

Copyright ©

Es gilt deutsches Urheberrecht.

Die Schrift darf zum eigenen Gebrauch kostenfrei heruntergeladen, konsumiert, gespeichert oder ausgedruckt, aber nicht im Internet bereitgestellt oder an Außenstehende weitergegeben werden ohne die schriftliche Einwilligung des Urheberrechtinhabers. Es ist nicht gestattet, Kopien oder gedruckte Fassungen der freien Onlineversion zu veräußern.

German copyright law applies.

The work or content may be downloaded, consumed, stored or printed for your own use but it may not be distributed via the internet or passed on to external parties without the formal permission of the copyright holders. It is prohibited to take money for copies or printed versions of the free online version.

Aus dem Institut für Meereskunde der Universität Kiel

Wasser- und Wärmehaushalt und Zirkulation in der Warmwassersphäre des Karibischen Meeres^{1) 2)}

Von GEORG WÜST

Die folgenden Ausführungen beruhen auf Ergebnissen von Studien, die der Verfasser 1960—1964 als Gastprofessor im Lamont Geological Observatory der Columbia-Universität (New York) über die Ausbreitung und Vermischung der Wassermassen sowie über ihre gesetzmäßigen Beziehungen zum Wasser- und Wärmehaushalt des Karibischen Meeres und des vorgelagerten Teils des Nordamerikanischen Beckens durchgeführt hat. Sie sind in extenso und von einem Atlas von 51 Tafeln begleitet als No. 2 der „Vema Research Series“ 1964 von der Columbia University Press veröffentlicht (26). Auf Grund der seit 1931 besonders durch Woods Hole Forschungsschiffe stark angewachsenen Beobachtungsmaterialien setzt unsere Arbeit den Beitrag, welchen G. DIETRICH zur Ozeanographie des Amerikanischen Mittelmeeres (1939) in einem Überblick (9) geliefert hat, fort. Sie stützt sich auf alle verfügbaren Daten über die Verhältnisse an der Oberfläche sowie auf 1725 ozeanographische Stationen (mit Reihenmessungen) der Periode 1873—1961. Die jahreszeitliche Verteilung der Beobachtungen zeigt leider eine beträchtliche Bevorzugung des sonnigen Winter-Frühjahr-Halbjahres. Im folgenden behandeln wir in einem zusammenfassenden Überblick die Beziehungen zwischen Wasser- und Wärmehaushalt, Salzgehalt, Temperatur und Strömungen in der Warmwassersphäre des Karibischen Meeres, der einen Beitrag von BLUME (2) zur Klimatologie Westindiens (d. h. der Großen und Kleinen Antillen) und die Studien von J. MALKUS (13) und COLÓN (6) über das „Joint air sea budget of the Caribbean region“ nach der ozeanographischen Seite ergänzt.

Wir wenden uns zunächst dem Oberflächensalzgehalt und seinen Beziehungen zum Wasserhaushalt zu. Durch die systematischen Profile der modernen Expeditionen 1931—1961 hat sich in unserer Region die Zahl exakter Salzgehaltsbestimmungen erheblich vermehrt gegenüber der Periode 1902—1931, auf welche sich die im „Meteor“-Atlas erschienenen, für das Karibische Meer noch hypothetischen Monats- und Vierteljahrskarten BÖHNECKES (3) beziehen. Unsere neuen Halbjahrskarten (Monats- oder Vierteljahrskarten sind hier auch heute noch verfrüht) liegen für die Periode 1931—1961 über 2000 gute Beobachtungen in besserer räumlicher Verteilung — davon 70% für das Winterhalbjahr, 30% für das Sommerhalbjahr — zu Grunde, die wir zu 1°-Feld-Mittelwerten zusammengefaßt haben.

In der Winter-Frühlingskarte sind die Salzgehalte des Karibischen Meeres mit 35,75 bis 36,75 ‰ relativ hoch (Taf. 1). Nur südlich Hispaniola und Jamaica, im Honduras- und Moskito-Golf sowie vor den Kl. Antillen sind die Salzgehalte kleiner als 35,5 ‰. Ganz im SE außerhalb des Antillenbogens sinken sie auf 30—34,5 ‰. Die letztgenannten Minimalwerte werden durch den Guiana-Strom verursacht, der aus der äquatorialen Zone, hauptsächlich von der Mündung des Amazonas, starke Süßwasser-

¹⁾ Nach einem Vortrag vom 29. Mai 1964 im Meereskundlichen Kolloquium der Universität Kiel. Ein entsprechender Vortrag über die Zirkulation der Kaltwassersphäre des Karibischen Meeres ist vom Verfasser 1963 in „Deep-Sea-Research“ (25) veröffentlicht.

²⁾ Zusammenfassung und engl. Summary am Schluß des Aufsatzes.

beimischungen in überraschenden Fernwirkungen bis 10°—15° N. transportiert. Die 2 Salzgehaltsmaxima ($> 36,75\text{‰}$) vor der Nordküste von Venezuela und Kolumbien deuten auf vertikale Auftriebseffekte¹⁾.

Wesentlich veränderte Verhältnisse, d. h. bemerkenswert niedrigere Werte des Oberflächensalzgehalts (kleiner als 35‰) zeigt die Sommer-Herbst-Karte (Juni-November) im Karibischen Meer (Taf. 2). Statt einer küstennahen Zelle geringen Salzgehalts (kleiner als $34,5\text{‰}$) treten nun vier auf, von denen drei durch die Süßwasserzufuhr von Flüssen erzeugt sind. Die verfügbaren spärlichen Angaben über den Abfluß der 3 südamerikanischen Ströme, Amazonas, Orinoco und Magdalena, sind in Tab. 1 zusammengefaßt.

Tabelle 1
Abflußmengen der Ströme

Strom	m ³ /sec	Maximum	Quellen
Amazonas	85 000—146 000	Januar—Februar	a, b, c
Orinoco	14 000— 85 000	August	a, b, d
Magdalena	2 400— 11 500	August—Dezember	a, b, e

Quellen: a) I. V. SAMOJLOV: Die Flußmündungen, Gotha 1956. b) L. B. LEOPOLD: Rivers. American Scientist, L, 1962, S. 514—515. c) R. KELLER: Gewässer und Wasserhaushalt des Festlandes, Berlin 1961, Tab. 12; d) und e) persönliche Mitteilungen von CH. B. HITCHCOCK (New York) und BR. HEEZEN (Palisades, N. Y.)

Diesen Süßwasserzufuhren entsprechen folgende 3 küstennahen Zellen niedrigen Salzgehalts:

1. Im SE außerhalb des Antillenbogens die Zelle kleiner als $33,5\text{‰}$ infolge der Amazonasbeimischungen im Guianastrom, der im Sommer ein Minimum an Stromstärke aufweist,
2. vor der Mündung des Orinoco (beiderseits Trinidad) eine Zelle von weniger als $33,5\text{‰}$.
3. vor der Mündung des Magdalena, als dem Strom mit relativ geringen Abflußmengen, eine kleine Zelle von weniger als $34,5\text{‰}$.

Fernwirkungen der niederschlagreichen Kalmenzone machen sich in 16°—19°N und 55°—57°W mit Salzgehalten kleiner als $34,5\text{‰}$ bemerkbar. Ähnliche niedrige Beträge

¹⁾ Diese Auftriebseffekte knüpfen sich an Querkirkulationen innerhalb der seichten Deckschicht, die von der salzreichen Zwischenschicht in (in 50—200 m Tiefe) unterlagert wird (siehe Abb. 12).

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 1)

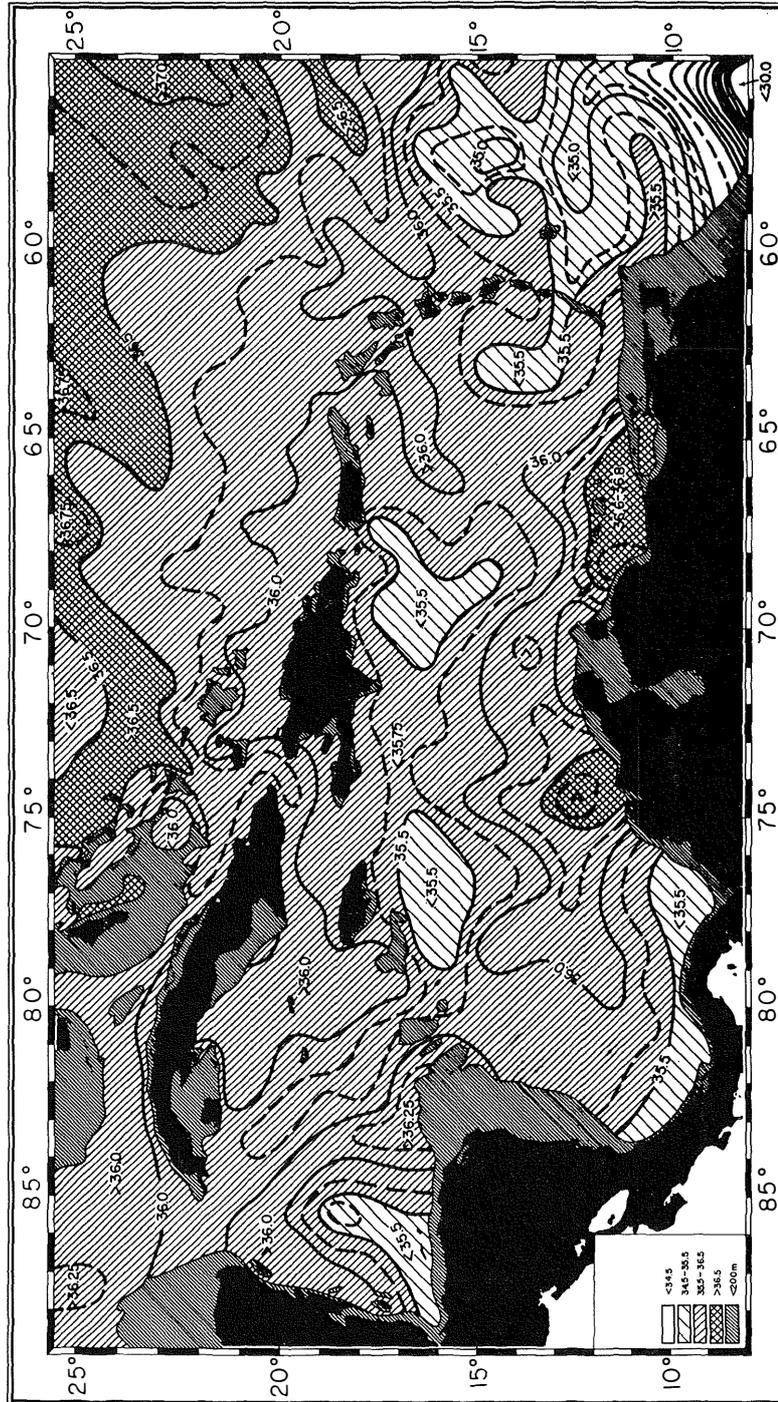
Abb. 1: Mittlere Verteilung des Oberflächen-Salzgehaltes im Winter/Frühlings-Halbjahr im Karibischen Meer (Dezember—Mai 1931—1961).

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 2)

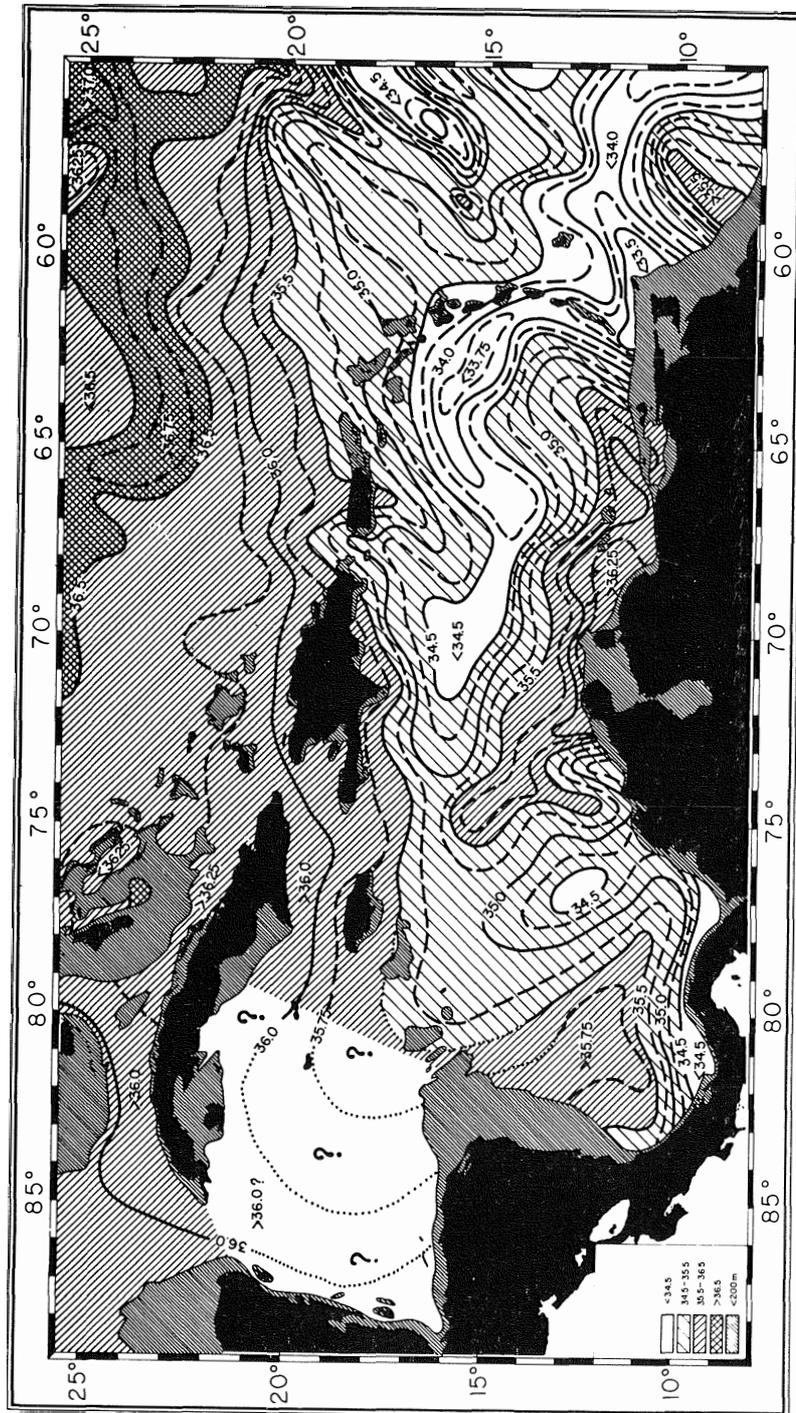
Abb. 2: Mittlere Verteilung des Oberflächen-Salzgehaltes im Sommer/Herbst-Halbjahr im Karibischen Meer (Juni—November 1931—1961).

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 3)

Abb. 3: Rahmen der Karibischen Wasser- und Wärme-Haushalts-Studie (nach COLÓN 1963).

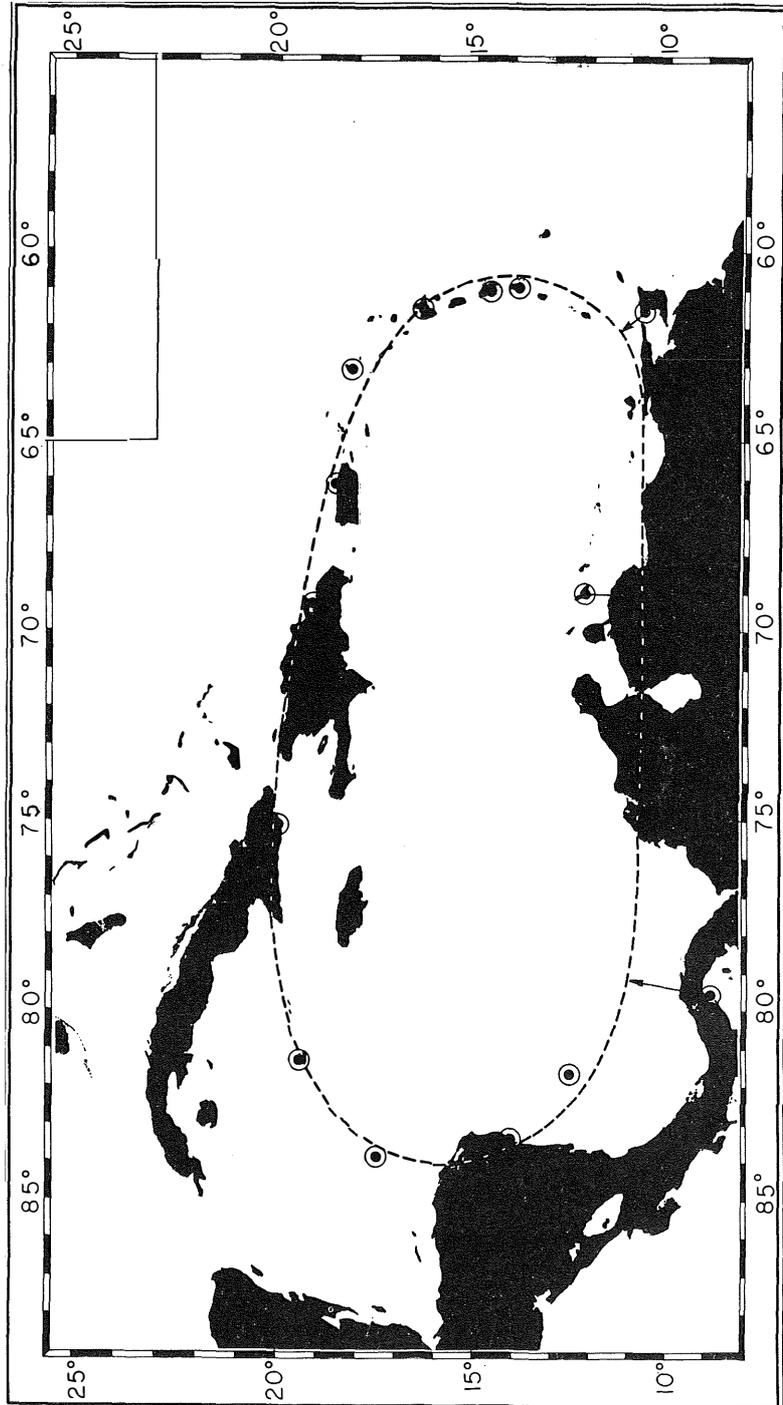


Tafel 1 (zu G. Wüst)

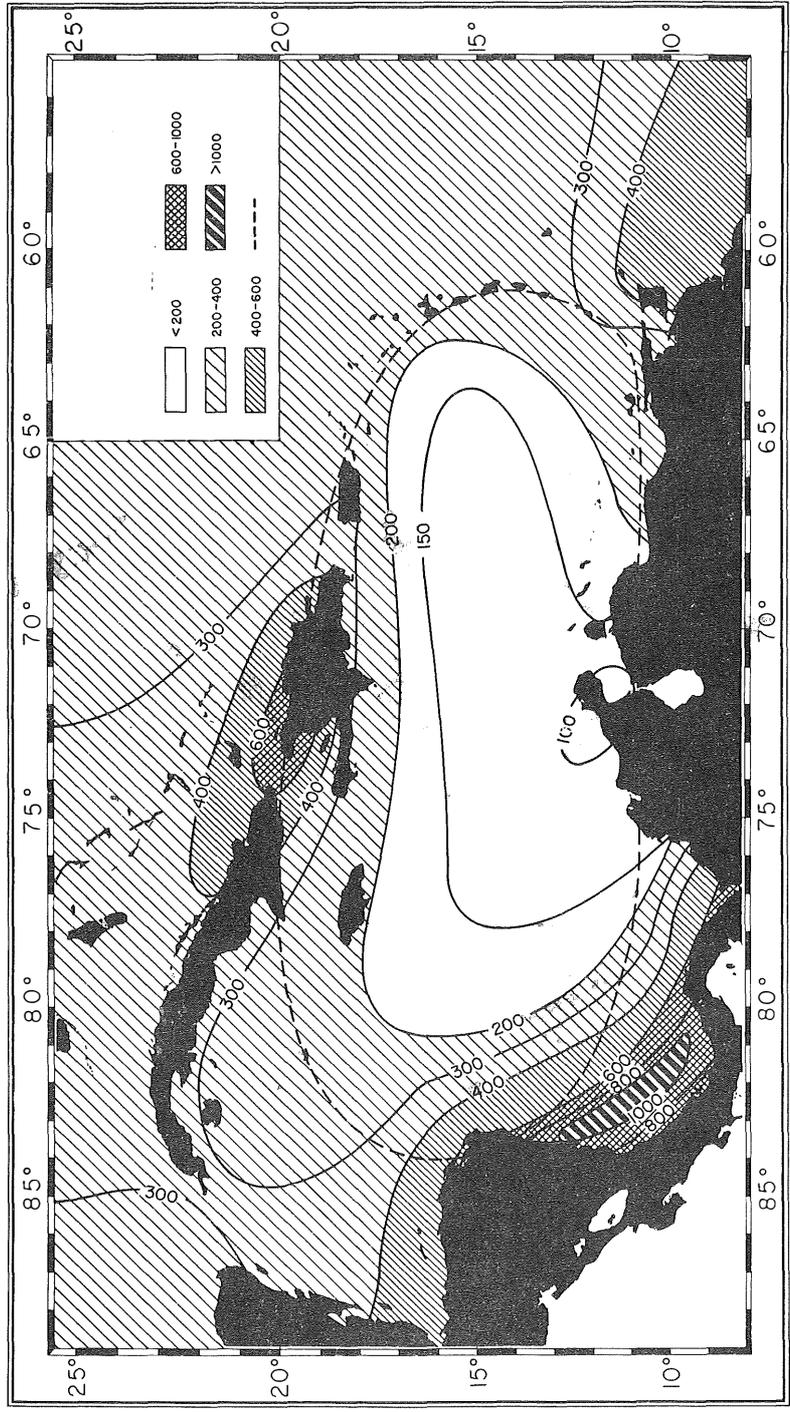


Tafel 2 (zu G. Wüst)

he randerken (



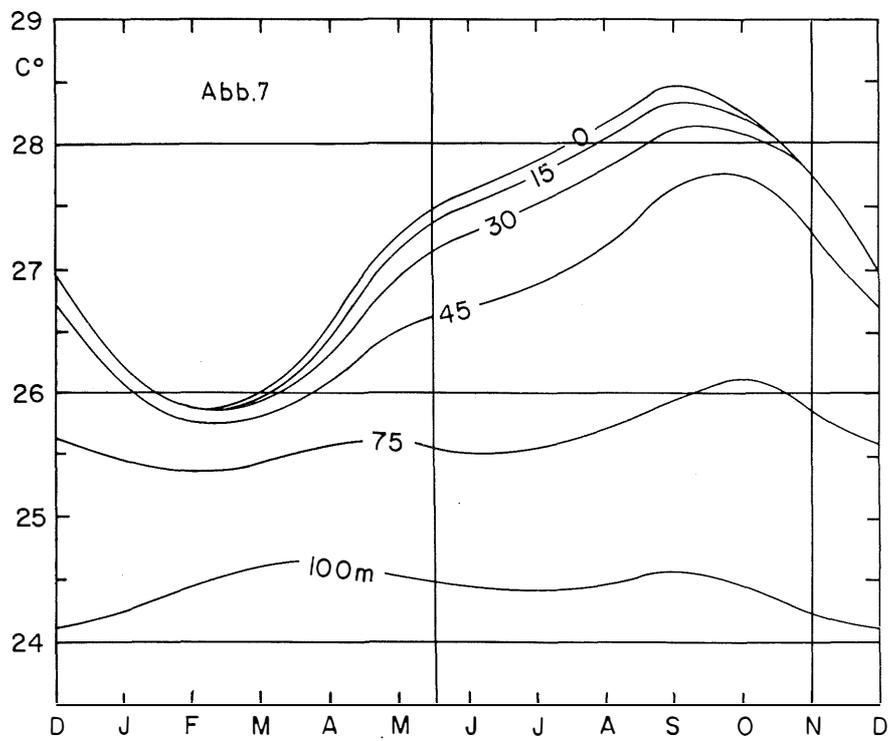
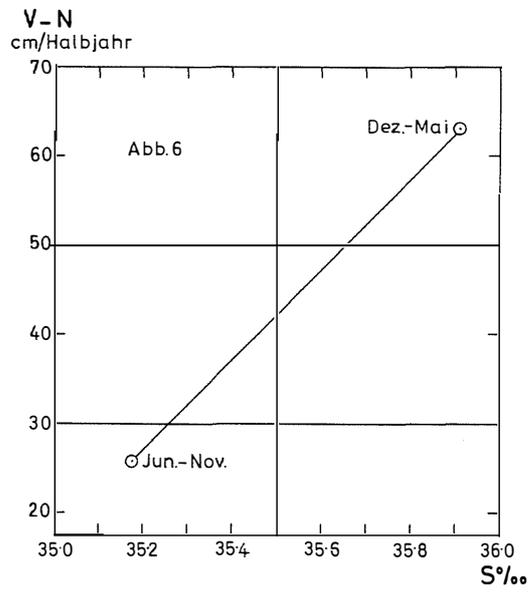
Tafel 3 (zu G. Wüst)



Tafel 4 (zu G. Wüst)



Tafel 5 (zu G. Wüst)



Tafel 6 (zu G. Wüst)

werden durch die hohen sommerlichen Niederschläge im Moskitogolf verursacht. Die Verhältnisse im Yukatan-Becken sind im Sommer noch unbekannt. In den zentralen Gebieten des Venezuela-Beckens sinkt der Salzgehalt ebenfalls unter $34,5\text{‰}$ als Folge des sommerlichen Minimums von Verdunstung minus Niederschlag (V—N), wie wir noch zeigen werden. In seinen südlichen Randgebieten finden wir (zwischen den Flußmündungen) einen Salzgehaltsanstieg, der wiederum auf vertikale Auftriebseffekte¹⁾ hindeutet. (s. Fußnote auf S. 4)

Hiermit kommen wir zum Wasserhaushalt des Karibischen Meeres, zu dessen Aufstellung außer eigenen Arbeiten (21, 22) die Beiträge von COLÓN (6), MALKUS (13) und MÖLLER (15) herangezogen werden. COLÓN (6) hat unter Benutzung von Formeln der Strahlung und der turbulenten Diffusion die Komponenten des Wärmehaushalts über dem Karibischen Wasserkörper berechnet und integriert. Dieser Wasserkörper ist durch einen elliptischen Ring von meteorologischen und aerologischen Stationen seitlich begrenzt (Taf. 3). Für ihn stehen ausreichende — auch ozeanographische — Daten über das ganze Jahr zur Verfügung. Der so umschlossene Raum ist auch dadurch für eine solche Aufgabe besonders geeignet, daß er eine klar definierte Meeresströmung, den Karibenstrom, (Taf. 8 u. 9) besitzt, der während des ganzen Jahres nahezu gleichbleibend zwischen den Kleinen Antillen in ihn eintritt und ihn durch das sich verengende Yukatan Meer verläßt. Aus COLÓN'S (6) Berechnungen der monat-

Tabelle 2
Wasserhaushalt und Oberflächensalzgehalt des Karibischen Meeres
(elliptischer Ring) nach COLÓN, MÖLLER und WÜST

	Dez.—Febr.	März—Mai	Juni—Aug.	Sept.—Nov.	Jahr	
V cm/3 Mon.	46	38	33*	44	} 161 cm	
V cm/6 Mon.	84		77*			
N cm/6 Mon.	20.5*		50.5			71 cm
V—N cm/6 Mon.	63.5		26.5*			90 cm
Oberflächen- salzgehalt ‰	35.90 ₀		35.17 ₆ *		35.53 ₈	

Maxima unterstrichen
Minima mit *

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 4)

Abb. 4: Mittlerer Niederschlag (mm) im Winter/Frühlings-Halbjahr (Dezember—Mai) (nach F. MÖLLER).

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 5)

Abb. 5: Mittlerer Niederschlag (mm) im Sommer/Herbst-Halbjahr (Juni—November) (nach F. MÖLLER).

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 6)

Abb. 6: Beziehung zwischen den Halbjahrsbeträgen des Oberflächen-Salzgehaltes und der Differenz Verdunstung minus Niederschlag (V minus N) (nach Wüst 1964).

Abb. 7: Jährlicher Gang der Wassertemperatur zwischen 0 und 100 m Tiefe, gemittelt für das elliptische Areal (nach COLÓN 1963 und MALKUS 1963).

lichen Wärmeabgabe vom Karibischen Wasserkörper an die Atmosphäre ergeben sich die obigen viertel- und halbjährlichen Beträge der Verdunstung, die heute als die am besten fundierten Näherungswerte angesehen werden dürfen (Tab. 2).

Die Verdunstungssumme stimmt im Jahresbetrag von 161 cm bis auf 10% mit den Schätzungen des Verfassers (22) überein, die für die atlantische Zone 10°—20°N durch Reduktion von Gefäßmessungen zu einem Mittelwert von 146 cm/Jahr geführt haben. Auch die von A. SCHUMACHER (20) veröffentlichten Gefäßmessungen auf der „Meteor“-Expedition 1925/27 ergeben für diese Zone (zw. 20° u. 50°W) nach Reduktion mit dem 1954 vom Verfasser (24, 27) abgeleiteten Faktor 0.55 einen ganz ähnlichen Wert von 152 cm¹). Aus der Tabelle ergibt sich, daß nach COLÓN (6) die höchste Verdunstung auf die Wintermonate mit 46 cm/3 Mon. entfällt, die geringste mit 33 cm/3 Mon. auf die Sommermonate in innerer Übereinstimmung mit den atlantischen Ergebnissen von W. C. JACOBS (12). In zahlreichen Untersuchungen ist vom Verfasser (22, 23, 24 und 27) und anderen Autoren wie BERGERON (1), JACOBS (12), MÖLLER (15), REICHEL (18), BROGMUS (4), PRAGER (17) und SCHOTT (19) wahrscheinlich gemacht, daß die Regenmessungen an Küstenstationen wegen des horizontalen Gradienten zur See im Mittel um etwa 20% reduziert werden müssen, wenn man zu vernünftigen Annäherungen für die Bedingungen des offenen Ozeans gelangen und sie mit den bis jetzt noch nicht zahlreichen Regenmessungen auf Forschungsschiffen wie „Meteor“, Wetter- und Feuerschiffen in Einklang bringen will²). Wir betrachten daher die „Vierteljahrskarten des Niederschlags für die ganze Erde“ von MÖLLER (15), die für die ozeanischen Flächen die Küstenstationsmessungen um etwa 20% reduzieren und in die klimatologischen Standardwerke übergegangen sind, als die derzeit beste Annäherung, so auch für das Karibische Meer. Durch Überlagerung von je 2 Vierteljahrskarten von MÖLLER (15) sind die folgenden Halbjahrskarten des Niederschlags abgeleitet (Taf. 4 und 5). Im elliptischen Areal erweist sich das Winter-Frühling-Halbjahr als die Trockenzeit mit 100—300 mm, das Sommer-Herbst-Halbjahr hingegen als die Regenzeit mit 300—800 mm, im Columbia-Becken sogar bis über 1000 mm/Halbjahr. Durch Ausmessung mit dem Polarplanimeter ergeben sich im elliptischen Areal 205 mm für die Monate Dezember-Mai und 505 mm für Juni-November³), also 71 cm für das ganze

¹) Für dieses Areal stehen 20 Gefäßmessungen der „Meteor“-Expedition zur Verfügung, die unreduziert im Mittel einen Wert von 7,6 mm pro Tag ergeben.

²) Es soll nicht verschwiegen werden, daß Autoren wie BUDYKO (5), DROSDOV (9), MALKUS (13) an der Auffassung von MEINARDUS (14) festhalten, daß bei der Konstruktion von ozeanischen Isohyeten auf Grund von Küstenstationen die Elimination eines „Landeffekts“ nicht berechtigt ist.

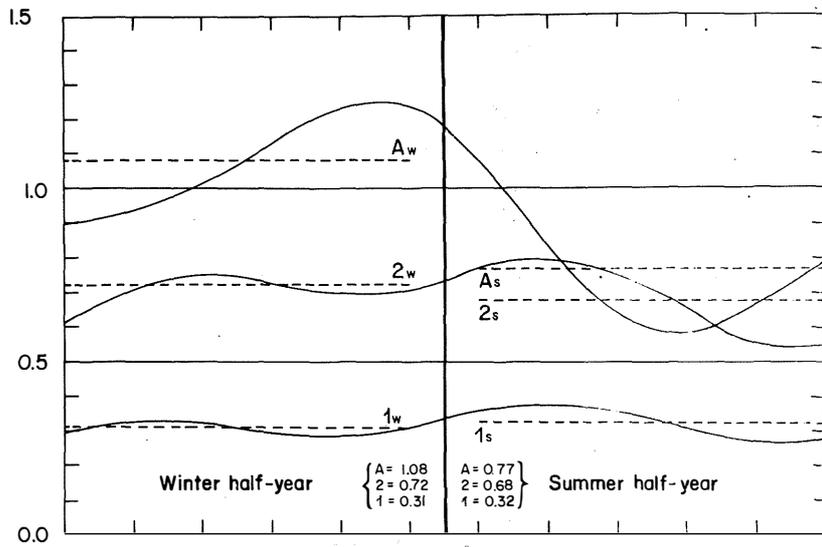
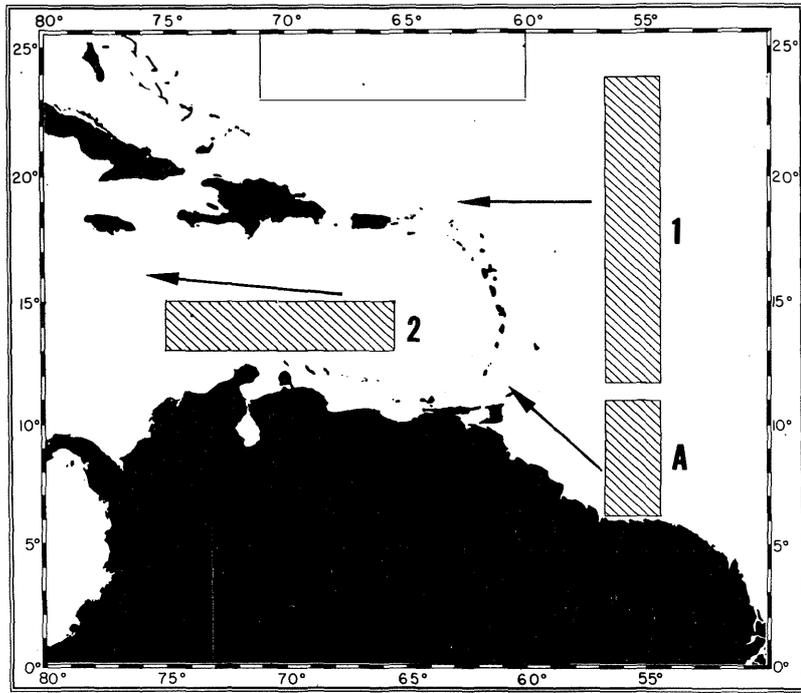
³) Dieser hohe Sommerniederschlag ist keineswegs annähernd gleichmäßig über diese Jahreszeit verteilt, sondern beruht, wie BLUME (2) betont hat, auf starken Regenfällen, die in der Hauptsache mit dem Durchzug von Passatwellen (easterly waves) und besonders im Spätsommer mit den katastrophalen Hurrikans, d. h. nach MALKUS (13) mit „major synoptic scale storms“ verknüpft sind.

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 7)

Abb. 8: Stromsegmente im Guiana-Strom (A), Nordäquatorial-Strom (1) und Karibischen Strom (2).
Abb. 9: Jahresschwankungen der Stromgeschwindigkeit in den obengenannten Stromsegmenten A, 1 und 2 (beide Abb. nach FUGLISTER 1951).

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 8)

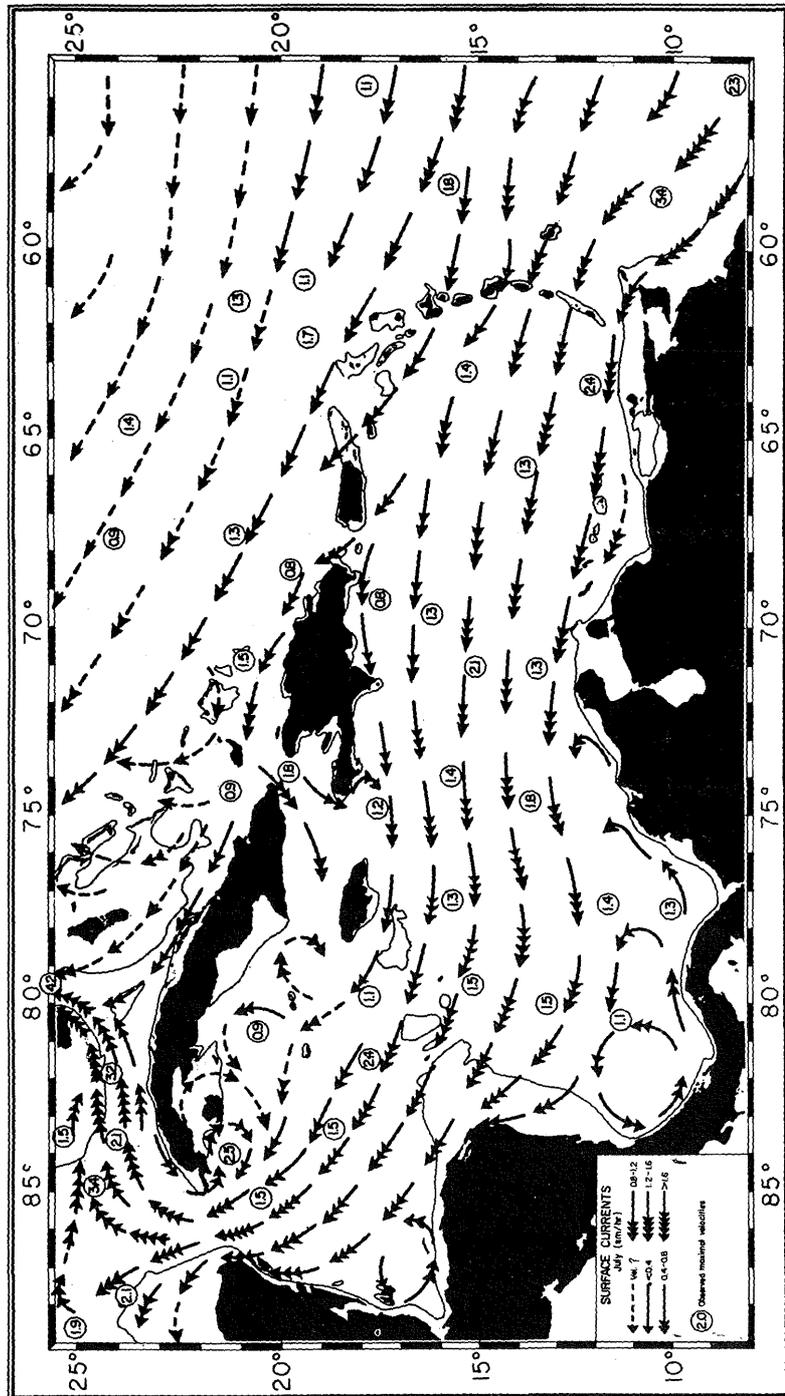
Abb. 10: Oberflächenströmungen im Januar nach mittleren Besteck-Versetzungen in Pfeilen (US Hydrographic Office) und maximalen Besteckversetzungen in Zahlen (nach Dtsch. Hydrogr. Inst.).



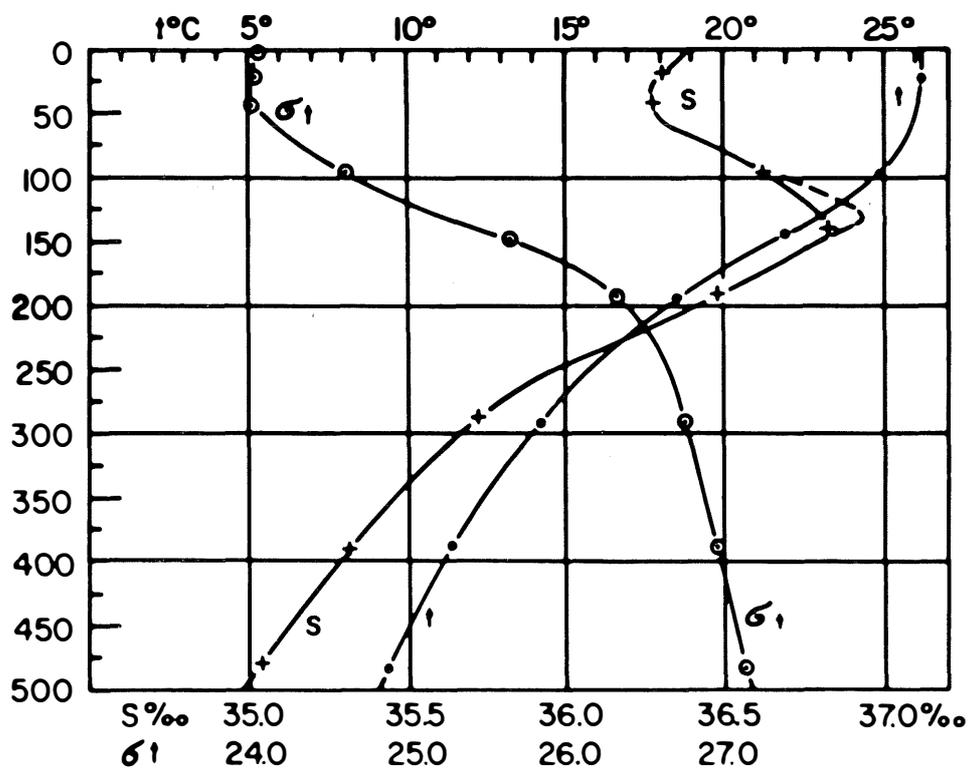
Tafel 7 (zu G. Wüst)



Tafel 8 (zu G. Wüst)



Tafel 9 (zu G. Wüst)



Tafel 10 (zu G. Wüst)

Jahr (s. 3. Reihe in Tab. 2). Hiernach beläuft sich die bedeutsame Größe Verdunstung minus Niederschlag, $V-N$, auf 63,5 cm im Winterhalbjahr bzw. nur 25,5 cm im Sommerhalbjahr, d. h. auf 70% bzw. 30% der Jahressumme von 90 cm. Aus unseren neuen Karten des Salzgehalts ergeben sich für das elliptische Areal im Mittel $35,90\text{‰}$ im Winter- und $35,17\text{‰}$ im Sommer-Halbjahr und für das ganze Jahr $35,53\text{‰}$ (Reihe 5 von Tab. 2). Die bemerkenswert große halbjährliche Schwankung von $0,72\text{‰}$, die erheblich abweicht von der geringen Schwankung ($0,20\text{‰}$) im offenen Atlantischen Ozean, steht völlig in Einklang mit der halbjährlichen Schwankung von $V-N$ (Taf. 6). Bei der Diskussion der Salzgehaltskarten ist auf den zusätzlichen Einfluß von Orinoco und Magdalena und der Querkirkulation in den küstennahen Gebieten hingewiesen, jedoch bereits betont, daß der ausschlaggebende Faktor im zentralen Areal des Karibischen Meeres die Größe $V-N$ darstellt. Selbst wenn der jährliche Gang des Abflusses vom Lande A_L hinreichend bekannt wäre, würde es wegen der zahlreichen Passagen zum Ozean nicht möglich sein, A_L — in cm Wasserhöhe ausgedrückt — in der Bilanz für das Karibische Meer zu berücksichtigen, wie es bei den weitgehend abgeschlossenen Nebenmeeren, wie Mittelmeer und Ostsee, statthaft ist. Im übrigen spricht alles dafür, daß im elliptischen Areal A_L innerhalb der Fehlergrenzen von V und N gelegen ist und nur eine leichte Senkung des Sommerpunktes im Diagramm (Taf. 6) zur Folge haben kann.

In Bezug auf den Wärmehaushalt wird auf die umfangreiche Studie COLÓNS (6) und das ausgezeichnete Resumée, betitelt „Joint air-sea energy budget of the Caribbean region“, von J. MALKUS (13) verwiesen. Tab. 3 gibt die aus COLÓNS Berechnungen abgeleiteten Halbjahresmittel der im elliptischen Areal absorbierten Gesamtstrahlung Q_s-Q_a , d. h. abzüglich Ausstrahlung. Die Differenz zwischen den Halbjahresmitteln der absorbierten Gesamtstrahlung Q_s-Q_a sowie der Oberflächentemperatur ist bemerkenswert klein, was sich im wesentlichen daraus erklärt, daß der Effekt des höheren Sonnenstandes durch die höhere Bewölkung im Sommer weitgehend aufgehoben wird.

Tabelle 3
Absorbierte Gesamtstrahlung, Oberflächentemperatur und Bewölkung
(Halbjahresmittel) im Karibischen Meer

	Dez.—Mai	Juni—Nov.	Jahr	
Q_s-Q_a	6.21*	<u>6.31</u>	6.26	10^{18} cal/Tag
t_w	26.45*	<u>28.05</u>	27.25	C°
Bewölkung	39.3*	<u>47.8</u>	43.5	%

Die mittlere jährliche Wärmespeicherung in 0—100 m Tiefe des elliptischen Areals ist von J. MALKUS (13) aus 8000 Bathythermogrammen ermittelt und im

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 9)

Abb. 11: Oberflächenströmungen im Juli nach mittleren Besteckversetzungen in Pfeilen (US Hydrographic Office) und maximalen Besteckversetzungen in Zahlen (nach Dtsch. Hydr. Inst.).

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 10)

Abb. 12: Vertikalkurven der Temperatur, des Salzgehaltes und der Dichte in der Wärme-Wasser-Sphäre („Atlantis“-Station 1509 in $13^{\circ}58'N$ $68^{\circ}36'W$) (nach Wüsr 1964).

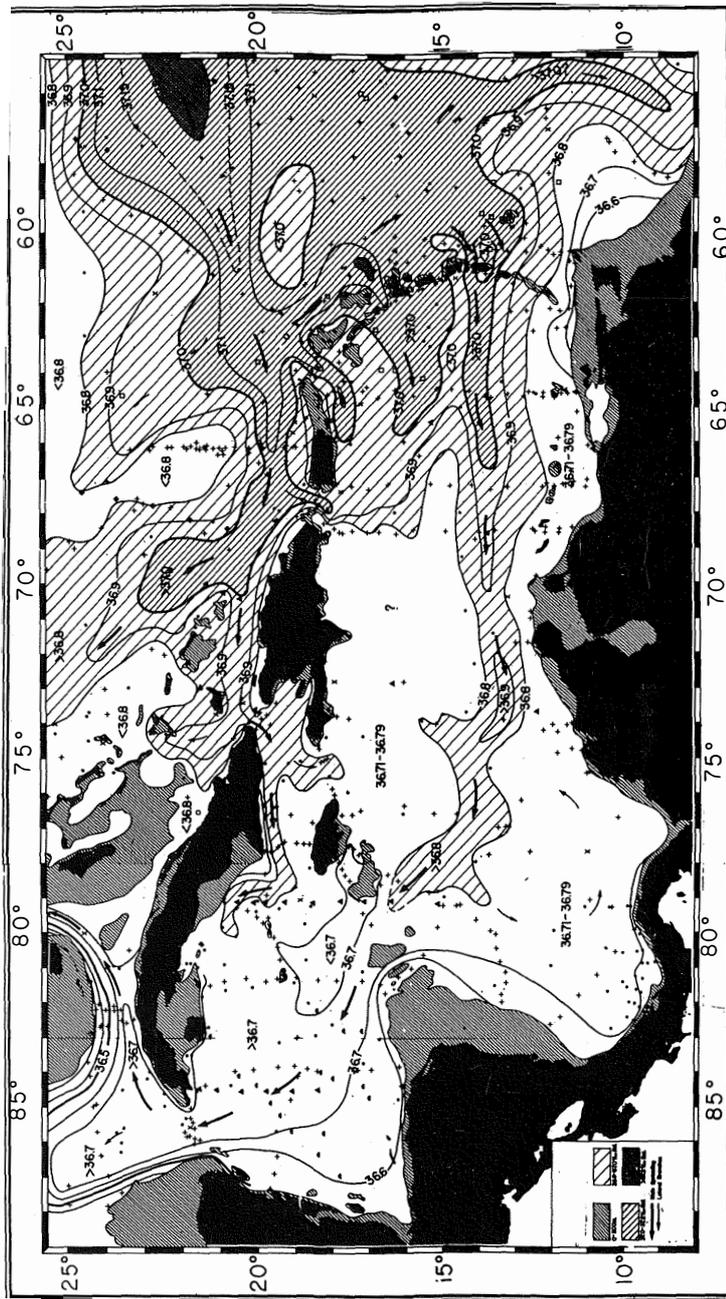
obigen Diagramm des jährlichen Ganges der Wassertemperatur in den verschiedenen Tiefen veranschaulicht (Taf. 6). Die jährliche Schwankung beträgt an der Oberfläche und in 15 m Tiefe nur etwa $2,5^{\circ}\text{C}$ und reduziert sich in 30 m auf 87%, in 45 m auf 76% und in 75 m auf 26% dieses Betrages (unter gleichzeitiger Phasenverschiebung). In 100 m Tiefe nahe der Sprungschicht ist ein klar definierter jährlicher Gang nicht festzustellen. Hieraus folgt, daß in Tiefen von mehr als 100 m praktisch stationäre Bedingungen existieren. Sie sind nur von kleineren unperiodischen Schwankungen überlagert, die in Studien über die mittleren Zirkulations- und Vermischungphänomene vernachlässigt werden können. Jedoch sind unsere Ergebnisse eingeschränkt dadurch, daß sie sich im wesentlichen auf das elliptische Areal und Halbjahresmittel beschränken.

Das Endergebnis dieser Wasserhaushalts- und Wärmehaushaltsbetrachtung ist, daß im Karibischen Meer nur zwei größere Jahreszeiten auftreten: das sonnige Winter-Frühlings-Halbjahr, gekennzeichnet durch hohe Verdunstung, geringen Niederschlag, geringen Abfluß vom Lande und hohem Oberflächensalzgehalt und das bewölkte Sommer-Herbst-Halbjahr mit geringer Verdunstung, hohem Niederschlag, hohem Abfluß vom Lande und geringem Oberflächensalzgehalt — in beiden Halbjahren bei ziemlich konstanter Wassertemperatur, deren mittlere jährliche Schwankung kaum $2,5^{\circ}\text{C}$ übersteigt.

In der bisherigen Diskussion sind die jahreszeitlichen Veränderungen der Advektion durch die Meeresströmungen, die durch den beständigen frischen NE-Passat unter Ablenkung nach rechts in Gang gehalten werden, nicht berücksichtigt. FUGLISTER (11) hat die mittleren jährlichen Schwankungen des Guiana-, Nordäquatorial- und Karibenstroms in drei charakteristischen Segmenten studiert, wo die größte Zahl der Beobachtungen vorliegt und die Stromrichtungen nahezu unverändert bleiben (Taf. 7). Durch harmonische Analyse der mittleren Stromresultierenden für die 1° -Felder ergeben sich die im Diagramm (Taf. 7) dargestellten Schwankungen der Stromgeschwindigkeiten (in Knoten/Stunde). Der Guiana-Strom ist als ein küstenparalleler tiefreichender Gradientstrom mit 1,88 Knoten/Stunde im Winter-Halbjahr und 0,77 im Sommer-Halbjahr der stärkste, der windgetriebene Triftstrom im offenen Ozean, der Nordäquatorialstrom, mit 0,3 Knoten der schwächste. Der zum Teil windgetriebene, durch überlagerte Gradientkräfte tiefreichende Karibenstrom nimmt durch Überlagerung eine Mittelstellung in Geschwindigkeit (0,7 Knoten) und Amplitude (0,3 Knoten) ein. Die Differenz zwischen Winter- und Sommerhalbjahr ist in Segment 1 und 2 mit 0,01 bis 0,04 Knoten/Stunde im Mittel relativ gering, d. h. im Durchschnitt spielen Schwankungen der Advektion in den obigen Wärme- und Wasserhaushaltsbetrachtungen eine sekundäre Rolle. Die monatlichen Stromkarten, die auf 1° -Feld Mittelwerten der Besteckversetzungen beruhen und aus Bearbeitungen des US-Hydrographic Office und US-Weather Bureau (21) und des Deutschen Hydrographischen Instituts (8) abgeleitet sind, bestätigen diese Vorstellung. Die erstgenannten liefern Richtung und Geschwindigkeit der vorherrschenden (Beständigkeit $> 25\%$) Strömungen, die zweiten durch Kreise umschlossene Zahlen die jeweils beobachteten maximalen Stromversetzungen (in Knoten/Stunde). Hier seien nur die Januar- und Julikarte reproduziert (Taf. 8 und 9), die, wie auch in den anderen Monaten, im Prinzip das analoge Strombild zeigen und längs der von Südost nach Nordwest verlaufenden Stromachse maxi-

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 11)

Abb. 13: Ausbreitung des subtropischen Unterstromes in Kernschicht (intermediäres Salzgehaltsminimum in 50—200 m Tiefe) (nach Wüstr 1964).



Tafel 11 (zu G. Wüst)

male Stromstärken nahe oder über 2,0 Knoten/Stunde, d. h. 70—130 cm/sec aufweisen. In den großen Buchten treten rotierende Ströme mit Gegenströmungen längs der Küste auf.

Wir wenden uns nun der Warmwasser-Zirkulation in der Tiefe des Karibischen Meeres zu, die mittels der Kernschicht-Methode abgeleitet wird. Alle Vertikalkurven des Salzgehalts, der Temperatur und Dichte zeigen im Prinzip das in Taf. 10 dargestellte Bild, das durch ein intermediäres Salzgehaltsmaximum und eine thermische und Dichte-Sprungschicht zwischen 50 und 200 m Tiefe gekennzeichnet ist. Aus der Verteilung des Salzgehalts innerhalb dieser Kernschicht des subtropischen Unterwassers, dessen Quellgebiet in 20°—25°N, d. h. im Maximum von V—N, gelegen ist, ist die neue Karte des subtropischen Unterstroms (Taf. 11) abgeleitet, die gegenüber einem früheren Versuch von DIETRICH (9) eine Reihe von Verfeinerungen in Bezug auf die Ausbreitungs- und Vermischungseffekte ausweist. In vier Zungen nimmt diese Ausbreitung innerhalb 100 und 200 m Tiefe einen stromartigen Charakter (in der Größenordnung von 35—40 cm/sec) an. Innerhalb des Karibischen Meeres fällt die Hauptzunge des subtropischen Unterstroms mit der Achse des Karibenstroms zusammen und bildet die Hauptader in diesem Ursprungsgebiet des Golfstrom-Systems. Wir haben hier mit einem typischen Beispiel einer winderzeugten Meeresströmung in einem baroklinen Massenfeld zu tun. Im Endzustand des Gleichgewichts zwischen den beiden Kraftfeldern haben die Strömungen in allen Schichten bis zur Bezugsfläche (in 800 bis 1700 m) praktisch dieselbe Richtung. Konstruiert man längs der Hauptachse einen Vertikalschnitt des Salzgehaltes (und auch der Temperatur), wie es in den Abhandlungen des Verfassers (25, 26) geschehen ist, so erweist sich der subtropische Unterstrom über eine Strecke von 4200 km und in einer Tiefe zwischen 100 und 200 m als ein schmales Band maximalen Salzgehalts ($> 36,7\text{‰}$) und unverändert geringer Dicke (50—75 m). Der Vergleich dieses Salzgehalts-Längsschnittes mit dem Temperatur- und Dichte-Schnitt lehrt, daß das Salzgehalts-Maximum des subtropischen Unterstroms mit einer sehr scharfen Dichte-Sprungschicht zusammenfällt. Wegen der hohen vertikalen Stabilität einer solchen Schichtung ist der vertikale Austausch stark unterdrückt, sodaß der subtropische Unterstrom dem Charakter einer laminaren Strömung nahekommt. Diese Erscheinung hat zuerst MONTGOMERY (16) studiert, der einen vertikalen Austauschkoeffizienten von nur 0,4 g/cm/sec, d.h. nicht weit vom molekularen Diffusionskoeffizienten für Salz in Wasser (0,01), abgeleitet hat, während sinngemäß DEFANT (7) für den vertikalen Austausch im unterlagernden subantarktischen Zwischenstrom wegen der geringen Stabilität der Schichtung in 500—700 m Tiefe einen Koeffizienten von 5—10 g/cm/sec gefunden hat.

Die Grenze zwischen der Warmwasser- und Kaltwassersphäre fällt mit den Isothermen von 8°—9° und mit den Isohalinen von 34,9—35,0‰ zusammen und ist am besten zwischen 300 und 600 m Tiefe gekennzeichnet durch die Kernschicht des intermediären Sauerstoffminimums, die in der folgenden Karte (Taf. 12) auf Grund von „Atlantis“-Stationen aus den Jahren 1932—1937 dargestellt ist. Wie die Kernschicht des subtropischen Unterstroms, zeigt auch diese Grenzschicht ein Gefälle von links nach rechts in Bezug auf die Hauptstromrichtung. Dieses Sauerstoffminimum darf nicht durch einen Mangel an seitlicher Advektion vom offenen Ozean erklärt werden, sondern beruht im wesentlichen auf biochemischen Ursachen. Die dynamische Grenz-

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 12)

Abb. 14: Verteilung des Sauerstoffs in der Kernschicht des intermediären Sauerstoffminimums in 300—800 m Tiefe nach Beobachtungen in den Jahren 1932—1937 (Kernschichttiefen sind in Klammern angegeben) (nach Wüst 1964).

schicht oder Bezugsfläche, d. h. die sogenannte Nullschicht mit praktisch unmeßbarer Bewegung, befindet sich im Karibischen Meer in Tiefen zwischen 800 und 1700 m. Die größten Satteltiefen in den Passagen des Antillen-Bogens (Windward- und Anegada-Virgin Islands Passagen) liegen, wie der Verfasser (25, 26) gezeigt hat, bei Tiefen zwischen 1600 und 1775 m. Hieraus folgt, daß das Karibische Meer bis zu diesen großen Tiefen einen integrierenden Bestandteil des offenen Nordatlantischen Ozeans darstellt und nicht eigentlich als ein Teil eines „Amerikanischen Mittelmeeres“ im Sinne von KRÜMMEL (1907), DIETRICH (1939) und SVERDRUP (1942) bezeichnet werden kann. Es empfiehlt sich daher, für dieses Nebenmeer des Nordatlantischen Ozeans die amerikanische Nomenklatur „Zentralamerikanisches Meer“, das aus dem Karibischen Meer und dem Golf von Mexico besteht, zu bevorzugen.

Zusammenfassung: Die quantitative Analyse des Wasser- und Wärmehaushalts und seiner Auswirkungen auf die Salzgehalts- und Temperaturverteilung an der Oberfläche des zentralen elliptischen Areals lehrt, daß im Karibischen Meer im wesentlichen nur zwei größere Jahreszeiten auftreten: 1. das sonnige Winter-Frühlings-Halbjahr, gekennzeichnet durch hohe Verdunstung V , geringen Niederschlag N und Abfluß vom Lande A_L und hohen Oberflächensalzgehalt S ‰ und 2. das bewölkte Sommer-Herbst-Halbjahr mit geringem V , hohem N und A_L und niedrigerem S ‰. Die Warmwasserzirkulation in der Tiefe wird durch eine Kernschichtkarte des Subtropischen Unterstroms veranschaulicht, der durch die schmale Schicht des intermediären Salzgehaltsmaximums in 50—200 m gekennzeichnet ist.

Interaction between Sea and Atmosphere and the Circulation Patterns in the Warm-water-sphere of the Caribbean Sea (Summary): The quantitative analysis of the interactions sea—air shows that two main seasons exist in the central elliptic area of the Caribbean Sea: the sunny winter-spring season and the rainy summer-autumn season. The first is from December to May characterized by a semi-arid climate with sunshine, high evaporation, small precipitation and runoff and high surface salinity; the second is from June to November characterized by a more semi-humid climate with cloudiness, small evaporation, high precipitation and runoff and lower surface salinity. The warmwatercirculation is best described by the spreading of the Subtropical Undercurrent characterized by the narrow intermediate salinity maximum in 50—200 m. The boundary between the warmwater- and the coldwater-spheres is best fixed by the oxygen-minimum in 300 to 600 m depth sloping from S to N like the core of the undercurrent.

The whole paper forms an abstract of some chapters of the author's extensive study on the "Stratification and Circulation in the Antillen-Caribbean Basins", which in 1964 is published by the Lamont Geological Laboratory as No. 2 of the "Vema Research Series". The author wishes to thank the Columbia University Press for the permission to reproduce here 12 plates from the mentioned book.

Literaturverzeichnis

1. BERGERON, T. (1950): Über den Mechanismus der ausgiebigen Niederschläge. Ber. D. Wetterdienst, US-Zone 12, S. 225.
2. BLUME, H. (1962): Beiträge zur Klimatologie Westindiens. Erdkunde 16, S. 271—289.
3. BÖHNECKE, G. (1936): Temperatur, Salzgehalt und Dichte an der Oberfläche des Atlantischen Ozeans. „Meteor“-Werk Bd. V, Atlas. Berlin.
4. BROGMUS, W. (1952): Eine Revision des Wasserhaushalts der Ostsee. Kieler Meeresforschungen IX, S. 1.
5. BUDYKO, M. L. (1958): The heat balance of the earth's surface. US Weather Bureau. Washington.
6. COLÓN, F. A. (1963): Seasonal variations in heat flux from the sea surface to the atmosphere over the Caribbean Sea. Journ. Geophys. Res. 68, S. 1421—1430.
7. DEFANT, A. (1936): Schichtung und Zirkulation des Atlantischen Ozeans. Die Troposphäre. „Meteor“-Werk Bd. VI, 2.2. Berlin.
8. DEUTSCHES HYDROGRAPHISCHES INSTITUT (1956): Monatskarten für den Atlantischen Ozean. Hamburg.

9. DIETRICH, G. (1939): Das Amerikanische Mittelmeer. Z. Ges. f. Erdk. Berlin, S. 108—130.
10. DROZDOV, O. A. (1953): Annual amounts of precipitation. Chart. 48, Russian Morskoi Atlas, Vol. 2, (russisch).
11. FUGLISTER, F. (1951): Annual variations in current speeds in the Gulf Stream system. Journ. Mar. Res. 10.
12. JACOBS, W. C. (1951): The energy exchange between sea and atmosphere and some of its consequences. Bull. Scripps Inst. Oceanogr. Techn. Ser. 6 (2), S. 27—122.
13. MALKUS, J. (1962): Large-scale interactions. Chap. 4 in "The Sea" (ed. by M. N. Hill) Vol. 1. Physical Oceanography. New York and London.
14. MEINARDUS, W. (1934): Eine neue Niederschlagskarte der Erde. Petermanns Geogr. Mitt. 80, S. 1—4.
15. MÖLLER, F. (1951): Vierteljahrskarten des Niederschlags für die ganze Erde. Petermanns Geogr. Mitt. 95, S. 1—7.
16. MONTGOMERY, R. B. (1939): Circulation in the upper layers of southern North Atlantic deduced with use of isentropic analysis. Pap. in Oceanography. 6, 2. Cambridge Mass.
17. PRAGER, E. (1952): Der Niederschlag auf See und an der Dünenflachküste. Ann. Met. 5, S. 259.
18. REICHEL, E. (1952): Der Stand des Verdunstungsproblems. Ber. D. Wetterdienst US-Zone. 35, S. 155.
19. SCHOTT, G. (1942): Geographie des Atlantischen Ozeans. 3. Aufl. Hamburg.
20. SCHUMACHER, A. (1962): Ozeanographische Sonderuntersuchungen. 2. Lief. B. Verdunstungsmessungen. „Meteor“-Werk Bd. VII, 2. Berlin.
21. US HYDROGRAPHIC OFFICE and U.S. WEATHER BUREAU (1959): Climatological and Oceanographic Atlas for Mariners. North Atlantic Ocean. Washington 1959.
22. WÜST, G. (1936): Oberflächensalzgehalt, Verdunstung und Niederschlag auf dem Weltmeere. Landeskundliche Forschung. Festschrift N. Krebs, Stuttgart.
23. WÜST, G. (1950): Wasserdampf und Niederschlag auf dem Meere als Glieder des Wasserkreislaufs. D. Hydr. Zeitschr. 3, S. 111—127.
24. WÜST, G. (1954): Gesetzmäßige Wechselbeziehungen zwischen Ozean und Atmosphäre in der zonalen Verteilung von Oberflächensalzgehalt, Verdunstung und Niederschlag. Archiv für Meteorologie, Geophysik u. Bioklimatologie, Ser. A. 7, Wien 1954, S. 305—328.
25. WÜST, G. (1963): On the stratification and the circulation in the cold-watersphere of the Antillean-Caribbean basins. Deep Sea Res. 10 (3), S. 165—187, London.
26. WÜST, G. (1964): Stratification and circulation in the Antillean-Caribbean basins. Part I, (Vema Research Series No. 2) New York and London.
27. WÜST, G., W. BROGMUS und E. NOODT (1957): Die zonale Verteilung von Salzgehalt, Niederschlag, Verdunstung, Temperatur und Dichte an der Oberfläche der Ozeane. Kieler Meeresforschungen 1957, S. 137—161.