

Ausbreitung und Vermischung der Zentralwassermassen in den Tropengebieten der Ozeane. 1: Atlantischer Ozean

Zentralwasser
Vermischung
Fronten
Tropischer Ozean
Central Water
Mixing
Fronts
Tropical ocean

M. Tomczak Jr.

CSIRO Marine Laboratories, Division of Oceanography, Cronulla, N.S.W. 2230, Australia.

Present address: Marine Studies Centre, the University of Sydney, Sydney, N.S.W. 2006, Australia.

Received 26/4/82, in revised form 24/10/83, accepted 15/11/83.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Wassermassen der ozeanischen Sprungschicht, seit Sverdrup, Johnson und Fleming (1942) als Zentralwassermassen bezeichnet, entstehen an der subtropischen Konvergenz beider Hemisphären und breiten sich von dort zum Äquator hin aus. Im TS-Diagramm sind sie durch nahezu lineare TS-Beziehungen gekennzeichnet. In den Tropengebieten der Ozeane stossen sie auf Wassermassen mit ähnlich ausgedehntem TS-Bereich und bilden mit ihnen unterhalb der ozeanischen Deckschicht eine zonal verlaufende Front. Ihre Lage, Intensität und Veränderlichkeit in den drei Ozeanen werden in dieser Arbeit untersucht. Das Material der Untersuchung bilden die historischen Daten des ozeanographischen Weltzentrum A, die auf der Grundlage von 5°-Feldern in Regionen zusammengefasst wurden. Für jede Region wurden die relativen Anteile der beteiligten Wassermassen als Funktion der Tiefe sowie ihre Streuung bestimmt. Die Bestimmung der Anteile erfolgte mittels isentroper Analyse und Multiparameter-Analyse (Tomczak, 1981 a).

Der vorliegende erste Teil beschreibt die Methode der Untersuchung und die Ergebnisse für den Atlantischen Ozean. Dort treffen Nordatlantisches Zentralwasser (NAZW) und Südatlantisches Zentralwasser (SAZW) bei 15°N aufeinander. Die Front verläuft, leicht abweichend von zonaler Orientierung, von Südosten nach Nordwesten und steigt von Süden nach Norden an, wobei SAZW über NAZW lagert. Die Streuung nimmt von Osten nach Westen zu, in Ausbreitungsrichtung der Wassermassen. Stationen mit ineinandergeschobenen Schichten von NAZW und SAZW finden sich über die ganze Breite des Ozeans. Es wird geschlossen, dass Unterschiede in der Vermischung entlang der Front wenig wahrscheinlich sind, und dass die Zunahme der Streuung nach Westen zunehmende Veränderlichkeit in der Lage der Front reflektiert. Multiparameter-Analyse führt zu keinen schlusskräftigen Ergebnissen; weitgehende Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen beider Methoden deutet aber darauf hin, dass Vermischung in der Front isentrop erfolgt.

Oceanol. Acta, 1984, 7, 2, 145-158.

ABSTRACT

On the spreading and mixing of central water in the tropical areas of the oceans. 1: Atlantic Ocean

The water masses of the permanent pycnocline, known since Sverdrup, Johnson and Fleming (1942) as the central water masses, originate at the subtropical convergences of both hemispheres and spread towards the equatorial regions. They are recognised in a TS-diagram by nearly linear TS-relationships. On encountering, in the tropical oceans, water masses of similar TS-ranges they combine with them in the formation of fronts. The fronts are of basically zonal orientation; they are often restricted to sub-surface layers and density-compensated (*i.e.* displaying horizontal gradients in temperature and salinity but not in density). Their position, strength and variability is the focus of this study. It is based on historical data, obtained from the Oceanographic World Data Centre A and grouped into regions consisting of one or more areas of 5° latitude by 5° longitude. The relative contributions of the water masses are

determined as a function of density in each region, and variability is displayed by means of bivariate distributions of water mass content and density. Calculations are based on isentropic analysis and multi-parameter analysis (Tomczak, 1981 a).

Part 1 of this study discusses the methodology and presents results for the Atlantic Ocean, for the density range $26.5-27.1 \sigma_t$ which spans approximately 300 m (150 m-450 m, ± 50 m depending on region). North Atlantic Central Water (NACW) and South Atlantic Central Water (SACW) meet at 15°N . The front deviates slightly from zonal orientation, running from south-east towards north-west and rising from south towards north, with SACW lying above NACW. Variability increases from east towards west, in the direction of spreading of the water masses. Stations with multiple layers of alternating NACW and SACW can be found across the entire width of the ocean. It is argued that changes in the type and intensity of mixing along the front are unlikely and that the increase of variability towards west reflects increasing variability in the position of the front. Multi-parameter analysis suffers from problems with data quality, particularly in the nutrient data; the few results obtained support, however, the assumption that mixing is isentropic.

Oceanol. Acta, 1984, 7, 2, 145-158.

RÉSUMÉ

Écoulement et mélange de l'eau centrale dans les zones océaniques tropicales. 1.: Océan Atlantique

Les masses d'eau de la pycnocline permanente, connues depuis Sverdrup *et al.* (1942) comme masses d'eau centrale, se forment aux convergences subtropicales des deux hémisphères et s'écoulent en direction de l'équateur. Elles sont caractérisées sur le diagramme TS par des relations quasi-linéaires. Dans les régions tropicales, elles rencontrent des masses d'eau aux caractéristiques TS semblables avec lesquelles elles forment des fronts d'orientation zonale. Souvent limités aux couches subsuperficielles, ces fronts sont compensés en densité, c'est-à-dire qu'ils présentent des gradients horizontaux de température et de salinité, mais pas de gradient de densité. Leurs position, intensité et variabilité font l'objet de la présente étude. Les données historiques utilisées sont celles du Centre Mondial A de Données Océanographiques, qui ont été regroupées par mailles de 5° en longitude et latitude. Pour chaque région, la proportion des différentes masses d'eau est déterminée en fonction de la densité, et la variabilité est déduite de la répartition de ces deux variables. Les calculs utilisent l'analyse isentropique et l'analyse multiparamètres (Tomczak, 1981 a). La première partie de ce travail décrit la méthodologie et les résultats relatifs à l'Océan Atlantique, dans une gamme de densités de $26,5$ à $27,1$ en σ_t , couvrant environ 300 m (de 150 à 450 m, à ± 50 m selon la région). L'eau centrale nord-atlantique (NAZW dans le texte) et l'eau centrale sud-atlantique (SAZW) se rencontrent vers 15°N . Le front s'écarte légèrement de la direction zonale pour s'orienter du Sud-Est au Nord-Ouest et monte du Sud vers le Nord, avec SAZW recouvrant NAZW. La variabilité augmente d'Est en Ouest, dans la direction de l'écoulement des masses d'eau. Des stations avec couches multiples alternées de NAZW et SAZW se trouvent sur toute la largeur de l'océan. Les variations dans le type et l'intensité du mélange le long du front sont peu probables et l'augmentation de la variabilité vers l'Ouest reflète une variabilité croissante dans la position du front. L'analyse multiparamètres ne donne pas de résultats convaincants à cause de la qualité des données, en particulier pour les sels nutritifs; les quelques résultats obtenus confirment cependant l'hypothèse d'un mélange isentropique.

Oceanol. Acta, 1984, 7, 2, 145-158.

EINLEITUNG

In den niederen Breiten der Ozeane sind Diagramme der Temperatur als Funktion des Salzgehalts (TS-Diagramme) über einen weiten Bereich durch eine annähernd lineare TS-Beziehung charakterisiert. Für die Wassermassen, die diesen Bereich einnehmen, wird seit Sverdrup, Johnson und Fleming (1942) die Bezeichnung Zentralwasser verwendet. Zentralwasser entsteht auf beiden Hemisphären an der subtropischen Konvergenz

und breitet sich von dort unterhalb der nahezu homogenen Oberflächenschicht zum Äquator hin aus.

Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit der Frage: Was geschieht, wenn die Zentralwassermassen beider Hemisphären im tropischen Ozean aufeinander oder auf andere (tropische) Wassermassen stossen? Aufgeworfen wurde die Fragestellung unter anderem durch Beobachtungen aus dem Auftriebsgebiet des Kanarenstroms, wo die beiden Zentralwassermassen des Atlantischen Ozeans im Ursprungsgebiet des aufgestiegenen

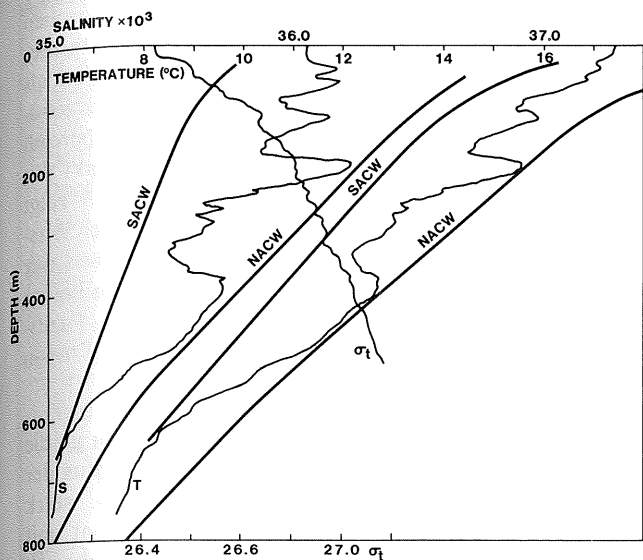


Abbildung 1

Temperature T , Salzgehalt S und Dichte σ_t als Funktion der Tiefe bei $22^{\circ}53,9'N$, $17^{\circ}49,6'W$ ("Discovery"-Station 8693, Februar 1975). Die dicken Linien illustrieren für das Gebiet typische Temperatur- und Salzgehaltskurven für unvermishtes Zentralwasser (aus Tomczak, Hughes, 1980).

Temperature T , salinity S and density σ_t as functions of depth at $22^{\circ}53,9'N$, $17^{\circ}49,6'W$ ("Discovery" station 8693, February, 1975). The heavy lines show typical temperature and salinity curves for pure Central Water in the area (from Tomczak, Hughes, 1980).

Profils de température T , salinité S et densité σ_t au point $22^{\circ}53,9'N$, $17^{\circ}49,6'W$ (station 8693 « Discovery », février 1975). Les profils de température et de salinité de l'eau centrale pure dans cette région figurent en trait épais (d'après Tomczak, Hughes, 1980).

küstennahen Wassers nicht nur nahezu unvermisht nebeneinander sondern oft in vielfachen Schichten ineinander gelagert sind (Abb. 1). Der Übergang von einer Wassermasse zur anderen ist dort mitunter so abrupt, dass Messungen mit einer Temperatur-/Leitfähigkeits-/Tiefensonde Unterschiede zwischen Fier- und Hievkurve von mehr als $2^{\circ}C$ zeigen können (Tomczak, Hughes, 1980). Aus den Beobachtungen ging hervor, dass Nordatlantisches Zentralwasser (NAZW) und Südatlantisches Zentralwasser (SAZW) im Tiefenbereich 150-600 m vor der afrikanischen Küste eine Front bilden, die an der Oberfläche nicht immer erkennbar ist. Derartige Fronten, die auf den Tiefenbereich unterhalb der Deckschicht beschränkt sind, werden im folgenden kurz als innere Fronten bezeichnet.

Nach den Ergebnissen der Untersuchungen vor der afrikanischen Küste lag es nahe, den Verlauf der inneren Front zwischen NAZW und SAZW nach Westen zu verfolgen und die Verteilung von NAZW und SAZW im gesamten tropischen Atlantischen Ozean zu erfassen. Voraussetzung dafür ist eine objektive Wassermassenanalyse. Da die Zentralwassermassen im TS-Diagramm durch Kurvenabschnitte repräsentiert sind, ist für die Analyse der Vermischung zwischen ihnen die klassische Technik des Vermischungsdreiecks (Mamayev, 1975) oder der Verfolgung von Kernschichten (Wüst, 1935) nicht anwendbar, und zusätzliche Annahmen über den Vermischungsprozess werden notwendig. Die sogenannte isentrope Analyse, die im Ozean in guter Näherung durch Analyse auf Dichteflächen ersetzt werden kann, schliesst Vermischung zwi-

schen Flächen verschiedener Dichte aus. Sie wurde von Barton und Hughes (1982) erfolgreich für eine Analyse der Verteilung von NAZW und SAZW vor der nordwestafrikanischen Küste angewendet. Ihre Untersuchung bestätigt aber auch die weite Verbreitung blättriger Strukturen in der Wassermassenverteilung entlang der Front.

Die Kombination von kräftigen vertikalen Temperatur- und Salzgehaltgradienten mit nur schwacher Dichteschichtung schafft gute Bedingungen für sogenannte Salzfinger-Diffusion. Wegen des mit Salzfinger-Diffusion verbundenen Salz- und Wärmetransports durch Dichteflächen hindurch ist nicht ohne weiteres klar, ob die isentrope Wassermassenanalyse bei inneren Fronten zu einer korrekten Darstellung der Wassermassenverteilung führt. Eine Methode, die ohne diese einschränkende Voraussetzung arbeitet, ist die Multiparameter-Analyse (Tomczak, 1981 a). Ihre Anwendung auf die Front zwischen NAZW und SAZW vor der afrikanischen Küste ergab gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der isentropen Analyse (Tomczak, 1981 b). Bevor dieses Ergebnis verallgemeinert wird, scheint ein Vergleich der Ergebnisse beider Methoden in anderen Meeresgebieten angebracht.

In der vorliegenden Arbeit wird die isentrope Analyse auf einen historischen Datensatz der Tropengebiete des Atlantischen Ozeans angewendet. Die resultierende Verteilung der Wassermassen im Tiefenbereich des Zentralwassers wird in ozeanischen Karten dargestellt und mit bestehenden Vorstellungen der Zirkulation verglichen. Um die Gültigkeit der isentropen Analyse zu überprüfen, wird der Versuch einer Anwendung der Multiparameter-Analyse auf denselben historischen Datensatz unternommen.

DIE ZENTRALWASSERMASSEN DER OZEANE

Die Bezeichnung Zentralwasser für die Wassermasse oberhalb des Zwischenwassers hat ihren Ursprung im westlichen Nordatlantik, wo Iselin (1936) das Wasser der Sargassosee als Zentralatlantisches Wasser bezeichnete, im Gegensatz zum Küstenwasser auf dem Schelf und am Kontinentalabhang. Sverdrup erweiterte den Begriff auf alle drei Ozeane (Sverdrup *et al.*, 1942) und löste sich damit von den geographischen Bedingungen, die zu der Bezeichnung Zentralwasser geführt hatten. Seitdem ist der Begriff mit dem Tiefenbereich verbunden, der das Zwischenwasser von der winddurchmischten Deckschicht trennt und im TS-Diagramm den größten Bereich umfasst. Die Bezeichnungen sind nicht immer einheitlich. Wright und Worthington (1970) benutzen Iselins TS-Beziehung und weisen darauf hin, dass es sich bei Iselins Zentralatlantischem Wasser im wesentlichen um Sverdrups NAZW handelt, führen dann aber die Bezeichnung Westliches Nordatlantikwasser dafür ein. Gegen eine derartige rein geographische Benennung spricht die Beobachtung, dass Wassermassen mit ähnlich linearer TS-Beziehung, Herkunft und Verbreitungstiefe in allen Ozeanen angetroffen werden. Sverdrups Verwendung der Bezeichnung Zentralwasser drückt diese Gemeinsamkeit aus, so dass der Begriff

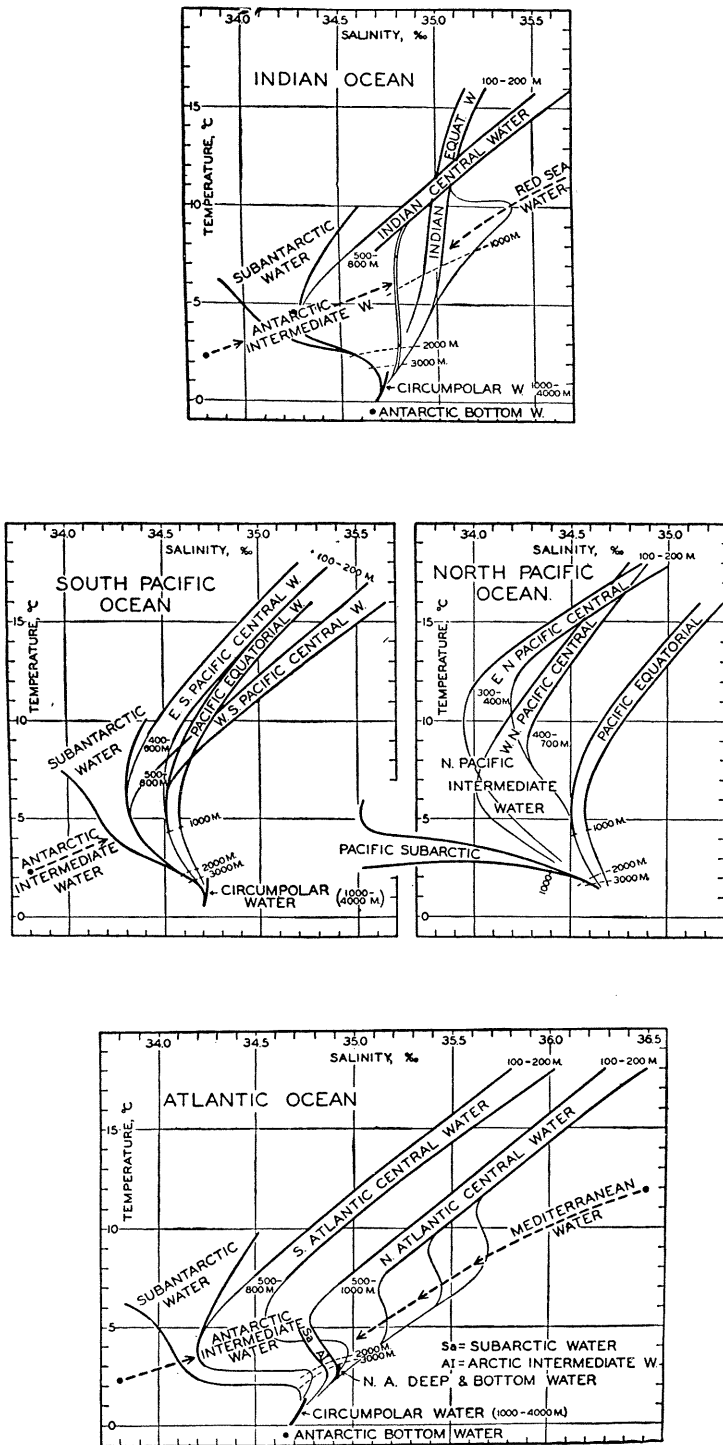


Abbildung 2
 TS-Diagramme der drei Ozeane (aus Sverdrup et al., 1942).
 TS-diagrams of the three oceans (from Sverdrup et al., 1942).
 Diagrammes TS des trois océans (d'après Sverdrup et al., 1942).

heute mehr enthält als nur geographische Einordnung. In der vorliegenden Untersuchung wird deshalb Sverdrups Nomenklatur verwendet.

Sverdrups zusammenfassende Darstellung der TS-Diagramme der Ozeane ist in Abbildung 2 wiedergegeben. Neben den sieben Zentralwassermassen (Nordatlantisches, Südatlantisches, Nordostpazifisches, Nordwestpazifisches, Südostpazifisches, Südwestpazifisches

und Indisches Zentralwasser) zeigt sie im Pazifischen und Indischen Ozean noch äquatoriale Wassermassen, die einen ähnlich grossen Bereich überdecken und als Produkt von Vermischungsvorgängen in der Wurzelregion der äquatorialen Gegenströme im Tiefenbereich der ozeanischen Sprungschicht, d.h. ohne Kontakt mit der Atmosphäre entstanden sind. Abbildung 3 zeigt Sverdrups Bild der geographischen Verteilung der Wassermassen in etwa 250 m Tiefe. Man erkennt, dass nur im Atlantischen Ozean die Zentralwassermassen beider Hemisphären unmittelbar zusammentreffen. Im Pazifischen und Indischen Ozean treffen sie in den Tropen auf Äquatorialwasser.

Das Entstehungsgebiet der Zentralwassermassen ist die subtropische Konvergenz. Über den Mechanismus der Entstehung einer kontinuierlich und relativ stark geschichteten Wassermasse entlang einer Front mit geringer meridionaler Ausdehnung ist wenig bekannt. Seit Iselin (1939) auf die Ähnlichkeit zwischen vertikalen TS-Diagrammen im tropischen Ozean und horizontalen TS-Diagrammen entlang meridionaler Schnitte durch den Nordatlantik hinwies, wird angenommen, dass Wasser aus der Frontalzone auf der seiner Dichte entsprechenden Dichtefläche absinkt. Die beobachteten starken jahreszeitlichen Schwankungen lassen darauf schliessen, dass die Dichte des absinkenden Wassers auch jahreszeitlich variiert. Zentralwasser unterschiedlicher Dichte würde demnach zu verschiedenen Zeiten des Jahres entstehen und sich auf der entsprechenden Dichtefläche in das vorhandene Zentralwasser einordnen können, während zu jeweils gegebenem Zeitpunkt das an der Front entstehende Wasser weitgehend konstante TS-Eigenschaften besitzt. Diese Vorstellung entspricht dem Konzept der Entstehung des sogenannten *mode water* auf der dem Äquator zugewandten Seite der subpolaren und subtropischen Konvergenzen. Als *mode water* wird seit Masuzawa (1969) das Wasser in Tiefenhorizonten bezeichnet, wo die Änderung der Temperatur mit der Tiefe ein Minimum aufweist. *Subantarctic Mode Water* (McCartney, 1977) ist im wesentlichen identisch mit Antarktischem Zwischenwasser. *Subtropical Mode Water* findet man im Nordatlantik bei 18°C in 100-300 m Tiefe (Worthington, 1959) und im Nordpazifik bei 17°C in derselben Tiefe (Masuzawa, 1969).

Man kann die Zentralwassermassen demnach auch damit beschreiben, dass sie den Tiefenbereich zwischen *Subtropical Mode Water* und *Subpolar Mode Water* einnehmen. Da *mode water* definitionsgemäss mit einem Minimum des vertikalen Temperaturgradienten zusammenfällt, fallen die Zentralwassermassen mit einer Schicht relativ starker Änderungen zusammen, die als die permanente oder ozeanische Sprungschicht bezeichnet wird. Sie können daher auch als die Wassermassen der ozeanischen Sprungschicht bezeichnet werden.

Abbildung 4 gibt eine schematische Zusammenfassung der Wassermassenverteilung in einem Meridionalchnitt durch einen hypothetischen Ozean mit symmetrisch zum Äquator liegenden Oberflächenkonvergenzen, an denen sich die Neubildung der Wassermassen bei verschiedener Dichte und mit ungleicher Stärke

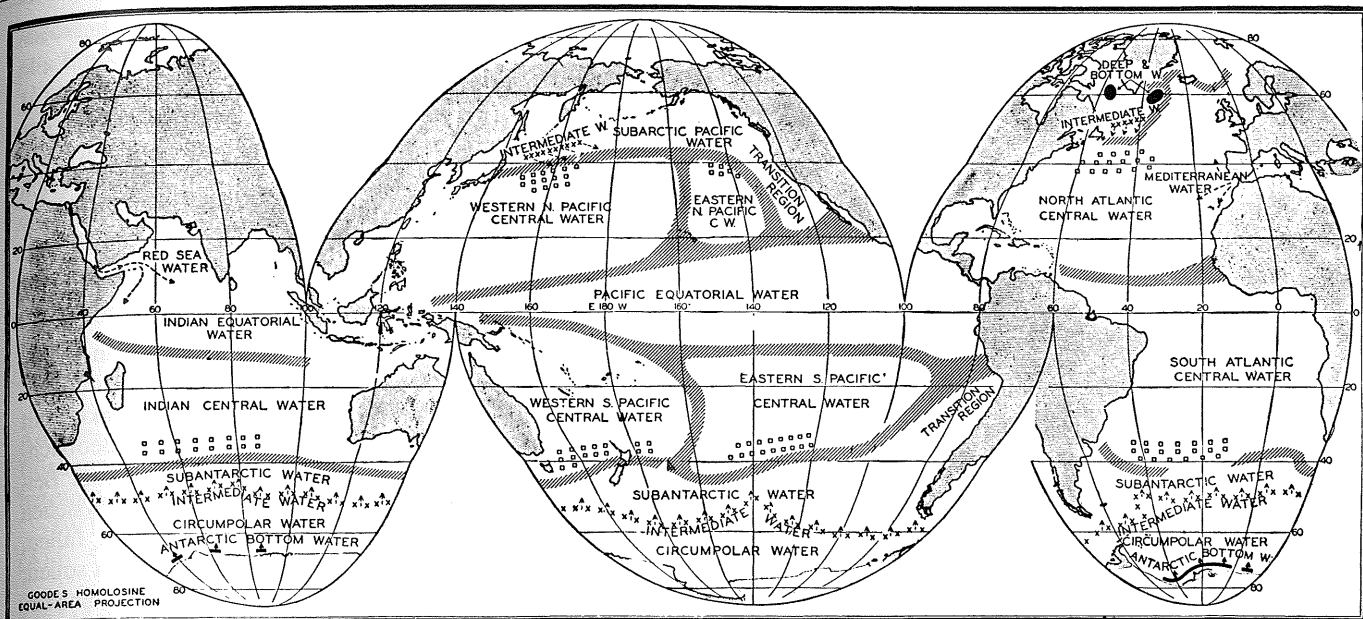


Abbildung 3

Verteilung der Wassermassen im Weltozean in etwa 250 m Tiefe. Kreuze bezeichnen die antarktische und arktische Konvergenz, das Entstehungsgebiet des Zwischenwassers. Quadrate bezeichnen die subtropische Konvergenz, das Entstehungsgebiet des Zentralwassers (aus Sverdrup et al., 1942).

The distribution of water masses at approximately 250 m depth in the world ocean. Crosses mark the Antarctic and Arctic convergences, respectively, the area of origin for intermediate water. Squares mark the subtropical convergences, the area of origin for central water (from Sverdrup et al., 1942).

Répartition des masses d'eau dans l'océan mondial à une profondeur voisine de 250 m. Les croix indiquent les convergences antarctique et arctique, zones de formation de l'eau intermédiaire. Les carrés indiquent les convergences subtropicales, zones de formation de l'eau centrale (d'après Sverdrup et al., 1952).

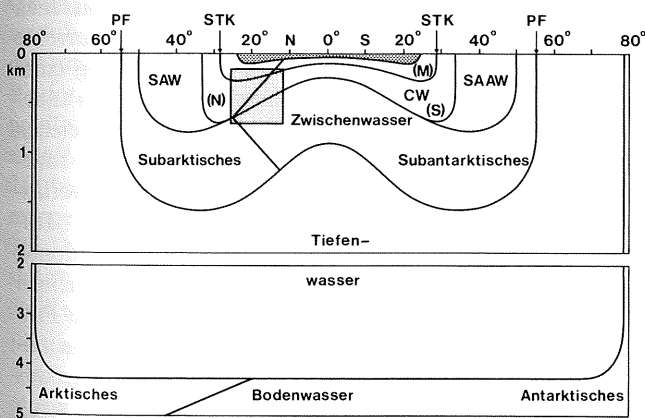


Abbildung 4

Schema der Wassermassen in einem ozeanischen Meridianschnitt. PF = Polarfront (subpolare Konvergenz); STK = Subtropische Konvergenz; Schraffiert: Deckschicht; SAAW = Subantarktisches Wasser; SAW = Subarktisches Wasser; CW = Zentralwasser (N = nördliches, S = Südliches); M = mode water (subtropical). Das graue Rechteck gibt das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit an.

Distribution of water masses in a meridional section (schematic). PF = polar front (or subpolar convergence); STK = subtropical convergence; shaded: surface layer; SAAW = subantarctic water; SAW = subarctic water; CW = central water (N = northern, S = southern); M = mode water (subtropical). The shaded rectangle indicates the investigation area for this study.

Schéma de la répartition des masses d'eau selon une section méridienne. PF = front polaire (en convergence subpolaire); STK = convergence subtropicale; en gris: couche superficielle; SAAW = eau subantartique; SAW = eau subarctique; CW = eau centrale (N = nord, S = sud); M = eau « mode » (subtropicale). Le rectangle gris situe la zone d'étude.

vollzieht, so dass die Grenze zwischen den Wassermassen beider Hemisphären geneigt ist und gegen den Äquator verschoben. Aus ihr wird erkenntlich, wie sich das hier untersuchte Gebiet in die allgemeine Verteilung einordnet. Die Grenze zwischen Tiefen- und Zwischenwasser verläuft bei etwa 3-4°C, die Grenze zwischen Zentral- und Zwischenwasser bei 8-10°C. Gelegentlich fasst man im Anschluss an Defant (1936, 1961) Boden-, Tiefen- und Zwischenwasser zur Stratosphäre und die übrigen Wassermassen zur Troposphäre des Ozeans zusammen. Wüst (1949) hat auf die Unzulänglichkeiten der Analogie mit der Atmosphäre hingewiesen und stattdessen Kaltwassersphäre und Warmwassersphäre vorgeschlagen. Letzteres hat sich weitgehend durchgesetzt, obwohl wiederauflebendes Interesse an der "Meteor"-Expedition von 1925-1927 und die Übersetzung zweier aus ihr hervorgegangener wichtiger Arbeiten (Defant, 1936; Wüst, 1935) ins Englische zu erneuter Verbreitung der ersten Begriffe führen (Emery, 1980). Die in dieser Arbeit untersuchten Wassermassen sind Teil der Warmwassersphäre (Troposphäre); im Untersuchungsgebiet bilden sie ihren unteren Teil.

BEOBACHTUNGSMATERIAL UND METHODEN

Die für die Untersuchung verwendeten Beobachtungen sind dem Archiv des ozeanographischen Weltzentrum A (im NODC Washington) entnommen. Sie wurden vom NODC im März 1980 auf Magnetbänder geschrieben und basieren auf allen zu jenem Zeitpunkt zugänglichen Stationen. Nur solche Stationen, die aus-

ser Beobachtungen der Temperatur und des Salzgehalts auch Beobachtungen von wenigstens einem der Nährstoffe Phosphat, Silikat und Nitrat enthalten, wurden ausgewählt. Insgesamt standen 2.032 derartige Stationen in 11 Zehngradfeldern für den Atlantischen Ozean zur Verfügung.

Für die Analyse der Wassermassen werden zwei Methoden verwendet. Die erste Methode beruht auf der Annahme, dass sich die Vermischung auf Flächen konstanter Dichte beschränkt. Da im Ozean Analyse auf Dichteflächen und isentrope Analyse nahezu identisch sind, wird sie im folgenden als isentrope Analyse bezeichnet. Bei der zweiten Methode handelt es sich um die in Tomczak (1981 a) beschriebene Multiparameter-Analyse.

In der folgenden Beschreibung der einzelnen Schritte der Datenbehandlung stehen T für Temperatur, S für Salzgehalt, Ph für Phosphat, Si für Silikat und Ni für Nitrat. Eine exaktere Schreibweise für die Nährstoffe, die heute allgemein üblich ist, wäre PO_4^- -P, SiO_3^+ -Si und NO_3^- -N. Sie werden hier nicht verwendet, weil ihre Benutzung bei dem hier behandelten historischen Datensatz eine Gleichartigkeit der Bestimmungsmethoden vortäuschen würde, die nicht gegeben ist. Die Schreibweisen Ph, Si und Ni sind kürzer und erfüllen für diese Untersuchung denselben Zweck. Für Ph wurde bei allen Stationen der Wert für anorganisches Phosphat benutzt, auch in den seltenen Fällen, wo zusätzlich Angaben für Gesamtphosphat vorlagen.

Die Schritte der Datenbehandlung waren die folgenden.

- 1) Zunächst wurden für Fünfgradfelder (in Gebieten niedriger Datendichte für Zehngradfelder) TS-Diagramme hergestellt. Sie bildeten die Grundlage für eine grobe Aufteilung in Gebiete, in denen die Zentral- oder Äquatorialwassermassen ohne Beimischungen aus anderen Wasserkörpern auftraten, und Vermischungszonen.
- 2) Die Gebiete unvermischter Wassermassen wurden herangezogen für eine lineare Näherung der TS-Beziehung im Dichtebereich der Wassermassen, wobei der Dichtebereich so weit nach oben und unten ausgedehnt wurde, wie es ohne bedeutende Abweichung der beobachteten TS-Beziehung von einer Geraden möglich war. Die Endpunkte des so definierten Geradenabschnitts ergaben eine erste Definition der Wassermassen in T und S.
- 3) Für dieselben Fünf- bzw. Zehngradfelder wurden TPh- und TSi-Diagramme hergestellt. Sie bestätigten im allgemeinen die mittels T und S vorgenommene Aufteilung des Gebiets nach Wassermassen, sind allerdings oft durch Stationen gestört, deren Daten von der allgemeinen Verteilung stark abweichen. Von der analogen Behandlung der Nitratbeobachtungen wurde abgesehen, weil sich die Zahl der Beobachtungen für statistische Behandlung als zu niedrig erwies.
- 4) Ausgehend von den Gebieten unvermischter Wassermassen wurde eine lineare Näherung der TPh- bzw. TSi-Beziehung für den vorher festgelegten Dichtebereich gesucht. War die Krümmung der beobachteten Beziehung für eine akzeptable Näherung zu gross, oder führte die Näherung bei niedrigen Dichtewerten zu

negativen Nährstoffgehalten, dann wurde der Dichtebereich verkleinert, bis die Näherung akzeptabel und alle Nährstoffwerte positiv waren. Die Definitionswerte für T und S wurden entsprechend korrigiert, d.h. aus der bereits bestimmten linearen TS-Näherung wurden die TS-Definitionswerte für den reduzierten Dichtebereich berechnet. Die endgültig verwendeten Dichtebereiche sind damit festgelegt als der grösstmögliche Dichtebereich, in dem T, S, Ph und Si alle positiv sind und eine gute lineare Korrelation miteinander aufweisen.

5) Die Kontrolle der Datenqualität geschah in mehreren Schritten. Vor der endgültigen Wassermassen-Analyse wurden alle Werte auf ihre Verträglichkeit mit der Definition der Wassermassen untersucht. Beobachtungen der Temperatur und des Salzgehalts zum Beispiel müssen im TS-Diagramm in den Bereich zwischen den TS-Definitionsgerten der Wassermassen fallen, wenn sie auf Vermischung zurückgeführt werden sollen; dasselbe gilt entsprechend für alle anderen Kombinationen der Variablen. Alle Beobachtungen, die diese Bedingung nicht erfüllen, wurden deshalb ausgesondert. Die Streuung der Beobachtungen, die aus der Ungenauigkeit der Messungen resultiert, wurde dabei berücksichtigt, indem der zugelassene Bereich beiderseits um einen festen Betrag erweitert wurde. Die jeweils zugelassenen Streuungen sind bei der Behandlung der einzelnen Ozeane angegeben, ebenso die Zahl der ausgesonderten Beobachtungen.

6) Der beschriebene Test ermöglicht die Erkennung fragwürdiger Daten, sofern sie aus den zugelassenen Bereichen fallen (Er sondert natürlich auch korrekte Daten aus, die — etwa infolge der Beimischung einer nicht als solcher erkannten Wassermasse oder aus anderen Gründen — nicht in den zugelassenen Bereichen liegen). Für die Erkennung fragwürdiger Daten innerhalb der zugelassenen Bereiche gibt es keine zuverlässige Methode. Aus den TS-, TPh- und TSi-Diagrammen geht aber hervor, dass einige Stationen um beträchtliche Beträge gegenüber der allgemeinen Beziehung verschoben sind, was auf methodische Probleme bei der Messung hinweist; andere Stationen zeigen Beziehungen mit entgegengesetzter Steigung, was auf Verwechslung der Proben hindeutet. Auch wenn einige Werte dieser Stationen in den prinzipiell zulässigen Bereich fallen, ist ihre Brauchbarkeit zweifelhaft. Um diese und ähnliche Fälle zu erfassen, wurden Stationen, deren Daten im untersuchten Dichtebereich von dem oben beschriebenen Test zu mehr als 50% zurückgewiesen wurden, insgesamt von der Analyse ausgeschlossen. Angaben über die Zahl der ausgesonderten Stationen finden sich ebenfalls bei der Behandlung der einzelnen Ozeane.

7) Die nach Anwendung der beschriebenen Tests nicht zurückgewiesenen Daten bilden die Grundlage für die eigentliche Wassermassen-Analyse. Auch bei ihnen besteht noch die Möglichkeit, dass Daten bei T, S, Ph und Si jeweils innerhalb der zugelassenen Bereiche liegen, die Kombination TSPH oder TSSI aber keine zugelassene Lösung der Multiparameter-Analyse ergibt. Diese Fälle sind erst nach Durchführung der Analyse erkennbar und müssen bei der Diskussion der Ergebnisse ausgeschieden werden, wobei die Gründe für ihr

Abbildung 5

TS-, TPh- und TSi-Diagramme für den tropischen Atlantischen Ozean. Die Geraden zeigen die Definitionskurven für SAZW und NAZW. Die Daten sind von 0-2°N, 35-40°W (0, Region 13) und von 15-20°N, 40-45°W (*, Region 3).

Diagrams of temperature against salinity, phosphate and silicate in the tropical Atlantic Ocean. The lines show definition curves of SACW and NACW. Data shown are from 0-2°N, 35-40°W (0, region 13) and from 15-20°N, 40-45°W (*, region 3).

Diagrammes de salinité, phosphate et silicate en fonction de la température dans l'Océan Atlantique tropical. Les lignes caractérisent les eaux SACW et NACW. Les données viennent de 0-2°N, 35-40°W (0, région 13) et de 15-20°N, 40-45°W (*, région 3).

Auftreten behandelt werden müssen. Als zugelassene Lösungen werden in dieser Arbeit alle Lösungen betrachtet, bei denen für die berechneten Anteile $[WT_1]$, ..., $[WT_4]$ der Mischungskomponenten WT_1 , ..., WT_4 (Abb. 5) gilt:

$$|[WT_1]| + |[WT_2]| + |[WT_3]| + |[WT_4]| \leq 140\%$$

Da sich die vier Anteile stets zu 100% ergänzen, drückt die Ungleichung für ihre Absolutbeträge eine Bedingung für die Bestimmungsungenauigkeit aus: Durch sie hervorgerufene Beträge dürfen den Betrag von 20% nicht überschreiten.

8) Da die Zahl der Beobachtungen je Fünfgradfeld für eine sinnvolle statistische Anwendung der Wassermassen-Analyse nicht ausreicht, wurde das Gebiet für die eigentliche Untersuchung neu unterteilt. Grundlage dafür bildete Phosphat, für das mehr Beobachtungen vorhanden sind als für Silikat. Die Elemente der endgültigen Aufteilung werden im folgenden als Regionen bezeichnet. Es wurden jeweils so viele Fünfgradfelder zusammengefasst, dass die Zahl der Phosphatbeobachtungen je Region in der Regel wenigstens 250 betrug. Dabei wurde darauf geachtet, dass zusammengefasste Fünfgradfelder ähnliche TS-, TPh- und TSi-Diagramme besitzen, damit die daraus abgeleitete statistische Wassermassenverteilung repräsentativ für die Region ist.

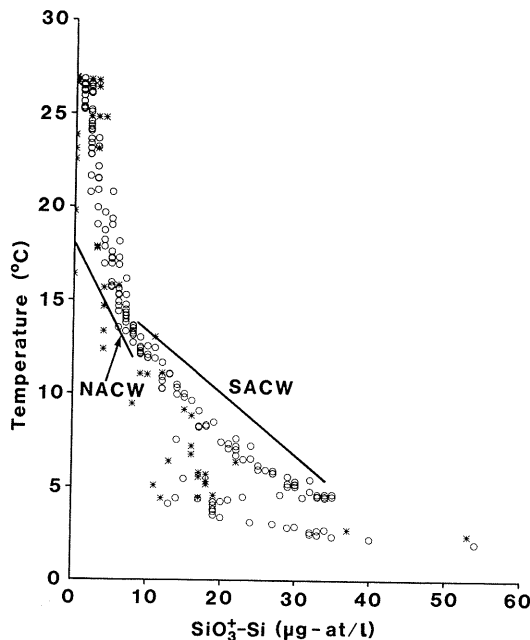
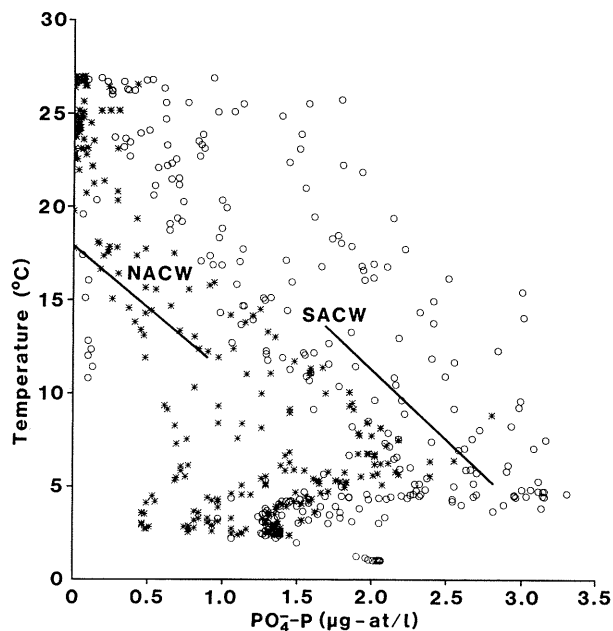
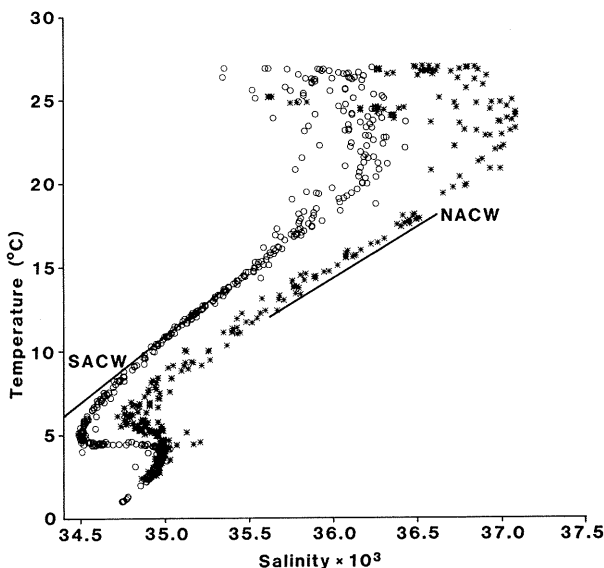
Bei der Beschreibung der Ergebnisse werden folgende Abkürzungen verwendet:

Sei WM eine Wassermasse, definiert durch beliebig gegebene TS-, TPh- und TSi-Beziehungen. Der betrachtete Dichtebereich sei in j Dichteklassen eingeteilt, und n_i sei die Zahl der Beobachtungen in Dichteklasse i . Dann ist $[WM]$ der relative Anteil von WM an einem Wasserkörper, welcher durch einen einzelnen Beobachtungssatz (T,S,Ph,Si) repräsentiert ist. $[WM]_i^{\sigma}$ ist der mittlere Anteil von WM in einer Region, berechnet aus allen n_i Beobachtungen für die Dichteklasse i , und $[WM]^*$ ist der mittlere Anteil von WM in einer Region, gemittelt über alle Dichteklassen:

$$[WM]_i^{\sigma} = (\sum_k [WM]_k) / n_i, \quad k = 1, 2, \dots, n_i$$

$$[WM]^* = (\sum_i [WM]_i^{\sigma} n_i) / (\sum_i n_i), \quad i = 1, 2, \dots, j.$$

Indices "mult" oder "is" geben an, ob die jeweilige Grösse durch Multiparameter-Analyse bestimmt worden ist oder durch isentrope Analyse. $\Delta[WM]$ bezeichnet die Differenz zwischen beiden Lösungen:



$$\Delta[\text{WM}] = [\text{WM}]_{\text{mult}} - [\text{WM}]_{\text{is}},$$

und entsprechend für $\Delta[\text{WM}]_i^{\sigma}$. Schliesslich gilt

$$\Delta[\text{WM}]^* = (\sum_i([\text{WM}]_{i \text{ mult}}^{\sigma} - [\text{WM}]_{i \text{ is}}^{\sigma} n_i) / (\sum_i n_i),$$

$i = 1, 2, \dots, j$.

Die Bezeichnung verschiedener Tiefenhorizonte folgt durchgehend, auch wenn die vertikale Koordinate durch die Dichte ausgedrückt wird, der üblichen Konvention für Raumkoordinaten. Zum Beispiel wird die Grenze eines Dichtebereichs, die der Meeresoberfläche am nächsten ist, als die obere Grenze des Dichtebereichs bezeichnet, obwohl die Dichte dort die niedrigsten Werte annimmt.

Als Abkürzungen für die behandelten Wassermassen werden verwendet: SAZW oder SACW für Südatlantisches Zentralwasser, NAZW oder NACW für Nordatlantisches Zentralwasser.

ZENTRALWASSER IM ATLANTISCHEN OZEAN

Definition der Wassermassen

Die Definitionswerte der vier Parameter T, S, Ph und Si für Nordatlantisches Zentralwasser (NAZW) und Südatlantisches Zentralwasser (SAZW) sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Der von der Untersuchung erfasste Dichtebereich ist damit auf $26.542 \leq \sigma_t \leq 27.100$ festgelegt. Ausgangspunkt der Festlegung sind TS-Diagramme für NAZW und SAZW, deren geradliniger Teil mindestens den Temperaturbereich von 8 bis 18°C umfasst (vergl. Abb. 2). Die obere Grenze des verwendbaren Dichtebereichs wird durch Ph bestimmt, dessen Konzentration im NAZW bei Temperaturen von 18°C und mehr sehr niedrig werden. Die untere Grenze wird durch einen deutlichen Knick in der TSi-Beziehung im NAZW bei etwa 12°C festgelegt. Der damit definierte Dichtebereich wird von SAZW in den vorliegenden Beobachtungen nur teilweise abgedeckt; im unteren Ende weicht die TS-Kurve durch zunehmenden Einfluss von Tiefenwasser von der linearen Beziehung ab. Ohne diesen Einfluss muss SAZW dort in Antarktisches Zwischenwasser übergehen, für das Werte von 2.2°C und 33.8‰ charakteristisch sind. Die beobachtete TS-Kurve wurde deshalb für SAZW zu diesem Punkt hin verlängert, und der in Tabelle 1 angegebene Wert für $\sigma_t = 27.1$ daraus bestimmt.

Abbildung 5 vergleicht die Definitionen für SAZW und NAZW mit Daten vom südlichen und nördlichen Rand des Untersuchungsgebietes (Diese Gebiete sind nicht vollständig "reine" SAZW- bzw. NAZW-Gebiete; isentrope Analyse ergibt jeweils etwa 30% Beimischung der anderen Wassermasse. Sie dienen hier zur Illustration der Probleme der Datenqualität). Die TS-Definitionen stimmen mit Definitionen anderer Autoren für die südlich und nördlich anschliessenden Seegebiete überein. Für das Gebiet nördlich von 20°N gibt Kuhn (1967) dieselbe Beziehung für NAZW, transformiert in ein

σ_t -Diagramm. Für das Gebiet südlich des Untersuchungsgebietes bestätigt der GATE-Atlas (Düing *et al.*, 1980; GATE = *Global Atmospheric Research Program (GARP) Atlantic Tropical Experiment*) die Beziehung des SAZW. Beide Beziehungen entsprechen den beiden Maxima der volumetrischen Verteilung von Wright und Worthington (1970).

Die TPh-Definitionen sind mit grosser Unsicherheit behaftet. Mit Sicherheit lässt sich eigentlich nur sagen, dass SAZW einen höheren Phosphatgehalt aufweist als NAZW. Die extreme Streuung der Daten schliesst eine sinnvolle Anwendung der Multiparameter-Analyse praktisch aus. Als Ursache für die Streuung müssen methodische Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Phosphatkonzentration angenommen werden. Verzögerungen der Messung nach der Probennahme oder mangelhafte Vorkehrungen bei der Aufbewahrung der Proben führen zu wesentlich zu hohen Werten, so dass anzunehmen ist, dass die wahren Ph-Konzentrationen jeweils in der Nähe des linken Randes der Datenwolke für NAZW und SAZW liegen. Neuere Daten, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass die methodischen Schwierigkeiten überwunden sind, sollten ebenfalls nur am linken Rand zu finden sein. Um dies zu überprüfen, wurden in den Daten der Abbildung 5 nacheinander alle Beobachtungen ausgeschlossen, die vor 1960, 1965 und 1970 gewonnen wurden. Der Anteil von Stationen mit hohen Ph-Werten mimmt dadurch sukzessive ab, und die verbleibenden Stationen rücken an die Ph-Definition der Tabelle 1 näher heran. Die Zahl der verbleibenden Stationen ist aber so gering — im nördlichen Gebiet gibt es nach 1960 zwei Stationen, nach 1965 keine Station; im südlichen Gebiet bleibt nach 1965 eine Station übrig —, dass sie für eine Verbesserung der Ph-Definition nicht ausreichen.

Das Problem der TSi-Definition ist weniger die Datenqualität als die Nichtlinearität der TSi-Kurve. In den östlichen Regionen, die NAZW bzw. SAZW nahezu ohne fremde Beimischungen enthalten, ist die Zahl der Si-Beobachtungen niedrig und die Streuung gross; eine lineare TSi-Beziehung erscheint dort gerechtfertigt (Tomczak, 1981 *b*). Im Westen zeigen die TSi-Kurven einen gekrümmten Verlauf (Metcalf, 1969). Mit der Tiefe zunehmende Remineralisierung kann als Ursache nicht ausgeschlossen werden, sollte aber in Tiefen von weniger als 500 m nicht von Bedeutung sein. Eine

Tabelle 1

Definitionswerte der Zentralwassermassen im Atlantischen Ozean, Dichtebereich 26.542-27.100 σ_t .

Definition values for Central Water in the Atlantic Ocean, density range 26.542-27.1 σ_t .

Caractéristiques de l'eau centrale atlantique pour des densités comprises entre les valeurs 26,542 et 27,100 σ_t .

	σ_t	T (°C)	S (‰)	Ph ($\mu\text{g-at/l}$)	Si ($\mu\text{g-at/l}$)
NAZW oben	26.542	18.00	36.636	0.00	00.0
unten	27.100	12.00	35.635	0.90	07.8
SAZW Oben	26.542	13.74	35.365	1.685	08.5
unten	27.100	05.30	34.291	2.80	34.0

Die aufgeführten Werte sind teilweise Ergebnis linearer Interpolation. Die Bestimmungsgenauigkeit der Geradenendpunkte ist bei allen Parametern eine Dezimale geringer als in der Tabelle.