

Die Kreisläufe des Wassers auf der Erde¹⁾

Von Georg WUST, Kiel.

Mit 6 Abbildungen.

Wenn mit den Tiefdruckgebieten vom Westen her dunkle Regenwolken über Schleswig-Holstein hinwegziehen und zeitweise in Regenfronten zur Entladung kommen, dann weiß ein jeder, daß es sich hierbei um Wasserdampfmengen handelt, die von der Verdunstung des fernen Atlantischen Ozeans herrühren und die über dem Kontinent zur Kondensation gelangen, um dann auf dem Wege des Abflusses wieder dem Weltmeer zuzuströmen. Diesen Kreislauf des Wassers in Dampfform vom Ozean zur Atmosphäre, in flüssiger Form von der Atmosphäre zum Kontinent und von diesem wieder zum Ozean, bekommt ein jeder zu spüren, ihm kann sich niemand entziehen, so unangenehm, ja katastrophal auch manchmal bei langen und heftigen Regenperioden ein Zuviel der ozeanischen Feuchtigkeit oder bei Dürreperioden ein Zuwenig derselben für die menschliche Wasserwirtschaft wird. Im Grunde weiß ein jeder, daß Wasser und Wasserdampf erst das organische Leben ermöglichen und daß beide ebenso wie die Sonnenstrahlung unentbehrlich sind für die menschliche Existenz.

Aber so richtig und einfach diese Grundvorstellungen über den großen Kreislauf des Wassers sind, so kompliziert und erdumfassend wird das Problem, wenn wir nach den Bahnen des Kreislaufs fragen, nach den treibenden Kräften forschen und zu berechnen versuchen, welche Wassermengen etwa im Laufe eines Jahres in den drei Sphären unseres Planeten bewegt werden. An der Lösung dieses geophysikalischen Kernproblems sind nicht nur die Hydrologen und Wasserwirtschaftler beteiligt, grundlegende Beiträge hierzu müssen die Ozeanographen, die Geologen und die Meteorologen beisteuern, wenn die einzelnen Komponenten des Wasserhaushaltes mengenmäßig ermittelt werden sollen. Wenn ich als Vertreter der Ozeanographie versuche, ein übersichtliches Bild vom Wasserkreislauf auf Grund der neuesten Forschungen zu entwerfen, so darf ich die Berechtigung hierzu herleiten aus der Tatsache, daß rund $\frac{7}{10}$ der Erdoberfläche vom Meer eingenommen werden und nur $\frac{3}{10}$ vom Land, daß also die ozeanischen Komponenten in unserer Bilanz den Ausschlag geben und ferner daraus, daß gerade die Ozeanographie in den letzten Dezennien wichtige Beiträge zur Lösung dieses fundamentalen Grenzproblems Ozean — Atmosphäre — Kontinent geliefert hat. Ich gehe hierbei aus von der grundlegenden Arbeit Eduard BRUCKNER's und stütze mich dann hauptsächlich auf die Arbeiten von F. ALBRECHT, W. MEINARDUS, P. RAETHJEN, W. SCHMIDT, G. SCHOTT, H. U. SVERDRUP, W. WUNDT und auf eigene Untersuchungen (Vgl. Schriften am Schluß des Aufsatzes).

¹⁾ Nach einem gleichnamigen auf den „Kieler Universitätsdagen 1951“ in der Christian-Albrechts-Universität am 1. Februar 1951 gehaltenen öffentlichen Vortrag des Verfassers.

Wir wollen zunächst eine Jahresbilanz des Kreislaufs des Wassers für die ganze Erde aufstellen. Wir setzen dabei voraus, daß sowohl das Klima der Erde in kleineren, nicht geologischen Zeiträumen konstant ist und daß auch das Meeresniveau in seiner mittleren Lage konstant ist, daß also im Jahresmittel nur unbedeutende Wassermengen im Boden verschwinden bzw. aus ihm in juvenilen Thermen und vulkanischen Dämpfen in den Wasserkreislauf an der Erdoberfläche gelangen. Unter diesen zulässigen Voraussetzungen muß die mittlere jährliche Verdunstung auf der gesamten Erdoberfläche genau gleich dem mittleren jährlichen Niederschlag sein. Verdunstung und Niederschlag setzen sich aus je 2 Komponenten zusammen, nämlich der Verdunstung vom Meer V_M und vom Land V_L sowie dem Niederschlag auf dem Meer N_M und auf dem Land N_L und unsere Grundgleichung muß lauten:

$$V_M + V_L = N_M + N_L$$

In dieser Gleichung ist die Größe V_L , die Verdunstung vom Lande, höchst unbequem, da sie direkten Messungen kaum zugänglich ist, weil auf den Kontinenten die Verdunstung nicht nur von freien Wasserflächen, sondern in höchst komplizierter Form auch von der Vegetationsdecke und vom festen Boden her erfolgt (ALBRECHT, 1950. FRIEDRICH, 1950). Da hilft uns die Tatsache weiter, daß auf dem Lande ein kleiner Kreislauf existiert, der durch die Beziehung

$$N_L - V_L = A_L$$

dargestellt wird, d. h. der Überschuß des Niederschlags über die Verdunstung muß auf den Kontinenten genau den Abflußmengen der Flüsse, Gletscher und des Grundwassers entsprechen, die aus hydrologischen Messungen angenähert bekannt sind. Da diese Abflußmengen dem Weltmeer zugutekommen, muß die ozeanische Verdunstung also größer sein als der ozeanische Niederschlag, und zwar genau um den Betrag der jährlichen Süßwasserzufuhr vom Lande A_L , d. h.

$$V_M - N_M = A_L$$

Welche Wassermengen gehen jährlich von den Meeresflächen durch die Verdunstung in die Atmosphäre über? Es würde hier zuweit führen, die Methoden und Fehlerquellen der Verdunstungsmessungen auf dem Meere darzulegen, die nicht anders als in kardanisch aufgehängten Verdunstungsgefäßen an Deck von Schiffen ausgeführt werden können. Bei Berücksichtigung der Aufstellungs- und der Gefäßeinflüsse, die sich aus den Unterschieden der meteorologischen Bedingungen zwischen der natürlichen Meeresoberfläche in 0 m und der künstlichen Gefäßoberfläche in Bordhöhe (ca. 6–8 m) ergeben, gelangt man zu einem Reduktionsfaktor von 0,53, d. h. um 47 %, also auf fast die Hälfte sind die aus Gefäßmessungen abgeleiteten Mittelwerte zu verringern, um die tatsächliche Verdunstung der Meeresoberfläche darzustellen. Durch verschiedene Kunstgriffe und Kontrollrechnungen über den Wärmehaushalt der Erde ist es gelungen, die Fehlergrenze dieses wahrscheinlichsten Wertes auf ca. 10–15 % einzuengen, und wir können heute sagen, daß jährlich rund 334 000 km³ Ozeanwasser in Wasserdampf übergehen, eine Menge, mit der wir zunächst keine Vorstellung verbinden. Anschaulicher ist schon, wenn wir sie in cm Wasserhöhe umrechnen. Über das ganze Weltmeer gleichmäßig verteilt, entspricht diese Wassermenge einer durchschnittlichen Verdunstungshöhe von

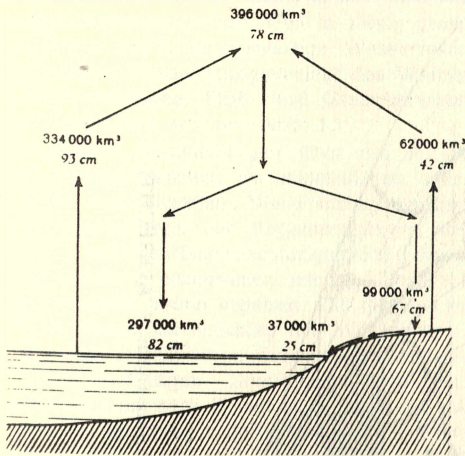


Abb. 1. Der Jahreskreislauf des Wassers auf der Erde (nach G. WUST)

Abb. 4. Zonale Verteilung des Oberflächensalzgehalts S und der Differenz Verdunstung minus Niederschlag ($V-N$) in den offenen Ozeanen (nach G. WUST)

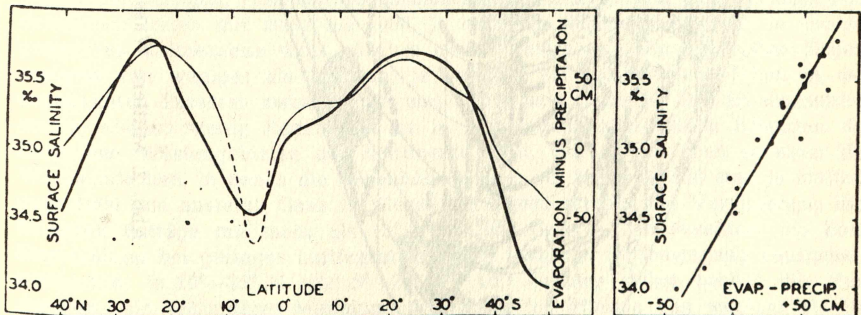
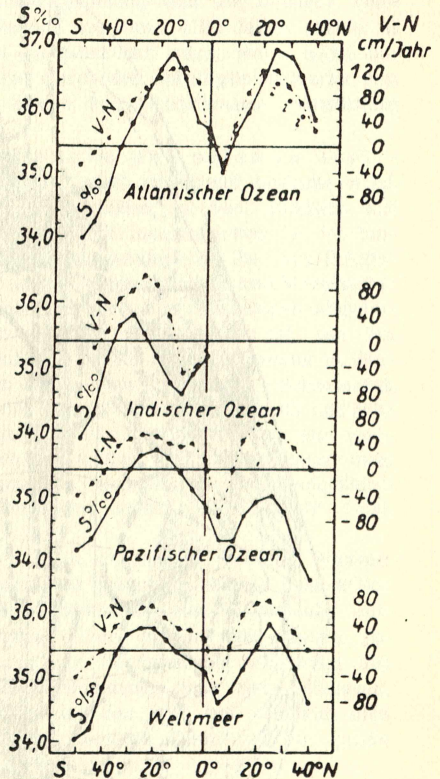


Abb. 3. Zonale Verteilung des Oberflächensalzgehaltes und der Differenz Verdunstung minus Niederschlag im Weltmeer; rechts die gesetzmäßige Beziehung zwischen beiden Größen (nach G. WUST)

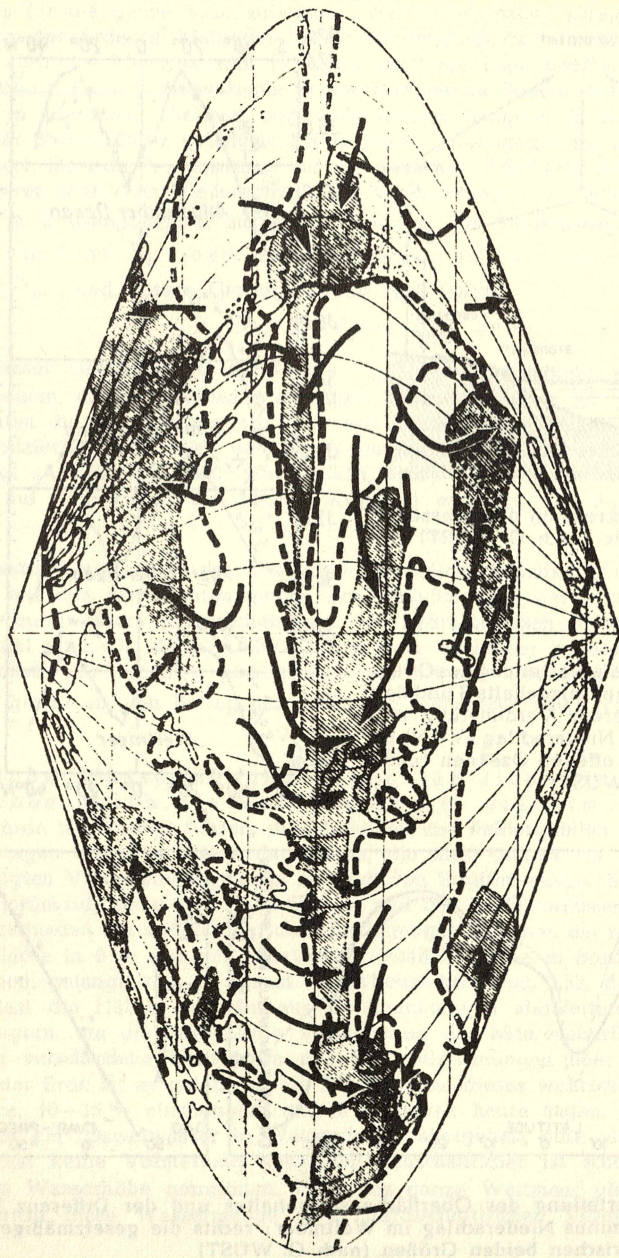


Abb. 2. Mittlere Wasserbilanz der Erdoberfläche im Februar (nach F. ALBRECHT)

93 cm im Jahr. Im Vergleich hierzu erscheint der gesamte Wasservorrat des Weltmeeres mit 1 Milliarde 370 Millionen km^3 gewaltig und die mittlere Tiefe des Weltmeeres von 3795 m riesig groß. Jedoch nur rund 4100 Jahre würde es dauern, bis diese gewaltige Wasserreserve aufgebraucht wäre, wenn nicht der jährliche Verdunstungsverlust des Weltmeeres durch den ständigen Zuwachs von Niederschlägen, Fluß- und Gletscherwasser sowie von Grundwasser vollständig ausgeglichen würde. (Abb. 1.)

Unsere Vorstellungen über die Regenmengen des offenen Weltmeeres beruhen im wesentlichen, was vielfach nicht genügend bedacht wird, nicht auf direkten Niederschlagsmessungen auf Schiffen in See, sondern auf Extrapolationen von Regenmessungen an Küsten- und Inselstationen in Verbindung mit Schiffsbeobachtungen über die Niederschlagshäufigkeit, die aus Schifftagebüchern entnommen werden. Neuere kritische Untersuchungen und Vergleichsmessungen haben ergeben, daß der aus solchen terrestrischen Messungen abgeleitete Gesamtniederschlag des Weltmeeres um rund $\frac{1}{4}$ zu verringern ist, um ihn mit den tatsächlichen durchschnittlichen Verhältnissen des offenen Ozeans in Einklang zu bringen. Somit fallen von den im Jahre vom Weltmeer verdunsteten $334\,000\text{ km}^3$ nach Kondensation in der Atmosphäre $297\,000\text{ km}^3$ oder 82 cm/Jahr als Niederschlag unmittelbar auf das Meer zurück. Der Rest von $37\,000\text{ km}^3$ (entsprechend 25 cm/Jahr Wasserhöhe) wird durch den Abfluß vom Lande wieder dem Weltmeer zugeführt. Dies ist die Wassermenge, welche für die geologische Arbeitsleistung auf der festen Erde zur Verfügung steht. (WUST 1922, 1936, BRINKMANN-KAYSER 1940).

Aus unserem Schema (Abb. 1) können wir auch entnehmen, welche Wasserdampfmengen auf den Kontinenten zur Kondensation gelangen: es sind dies $99\,000\text{ km}^3/\text{Jahr}$, was einer mittleren Regenhöhe der Kontinente von 67 cm/Jahr entspricht. Soweit dieses Regenwasser nicht unmittelbar wieder zum Meere abfließt, gelangt es auf den Kontinenten wieder zur Verdunstung und trägt mit $62\,000\text{ km}^3/\text{Jahr}$ (oder 42 cm/Jahr) als Landverdunstung (von Seen, Flüssen, Gletschern und Vegetation) zum Gesamtniederschlag der Erde bei, der sich also insgesamt auf $396\,000\text{ km}^3/\text{Jahr}$ oder 78 cm/Jahr beläuft. Damit ist der große und der kleine Jahreskreislauf des Wassers geschlossen.

Niederschlag und Verdunstung zeigen auf dem Weltmeer einen höchst eigenartigen, zum Teil gegensätzlichen zonalen Verlauf. Die höchsten Niederschläge treten mit mehr als 1000, ja mehr als 2000 mm im Jahr in der sogenannten Kalmenzone dicht nördlich des Äquators auf. Die geringsten Regenmengen von weniger als 250 mm, ja weniger als 100 mm/Jahr fallen in den sogenannten Passaten zwischen 10° und 30° N bzw. S-Breite. Das ist erstaunlich wenig, ebenso wenig Regen, wie er in den sogenannten ariden Klimaten der Erde, den Wüstengebieten der Kontinente, fällt. Wir selbst leben in einer der Westwindzonen, in denen die Regenhöhe wieder auf mehr als 500 mm, ja vielfach über 1000 mm ansteigt. Ganz im Gegensatz hierzu erreicht die Verdunstung ihre höchsten Beträge mit mehr als 1300 mm/Jahr dort in den Passaten, wo hohe Einstrahlung bei geringer Luftfeuchtigkeit mit lebhafter Luftbewegung zusammentrifft, d. h. in 10° — 25° N und 5° — 20° S. Am Äquator selbst besitzt die Verdunstung ein sekundäres Minimum; ihre absoluten Minima von weniger als 100 mm treten naturgemäß in den Polargebieten auf. So stehen sich auf der Erde Gebiete gegenüber, in denen die Verdunstung größer ist als der Niederschlag, das sind die sogenannten ariden Klimate, die auf den Ozeanen zugleich

die Quellgebiete des Wasserdampfes sind, und solche, in denen es mehr regnet bzw. schneit als verdunstet, das sind die humiden bzw. an den Polen die nivalen Klimate. In der Karte der mittleren Wasserbilanz der Erdoberfläche im Februar (Abb. 2) sind die Gebiete schraffiert, in denen $V-N$ negativ ist, d. h. der Niederschlag in 30 Tagen die Verdunstung um 50 mm übersteigt. Weiß gelassen sind zwischen den fettgestrichelten Kurven die Quellgebiete des ozeanischen Wasserdampfes, wo $V-N$ positiv ist. Die Pfeile bezeichnen in schematischer Weise die Bahnen, auf denen (im Februar) der Wasserdampf von den Verdunstungsgebieten in die Niederschlagsgebiete strömt. Der Niederschlag fällt natürlich vornehmlich dort aus, wo diese Wasserdampfbahnen konvergieren, und so kommt es zur Entstehung der 3 großen zonalen Regengürtel auf der Erde. Bei genauerer Betrachtung der Wasserdampfwege erkennen wir, daß das Einflußgebiet von Wasserdampf atlantischen Ursprungs auf den Kontinenten um ein Mehrfaches größer ist als das von Wasserdampf pazifischer Herkunft, was sich übrigens auch in den Einzugsgebieten der großen Ströme widerspiegelt. Wesentlich für diese Zweiteilung der Erde ist nach Auffassung ALBRECHT's (1947) die Kette der Anden und die eurasiatische-afrikanische Landmasse, welche beide die Erde in eine Landseite und in eine Wasserseite teilen. Die Wasserseite umfaßt den Indischen und Stillen Ozean mit ihren relativ schmalen Randgebieten, die bis an die afrikanischen und asiatischen Wüsten reichen. Die Landseite umfaßt den Atlantischen Ozean und den größten Teil der Festländer der Erde, die ausschließlich vom Atlantischen Ozean mit Wasserdampf versorgt werden (vgl. auch DIETRICH 1950).

Seitdem wir über die klimatisch so wichtige Größe ($V-N$) in den einzelnen Zonen des Weltmeeres genauer unterrichtet sind, vermögen wir auch die sonderbare zonale Verteilung des Salzgehalts an seiner Oberfläche zu verstehen. Dort wo die Differenz $V-N$ ihre höchsten positiven Beträge erreicht, d. h. in 20° – 30° N und S, ist der Oberflächensalzgehalt übernormal und am größten, dort wo $V-N$ negativ ist, d. h. in der äquatorialen Zone (0° – 10° N) und in den hohen subpolaren Regionen ist der Salzgehalt unternormal. Abb. 3 zeigt, daß die Kurven für den zonalen Verlauf des Oberflächensalzgehalts und von $V-N$ sich im Weltmeer fast vollständig decken, ja die Beziehung zwischen beiden Größen ist eine so enge, gesetzmäßige, daß es gelungen ist, sie in eine mathematische Formel zu kleiden, die für das Weltmeer die Form annimmt:

$$S = 34.60 + 0.0175 (V - N).$$

Mit anderen Worten: man kann aus den Zonenwerten der Größe ($V-N$) mit hinreichender Genauigkeit die Zonenwerte des Oberflächensalzgehalts berechnen. Hierdurcherst konnte der Beweis erbracht werden, daß unsere neuen Vorstellungen über den Wasserhaushalt des Weltmeeres zahlenmäßig auf einem brauchbaren Fundament ruhen (WUST 1950, a).

Die genauere Analyse der Kurven des Salzgehalts und der Größe ($V-N$) in den 3 Ozeanen läßt erkennen, daß die einzelnen Ozeanhälften ein ganz unterschiedliches Verhalten aufweisen, indem in ihnen bei ähnlichen Werten von ($V-N$) stark abweichende Absolutbeträge des Salzgehalts auftreten. Besonders auffällig ist der extrem hohe Oberflächensalzgehalt des Nordatlantischen im Vergleich zum Nordpazifischen Ozean, wie es aus dem Verlauf der Kurven in Abb. 4 klar hervorgeht. Hierfür gibt nicht der erwähnte ständige gewaltige Wasserdampfverlust des Atlantischen Ozeans den Ausschlag. Die

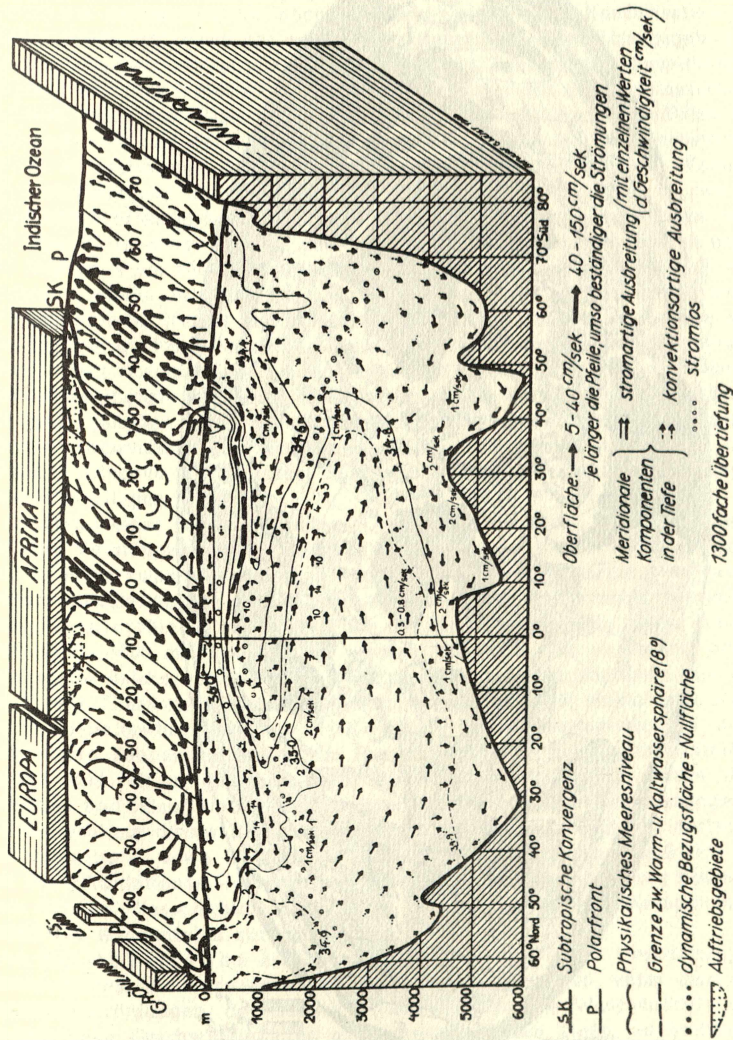


Abb. 5. Schematisches Blockdiagramm der Tiefenzirkulation und der Oberflächenströmungen im Atlantischen Ozean (nach G. WÜST)



Abb. 6. Karte der pot. Bodentemperatur am Tiefseeboden des Weltmeeres (nach G. WUST)

Ursachen für die allgemeine atlantische Salzanreicherung liegen tiefer, nämlich in den Unterschieden der Zirkulations- und Vermischungsvorgänge in den Tiefen der Ozeane. Und damit kommen wir zu den großen Kreisläufen des Wassers innerhalb der gewaltigen Hohlräume der Erdkruste, die vom Weltmeer ausgefüllt werden.

Kehren wir zu den anfangs betrachteten atlantischen Wasserdampfmengen zurück, welche über Schleswig-Holstein zur Kondensation gelangen. Dieses Niederschlagswasser wird in der Hauptsache vom Einzugsgebiet der Elbe an die Nordsee weitergeleitet. In spiraligen Bahnen der Gezeitenströmungen wandert es unter Vermischung mit Nordseewasser mit den kontinuierlichen Restströmen längs der Küste Schleswig-Holsteins und Jütlands allmählich nach Norden und wird vor der Küste Norwegens Bestandteil des Golfstromsystems. Mit seinen Wassermassen gelangt es unter Vermischung mit kälterem Wasser schließlich untertauchend in die tieferen Schichten des Nordpolarmeeres, wo es wahrscheinlich jahrtausendelang langsam umherkreist, bis es eines Tages wieder an die Oberfläche steigt und mit dem Ostgrönlandstrom wieder niederen und wärmeren Breiten, etwa südlich Grönlands, zugeführt wird, um hier zum Teil durch Verdunstung wieder in den atmosphärischen Kreislauf einzutreten, zum andern Teil — besonders im Herbst und Winter — durch Abkühlung wieder schwerer zu werden, zu den großen atlantischen Tiefen abzusinken und in die allgemeine ozeanische Tiefenzirkulation einbezogen zu werden. Der Schleier über diese weitreichenden Ausbreitungs- und Vermischungsvorgänge in den Tiefen des Weltmeeres hat sich jetzt gehoben, seitdem die Ergebnisse der großen ozeanischen Forschungsfahrten (besonders der Forschungsschiffe: „Meteor“, „Atlantis“, „Carnegie“, „Dana“, „Discovery“, „Michael Sars“ und „Armauer Hansen“) in Expeditionswerken vorliegen.

An Hand eines Blockdiagrammes (Abb. 5) ist versucht, alle charakteristischen und für Verständnis der atlantischen Kreisläufe wichtigen Erscheinungen zu einer zwar schematischen, jedoch räumlichen Darstellung zu bringen. In diesem Zirkulationsschema hat man sich den Ozean längs eines S-förmig gewundenen Längsprofils ungefähr am Fuße des Kontinentalabfalls beider Amerika, wo etwa 4500—6000 m Tiefe erreicht werden, aufgeschnitten zu denken oder besser gesagt: die Blöcke von Nord- und Südamerika sind weggenommen und gleichsam durch eine Glaswand ersetzt zu denken, so daß man bei einem Blick nach Osten die Salzgehaltsschichtung und die Kreisläufe der Wassermassen aus der Vogelperspektive beobachten kann. Im Hintergrund sind die Kontinentalblöcke von Europa und Afrika, getrennt durch die Straße von Gibraltar, links die Inseln Grönland und Island und rechts der Rand des Südpolarkontinents angedeutet. Bei der Betrachtung dieses Blockdiagramms ist zu bedenken, daß der vertikale Maßstab gewaltig — etwa 1300fach — übertieft dargestellt ist und daß sich in Wahrheit die Zirkulationen — verglichen mit den Dimensionen unseres Planeten — in ganz dünnen Wasserschichten abspielen und die vertikalen Komponenten weit hinter den horizontalen zurücktreten.

An der Oberfläche erkennen wir in perspektivischer Verkürzung das bekannte System der vorwiegend zonalen Meeresströmungen, unter denen sich die Äquatorialströmungen, der Golfstrom und die südliche Westwindtrift durch besonders hohe Geschwindigkeiten auszeichnen. In den Tiefen beobachten wir im Vordergrund, d. h. auf der Westseite des Ozeans, einen mehrfachen Wechsel salzärmerer und salzreicherer Schichten und weitreichende, vorwiegend meridionale

Ausbreitungs- und Vermischungsvorgänge, die quer über den Äquator von Hemisphäre zu Hemisphäre in entgegengesetzten Richtungen verlaufen²⁾).

Fassen wir zunächst noch einmal die bereits erwähnten Wassermassen südlich Grönlands ins Auge, so erkennen wir aus dem Blockdiagramm, daß diese in der Tat im Herbst und Winter infolge Ausstrahlung von der Oberfläche bis zu Tiefen von mehr als 2000 m absinken und sich nach S ausbreiten. In ca. 30° N vermischen sie sich zwischen 1000 und 2000 m Tiefe mit dem aus der Straße von Gibraltar eindringenden Mittelmeerwasser und machen sich durch höheren Salzgehalt als nordatlantischer Tiefenstrom noch auf der Südhemisphäre, vornehmlich auf der Westseite des Ozeans, bis 50° S bemerkbar. Im antarktischen Wasserring steigen diese Wassermassen nordatlantischer Herkunft in Ausläufern und unter Vermischung mit salzärmerem Wasser der Antarktis in höhere Schichten empor und werden von der großen zirkumpolaren nach E setzenden Strömung erfaßt und in Beimischungen dem Indischen und dem Pazifischen Ozean zugeführt. In der Antarktis werden zwei salzärmere Wassermassen gebildet, einmal aus den Schmelzwässern das salzärmste Wasser, das an der Polarfront in ca. 45° S zur Tiefe sinkt und sich als subantarktischer Zwischenstrom in 800 m Tiefe auf der Westseite nordwärts bis 20° N ausbreitet, zum andern der eiskalte antarktische Bodenstrom, der in der atlantischen Westmulde in Anpassung an das Relief der Tiefsee sogar bis 40° N — der Breite von New York — zu verfolgen ist. Klar treten aus unserem Schema und aus Abb. 6 die riesige Reichweite dieses Bodenstroms und die Bedeutung der zwei Durchbrechungen des atlantischen Zentralrückens am Äquator und in 8° N entgegen, durch welche Ausläufer des westatlantischen antarktischen Bodenstroms in die sonst abgeriegelte ostatlantische Tiefseemulde gelangen und hier, nach S und N ausstrahlend, noch gewisse antarktische Beeinflussungen bis ca. 36° N und 30° S ausüben.

Unser schematisches Blockdiagramm, das hauptsächlich auf den Ergebnissen der „Meteor“-Expedition beruht, vermittelt eine räumliche und in sich geschlossene Vorstellung von den Kreisläufen der atlantischen Wassermassen, in denen alle Übergänge von der unmeßbar langsamen konvektionsartigen Ausbreitung bis zu den stärksten Meeresströmungen existieren. In den Strompfeilen und in der Verteilung des Salzgehalts kommt die zum Äquator ganz asymmetrische Anordnung von Schichtung und Zirkulation deutlich zum Ausdruck. Es handelt sich im wesentlichen um einen Austausch von antarktischen und nordatlantischen Wassermassen, der sich in verschiedenen Stockwerken quer über den Äquator von Hemisphäre zu Hemisphäre und ganz überwiegend auf der Westseite vollzieht. Infolge der orographischen und morphologischen Gegebenheiten des Ozeans spielen hier arktische Komponenten eine ganz untergeordnete Rolle. Denn diese Komponenten aus den an und für sich kleinen arktischen Einzugsgebieten werden durch hochaufragende Schwellen in

²⁾ Dieses Blockdiagramm ist nur ein halbräumliches Blockbild, da es nur die Verhältnisse von zwei Seiten des Blocks, nämlich von der Oberfläche und von der Vorderfront, der Westseite, zur Darstellung bringt. Es fehlt der Einblick in das Innere des Wasserblocks, wodurch erst eine volle räumliche Vorstellung von den West-Ost-Unterschieden der Salzgehaltsverteilung und der sie aufrecht erhaltenden Tiefwasserbewegungen, d. h. von der wahren Bewegung im Raume vermittelt werden kann. Aus diesem Grunde haben wir 1950 in einer in den „Kieler Meeresforschungen“ erschienenen Arbeit (WUST 1950 b) den Atlantischen Ozean blockartig in 4 Stockwerke von 0—800 m, 800—2000 m, 2000—4000 m und 4000—6000 m Tiefe aufgeschnitten, wodurch in schematischer Weise die Schichtungs- und Zirkulationsverhältnisse der Deckschicht, der Zwischenschicht, der Tiefenschicht und der Bodenschicht räumlich erfaßt werden können. Auf das darin enthaltene vollräumliche Blockbild wird als Ergänzung besonders verwiesen.

ca. 65° N vom offenen Atlantischen Ozean weitgehend abgeriegelt. Für die Entstehung des salzreichen nordatlantischen Tiefenwassers ist die Existenz des salzreichen Mittelmeeres bedeutungsvoll. Durch den auf der Westseite weit nach S setzenden Tiefenstrom erfolgt die Kompensation für den ständigen Übertritt südhemisphärischer Wassermassen über den Äquator nach N, der an der Oberfläche, im subantarktischen Zwischenstrom und im antarktischen Bodenstrom ebenfalls bevorzugt in der Westhälfte erfolgt. Jedoch ist zu beachten, daß bereits im Südatlantischen Ozean ein beträchtlicher Teil der beiden antarktischen Wassermassen sich mit dem entgegengesetzt vordringenden nordatlantischen Tiefenwasser vermischt und mit diesem zur Antarktis zurückkehrt, was wir in unserem Schema durch rückkehrende Pfeile angedeutet haben. Durch die Zirkumpolarströmung werden im antarktischen Wasserring Ausläufer des nordatlantischen Tiefenwassers der indopazifischen Kaltwassersphäre zugeführt. Auch die Temperaturverhältnisse am Tiefseeboden der beiden Nachbarozeane weisen auf eine starke atlantische Beeinflussung hin. Aus der flächentreuen Karte des Weltmeeres, in welcher nach einem von A. F. SPILHAUS in Hammer'scher Projektion ausgeführten Entwurf das Südpolargebiet in den Mittelpunkt gestellt ist, müssen wir die auf den ersten Blick befremdende Folgerung ziehen, daß sich von begrenzten Arealen im atlantischen (vielleicht auch im indischen) Südpolarmeer die antarktischen Einflüsse herleiten, die wir am Tiefseeboden aller 3 Ozeane in einer gewaltigen flächenhaften Ausdehnung bis zu ihren nördlichen Umrandungen, d. h. über mehr als 10 000 km meridionaler Erstreckung in der Verteilung der potentiellen Bodentemperaturen erkennen. (Abb. 6)

Es handelt sich also um ozeanische Kreisläufe wahrhaft planetarischen Ausmaßes, bei denen sich Ausbreitung und Vermischung, Absinken und Aufsteigen genau die Waage halten müssen. Die treibenden Kräfte für die Inganghaltung dieser großen Kreisläufe liegen erstens in den Winden, die ihre Energien an die Wassermassen und, wie wir gesehen haben, in den höheren Breiten bis zu erheblichen Tiefen abgeben, zweitens in den unterschiedlichen Einwirkungen der polaren und subpolaren Klimate in N- und S-Hemisphäre auf den thermohalinen Aufbau, drittens in den Unterschieden von Verdunstung und Niederschlag und schließlich in den Einstömungen aus salzreichen Nebenmeeren, und hierbei rangiert das Mittelländische Meer an erster Stelle.

Zum Schluß wollen wir uns im Anschluß an ähnliche Betrachtungen von W. MEINARDUS (1928) den beiden Fragenkomplexen zuwenden, wie lange ein Wasserteilchen wohl im Durchschnitt in den verschiedenen Stadien des Kreislaufs im Meer, in der Atmosphäre und in der festen Erdkruste verweilt und bis in welche Höhen und Tiefen es dabei gelangen kann. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein bestimmtes Wasserteilchen in einem Jahr von der Meeresoberfläche wieder zur Verdunstung kommt, ergibt sich aus dem Verhältnis der jährlichen Verdunstungsmengen zur gesamten Wassermasse des Weltmeeres, d. h. von 334 000 km³ zu 1 370 000 000 km³. Diese beiden Quanten verhalten sich wie 1:4100. Es werden also im Durchschnitt 4100 Jahre verfließen, ehe ein beliebiges im Weltmeer befindliches Wasserteilchen verdampft und den Kreislauf durch die Atmosphäre antritt. Dabei setzen wir voraus, daß sich jedem Wasserteilchen, wo immer es sich im Weltmeer befindet, die Möglichkeit eröffnet, irgendwann an die Meeresoberfläche zu gelangen und dort zu verdunsten. Aus den soeben dargelegten neuen Vorstellungen über die räumliche Tiefenzirkulation mit ihren weitreichenden Aus-

breitungs- und Vermischungsvorgängen geht einwandfrei hervor, daß diese Voraussetzung im Weltmeer vollkommen erfüllt ist. Die Verteilung des Salzgehalts und des Sauerstoffgehalts in den Tiefen des Weltmeeres und die antarktischen Temperaturen am Tiefseeboden sind ein bündiger Beweis dafür, daß die Wassermassen sich überall in Bewegung befinden. Ja selbst in den stark abgeschlossenen Tiefen, beispielsweise des Schwarzen Meeres, wo der Sauerstoff ab 150 m verschwindet und das tierische Leben zum Erliegen kommt, findet eine zwar äußerst langsame Vertikalzirkulation und Erneuerung der Wasserteilchen statt. Es gibt nirgends im Weltmeer, auch nicht in seinen größten Tiefen, eine völlige Stagnation der Wassermassen, wie man es vielfach vermutet hatte. Der große deutsche Geograph Bernhard VARENIUS hatte in richtiger Vorausahnung dieser neuen Auffassungen bereits im 17. Jahrhundert den Satz geprägt: *Si pars oceani movetur, totus oceanus movetur*. Natürlich ist die Zahl von 4100 Jahren nur ein Durchschnittswert. Die Wasserteilchen an der Meeresoberfläche gelangen sehr viel rascher zur Verdunstung. Bei den Wasserteilchen der Tiefsee müssen hingegen Zehntausende von Jahren vergehen, ehe sie wieder in den atmosphärischen Kreislauf eintreten.

Eine ähnliche Berechnung für die Atmosphäre ergibt, daß durchschnittlich im Laufe eines Jahres sich die Atmosphäre rund 40mal ihres ganzen Wasserdampfgehalts entledigen müßte, um die gesamte Jahresmenge des Niederschlags von 396 000 km³ zu ermöglichen. Anders ausgedrückt: Der von der Atmosphäre aufgenommene, von Meeres- und Landverdunstung herrührende Wasserdampf benötigt durchschnittlich nur 9 Tage bis zu seiner Rückkehr zur Erdoberfläche. Verglichen mit dem nach Jahrtausenden bemessenen Aufenthalt im Welt-ozean ist der mittlere Aufenthalt des Wassers im Luftmeer erstaunlich kurz. Natürlich gibt es auch hier starke Abweichungen vom Mittelwert. Bei den täglichen lokalen Wärmegewittern, wie sie im Sommer auch in Schleswig-Holstein auftreten, ist ein kleiner Kreislauf des Wassers schon innerhalb weniger Stunden geschlossen. Mit der starken sommerlichen Überhitzung der bodennahen Luftschichten setzt bei Windstille schon in den Vormittagsstunden ein Aufsteigen der hocharwärmten mit Feuchtigkeit gesättigten Luft in Quellwolkentürmen ein. Nach Überschreiten einer gewissen Höhe, der Kondensationsgrenze, fällt aus den Wolkentürmen die Feuchtigkeit als Regen wieder aus, häufig unter Begleitung von Wärmegewittern, und am nächsten Tage wiederholt sich dieser Kreislauf, der, wie gesagt, nur wenige Stunden währt. Andererseits wird der Wasserdampf in den höheren Atmosphärenschichten bei starker Luftbewegung ohne vertikale Komponenten oft viele Wochen warten müssen, bis er zum Niederschlag kommt.

Am schwierigsten ist die Frage zu beantworten: Wie lange braucht das Wasser für den festländischen Teil des Kreislaufes? Denn das Festland gibt an seine Partner (Atmosphäre und Ozean) Wasser in verschiedenster Form ab: an die Luftfülle als Wasserdampf, an das Meer in flüssiger und fester Form durch Vermittlung von Bächen, Flüssen und Strömen, von Grundwasser und von Gletschern. Die Schätzung der einzelnen Posten ist noch ziemlich unsicher. Man hat den Inhalt der Flüsse und Seen auf 250 000 km³ geschätzt, und der gleiche Wert wird als Maximalwert für die Grundwassermengen angegeben. Die Eisansammlungen um die Pole — besonders in der Antarktis und in Grönland — besitzen mit 23 Millionen km³ fast die hundertfache Größenordnung. Sie bilden in Wahrheit einen eisernen Bestand an irdischen Wasserreserven, der für den Jahreskreislauf des Wassers nur in sehr geringem Ausmaße in Anspruch ge-

nommen wird. Man gelangt also, je nachdem wie man die einzelnen Posten zusammenfügt, zu ganz verschiedenen Ergebnissen für die Aufenthaltsdauer eines Wasserteilchens auf dem Lande.

Bezüglich des maximalen vertikalen Ausmaßes der Bewegungen im Wasserhaushalt der Erde ist es nach den bisherigen Darlegungen klar, daß die ozeanischen Kreisläufe bis zu den größten Meerestiefen hinabreichen. Wie ich an anderer Stelle (WUST 1951 b) zeigen werde, müssen wir beim heutigen Stande der Forschung annehmen, daß die abgerundete Tiefenzahl 10 500 m die Grenze der größten Depressionen des Weltmeeres bezeichnet, ein Wert, der innerhalb der Fehlergrenzen der beiden im Philippinen-Graben geloteten Rekordtiefen von „Cape Johnson“ (USA) und „Emden“ (Deutschland) gelegen ist. Bis zu dieser enormen Tiefe reicht also der Austausch der Wasserteilchen in der ozeanischen Sphäre. Nach den neuesten Ergebnissen der schwedischen „Albatros“-Expedition müssen wir mit Sedimentdecken aus plastischem Schlamm bis zu 2500 m Mächtigkeit unter dem Meeresboden rechnen, in welche möglicherweise das Wasser abzusinken vermag. Aber auch in die festen Gesteine vermag das Wasser je nach dem Grade ihrer Zerklüftung und Durchlässigkeit einzudringen, bis zu welchen maximalen Beträgen, das ist noch völlig unsicher. MEINARDUS (1928) nimmt an, „daß unter dem Festland Wasser in flüssigem Zustand bis 5 km Tiefe eindringen kann“ und fährt fort: „In größerer Tiefe mag es auch noch in flüssigem oder gasförmigem Zustande das Gestein durchsetzen, ohne daß es in den regelmäßigen Kreislauf einbezogen wird“. Das auf diese Weise dem Wasserkreislauf verlorengehende Tiefenwasser wird wahrscheinlich im wesentlichen ersetzt durch die ansehnlichen Mengen von Wasser bzw. Wasserdampf, welche die Vulkane aus größeren Tiefen bei ihren Eruptionen als neues juveniles Wasser zur Erdoberfläche befördern. Am Tiefseeboden besitzt die feste Erdkruste gleichsam einen eiskalten Umschlag, dessen Temperatur, wie Abb. 6 lehrt, sich nur wenig über dem Nullpunkt befindet. Wir müssen daher damit rechnen, daß unter dem Weltmeere Wasser ähnlich tief eindringen kann. Die maximale vertikale Reichweite des Wasseraustausches im Ozean und im ozeanischen Boden zusammengenommen ist also auf den zwar noch durch keine „Messungen“ erhärteten Wert von rund 13 km schätzen. In der Atmosphäre beschränkt sich der Kreislauf des Wasserdampfes auf die Troposphäre, d.h. auf die untersten Atmosphärenschichten bis maximal 17 km Höhe. In allen höheren Schichten oberhalb der Tropopause, der Grenzfläche zwischen Tropo- und Stratosphäre, fehlt ein solcher Kreislauf (RAETHJEN 1950). In summa ergibt sich also, daß der Kreislauf des Wassers in den 3 Sphären (Lithosphäre, Ozean und atmosphärische Troposphäre) sich in einer konzentrischen Schicht unseres Planeten abspielt, deren vertikales Ausmaß wahrscheinlich 30 km nicht überschreiten dürfte. Gemessen an menschlichen Dimensionen ist dieser vertikale Spielraum gewaltig, gemessen an den Dimensionen der Erde stellt er nur eine dünne Schale dar, die sich um sie herumlegt. Die horizontalen Bewegungen im Kreislauf des Wassers erstrecken sich über den ganzen Erdumfang von 40 000 km, demgegenüber treten die vertikalen von maximal 30 km ganz zurück.

Wir haben bisher angenommen, daß das Klima der Erde konstant und die Lage des Meeresspiegels unverändert ist, mit anderen Worten, daß die Wassermenge im Weltmeer und auf dem Lande, sowie die Wasserdampfmenge in der Atmosphäre jede für sich konstant ist. Das trifft aber nur in erster An-

näherung zu. Mit der Veränderung der Klimate verschieben sich die Anteile des Wassers auf der Erde innerhalb der 3 Phasen (flüssig, fest, Dampfform); nur die Gesamtsumme bleibt konstant, da aus dem wasserdampfleeren Weltenraum praktisch kein Wasser hinzukommt bzw. in ihm verloren geht. Noch vor ca. 70 000 Jahren in dem letzten Stadium der Eiszeit waren größere Mengen Wasser in den gewaltigen Eiskalotten der höheren Breiten in fester Form gebunden und dem Ozean ständig entzogen, so daß der Meeresspiegel des Weltmeeres um wenigstens 80 m tiefer stand als heute. Aber es gibt auch kürzere Klimaschwankungen, die mit Schwankungen der Sonnenstrahlung, wie sie uns beispielsweise durch die Zahl der Sonnenflecken augenfällig werden, zusammenhängen. Wir selbst sind Zeugen einer solchen Klimaverwerfung, die letzten Endes auf Veränderungen auf unserem Zentralgestirn, der Sonne, zurückgeführt werden muß. Etwa seit der Jahrhundertwende erleben wir einen starken Rückgang der Vereisung in den Polarkalotten und Gletschern, die im Nordpolargebiet ihren Höhepunkt in den 30er Jahren erreichte. Damit ist verknüpft eine Belebung der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation und ein Anstieg der Wasserstände an den Küsten des Atlantischen Ozeans in der Größenordnung von etwa 1—6 mm im Jahr, was 10—60 cm in 100 Jahren entsprechen würde, wenn es anhielte. Wir haben es also selbst in der Gegenwart mit merklichen Verschiebungen in den Anteilen der festen, flüssigen und dampfförmigen Bestandteile innerhalb der konstanten Gesamtmenge des Wasserkreislaufes zu tun! 1880—1930 war, wie eine kürzlich von SCHERHAG (1948) vorgenommene Bearbeitung der langperiodischen Schwingungen der Sonnentätigkeit lehrt, der längste Zeitraum mit unternormaler Sonnentätigkeit innerhalb der letzten 200 Jahre. Dementsprechend erreichte, wie aus den Anomalien der Winterkurve für einige europäische Stationen klar hervorgeht, zu Ende dieser Epoche auch die Milderung der europäischen Winter ihren Höhepunkt. Die neue Belebung auf der Sonne seit 1930, die sich in der Sonnenfleckenkurve anzeigt, läßt mit einer gewissen Phasenverschiebung (von ca. 10 Jahren) wieder einen erheblichen Anstieg in der Häufigkeit merklich zu kalter Wintermonate und in Verbindung damit ein erneutes Anwachsen der polaren Vereisung und wieder ein allmähliches Absinken der Wasserstände erwarten.

Auf die Möglichkeiten künstlicher Beeinflussung des Wasserkreislaufs möchte ich nicht näher eingehen, um nicht die Grundlagen gesicherter naturwissenschaftlicher Forschung zu verlassen. Nur einige Worte seien noch dem größten und zugleich phantastischsten Projekt dieser Art — dem „Atlantropa-Projekt“ Hermann SÖRGE's — gewidmet, weil es sich mit viel Propaganda an die Weltöffentlichkeit gewandt hat. Der Kern dieses Planes sieht zwei gewaltige Eingriffe in den Wasserhaushalt des Mittelmeeres und Nordafrikas vor: 1) die Absperrung des Mittelmeeres und die Schrumpfung seines Volumens infolge des beträchtlichen Überschusses der Verdunstung über den Niederschlag und die Süßwasserzufuhr vom Lande und 2) die Ausbreitung des Wasserüberschusses des Kongo-Regenwaldgebietes über große Teile Nordafrikas. Die naturwissenschaftlichen Grundlagen dieses Planes hat kürzlich C. TROLL (1950) mit seinen Mitarbeitern van EINERM und DAUME sorgfältig geprüft und gezeigt, daß „die allereinfachsten geographischen Grundvoraussetzungen des Atlantropaplanes von seinem Schöpfer und dessen Mitarbeitern“ nicht ausreichend geprüft und beachtet worden sind und daß dem Plane in Wahrheit ungeheure (aus dem Wasserkreislauf folgende) Schwierigkeiten entgegenstehen, die „ihn in großen Teilen unmöglich machen“ — von den technischen, wirtschaftlichen und politischen ganz zu schweigen.

Ich habe versucht, aufzuzeigen, welche weltweiten Probleme und welche großen Aufgaben sich an die Erforschung des Wasserkreislaufs auf unserer Erde knüpfen. Bisher sind wir nur in der Lage, die Prozesse im großen und im wesentlichen im Jahresdurchschnitt zu verfolgen. Das nächste Ziel der Forschung wird sein, die jahreszeitlichen und die längeren periodischen und unperiodischen Veränderungen dieser Kreisläufe von Jahr zu Jahr zu ermitteln, was umfangreiche und systematische ozeanographische, meteorologische und hydrologische Expeditionen und Aufnahmen voraussetzt. Die Kreisläufe des Wassers im Ozean, in der Atmosphäre und in der festen Erdkruste beeinflussen sich gegenseitig und bilden zusammengekommen eine gewaltige erdumfassende Wärmekraftmaschine.³⁾

Schriften

- ALBRECHT, F.: Die Aktionsgebiete des Wärme- und Wasserhaushalts der Erdoberfläche. Z. Meteorol. 1947.
- ALBRECHT, F.: Über die Wärme- und Wasserbilanz der Erde. Ann. Meteorol., 2. Jahrg. 1949.
- ALBRECHT, F.: Die Methoden zur Bestimmung der Verdunstung der natürlichen Erdoberfläche. Arch. f. Meteor. 1950.
- BRUCKNER, E.: Die Bilanz des Kreislaufs des Wassers auf der Erde. Geogr. Zeitschr. 1905.
- DIETRICH, G.: Kontinentale Einflüsse auf Temperatur und Salzgehalt des Ozeanwassers. Deutsch. Hydr. Ztschr. 1950.
- FRIEDRICH, W.: Über die Verdunstung vom Erdboden. Ztschr. „Das Gas- und Wasserfach“, 1950, Heft 24.
- KALLE, W.: Der Stoffhaushalt des Meeres. Leipzig 1943.
- MEINARDUS, W.: Über den Kreislauf des Wassers. Sitz. Ber. Med. nat. Ges. Münster, 1900.
- MEINARDUS, W.: Der Kreislauf des Wassers. Rektoratsrede Universität Göttingen, 1928.
- MEINARDUS, W.: Eine Niederschlagskarte der Erde. Petermanns Geogr. Mitt. 1934.
- RAETHJEN, P.: Wärmehaushalt der Atmosphäre. Geophysik. Einzelschr. Hamburg 1950.
- SCHERHAG, R.: Neue Methoden der Wetteranalyse und Wetterprognose, Berlin 1948.
- SCHMIDT, W.: Strahlung und Verdunstung an freien Wasserflächen; ein Beitrag zum Wärmehaushalt des Weltmeeres und zum Wasserhaushalt der Erde. Ann. d. Hydrogr. 1915.
- SCHOTT, G.: Die jährlichen Niederschlagsmengen auf dem Indischen und Stillen Ozean. Ann. d. Hydrogr. 1933.
- SCHOTT, G.: Geographie des Atlantischen Ozeans. 3. Aufl. Hamburg 1942 (1944).
- SVERDRUP, H. U.: Oceanography for meteorologists. London 1945.
- TROLL, C., VAN EINERM, J., DAUME, W.: Hermann Sörgels „Atlantropa“ in geographischer Sicht. Erdkunde, Bd. IV, Bonn 1950.
- WUST, G.: Die Verdunstung auf dem Meere. Veröff. Inst. f. Meereskunde Berlin, 1920.
- WUST, G.: Verdunstung und Niederschlag auf der Erde. Ztschr. Ges. f. Erdkunde Berlin 1922.
- WUST, G.: Oberflächensalzgehalt, Verdunstung und Niederschlag auf dem Weltmeere nebst Bemerkungen zum Wasserhaushalt der Erde. Festschr. N. Krebs, Stuttgart 1936.
- WUST, G.: Die Kreisläufe der atlantischen Wassermassen — ein neuer Versuch räumlicher Darstellung. Forsch. und Fortschritte 1949.
- WUST, G.: Wasserdampf und Niederschlag auf dem Meere als Glieder des Wasserkreislaufs. Deutsch. Hydr. Ztschr. 1950 (a).
- WUST, G.: Blockdiagramme der atlantischen Zirkulation auf Grund der „Meteor“-Ergebnisse. Kieler Meeresforsch. Bd. VII, Heft 1, Kiel 1950 (b).
- WUST, G.: Über die Fernwirkungen antarktischer und nordatlantischer Wassermassen in den Tiefen des Weltmeeres. Naturwissensch. Rundschau, Stuttgart 1951, Heft 3 (a).
- WUST, G.: Die größten Tiefen des Weltmeeres in kritischer Betrachtung. Zeitschr. „Die Erde“ 1951 Berlin (b). (Erscheint demnächst.)
- WUNDT, W.: Das Bild des Wasserkreislaufs auf Grund früherer und neuerer Forschungen. Mitt. Reichsverb. Dtsch. Wasserwirtschaft, Berlin 1938.
- Nach Drucklegung des Vortrags sind noch folgende zwei wichtigen Beiträge zu unserem Thema erschienen:
- MOLLER, F.: Vierteljahrs-Karten des Niederschlags auf der ganzen Erde. Peterm. Mitt. 1951.
- MOLLER, F.: Die Verdunstung als geophysikalisches Problem. Naturwissensch. Rundschau 1951.

³⁾ Die Vorlagen zu den Abbildungen sind folgenden Quellen entnommen: Abb. 1 aus R. BRINKMANN, Abriß der Geologie, Bd. 1, 1940, S. 8; Abb. 2 aus RAETHJEN 1950 Abb. 43; Abb. 3 aus SVERDRUP 1945 und Abb. 4 aus KALLE 1943.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Schriften des Naturwissenschaftlichen Vereins für Schleswig-Holstein](#)

Jahr/Year: 1951

Band/Volume: [25](#)

Autor(en)/Author(s): Wüst Georg

Artikel/Article: [Die Kreisläufe des Wassers auf der Erde 185-195](#)