassers aus hohen Breiten gegen den Aequator nicht.

Zur Erklärung dieser Doppelbewegung der oceanischen Wassermassen, an der Oberfläche vom Aequator zu den Polen, in der Tiefe von den Polen zum Aequator, wurde alsbald nach ihrer Entdeckung die Wärme herangezogen, die in der bekannten und leicht verständlichen Art einer Warmwasserheizung wirken sollte. Da jedoch neuerdings gegen diese Erklärung Bedenken erhoben worden sind, müssten wir etwas ausführlicher bei ihr verweilen, als es auf den ersten Blick nötig scheinen könnte.

Nehmen wir an, das Wasser des Oceans habe zunächst durchweg dasselbe spezifische Gewicht, und sehen wir ab von der Einwirkung der Atmosphäre, dann würde seine Oberfläche überall auf der Richtung der Schwere senkrecht stehen, d. h. eine Niveaufläche bilden. Solche Niveauflächen, die im wesentlichen der Oberfläche parallel sind, kann man sich auch innerhalb des Wassers denken. Nun kann das Wasser nur in Ruhe bleiben, wenn der Druck auf jede Niveaufläche in allen Punkten derselbe ist.

Wird jetzt das Wasser an irgend einer Stelle von oben aus erwärmt, so steigt sein Spiegel über die ursprüngliche Höhe, also muss das Oberflächenwasser nach den Seiten abfließen. Infolge dessen sinkt der Druck auf die tiefer gelegenen Niveauflächen unter der erwärmten Stelle, während er dort, wohin der Abfluss erfolgt ist, steigt. Nun hat das Wasser, geradeso wie die Luft, das Bestreben, in jeder Niveaufläche von den Punkten höheren nach denen niederen Druckes hinzuzufliessen. Während also das erwärmte Oberflächenwasser sein Gefälle nach den kälteren Punkten hin hat, besitzt das Wasser in der Tiefe ein Gefälle in entgegengesetzter Richtung.

Es besteht sonach für das Oberflächenwasser der Oeane ein Gefälle von der heissen zur kalten Zone; in den tieferen Schichten dagegen herrscht ein Druckminimum in der heissen Zone, sodass diese Schichten ein Gefälle in der Richtung zum Aequator haben. Zwischen diesen Schichten mit entgegengesetztem Gefälle giebt es eine Niveaufläche, welche in allen ihren Punkten unter gleichem Drucke steht und daher keine horizontale Bewegung hat. Ueber ihre Lage wissen wir bisher nichts Näheres.

Da nun das Wasser in den kalten Zonen sich abkühlt und untersinkt, in der heissen Zone und schon auf dem Wege dorthin sich langsam erwärmt und durch die neu hinzu-

kommenden noch kälteren Wassermassen emporgehoben wird, so bildet die geschilderte Erscheinung einen Kreislauf, den man als vertikale Cirkulation bezeichnet.

Die stärkere Verdampfung in der heissen Zone wirkt im entgegengesetzten Sinne wie die Wärme, indem sie das Wasser wieder etwas schwerer macht. Doch wird sie im offenen Ocean durch den Einfluss der Wärme soweit überwogen, dass wir für unsere Zwecke auf sie nicht näher einzugehen brauchen.

Nun übt, wie wir in einem späteren Kapitel näher untersuchen werden, die Achsendrehung der Erde auf alle Strömungen, durch welche Ursachen auch immer diese hervorgerufen sein mögen, eine Wirkung aus in der Art, dass sie dieselben auf der nördlichen Halbkugel nach rechts, auf der südlichen nach links abzulenken sucht; und zwar ist dieser Einfluss um so stärker, je weiter sich die Ströme vom Aequator entfernen. Wir haben also schon hier ein, wenn auch nicht das einzige Motiv für das Hinüberdrängen des aus der heissen Zone abfliessenden warmen Oberflächenwassers nach Osten, das sich in den östlichen Triftströmungen der mittleren Breiten und in dem auffallend warmen Wasser an den Westküsten der Kontinente in höheren Breiten äussert.

3. Die Luftströmungen.

In ähnlicher Weise, wie das Wasser der Ozeane, wird durch die Sonnenstrahlen das Luftmeer in eine vertikale Cirkulation versetzt. Wo die Luft besonders stark erwärmt wird, dehnt sie sich aus, und zwar zunächst nach oben; die oberen Luftschichten fliessen ab, und es entsteht an dem Punkte der grössten Erwärmung in den unteren Schichten, also am Boden, ein Druckminimum, in einiger Entfernung von ihnen ein Gebiet höheren Druckes, sodass in den unteren Niveauflächen ein Gefälle oder, wie man es in der Meteorologie nennt, ein Gradient nach den Gebieten grösster Erwärmung hin besteht.

Da nun auch in diesem Falle die Erwärmung in erster Linie in der heissen Zone vor sich geht, so entsteht in den unteren Luftschichten, am Meeresspiegel und bis zu einiger Höhe über ihm, ein Gebiet niedrigen Druckes um den Aequator. Daher haben diese Luftschichten von einer gewissen geographischen Breite an einen Gradienten zum Aequator hin, die oberen einen Gradienten vom Aequator weg. Im Beharrungszustande befindet sich zwischen ihnen eine Niveaufläche gleichen Druckes. Im Druckminimum steigt die Luft über diese Niveaufläche empor, hat also keine horizontale Bewegung. Dies ist die Region der Aequatorial-Windstillen oder Kalmen. In höheren Breiten sinkt die abgekühlte Luft wieder herab, sodass auch hier die Bedingungen für Windstillen gegeben sind. Hiernach findet das um den Aequator bestehende barometrische Minimum seine physikalische Erklärung genau ebenso, wie ein um den Aequator liegendes Druckminimum in den unteren Niveauflächen der Ozeane. Dass das Wasser von oben, die Luft hauptsächlich von unten erwärmt wird, übt auf den Gang der Bewegung keinen Einfluss aus.

Merkwürdiger Weise scheint nun die Luft der höheren Schichten nur etwa bis zum 30. oder 40. Breitengrade vom Aequator abzufliessen und sich schon hier wieder zur Erde herabzusenken, sodass also die vertikale Cirkulation der Luft in ihrer Regelmässigkeit nur bis in diese Regionen besteht; denn von den genannten Breiten an finden wir nach den Polen zu wieder abnehmenden Luftdruck. Für diese auffallende Erscheinung, dass auf beiden Halbkugeln etwa in der Breite von 30—40° ein Gürtel höchsten Luftdruckes besteht, giebt es bis jetzt keine Erklärung; wir müssen uns an der Thatsache genügen lassen.

Nun aber folgt die Luft stets ihrem Gradienten, fliesst in jeder Niveaufläche — mit der bekannten, durch die Achsendrehung der Erde hervorgerufenen Ablenkung — immer von den Gebieten höheren nach denen niederen Druckes. Wir haben also, wenn wir von der Region der stärksten Erwärmung beispielsweise nach Norden gehen, folgende atmosphärische Erscheinungen zu erwarten: zuerst niedrigsten Barometerstand und Windstille; dann durch etwa 20 Breitengrade steigendes Barometer und Nordostwind, den bekannten Passat; weiter

höchsten Barometerstand mit Windstillen; endlich noch weiter nach Norden fallendes Barometer mit vorwiegenden Südwestwinden, die immer mehr in Westwinde übergehen. Warum diese einfachen Verhältnisse so vielfache Störungen erfahren, werden wir zum Teil später erörtern.

4. Grundzüge der grossen Meeresströmungen.

Die Luftströmungen üben auf das Wasser einen Einfluss aus, indem sie seine Oberfläche nicht nur in Wellenbewegung versetzen, sondern auch ihrerseits in denselben Strömungen hervorrufen und dadurch das einfache Bild der vertikalen Wassercirkulation nicht unwesentlich abändern.

Zunächst verhindern die Passate das Abfließen des warmen Oberflächenwassers und führen es, entgegen ihrem Gefälle, zum Äquator und nach Westen, bis es sich gegen die vorliegenden Landmassen aufstaut. Hier, in den westlichen Teilen der Ozeane, kommt zu dem bereits vorhandenen, durch die Erwärmung des Wassers hervorgerufenen Gefälle der indirekte Einfluss des Windes, und beide zusammen treiben das warme Oberflächenwasser bis in die mittleren Breiten. Diese warmen Strömungen lockern die über ihnen liegende Luft soweit auf, dass sie bis in die Zonen höchsten Luftdrucks hinein das Barometer zum Fallen bringen, womit die Kraft, die die Passate erzeugt, wegfällt. Dass letztere über den westlichen Meeresteilen nicht zur Herrschaft gelangen, hat somit seinen Grund in den warmen Meeresströmungen dieser Regionen. Damit soll nicht in Abrede gestellt sein, dass die veränderten Luftdruck- und Windverhältnisse ihrerseits wieder eine gewisse Rückwirkung auf die Bewegung des Wassers ausüben.

Je weiter sich nun die warmen Ströme vom Äquator entfernen, destomehr folgen sie der Rotationskraft nach Osten. Im weiteren Verlauf führen auch die vorherrschenden Westwinde das Wasser nach den östlichen Regionen, wo sich dann ein Teil wieder der Strömung zum Äquator anschliesst, während ein anderer Teil in höhere Breiten abfließt. Dieser lehnt sich, wo er auf Festland stösst, unter dem gemeinsamen Einflusse der Rotationskraft und der vorherrschenden Westwinde an die Küsten an und erzeugt das milde Küstenklima Europas, Alaskas und Patagoniens.

Das Wasser zwischen den Äquatorialströmen, in der Region der Kalmen, hat, wie diese Strömungen selbst, ein der Stromrichtung entgegengesetztes Gefälle und fliesst als Äquatorial-Gegenströmung nach Osten.

Sonach ist das Schema der grossen Oberflächenströmungen folgendes: Das Wasser aller Meere von der Region der Äquatorialkalmen bis etwa 40° Breite und von einem Kontinente bis zum andern beschreibt Kreise, deren Mittelpunkt etwa um den 30. Breitengrad liegt, auf der nördlichen Halbkugel im Sinne des Uhrzeigers, auf der südlichen im entgegengesetzten Sinne. Von diesen Wirbeln lösen sich auf der polaren Seite Wassermassen ab und fließen, immer mit einer östlichen Tendenz, in höhere Breiten. Zwischen den äquatorialen Teilen der Wirbel, den grossen Westströmungen, besteht in der Region der Kalmen eine Ostströmung. Das ganze System verschiebt sich mit dem Wechsel der Jahreszeiten um einige Grad nach Norden und Süden.

Alle diese Strömungen sind, wenn man nach der alten Auffassung die direct aus eisigen Regionen stammenden Ströme als kalte bezeichnet, warm. Will man einen Unterschied zwischen warmen und kalten Strömen beibehalten, so kann es sich nur noch um das Verhältnis zu der mittleren Temperatur der betreffenden Breiten handeln.

Zwischen den Oberflächenströmen und den Küsten der Festländer liegt nun in weiter Ausdehnung und in einer Breite bis zu 100 und mehr Kilometern ein Streifen abnorm kalten Wassers, der ursprünglich den Anlass zur Annahme von kalten Oberflächenströmen gegeben hat, von dem man aber jetzt weiss, dass er sich aus dem Meeresgrunde emporhebt.

5. Physikalische Ursachen des kalten Küstenwassers.

a. Die Rotationskraft.

Für das Emporquellen des kalten Küstenwassers aus der Tiefe der Oceane sind in den letzten Jahrzehnten mehrere Gründe gefunden. Der erste beruht auf der Achsendrehung der Erde und ist derselbe, der schon bei der Ablenkung der Ströme von ihrer Richtung erwähnt wurde.

Denken wir uns den Golfstrom beispielsweise in dem Teile seines Laufes, wo er an der Halbinsel Florida entlang nach Norden fliesst. Bei der Achsendrehung der Erde haben die südlichen, dem Aequator näher gelegenen Teile der Strömung einen grösseren Parallelkreis zu beschreiben als die nördlichen. Jedes von Süden kommende Wasserteilchen besitzt also eine grössere nach Osten gerichtete Rotationsgeschwindigkeit als der Parallelkreis, auf den es übergeht. Indem es nun infolge des Beharrungsvermögens die Tendenz hat, seine grössere östliche Geschwindigkeit beizubehalten, entwickelt es ein Bestreben, von der nördlichen Richtung nach Osten, also nach rechts abzuweichen. Es wirkt somit auf jedes Wasserteilchen ausser der Schwerkraft eine nach rechts gerichtete, aus der Achsendrehung der Erde entspringende Kraft, der man den Namen Rotationskraft gegeben hat. Diese führt das Wasser von der Küste weg und bewirkt so, dass sich die Oberfläche der Strömung links senkt, und zwar so weit, bis sie auf der Resultante aus Schwerkraft und Rotationskraft senkrecht steht.

Wenn sich selbstverständlich auf dem offenen Ocean diese Niveaudifferenz nicht direct durch Nivellement nachweisen lässt, so hat sie doch eine sehr hervortretende wichtige Folge. Da nämlich das ruhende, kalte Wasser der tieferen Schichten auf der rechten Seite unter höherem Drucke steht als auf der linken, muss dieses kalte Wasser links, also an der Küste, emporgedrückt werden.

An der gegenüberliegenden iberischen Halbinsel und besonders an der afrikanischen Küste kehrt ein Teil der Gewässer des Golfstroms zum Aequator zurück. Bei seiner Bewegung geht jedes Wasserteilchen von einem kleineren zu einem grösseren Parallelkreise über, hat also eine langsamere östliche Bewegung als der Teil der Erdoberfläche, auf den es gelangt. Mithin besitzt es infolge des Beharrungsvermögens die Tendenz, hinter der Bewegung der Erde zurückzubleiben und von der südlichen Richtung nach Westen, d. h. abermals nach rechts abzuweichen. Es wirkt also wieder auf jedes Wasserteilchen ausser der Schwere die Rotationskraft nach rechts, die Oberfläche muss sich daher links senken und es muss hier, an der Küste, kaltes Wasser emporgedrückt werden.

Betrachten wir der Vollständigkeit wegen wenigstens noch eine Strömung der südlichen Halbkugel. Die Kreisströmung des Südpacifischen Oceans berührt die Küste Amerikas etwa vom 45. Grad bis in die Nähe des Aequators. Ueberall wirkt auf sie die Rotationskraft nach links, die Oberfläche senkt sich daher nach rechts, und hier, an der Küste, tritt das kalte Grundwasser empor.

Ebenso tritt das kalte Wasser unter dem Einflusse der Rotationskraft mehr oder weniger deutlich auf an der Küste von Brasilien etwa von der Breite von Rio de Janeiro an, auf beiden Seiten von Südafrika und auf beiden Seiten des Nordpacifischen Oceans. An den Küsten von Australien und Neuseeland scheint es gleichfalls zu bestehen; doch ist es hier meines Wissens bisher nicht klar nachgewiesen, was wohl mit der geringeren meridionalen Ausdehnung dieser Länder zusammenhängt.

Eine meridionale Richtung des Stromes ist für die Entwicklung der Rotationskraft nicht erforderlich. Dieselbe beruht, wie die Abweichung des Foucaultschen Pendels, auf dem Bestreben der bewegten Massen, ihre Richtung im Raume beizubehalten, und wirkt auf Ströme jeder Richtung gleich stark. Wenn also das kalte Grundwasser hauptsächlich an meridionalen Küsten auftritt, so hat dies seinen Grund darin, dass die Strömungen hauptsächlich an solchen Küsten verlaufen. Doch dürfte bei Rio de Janeiro ein Beispiel westlicher Strömung mit kaltem Küstenwasser vorliegen. Ganz klar scheint das zweite hierher gehörige Beispiel zu liegen, die Einwirkung des Guinea-Stromes auf das kalte Wasser der Goldküste.

b. Ablandiger Wind.

Die Luftströmungen führen das Oberflächenwasser bis zu einer gewissen Tiefe mit sich, drängen es gegen etwa vorliegendes Land und erhöhen hier den Wasserspiegel, während sie ihn an der entgegengesetzten Seite erniedrigt haben. Das Wasser wird also auf der vom Winde getroffenen Seite abzufließen, auf der andern Seite zuzufliessen suchen und zwar sowohl seitwärts als unterseeisch. Somit wird ablandiger Wind bewirken, dass die tieferen und kälteren Wasserschichten an der Küste emporsteigen.

Diese Erscheinung tritt, wenn die erwärmte Schicht dünn ist, oft sehr auffallend hervor, so z. B. zu Anfang des Sommers in der Ostsee bei plötzlich aufkommendem ablandigen Winde. In den grösseren Verhältnissen der Océane wird eine ähnliche Erscheinung erst durch längere Dauer des Windes herbeigeführt werden, wie wir sie bei den regelmässigen Luftströmungen insbesondere bei den Passaten kennen. Somit hat das Emporquellen des kalten Wassers an den Westküsten der Kontinente seine Begründung teilweise in den Passaten.

Im Winter kühlt sich das Land stärker ab als das Meer, es steigt also der Luftdruck über dem Lande, und die Luft fliesst am Boden vom Lande zum Meere. Sonach herrschen an den Küsten im Winter ablandige Winde vor, die das kalte Küstenwasser emporheben. Dass im Sommer umgekehrt auflandige Winde dem Auftreten des kalten Wassers entgegenstehen, bedarf keiner weiteren Ausführung.

c. Die Centrifugalkraft.

Versetzt man in einem cylindrischen Gefässe das Wasser in Wirbelbewegung, so sinkt die Oberfläche in der Mitte und steigt am Rande empor. Befindet sich nun unter dem Wirbel eine schwerere, ruhende Flüssigkeit, so sinkt ihre Oberfläche am Rande und hebt sich in der Mitte. Man kann die Erscheinung leicht sichtbar machen, wenn man auf Wasser Terpentinöl giesst und letzteres vorsichtig in Rotation versetzt.

Noch einfacher und in mancher Hinsicht belehrender ist folgender Versuch. Man thut in Wasser etwas Salz, versetzt die ganze Masse in kreisförmige Bewegung und überlässt sie dann sich selbst. Anfangs bewegt sich das Salz als der schwerere Körper am Aussenrande entlang. Nun kommen aber infolge der Reibung die unteren Schichten eher zur Ruhe als die oberen. Sobald der Geschwindigkeitsunterschied ausreichend gross geworden ist, entsteht am Boden eine Strömung vom Rande zur Mitte, wo das Salz sich ansammelt, und man sieht von dort aus die schwerere Salzlösung emporsteigen und kleine Salzstückchen oder andere etwa im Wasser befindliche feste Körperchen mit in die Höhe heben. Es genügt zu dem Versuche auch ein Glas Wasser mit Zucker. Nachdem sich der schmelzende Zucker in der Mitte gesammelt hat, kann man über demselben deutlich die Schlieren der schwereren Zuckerlösung sowie kleinere Stückchen des schmelzenden Zuckers aufsteigen sehen.

Wenn also eine Oberflächenströmung einen Kreisbogen beschreibt, wenn etwa hinter einem Küstenvorsprung die Küste zurücktritt, so sinkt das Wasser an der inneren Seite und hebt sich an der äusseren, und zwar wieder soweit, bis es auf der Resultante aus Schwerkraft und Centrifugalkraft senkrecht steht. Alsdann stehen die unteren, ruhenden Wasserschichten an der Küste unter niedrigerem Drucke als an der Aussenseite, somit muss an der Küste das schwerere Bodenwasser emgedrückt werden.

d. Die Aspiration.

Ändert sich in einer Röhre der Querschnitt einer Strömung, so entstehen eigentümliche Druckverhältnisse auf die Wände derartig, dass der Druck unter Umständen negativ werden, dass eine saugende Wirkung eintreten kann. Die Druckverminderung findet ihre technische Verwertung in der Wasser-Luftpumpe. Dieselbe Kraft tritt auf in offenen Strömen und sie äussert sich bei den Flüssen in einem Zurückfliessen an und besonders zwischen Buhnen, wo man eine Wirbelbewegung des Wassers wahrnimmt derart, dass es sich am Lande der Stromrichtung entgegenbewegt. Die oceanischen Gewässer zeigen eine solche Erscheinung sehr häufig, und es erscheint nicht unwahrscheinlich, dass dieselbe mit einem Aufsteigen des kalten Wassers in Verbindung steht. Doch ist jedenfalls, wie sich später zeigen wird, der Einfluss der Aspiration verhältnismässig unbedeutend.

Eine saugende Wirkung äussert sich auch, wenn das Wasser über eine Bodenschwelle hinwegfliesst, und zwar sowohl vor, als auch hinter der Erhebung. Die Verhältnisse des Europäischen Nordmeeres scheinen auf eine derartige Erscheinung hinzuweisen. Wenn nämlich das Golfstromwasser den sog. Wyville-Thomson-Rücken überschreitet, der sich von Norwegen über die Shetland- und Fär-Öer-Inseln und Island nach Grönland hinzieht, so kann sich eine solche Aspiration geltend machen. Und in der That tritt an der Nordseite das Grundwasser so auffallend empor, dass östlich von Island im Meridian von Greenwich schon in weniger als 200 Meter Tiefe eine Temperatur von 0° gefunden wird.

Umgekehrt scheint über die tiefste Stelle dieses Rückens, gewissermassen über den Pass, der das Nordmeer mit dem Atlantischen Ocean verbindet, zwischen den Fär-Öer- und den Shetland-Inseln Wasser südwärts zu fliessen. Denn es ziehen sich an dieser Stelle von Norden her die kalten Wasserfäden genau so in die Höhe, wie dies beim Ausfliessen des Wassers aus einer seitlichen Oeffnung oder beim Ueberschreiten eines Wehres der Fall ist.

In der Umgebung von Untiefen und an dem unterseeischen Fusse von Inseln finden ähnliche Verhältnisse statt, und es ist wohl kaum zu bezweifeln, dass das kalte Wasser, welches häufig an solchen Stellen zum Vorschein kommt, seinen Ursprung teilweise der Aspiration verdankt. Gleichzeitig wirkt, da die Strömung um die Erhebungen einen Bogen beschreibt, in solchen Fällen die Centrifugalkraft auf das Emporsteigen des kalten Wassers ein.

6. Allgemeine Vergleichung der Kräfte.

Die zuerst betrachteten drei Kräfte, welche das Emporquellen des kalten Druckwassers verursachen, haben das mit einander gemein, dass sie das Bestreben haben, das Wasser von der Küste wegzuführen. Daher muss der Wasserspiegel an der Küste sinken, an der Aussenseite steigen. Befindet sich, wie dies bei den Meeresströmen der Fall ist, an der Aussenseite der unbegrenzte Ocean, so wird die Erhöhung verschwindend klein, während die Vertiefung an ausgedehnten Festländern, wo das Wasser seitlich kaum zufließen kann, bestehen bleibt.

Die nächste Folge der gedachten Einwirkung ist also die, dass das Wasser an der Küste sinkt, und zwar so weit, bis Gleichgewicht eintritt. Dieses stellt sich für die oberen Schichten her durch die Neigung der Oberfläche, für die unteren, in Ruhe befindlichen, durch das Emporquellen des kalten Druckwassers. Denken wir uns kommunizierende Röhren senkrecht zur Strömung durch das Wasser gelegt, so haben diese an der Aussenseite das leichtere, an der Innenseite das schwerere Wasser, mithin muss der Wasserspiegel an der Küste niedriger stehen. Ob sich freilich im offenen Ocean dieser Niveauunterschied jemals durch Nivellement wird nachweisen lassen, erscheint zweifelhaft.

Dagegen ist in kleinen Verhältnissen für jede einzelne Kraft die gedachte Wirkung nachweisbar. Hinsichtlich der Centrifugalkraft verweise ich auf den oben beschriebenen Versuch. Dass der Wind den Wasserspiegel verschiebt, ist für Binnenmeere durch Beobachtungen nachgewiesen, und in Teichen kann man das Sinken und Steigen des Wasserspiegels unter dem Einflusse des Windes leicht beobachten, besonders dann, wenn sie flach sind. Für die Rotationskraft ist mir nur ein hierher gehöriges Beispiel bekannt. Im Aermelkanal geht die Strömung bei Flut bis zur Grenze Dover-Calais nach Osten, bei Ebbe von da nach Westen. Die Rotationskraft wirkt also bei Flut nach Süden, verstärkt dieselbe an der französischen und schwächt sie an der englischen Küste. Bei Ebbe wirkt die Kraft nach Norden, verringert das Fallen des Wassers auf der englischen und verstärkt es auf der französischen Seite, sodass also die ganze Erscheinung auf der südlichen Seite intensiver auftreten muss als auf der nördlichen. Und in der That ergibt sich aus den von Krümmel (Handbuch der Oceanographie, Bd. 2, S. 255) mitgetheilten Zahlen, dass bei Springzeit der Unterschied zwischen Hochwasser und Niedrigwasser an der französischen Küste im Mittel 2,7 m grösser ist als an der englischen. Dabei ist freilich zu bedenken, dass auf die Fluthöhe örtliche Verhältnisse so stark einwirken, dass die Zahlen nicht ohne weiteres als ein Mass für die Stärke der Rotationskraft angesehen werden können. Ein hierher gehöriges Nivellement, auf das Mohn in den »Strömungen des Europäischen

Nordmeeres«, S. 20, (Petermanns Mitteilungen, Ergänzungsheft 79) hinweist, ist meines Wissens noch nicht ausgeführt.

Ein wesentlicher Unterschied hinsichtlich der Wirkungsweise der drei Kräfte besteht darin, dass die Rotationskraft und die Centrifugalkraft auf den Strom in seiner ganzen Tiefe einwirken, während der Wind nur die Oberfläche beeinflusst. Denn mag man über die Fortpflanzung der Windtrift in die Tiefe denken, wie man will, bei ablandigem Winde können immer nur die Schichten an der äussersten Oberfläche mit fortgeführt werden. Die tieferen Schichten erhalten durch die sofort eintretende Niveauveränderung einen Impuls auf die Küste zu und kommen hier mit der Zeit an die Oberfläche. Mag der Wind noch so lange andauern, die ablandige Bewegung kann sich nie etwa durch Reibung in grössere Tiefe fort-pflanzen, weil an die Stelle der fortgeführten Wasserteilchen stets andere treten, die noch keinen Impuls nach aussen erhalten haben.

Hiermit hängt auch zusammen, dass die Verschiebung des Wasserspiegels in flachen Gewässern bedeutender ist als in tiefen. In letzteren hat das Grundwasser unbehinderten Zu- und Abfluss. Nimmt man noch hinzu, dass aufländiger Wind das in heftiger Wellenbewegung befindliche Wasser wesentlich stärker beeinflusst als ablandiger die verhältnismässig glatte Oberfläche, so kann man sich die verheerenden Sturmfluten unserer flachen Küstengewässer erklären, ohne dass man dadurch in Versuchung kommt, die Einwirkung ablandiger Winde auf den tiefen Ocean zu überschätzen. Eine vorläufige Vergleichung hinsichtlich der Stärke der beiden wichtigsten Faktoren, die das kalte Küstenwasser bedingen, wird sich aus folgender Betrachtung ergeben.

Die Luft ist über den Festländern zwischen den Wendekreisen fast immer, in den höheren Breiten wenigstens im Sommer stärker erwärmt als das Meer. Die höhere Temperatur bedingt über ihnen tieferen Barometerstand, und so entsteht ein Gradient vom Meere zum Lande. Die hierdurch hervorgerufene Luftströmung erfährt nun durch die Achsendrehung der Erde die bekannte Ablenkung, und das Ergebnis aus dem Zusammenwirken aller Kräfte ist, dass an den Westküsten der Continente die Passate in weiter Ausdehnung der Küste parallel, häufig sogar bis zu gewissem Grade aufländig sind. Derartig abgelenkte Passate herrschen z. B. bei Peru und an der atlantischen Küste Südafrikas durchaus vor. Wenn also trotzdem das kalte Wasser gerade hier so deutlich hervortritt, so äussert sich schon darin meines Erachtens ein Ueberwiegen der Rotationskraft. Und dies zeigt sich noch klarer an der Küste von Chile, wo trotz entschieden aufländiger Luftströmungen das Küstenwasser auffallend kalt ist. Der weitere Verlauf unserer Untersuchung wird uns noch mehrere derartige Beispiele vorführen.

Gerade unter dem Einflusse des Windes äussert sich die Wirkung der Rotationskraft in höchst bemerkenswerter Weise. Kapitän Dinklage hat (Annalen der Hydrographie, 1888 S. 1 und 1895 S. 427 ff.) für Meere, in denen die sonstigen physikalischen Verhältnisse zu Strömungen wenig oder keinen Anlass geben, für die Ostsee und den Meerbusen von Biskaya, nachgewiesen, dass der Wind nicht eine Strömung in seiner Richtung erzeugt, sondern dass die Stromrichtung schon eine durch die Drehung der Erde bedingte nicht unbedeutende Abweichung nach rechts zeigt.

Sind also im offenen Ocean Wind und Strom einer Küste parallel, so äussert sich die Rotationskraft nach dem unter 5a entwickelten Gesetze in dem Emporquellen des kalten Wassers. Jedenfalls ist dann die Ursache des kalten Wassers nicht ablandiger Wind, sondern die Rotationskraft.

Ich möchte hier noch ein Beispiel anführen, das insofern eine besondere Bedeutung hat, als es für die Anerkennung der gegenwärtigen Theorie des kalten Küstenwassers ausschlaggebend gewesen ist. Ueber dem stark erwärmten asiatischen Kontinente bildet sich im Sommer ein tiefes barometrisches Minimum, das die Luft aus dem Indischen Ocean ansaugt. So entsteht an der Somaliküste und an der arabischen Küste ein kräftiger Monsun in der Richtung nach Nordost, der zur Entstehung einer entsprechenden Meeresströmung Anlass giebt. Wind und Strom sind zunächst der Küste parallel, später wendet sich die Küste nach links, während der Strom nach rechts abschwenkt. Hier nun fand vom 3. bis 5. Juli 1886 Kapitän z. S. Hoffmann an der Somaliküste Verhältnisse, die für das kalte

Küstenwasser so bezeichnend sind, dass ich einen Teil seines Berichtes aus den Annalen der Hydrographie (1886. S. 395) abdrucke:

»Bis dahin hatten Wasser und Luft gegen die in Zanzibar bestehenden Verhältnisse nicht wesentliche Aenderungen gezeigt. Die Wassertemperaturen hatten immer 25° C. und darüber betragen. Sobald die starke Strömung aufgehört hatte, fiel die Temperatur des Wassers zwischen 4° und 8° N.-Br. rapide und erreichte bei Ras al Khyle den abnorm niedrigen Stand von 14,9°. Infolge dessen fiel auch die Lufttemperatur. Bei klarem Himmel stieg das Thermometer mittags nicht über 20°, so dass man sich gern der Tropensonne aussetzte. Dabei war der Horizont dunstig und nachts taute es stark. Das Meer hatte ein tief olivengrünes, oft geradezu schwarzes Aussehen, ganz nahe der Küste wurde es hellgrün. In den normal warmen Gegenden war das Wasser stets tief blau. In jedem anderen Meeresteil würde man aus diesen Beobachtungen auf das Vorhandensein eines polaren Stromes schliessen. Hier wird man nicht umhin können, ein Aufsteigen des Wassers aus der Tiefe zuzugeben.«

Wenn nun an der Somaliküste der Wind teilweise ablandig ist, so ist er an der arabischen Küste, wo gleichfalls kaltes Wasser gefunden wird, vorwiegend auflandig, sodass man für diese Gegend auf ein Ueberwiegen der Rotationskraft schliessen möchte.

Noch tiefer als der Monsun greift sicherlich der Passat in die Anordnung der oceanischen Gewässer ein. Aber gerade hinsichtlich des kalten Küstenwassers versagt derselbe verhältnismässig oft, weil er an den Westküsten der Kontinente sehr häufig nicht ablandig ist und für die Ostküsten überhaupt nicht in Betracht kommen kann oder, falls man seine allgemeine westliche Tendenz in den Vordergrund stellt, sogar als ein Hindernis der Erscheinung in Rechnung gezogen werden muss.

Etwa vom 40. Breitengrade ab wirkt der vorherrschende Westwind mit der Rotationskraft zusammen dahin, das warme Oberflächenwasser von den Ostküsten der Kontinente fortzutreiben und das kalte Wasser in grosser Breite und im Zusammenhange mit polaren Regionen als wirkliche Strömung in dem alten Sinne auftreten zu lassen. Es gilt dies für die Ostküsten Nordamerikas und Asiens. An der atlantischen Küste Patagoniens aber kann das kalte Wasser, soweit seine Temperatur unter der des Kap Horn-Stromes liegt, wieder nur aus der Tiefe stammen. Und hier liegt wohl unzweifelhaft die wichtigste Ursache seines Auftretens in dem beständigen Westwinde.

Wie hoch oder wie niedrig man aber auch die eine oder die andere der genannten Kräfte veranschlagen mag: jedenfalls ist die Art und Weise, in der das kalte Wasser zu Tage gefördert wird, bei ablandigem Winde dieselbe wie bei der Rotationskraft und der Centrifugalkraft. Immer beruht der Grund der Erscheinung auf einer Verschiebung des Wasserspiegels und auf einer Aenderung der Druckverhältnisse in den tieferen Schichten.

Das letzte Kennzeichen trifft nun auch zu für die Aspiration. Passiert die Strömung eine Buhne, einen Küstenvorsprung, oder ein Wehr, eine Landschwelle, so sind es die eigentümlichen Druckverhältnisse, die zur Bildung rückläufiger Strömungen und zum Emporquellen des kalten Wassers führen.

Dagegen ist für sein Auftauchen eine Küste nicht unbedingt erforderlich. Der Versuch Seite 8 zeigt, dass das schwere Grundwasser gerade am Rande hinabgedrückt wird und in der Mitte aufquillt. Moh n hat in der Mitte des Europäischen Nordmeeres unter der warmen Oberfläche das Aufsteigen des schweren Bodenwassers bis zu Tiefen von 1000 und mehr Metern nachgewiesen und hauptsächlich aus den durch die Rotationskraft bedingten Druckunterschieden abgeleitet.

Da es also unter allen Umständen Druckverhältnisse sind, die das Aufquellen des kalten Wassers veranlassen, möchte ich für dieses Wasser, das bis jetzt keinen zutreffenden Namen hat, die Bezeichnung »Druckwasser« vorschlagen.

In welcher Weise die massgebenden Bedingungen zusammen- oder einander entgegenwirken, haben wir schon an mehreren Beispielen kennen gelernt. Doch möchte ich noch einige wichtige Fälle hervorheben.

Im Winter herrscht über dem kalten nordamerikanischen Festlande hoher Barometerstand, der ein Abfliessen der unteren Luftschichten zum Atlantischen Ocean bedingt, und ablandiger

Wind im Verein mit der Rotationskraft lassen das kalte Wasser sehr klar hervortreten. Im Sommer saugt der hoch erwärmte Continent die Luft vom Meere an, sodass die Luftströmung der Rotationskraft entgegen wirkt und das kalte Wasser an der Oberfläche bisweilen stellenweise zum Verschwinden bringt. Doch findet sich dasselbe auch dann noch in verhältnismässig unbedeutender Tiefe und zeigt so den Einfluss der Rotationskraft.

Ueber dem abnorm warmen Europäischen Nordmeere besteht im Winter sehr niedriger Luftdruck, der an der norwegischen Küste ablandige Winde hervorruft. Während also die Rotationskraft das warme Golfstromwasser an die Küste drängt, müsste der Wind dasselbe abtreiben und kaltes Grundwasser an die Oberfläche bringen. Da letzteres kaum jemals geschieht, ist klar, dass hier wieder der Einfluss der Rotationskraft den des Windes überwiegt.

An der Goldküste herrscht bei starker Ostströmung durchaus aufländiger Wind. Auf das Emporquellen des kalten Druckwassers, das besonders bei Kap Coast Castle hervortritt, wirken die Rotationskraft und die Centrifugalkraft, vielleicht auch, bei der Verbreiterung der Strömung, die Aspiration, die somit den entgegengesetzten Einfluss des Windes überwiegen.

Dafür, dass im Ocean der Wind allein ohne Mitwirkung der anderen Kräfte, vielleicht sogar gegen eine schwache Rotationskraft, das kalte Wasser zum Vorschein bringt, ist ausser der bereits erwähnten patagonischen Ostküste nur ein Beispiel von einiger Bedeutung bekannt, das ist die pacifische Küste von Nikaragua.

Kehren wir zum Schluss noch einmal zur Somaliküste zurück. Sie verläuft etwa von Ras Hafun bis Kap Guardafui in nördlicher Richtung, sodass der Südwestmonsun hier entschieden ablandig ist und das Wasser von der Küste wegtreibt. In demselben Sinne wirkt die Rotationskraft auf den Strom ein. Bei Ras Hafun und wohl mehr noch bei Guardafui kommt auch die Centrifugalkraft in Betracht, da die ausserordentlich starke Verdampfung in den regenarmen Gebieten des Roten Meeres und des Golfs von Aden einen beträchtlichen Wasserzufluss erfordert. Endlich wird auch noch die Verbreiterung des Strombettes ihre Wirkung ausüben, sodass an dieser Stelle alle vier Factoren zusammenwirken, um das kalte Wasser an die Oberfläche zu bringen.

7. Sonstige Eigenschaften des kalten Druckwassers.

Einige Eigenschaften des kalten Druckwassers haben wir schon bei Betrachtung der Verhältnisse an der Somaliküste kennen gelernt. Wenn wir dasselbe als stillstehendes Wasser bezeichnen, so ist damit nur ein Gegensatz gegen die nebenliegende Strömung ausgesprochen. Im übrigen ist es allen bewegenden Einflüssen unterworfen, denen die Oberfläche des Wassers ausgesetzt ist. Und da besonders Ebbe und Flut an den Küsten sehr starke Strömungen hervorrufen, so ist es nicht zu verwundern, dass man über seine Natur so lange im Unklaren gewesen ist.

Die beträchtliche Abkühlung der Luft über ihm ruft häufig dichte Nebel hervor, die den Schiffen gefährlich werden können. Diese Gefahr wird noch erhöht durch eigentümliche Windverhältnisse. Indem nämlich die Luft über dem kalten Wasser sich zusammenzieht, muss das Barometer einen höheren Stand annehmen, als in den Nachbargebieten. Es entsteht also ein Gradient von dem kalten Streifen weg einerseits zur Küste, andererseits auf die See hinaus. Deshalb herrscht an den vom kalten Wasser begleiteten Küsten so häufig aufländige Windrichtung vor, die bei Tage in stürmischen Seewind übergeht und für die im Nebel eingeschlossenen Schiffe eine neue Gefahr bildet. Auch das ausserordentlich kühle Küstenklima, das bei ablandigem Winde unbegreiflich sein würde, findet auf diese Art seine Erklärung.

Bei der Berührung mit dem warmen Stromwasser und unter dem Einfluss der Sonnenstrahlen erwärmt sich nun allmählich die kalte Wasseroberfläche, wird dadurch leichter und erlangt das specifische Gewicht des salzreicheren Strömungswassers schon bei einer um mehrere Grad tieferen Temperatur. In diesem Zustande kann es sich der wärmeren, salzreicheren Strömung anschliessen, bildet in ihr nicht selten zusammenhängende kalte Streifen und kühlt sie ihrerseits ab. So ist das Wasser der zum Aequator zurückkehrenden Ströme, obgleich es den grossen oceanischen Wirbeln angehört, die nur von der heissen Zone bis in die wärmeren Teile der gemässigten Zone reichen, verhältnismässig um so kälter, je näher es

dem Aequator kommt, und es ist begreiflich, wenn man diese Ströme kalt genannt hat. Nur besteht bei dem jetzigen Brauch zwischen warm und kalt keine bestimmte Grenze. Warum die Strömung bis zu diesem Punkte warm, von da ab kalt und dann, nachdem sie einige Zeit der Aequatorialströmung angehört hat, wieder warm heisst, ist nicht abzusehen, und die unter solchen Verhältnissen durchaus willkürliche Trennung auf den Karten würde nicht bestehen, wenn man nicht früher mit dem Begriffe des kalten Stromes einen Sinn verbunden hätte, der heute nicht mehr passt.

Dieser Mangel an Folgerichtigkeit ist zunächst ziemlich bedeutungslos. Aber er bringt auf den Strömungs-Karten einen höchst auffallenden Fehler zustande, indem diese bis in die neueste Zeit die Strömung an der pacifischen Küste Patagoniens »kalt« zeigen, während über ihre Natur als warme Strömung gar kein Zweifel bestehen kann. Allerdings ist die südliche Halbkugel kühler als die nördliche; trotzdem aber tritt der Wärmeüberschuss so unzweideutig hervor, dass der genannte Fehler völlig unbegreiflich wäre, wenn er nicht in der Entwicklung unserer Erkenntnis seine historische Erklärung fände. Als man das kalte Wasser bei Peru von einer antarktischen Strömung herleitete, musste natürlich der südpatagonische Strom gleichfalls »kalt« sein. Jetzt ist die Quelle des kalten Küstenwassers gefunden; aber nachdem man den einen Zweig der südpacifischen Triftströmung, den peruanischen Strom, »kalt« gezeichnet hat, scheut man sich, bei dem andern, dem Eismeere näheren Zweige, die warme Farbe anzuwenden. Und doch entspricht er ganz genau dem Golfstrom bei Irland und Schottland, wie man sich durch den Augenschein überzeugen kann, wenn man, um die rechte Seite mit der linken zu vertauschen, die Karte mit dem Südpole nach oben im Spiegel betrachtet. Wer den Golfstrom bei Irland, Schottland, Norwegen warm zeichnet, macht sich einer Rückständigkeit schuldig, wenn er für die Strömung zum Kap Horn die kalte Farbe verwendet.

Vergleichen wir noch allgemein die Mächtigkeit, in der das kalte Wasser zu Tage tritt, mit der Richtung der Küsten, so ergibt sich folgendes bemerkenswerte Verhältnis: Das kalte Druckwasser tritt am deutlichsten auf an denjenigen langgestreckten Küsten, die in meridionaler Richtung verlaufen oder von der meridionalen abweichen nach der Richtung, nach welcher die Rotationskraft die Strömung abzulenken sucht, weniger deutlich an den Küsten, die von der meridionalen nach der entgegengesetzten Richtung abweichen.

Das kalte Wasser tritt also besonders hervor an den meridionalen Westküsten von Südamerika und Südafrika; ferner an den Ostküsten von Nordamerika, Nordasien und der Somaliküste, die nach NO. verlaufen und wo die Rotationskraft nach O. wirkt; endlich an der Westküste von Nordafrika, die (in der Richtung des Stromes gerechnet) nach SW. verläuft, und wo die Rotationskraft nach W. wirkt.

Es tritt weniger hervor an der Westküste der Vereinigten Staaten, die nach SO. verläuft, während die Rotation nach W. wirkt, sowie an den Ostküsten von Südafrika und von Brasilien, die nach SW. verlaufen, während die Rotation nach Osten wirkt.

Bei der ersten Gruppe nicht-meridionaler Küsten wirkt die Rotation im Sinne des weiteren Verlaufes der Strömung, verstärkt sie zunächst und hebt dann das kalte Druckwasser. Bei der zweiten Gruppe wirkt die Rotation senkrecht zum weiteren Verlaufe der Strömung; diese bleibt schwächer und kann das kalte Druckwasser weniger deutlich emporheben.

8. Zahlenmässige Vergleichung der Kräfte.

a. Die Rotationskraft.

Die Rotationskraft beträgt für die Masseneinheit in jedem Azimut

$$\rho = \frac{2.2 \pi}{86164} v \sin \alpha$$

wo 86164 die Sekundenzahl des Sterntages, v die Geschwindigkeit der Strömung und α die

geographische Breite bedeutet. Ist somit γ der Winkel, um den sich die Oberfläche gegen den Horizont hebt, und g die Beschleunigung der Schwerkraft, so ist

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\rho}{g} = \frac{4 \pi}{86164 \text{ g}} v \sin \alpha$$

Bezeichnen wir noch die Breite der Strömung mit l , so ist die Niveaudifferenz zwischen den beiden Seiten

$$h = l \cdot \operatorname{tg} \gamma = \frac{4 \pi}{86164 \text{ g}} l v \sin \alpha$$

Nehmen wir beispielsweise nach »Hann, Allg. Erdkunde« für den Golfstrom unter $25\frac{1}{2}^{\circ}$ N. B. die mittlere Geschwindigkeit $1\frac{1}{3}$ m, die Breite 70 Kilometer, so hebt sich die Wasseroberfläche von links nach rechts unter einem Winkel von fast $2''$ im ganzen um etwa 60 cm. Diese Erhebung setzt sich in dem östlich vom Floridaströme ausserhalb des Antillenmeeres langsamer fliessenden Wasser fort, und nehmen wir hier seine mittlere Geschwindigkeit 0,2 m, die Breite 500 km, so ergibt sich eine weitere Erhebung von 64 cm, sodass also der Spiegel des ruhenden, von Strömungen umkreisten Nordatlantischen Oceans etwa 1,24 m höher stehen würde als das Wasser an der Küste von Florida.

Ich will schon hier bemerken, dass zu einer vollständigen Durchführung dieser Rechnungen gegenwärtig wohl das Material selbst für den Atlantischen Ocean noch nicht ausreicht. Hinsichtlich des besonders von den Norwegern so sorgfältig durchforschten Europäischen Nordmeeres sind alle einschlägigen Verhältnisse berücksichtigt in der bereits erwähnten Abhandlung von Moh n, der hierbei Niveaudifferenzen im offenen Ocean bis zu 1,6 m, bei Christiania sogar eine Erhebung von 2,9 m über der Niveaufläche des tiefsten Punktes gefunden hat. Für unsere Zwecke genügt es, wenn wir nur den Floridaström im engeren Sinne betrachten.

Die Breite dieses Stromes nimmt im weiteren Verlaufe zu, die Geschwindigkeit entsprechend ab, indem sie auf der rechten Seite allmählich in die allgemeine Wirbelbewegung des Oceans übergeht. Nehmen wir für 30° N. B. eine Geschwindigkeit von 1 Meter, so hebt sich die Oberfläche auf eine Strombreite von 80 km gleichfalls etwa 60 cm.

Fassen wir nun einen Punkt ins Auge, an dem links Wasser von 10° zu Tage tritt, und nehmen wir die Erhebung rechts zu 60 cm. Die Isotherme von 10° senkt sich von der Küste aus allmählich bis zur Tiefe von 400 m. Für dieses Wasser, welches schon nicht mehr dem Golfstrom, sondern dem Grundwasser des Oceans angehört, können wir einen Salzgehalt von 3,51% annehmen; dann beträgt seine Dichte (bezogen auf destilliertes Wasser von 4° , also sein »absolutes spezifisches Gewicht« = $S \frac{t}{4}$) fast genau 1,027.

Denken wir uns jetzt in der Isotherme von 10° ein System kommunizierender Röhren senkrecht zur Stromrichtung von der Küste bis unter die rechte Seite der Strömung und von dort vertikal bis zur Oberfläche gelegt, so enthalten diese in ihrem ersten Teile ausschliesslich Wasser von der Dichte 1,027, in dem letzten, vertikalen Teile Wasser, dessen Dichte bis zur Oberfläche abnimmt und schliesslich etwa 1,023 beträgt, das aber hier um 60 cm höher steht als auf der anderen Seite. Ist die mittlere Dichte dieses vertikalen Teiles D , so ist die Bedingung des Gleichgewichts:

$$400,6 \cdot D = 400 \cdot 1,027$$

$$D = 1,02546.$$

Bei dieser Wasserdichte würde also unter den angenommenen Umständen die Rotationskraft genügen, um das Wasser von 10° aus der Tiefe von 400 m an der Küste emporzudrücken.

Dieses Beispiel zeigt, wie schon eine geringe Niveaudifferenz ein Emporquellen des achwereren Grundwassers aus beträchtlicher Tiefe zur Folge hat. Letzteres wird besonders auffallend, wenn die Dichte der Wasserschichten nicht sehr verschieden ist. So würde z. B. sei den Dichten 1,0269 und 1,0270 ein Niveauunterschied von 10 cm genügen, um das schwerere Wasser 1026,9 m zu heben. Wenn also bei Florida, wo der Golfstrom noch mächtiger ist, das zehngrädige Wasser rechts 480 m, links 280 m unter der Oberfläche liegt, mithin durch die Niveaudifferenz von 60 cm nur um 200 m gehoben wird, so muss

man hieraus auf einen erheblichen Dichtigkeitsunterschied der Wasserschichten schliessen — vorausgesetzt natürlich, dass das zehnrädige Wasser bereits der in Ruhe befindlichen Bodenschicht angehört.

b. Die Centrifugalkraft.

Die Centrifugalkraft beträgt für die Masseneinheit

$$c = \frac{v^2}{R}$$

wo v wieder die Geschwindigkeit der Strömung, R den Radius des von ihr beschriebenen Kreises bedeutet. Es ergibt sich wie oben:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{c}{g}; h = l \cdot \operatorname{tg} \gamma = \frac{lv^2}{Rg}$$

Für den Strom im Süden von Florida folgt, wenn man die Geschwindigkeit wieder zu $1\frac{1}{3}$ m, den Radius des Krümmungskreises im Mittel zu 225 km, die Breite zu 75 km annimmt, eine Erhebung der rechten Seite um etwa 6 cm, sodass also die Centrifugalkraft in diesem Falle nur etwa den zehnten Teil der Rotationskraft beträgt. Das Steigen der Isothermen kommt somit überwiegend auf Rechnung der letzteren. Doch kann immerhin bei kleinerem Radius und geringerem Dichtigkeitsunterschiede des Wassers die Centrifugalkraft in den oceanischen Strömungen ein wahrnehmbares Emporsteigen des kalten Druckwassers hervorrufen.

c. Die Aspiration.

Der Ausdruck Aspiration wird ebenso wie die Ausdrücke Reaktion und Kompensation oft gebraucht in der Bedeutung von Gefälle. In der vorliegenden Frage verstehe ich unter Aspiration den Unterschied zwischen dem Drucke, den eine ruhende und eine bewegte Flüssigkeit ausüben. Entspricht dieser Druckunterschied einem Höhenunterschied h , so ist

$$v^2 = 2gh,$$

wo v wieder die Geschwindigkeit, g die Beschleunigung der Schwere bedeutet.

Die Geschwindigkeit, mit der das Wasser des Golfstroms den Wyville-Thomson-Rücken überschreitet, ist im Mittel erheblich unter 0,5 m; aber nehmen wir sie immerhin zu 0,5 m an, so ist doch nur

$$h = \frac{1}{8g} = 1\frac{1}{4} \text{ cm.}$$

Selbst eine so geringe Kraft könnte sich in dem Emporquellen des kalten Druckwassers wohl noch in wahrnehmbarer Weise äussern, da das schon weit abgekühlte, salzreiche Wasser des Golfstromes hier stellenweise nahezu dieselbe Dichte hat, wie das kühlere und salzärmere Wasser des Polarmeeres. Doch muss freilich das oben unter 5 d erwähnte Aufsteigen der Nullisotherme hauptsächlich auf Rechnung des stärkeren Motives der Rotationskraft geschrieben werden.

Auch das Emporziehen der Wasserfäden, die über ein Wehr hinwegfliessen, ist hierher zu zählen. Da jedoch bei dieser ganzen Gruppe von Erscheinungen die Reibung eine verhältnismässig bedeutende Rolle spielt, so kann der für unsere Zwecke in Betracht kommende Wert immer nur gering sein. Die obige Formel giebt eben den Maximalwert der Aspiration an, hinter dem sie in der Natur fast immer erheblich zurücksteht. Jedenfalls kann daher, abgesehen vielleicht von Ausnahmefällen in der Nähe des Aequators, die Aspiration im Vergleich zur Rotationskraft und zum Winde nur einen untergeordneten Einfluss auf das Erscheinen des kalten Druckwassers ausüben.

d. Ablandiger Wind.

Die bisher betrachteten Kräfte lassen sich ohne weiteres messen nach einem gemeinschaftlichen Masse, der Höhe einer Wassersäule, die nach einfachen mathematischen Gesetzen gefunden wird. Den Einfluss des Windes durch dasselbe Mass auszudrücken gelingt nur auf einem Umwege und in unvollkommener Weise.

Colding hat für den Windstau, für die Höhe, um die aufländiger Wind den Wasserspiegel hebt, eine empirische Formel aufgestellt, die für Wasserbecken von kleinerer Ausdehnung im allgemeinen zutrifft. Für die Weltmeere ist sie kaum verwendbar. Doch schätzt Colding die Erhebung, die das Wasser des Amerikanischen Mittelmeeres durch die Passate erfährt, auf 3 Fuss, und diese Schätzung ist, soviel ich sehe, allgemein angenommen. Nun wirken ablandige Winde, wie schon oben (S. 10) ausgeführt wurde, wesentlich schwächer als aufländige, und ich glaube mich nicht zu weit von der Wirklichkeit zu entfernen, wenn ich die Niveauerniedrigung bei andauernd ablandigem Winde im Ocean im allgemeinen auf $\frac{1}{2}$ Meter veranschlage.

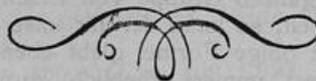
Sonach würde der Wind für das Aufquellen des Druckwassers nahezu der Rotationskraft gleichwertig sein. Denn dass der Wind eine Erhebung erst auf tausend und mehr Kilometer zustande bringt, für welche bei der Rotationskraft kaum 100 km erforderlich sind, bedingt für unseren Fall keinen wesentlichen Unterschied. Dieses Ergebnis, dass der Einfluss ablandigen Windes gegen die Rotationskraft etwas zurücksteht, liess sich nach der allgemeinen Betrachtung der geographischen Verhältnisse, wie sie in den beiden vorhergehenden Kapiteln versucht wurde, mit ziemlicher Sicherheit vermuten.

c. Vergleichende Zusammenstellung.

Hiernach würde die Rangordnung, in der sich die vier Kräfte hinsichtlich des kalten Druckwassers geltend machen, die sein, dass obenan steht die Rotation, in zweiter Linie und ihr nahe ablandiger Wind, in dritter Reihe und in weiterem Abstände die Centrifugalkraft, an vierter Stelle die Aspiration. Es ist das zugleich, wie in den Annalen der Hydrographie 1900, Heft 2, S. 74—75, gezeigt ist, die zeitliche Reihenfolge, in der die Ursachen der merkwürdigen Erscheinung gefunden worden sind.

Schluss.

Ich habe darzustellen versucht, in welcher Weise die Entdeckung des kalten Druckwassers das Bild der Meeresströme umgestaltet hat und noch umgestalten muss, und ich habe weiter versucht die Kräfte gegen einander abzuwägen, die das dichtere Grundwasser aus der Tiefe emporheben. Hierbei hat sich gezeigt, dass die heutigen hydrographischen Kenntnisse zwar im allgemeinen für das Verständnis des kalten Druckwassers ausreichen, dass wir aber noch sehr weit entfernt sind von dem Ziele, auch nur in den wichtigsten Fällen zahlenmässig angeben zu können, in wie weit das kalte Druckwasser auf Rechnung der einen oder der anderen seiner Ursachen zu schreiben ist.



Berichtigung. S. 8 Z. 9 v. o. ist zu lesen »während« statt »zu Anfang«.