

B. Physikalische Methoden

(G. SIEDLER)

Die Ergebnisse physikalischer Messungen im Meere spielen bei vielen Problemen der meeresbiologischen Forschung eine wichtige Rolle. Im allgemeinen wird der Biologe jedoch nicht gezwungen sein, diese physikalischen Messungen selbst durchzuführen. Um aber die Möglichkeit bestimmter Messungen und die Grenzen der Aussagekraft der erhaltenen Ergebnisse beurteilen zu können, sollte der Meeresbiologe die Prinzipien der für ihn wichtigen physikalischen Meßmethoden kennen. Die folgende Darstellung versucht daher, eine Einführung in derartige Meßmethoden zu geben, wobei mit Ausnahme der Meßverfahren, die gelegentlich auch vom Meeresbiologen selbst benutzt werden, das Prinzip, nicht aber die praktische Durchführung der Messung erläutert wird. Im Rahmen des vorliegenden Buches ist eine weitergehende Beschreibung nicht möglich. Ausführlichere Angaben sind der im Anhang genannten Literatur und den Gebrauchsanleitungen der benutzten Meßinstrumente zu entnehmen. Man findet dort auch wichtige Hinweise auf die Protokollführung bei den entsprechenden Messungen.

1. Wasserschöpfer

Zur Untersuchung der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Meerwassers und des Gehalts an schwebenden organischen Bestandteilen benötigt man, sofern kein in situ messendes Verfahren verfügbar ist, Wasserproben aus bestimmten Tiefen. Im allgemeinen gewinnt man diese Proben bei gestopptem Schiff mit Hilfe spezieller Wasserschöpfer in den wie folgt international festgelegten „Standardtiefen“: 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1750, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000 m.

Wasser aus unmittelbarer Nähe der Meeresoberfläche erhält man sehr einfach durch Schöpfemer (Pütz), wobei allerdings besonders darauf geachtet werden muß, daß die Probenentnahme an einer Stelle erfolgt, die nicht den Verunreinigungen vom Schiff ausgesetzt ist.

Proben aus der Tiefe gewinnt man meistens mit Serienwasserschöpfern, die übereinander an einem Draht hängend in geöffnetem Zustand in die Tiefe gebracht werden und deren Schließmechanismus durch ein am Draht hinabgleitendes Fallgewicht, durch Propellerbewegungen beim Beginn des Hebens und durch den hydrostatischen Druck betätigt wird. Als Schöpfermaterial verwendet man im allgemeinen Messing oder Kunststoffe, für bakteriologische Untersuchungen auch Glas, Gummi, Neopren oder Platin. Es sind sowohl Hahn- als auch Klappventile in Gebrauch.

Der in der Ozeanographie meistbenutzte Wasserschöpfer, nämlich der Kippwasserschöpfer nach NANSEN (Abb. 4), soll hier etwas ausführlicher beschrieben werden. Der Schöpfer besteht aus einem zylindrischen Gefäß mit 750 bis 1250 cm³ Fassungsvermögen, an dem ein Rahmen für Kippthermometer (siehe I. B. 3, S. 37)

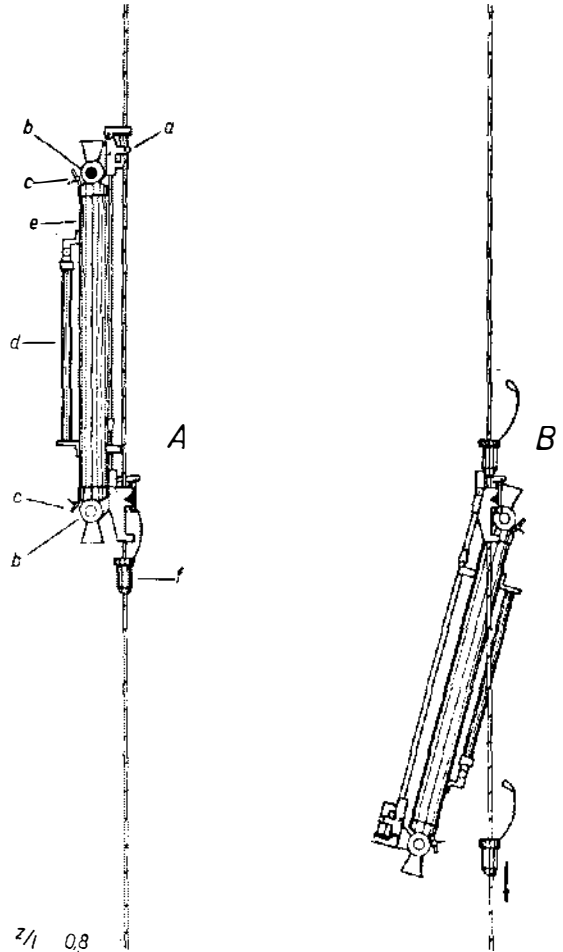


Abb. 4.
Kippwasserschöpfer nach NANSEN vor (A) und nach (B) dem Kippen. *a* Auslösvorrichtung, *b* Hahnventil zur Füllung, *c* Hahnventil zur Leerung, *d* Thermometerrahmen, *e* Schöpfgefäß, *f* Fallgewicht

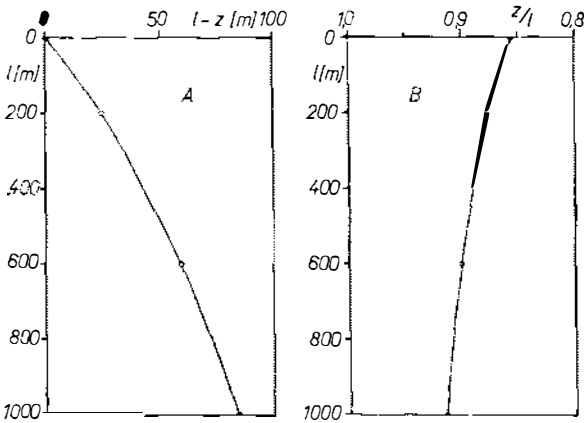


Abb. 5.
Diagramme zur Tiefenkorrektur durch Bestimmung der Differenzen $l-z$ (A) und der Quotienten z/l (B)

befestigt ist. Das Schöpfgefäß ist am oberen und unteren Ende mit Hahnventilen versehen. Das Instrument wird mit einer Klemmvorrichtung am Draht einer hydrographischen Winde befestigt, wobei die Auslösevorrichtung den Schöpfer am oberen Ende hält. Nach Erreichen der gewünschten Tiefe trifft ein Fallgewicht, das man am Draht hinabgleiten läßt, auf die Auslösevorrichtung. Die obere Befestigung und die Halterung für ein vorher unter dem Schöpfer angebrachtes weiteres Fallgewicht werden dadurch gelöst. Der Schöpfer kippt um etwa 180° , gleichzeitig werden die Hahnventile geschlossen und arretiert. Das freiwerdende untere Fallgewicht gleitet am Draht hinab, um in gleicher Weise den nächsten Schöpfer der Serie zu schließen. Die Wasserprobe kann dann abgeschlossen an Bord gehievt werden.

2. Tiefenbestimmung

Jede Probenentnahme oder in-situ-Messung im Meere wird begleitet von einer Bestimmung der Tiefe bzw. des Tiefenbereichs der Meßposition und meist auch der Tiefe des Meeresbodens. Für diese Tiefenbestimmungen werden verschiedene physikalische Methoden benutzt.

a) Drahtlängenmessung

Aus der Länge l des ausgefierten Drahtes oder Kabels, an dem das Gerät hängt, läßt sich bei geradem Draht und bekanntem Drahtwinkel α gegenüber der Vertikalen die Meßtiefe z bestimmen:

$$z = l \cdot \cos \alpha$$

Bei einer in verschiedenen Tiefen unterschiedlichen Drahtneigung muß die Tiefe für einige Punkte über eine Druckmessung (siehe nächsten Abschnitt) bestimmt werden. Die Korrektur der Tiefenangaben erfolgt dann über eines der beiden in Abbildung 5 gezeigten Diagramme.

b) Druckmessung

Der hydrostatische Druck ist bei konstanter Dichte des Seewassers in guter Näherung proportional der Tiefe. Im Rahmen einer Genauigkeit von 1 bis 3% vom Meßwert gilt, daß der Druck in Dezibar numerisch gleich der Tiefe in Metern ist. Für genauere Messungen muß die jeweilige Dichteverteilung berücksichtigt werden. Man unterscheidet zweckmäßig Einzelmessungen mit Wasserschöpfern und kontinuierliche Messungen:

Thermometrische Druckmessung: Mit zwei Tiefseeunkippthermometern (siehe I. B. 3, S. 37), von denen eines druckgeschützt und eines dem Wasserdruck ausgesetzt ist, wird in einer festen Tiefe die Temperatur gemessen. Das ungeschützte Instrument zeigt als Folge der Kompression des Thermometersystems eine höhere Temperatur als das geschützte Thermometer an. Im allgemeinen erhält man eine Erhöhung von ca. $0,01^\circ\text{C}$ pro Dezibar.

Aus der korrigierten Temperaturdifferenz ΔT der beiden Thermometer und dem Druckkoeffizienten $Q = g \frac{\Delta T}{P - P_0}$ (g = Schwerebeschleunigung, P bzw. P_0 = Druck in situ bzw. an der Oberfläche) erhält man mit der mittleren Dichte ρ_m die Beobachtungstiefe z :

$$z = \frac{\Delta T}{Q \cdot \rho_m}$$

Das Verfahren ist sehr genau, liefert jedoch nur Einzelmessungen in bestimmten Tiefenhorizonten.

Kontinuierliche Druckmessung: Für kontinuierliche Tiefenmessungen mit sofortiger Anzeige oder Registrierung auf elektrischen Schreibern werden Meßelemente verwendet, bei denen die mechanische Verformung speziell geformter Metallflächen unter Druckeinfluß eine Anzeige liefert. Derartige Druckaufnehmer werden eingesetzt, um bei gestopptem Schiff die Tiefe von vertikal bewegten Geräten zu jedem Zeitpunkt zu messen, um die Tiefe von geschleppten Geräten zu registrieren und gegebenenfalls durch Änderung der Drahtlänge oder der Schiffsgeschwindigkeit in passender Weise einzustellen und um bei Hochseepegeln im tiefen Ozean mit am Meeresboden befindlichen Instrumenten die durch Gezeitenwellen hervorgerufenen Druckschwankungen zu registrieren. Für den zuletzt genannten Zweck finden daneben auch Meßgeräte Verwendung, die statt der Verbiegung von Metallflächen die Volumenänderung eines Luftpolsters zur Druckmessung heranziehen. Die wichtigsten Druckaufnehmer sind das Bourdonrohr, das Wellrohr und die Membrandose.

c) Schallaufzeitmessung

Ist die Schallgeschwindigkeit in einem bestimmten Seegebiet bekannt, so läßt sich aus der Laufzeit eines Schallimpulses im Wasser die durchlaufene Strecke berechnen. Man kann eine derartige Zeitmessung dazu benutzen, um von einem

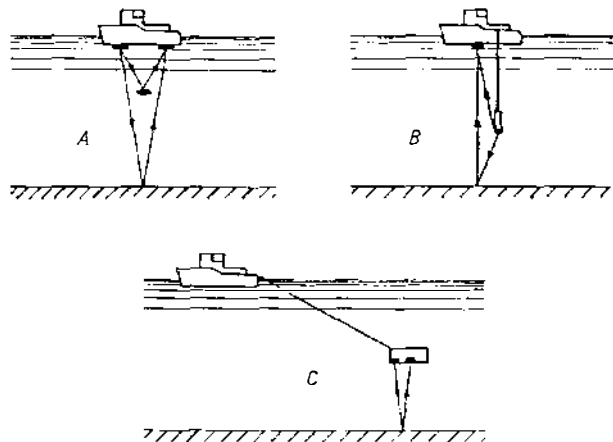


Abb. 6.
Anwendungen der Schallaufzeitmessung: Echolot und Fischlupe (A), Pinger (B) und Netzsonde (C)

Schiff aus die Tiefe des Meeresbodens festzustellen oder die Tiefe eines Meßgerätes zu bestimmen (Abb. 6 A), um den Bodenabstand eines Gerätes, z. B. einer Kamera, aus der Zeitdifferenz zwischen direktem und reflektiertem Strahl zu erhalten (Abb. 6 B) oder um die Tiefe eines Schleppgerätes zu kontrollieren (Abb. 6 C). Es werden meist magnetostriktive Schwinger zum Aussenden und Empfangen der im Hörfrequenzbereich oder im Ultraschallgebiet liegenden Signale eingesetzt.

3. Temperaturbestimmung

Die Temperatur des Meerwassers in den verschiedenen Tiefenbereichen eines Meeresgebietes wird im allgemeinen in situ mit Berührungsthermometern verschiedener Ausführungsformen bestimmt. Eine Ausnahme bilden die von tieffliegenden Flugzeugen aus zur Oberflächen-temperaturmessung herangezogenen Strahlungsthermometer. Im folgenden sollen die wichtigsten Verfahren bei der Berührungsmessung angegeben werden. Es werden sowohl Flüssigkeitsthermometer als auch elektrische Thermometer und gelegentlich auch Bimetallthermometer benutzt.

a) Flüssigkeitsthermometer

Quecksilberthermometer: Für Oberflächen-temperaturbestimmungen verwendet man normale Quecksilberthermometer mit $\frac{1}{5}$ oder $\frac{1}{10}$ °C-Teilung. Die Messung wird in der mit dem Schöpfeimer oder einem Isolierwasserschöpfer erhaltenen Probe durchgeführt. Zur Ermittlung der Temperatur in ausgewählten Tiefen des Meeres werden Kippthermometer (Abb. 7) nach NEGRETTI und ZAMBRA bzw. RICHTER und NANSEN eingesetzt, die an geeigneten Wasserschöpfern (siehe Abschnitt 1, S. 33) angebracht werden. Nachdem der Wasserschöpfer in die festgesetzten Tiefen gebracht wurde, wird nach einer Anpassungszeit von 5 bis 10 Minuten durch ein am Draht hinableitendes Fallgewicht eine Arretierungsvorrichtung gelöst und damit das Thermometer umgekippt und gleichzeitig der Schöpfer geschlossen. Beim Kippen des Thermometers reißt der Quecksilberfaden des Hauptthermometers bei der Abreißstelle am toten Arm der Kapillare ab und läuft nach unten ab. Das bei eventueller späterer Erwärmung von oben nachlaufende Quecksilber wird in der Auffangschleife zurückgehalten. Nach einer Anpassungszeit des Thermometersystems an Bord werden Haupt- und Nebenthermometer mit einer Lupe abgelesen. Im Anschluß an eine Skalenkorrektur muß der vom Hauptthermometer angezeigte Wert unter Berücksichtigung der Temperatur zur Zeit der Ablesung, die durch das Nebenthermometer gegeben ist, korrigiert werden, um Volumenänderungen des abgerissenen Quecksilbers infolge der veränderten Umgebungstemperatur auszugleichen.

Es gilt mit:

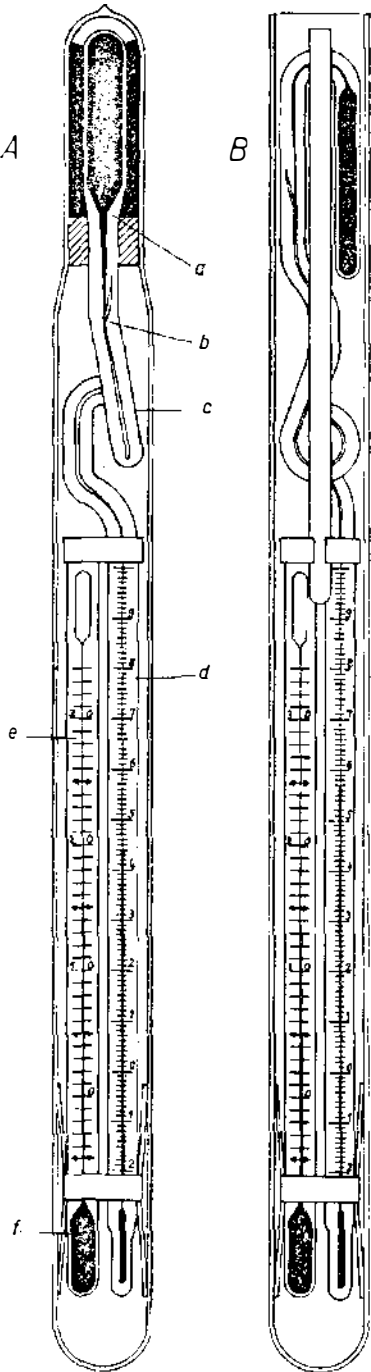
T_g = Temperaturanzeige des Hauptthermometers, skalenkorrigiert

t_g = Temperaturanzeige des Nebenthermometers, skalenkorrigiert

K = Wärmeausdehnungskoeffizient des Thermometersystems

V_0 = Hg-Volumen unter der 0 °C-Marke (in äquivalenten °C)

$$T_w = T_g + C_g \quad \text{mit} \quad C_g = \frac{(T_g + V_0)(T_g - t_g)}{K - 100}$$



Nach Durchführung aller Korrekturen läßt sich optimal eine Meßgenauigkeit von $\Delta T = \pm 0,01^\circ\text{C}$ erreichen.

Für das ungeschützte Thermometer (siehe Abschnitt 2, S. 34) gilt mit:

T_u = Temperaturanzeige des Hauptthermometers, skalenkorrigiert

t_u = Temperaturanzeige des Nebenthermometers, skalenkorrigiert

T_{wa} = Temperaturanzeige in situ

$$T_{wa} = T_u + C_u \text{ mit } C_u = \frac{(T_g + V_o)(T_g - t_g)}{K - 100}$$

Bathythermograph: Zur kontinuierlichen Registrierung der Temperatur in Abhängigkeit von der Tiefe mit geringer Genauigkeit bis zu Tiefen von 270 m findet der Bathythermograph nach SPILHAUS Verwendung (Abb. 8). Ein Wellrohr bewegt druckabhängig eine berußte oder goldbeschichtete Glasplatte, auf der ein durch die Temperatur gesteuerter Schreibstift eine Spur einkratzt. Zur Temperaturmessung wird eine organische Flüssigkeit benutzt, die sich in dem spiralförmigen abgeschlossenen Thermometerrohr bei Erwärmung auszudehnen sucht und dabei eine Druckerhöhung hervorruft. Das am Thermometerrohr angelegte Bourdonrohr reagiert auf diese Drucksteigerung und zeigt damit die Temperaturzunahme an. Wesentliche Vorteile des Instruments sind sein einfacher, robuster Aufbau und die Einsetzbarkeit nicht nur bei gestoppten, sondern auch bei fahrendem Schiff.



Abb. 7. Tiefsee-Umkippthermometer nach dem Kippen in geschützter (A) und ungeschützter (B) Ausführung. a, f Quecksilbergefäß, b Abreißstelle, c Auffangschleife, d Skala des Hauptthermometers, e Skala des Nebenthermometers



Abb. 8. Bathythermograph. a Wellrohr zur Druckmessung, b Schreibplatte, c Schreibstift, d Bourdonrohr, e Thermometerkapillare

b) Elektrische Thermometer

Metallwiderstandsthermometer: Metalle haben die Eigenschaft, ihren elektrischen Widerstand bei Erwärmung zu erhöhen. Für Meßzwecke verwendet man meist Platin, gelegentlich bei geringeren Genauigkeitsansprüchen auch Nickel. Platinthermometer werden vor allem dort eingesetzt, wo eine hohe Meßgenauigkeit und die Austauschbarkeit der Fühler gewährleistet sein soll. Die relative Änderung des elektrischen Widerstandes ist nahezu konstant und beträgt etwa 0,4% pro °C. Die optimal erreichbaren Genauigkeiten bei Messungen auf Sec liegen bei $\Delta T \approx \pm 0,01$ °C. Platinwiderstandsthermometer werden meist in der Wheatstoneschen Brückenschaltung unter Benutzung eines Mehrleiterkabels benutzt.

Thermistoren: Gewisse Halbleiter besitzen die Eigenschaft, auf eine Erwärmung mit einer kräftigen Widerstandsabnahme zu reagieren, die sich durch ein Exponentialgesetz annähern läßt. Diese „Thermistoren“, die auch als „NTC-Widerstände“ oder „Heißleiter“ bezeichnet werden, haben den Vorteil, eine sehr große Empfindlichkeit von etwa 3 bis 6% pro °C (bei 20 °C) aufzuweisen. Damit wird die elektrische Messung gegenüber Platinthermometern vereinfacht. Allerdings wirken die stark nichtlineare Kennlinie und Drifterscheinungen durch Alterungsprozesse als Nachteil. Auch Thermistoren werden häufig in einer Wheatstonebrücke betrieben, z. B. bei Registrierthermometern zur Oberflächenwassertemperaturmessung auf fahrenden Schiffen, bei verankerbaren automatisch registrierenden Thermographen und bei Temperaturvertikalsonden zur einmaligen Benutzung von fahrenden Schiffen (Expendable BT). Zur fortlaufenden Aufnahme der gesamten Wassertemperaturschichtung in der Oberflächennähe des Meeres sind zwei Meßsysteme mit Thermistoren entwickelt worden. Bei der Thermistorkette nach RICHARDSON und HUBBARD wird eine schwere flossenbeschwerte Kette mit 23 Thermistoren und einem Bourdonrohrdruckmesser zur Tiefenkontrolle vom fahrenden Schiff geschleppt. Die Thermistoren werden in wiederholten Zyklen abgetastet, und an Bord wird durch ein spezielles Wandlersystem direkt eine Registrierung der Isothermen gewonnen. Ein weniger aufwendiges System stellt der „Delphin“ nach JOSEPH und WEIDEMANN dar, bei dem ein stromlinienförmiges Meßgerät automatisch hinter dem fahrenden Schiff auf- und niedergesteuert wird. Auch hier gelangt man zu einer direkten Registrierung der Isothermen.

4. Salzgehaltsbestimmungen mit physikalischen Methoden

Der nach der Definition von FORCH, KNUDSEN und SÖRENSEN festgelegte Salzgehalt (vgl. I. A, S. 13) läßt sich mit physikalischen Methoden aus verschiedenen Größen, deren Zusammenhang mit dem Salzgehalt nach empirischen Daten bekannt ist, indirekt bestimmen. Der Salzgehalt kann in der Form der folgenden Funktionen angegeben werden:

$$S = f_1 (q, T, P_0)$$

$$S = f_2 (n, T, P_0)$$

$$S = f_3 (L, T, P)$$

$$S = f_4 (Cl)$$

$$S = f_5 (v, T, P)$$

Dabei sind:

S = Dichte, T = Temperatur, P = Druck (P_0 = Atmosphärendruck), n = Brechungsindex, L = elektrische Leitfähigkeit, v = Schallgeschwindigkeit, Cl = Chloridgehalt, ρ = Dichte.

Die Funktionen f_1 bis f_4 werden zur Salzgehaltsbestimmung herangezogen.

a) Salzgehaltsbestimmung mit dem Aräometer

Entsprechend der obengenannten Funktion f_4 läßt sich aus der Dichte des Meerwassers bei bekannter Temperatur der Salzgehalt berechnen. Zur Dichtemessung werden dabei Aräometer in Form geeichter Schwimmkörper aus Glas benutzt. Man verwendet zwei Typen, nämlich Stengelaräometer (Hydrometer) und Gewichtsaräometer.

Beim Gewichtsaräometer wird durch Auflegen von Gewichten dafür gesorgt, daß der Schwimmkörper bis zu einer festen Marke eintaucht. Die Größe der hinzugefügten Gewichte ist ein Maß für die Dichte der Seewasserprobe. Beim häufiger verwendeten Stengelaräometer (Abb. 9) enthält der Schwimmkörper eine Skala, die direkt in Einheiten der Dichte geeicht ist. Die Wasserprobe wird in einen Standardzylinder eingefüllt, man läßt sie die Temperatur der Umgebung annehmen und setzt das Aräometer ein. Nach dem freien Einspielen des Schwimmkörpers wird der Dichtewert von unten durch das Wasser blickend dort abgelesen, wo der Spindelstock durch die Wasseroberfläche stößt. Der abgelesene Wert wird auf die Dichte bei $17,5^\circ\text{C}$ umgerechnet und daraus der Salzgehalt aus den hydrographischen Tabellen von KNUDSEN ermittelt.

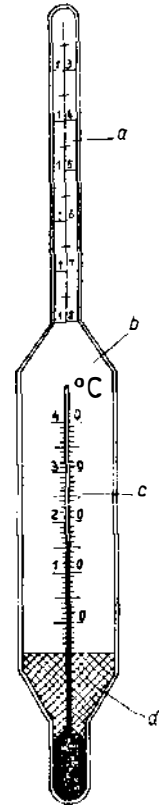


Abb. 9. Stengelaräometer zur Salzgehaltsbestimmung. a Dichteskala bezogen auf $\sigma = (\rho - 1) \cdot 10^3$, b Auftriebskörper, c Thermometer, d Metallgewicht

Die optimal erreichbare Genauigkeit beträgt $\Delta S \approx \pm 0,05\text{‰}$, dazu muß der Temperaturfehler kleiner als $\Delta T = \pm 0,1^\circ\text{C}$ sein. Die Genauigkeit des Verfahrens ist weit schlechter, wenn die Messungen an Bord eines Schiffes ausgeführt werden.

Für Messungen mit höherer Genauigkeit lassen sich das Verfahren nach STOTT, bei dem durch Erhöhung der Temperatur der Seewasserprobe ein Schwimmer zum Schweben gebracht wird, oder das Verfahren nach COX, bei dem das Schweben durch Erhöhung des Luftdrucks über der Probe erreicht wird, einsetzen.

b) Salzgehaltsbestimmung mit dem Refraktometer

Es ist möglich, durch Messung des Brechungsindex bei konstanter Temperatur entsprechend der oben angegebenen Funktion f_2 den Salzgehalt zu ermitteln. Der Brechungsindex des Seewassers nimmt mit wachsendem Salzgehalt zu, da zusätzliche Ionenhydrate die Dielektrizitätskonstante des Wassers erhöhen. Die Zunahme pro $\Delta S = 0,10/_{00}$ beträgt $\Delta n \approx 2 \cdot 10^{-5}$. Eine Temperaturabnahme von $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ erhöht den Brechungsindex um etwa den gleichen Betrag. Zur praktischen Messung verwendet man ein Eintauchrefraktometer nach PULFRICHI, bei dem der Grenzwinkel der Totalreflexion beim Auftreffen eines monochromatischen Lichtbündels auf die Grenzfläche zwischen Seewasser und optisch dichteren Glas bestimmt wird. Für diesen Grenzwinkel α_g (gegen das Einfallslot) der Totalreflexion gilt:

$$\sin \alpha_g = \frac{n_w}{n_G}$$

Dabei sind:

n_w = Brechungsindex des Seewassers

n_G = Brechungsindex des Glases

Die Meßanordnung zeigt Abbildung 10. Ein Meßprisma taucht in eine seewassergefüllte Durchlaufzelle, die sich ihrerseits im Wasserbad eines Thermostaten befindet. Über einen Spiegel wird das Prisma von unten mit einem monochromatischen Lichtbündel beleuchtet. Strahlen mit $\alpha < \alpha_g$ treten in das Prisma ein, Strahlen mit $\alpha > \alpha_g$ werden totalreflektiert. Bei Beobachtung des Prismas durch ein Fernrohr erkennt man auf einer Skala eine Hell-Dunkel-Grenze. Der abgelesene Skalenwert wird auf die Normtemperatur umgerechnet und der Salzgehalt aus einer Tabelle ermittelt.

Die optimal erreichbare Genauigkeit ist etwas besser als $\Delta S = \pm 0,10/_{00}$. Diese Genauigkeit kann auch in Bordbetrieb erreicht werden.

Die optimal erreichbare Genauigkeit ist etwas besser als $\Delta S = \pm 0,10/_{00}$. Diese Genauigkeit kann auch in Bordbetrieb erreicht werden.

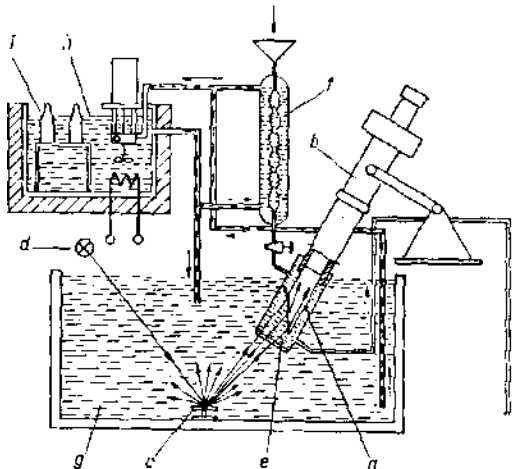


Abb. 10. Eintauchrefraktometer zur Salzgehaltsbestimmung. a Prisma, b Fernrohr, c Spiegel, d Lampe, e Probenbehälter, f Durchlaufkühler, g Wasserbad, h Thermostat, i Probenflasche

e) Salzgehaltsbestimmung durch Leitfähigkeitsmessungen

Man kann entsprechend der obengenannten Funktion f_3 die Leitfähigkeitsmessung zur Salzgehaltsbestimmung heranziehen, wenn man die Temperatur einer geschöpften Probe sehr konstant hält oder den Temperatureinfluß kompensiert, denn die spezifische elektrische Leitfähigkeit von Seewasser steigt um $\Delta L \approx 0,01 \text{ mS/cm}$ bei einer Erhöhung des Salzgehaltes um $\Delta S = 0,01\%$, der Temperatur um $\Delta T = 0,01^\circ\text{C}$ und des Druckes um $\Delta p = 20 \text{ dbar}$. Bei in-situ-Messungen ist es erforderlich, mit der Leitfähigkeitsmessung gleichzeitig eine sehr genaue Temperaturmessung und eine Druckmessung auszuführen. Als Meßelemente können Anordnungen mit 2 oder 3 Elektroden oder induktive Meßzellen eingesetzt werden.

Während bei Elektrodenzellen der Wechselstromwiderstand einer Wassersäule zwischen 2 bzw. 3 Elektroden gemessen wird, kontrolliert die Leitfähigkeit des Seewassers bei induktiven Zellen die Kopplung zweier Transformatoren. Abbildung 11 zeigt Beispiele für vereinfachte Meßanordnungen. Der salzgehaltsabhängige Widerstand R_w des Seewassers bildet bei der Elektrodenmeßzelle (Abb. 11 A) den Bestandteil einer Wechselstrom-Meßbrücke, die sich bei Verwendung der Festwiderstände R_1 und R_2 mittels des Potentiometers R_p und des Nullanzeigeelements G abgleichen läßt. Der Widerstand R_w ist dann nach $\frac{R_w}{R_p} = \frac{R_1}{R_2}$ berechenbar.

Wechselstrom muß verwendet werden, um Polarisierungseffekte zu vermeiden. Der Vorteil der Elektrodenmeßzelle gegenüber der induktiven Meßzelle besteht in dem geringen Aufwand beim Bau der Apparatur, der wesentlichste Nachteil in der schlechten Langzeitkonstanz infolge von Veränderungen auf den Elektrodenoberflächen.

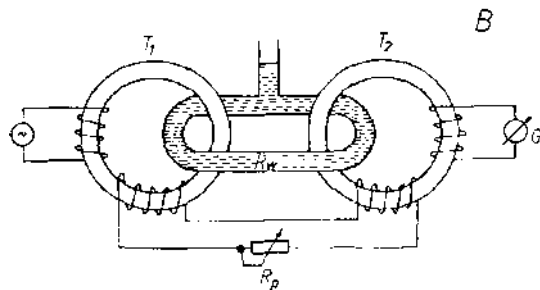
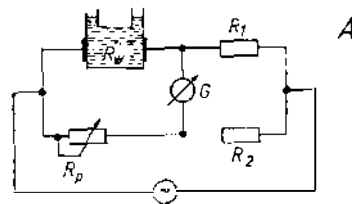


Abb. 11.
Prinzipien der Verfahren zur Messung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit mit Elektroden (A) und induktiv (B)

Der salzgehaltsabhängige Widerstand kontrolliert bei der induktiven Meßzelle (Abb. 11 B) den Strom, durch den zwei Toroidtransformatorspulen gekoppelt werden. Der über T_1 und die Seewasserschleife in T_2 induzierte Wechselstrom wird durch einen Strom in entgegengesetzter Richtung kompensiert, der durch das Potentiometer R_P eingestellt werden kann. Bei Nullabgleich durch das Anzeigement G ist die Potentiometerstellung ein Maß für den Salzgehalt. Man nennt Geräte zur Salzgehaltsbestimmung über die elektrische Leitfähigkeit vielfach „Salinometer“.

Labor-Leitfähigkeitsmeßgeräte: Für Präzisionsbestimmungen werden heute zwei Gerätetypen verwendet. Beim Salinometer nach COX, das in seinen prinzipiellen Aufbau den früheren Entwicklungen von WENNER, SMITH, SOULE und SCHLEICHER sowie BRADSHAW gleicht, werden 8 Elektrodenmeßzellen, deren Zellkonstanten durch Serien- und Parallelwiderstände gleich groß gemacht werden, durch eine Thermostatflüssigkeit sehr genau auf einer Temperatur von 15°C gehalten. Die Messung erfolgt in einer stufenweise einstellbaren Transformatorbrücke, der Nullabgleich ist mittels einer Anzeige mit einem Kathodenstrahloszillographen und einem Anzeigement mit phasenabhängigem Gleichrichter möglich. Zwischen die Messungen an unbekanntem Salzwasserproben werden jeweils Normalwassermessungen zur Eichung eingefügt. Man erreicht mit dieser Anordnung eine Reproduzierbarkeit von $\Delta S = \pm 0,0020/_{00}$ und eine Genauigkeit von $\Delta S = \pm 0,010/_{00}$. Die Meßgeräte geben das Verhältnis der Leitfähigkeit des unbekanntem Seewassers zu derjenigen des Normalwassers an. Die Ermittlung des Salzgehalts erfolgt dann über Tabellen.

Mit geringerem Aufwand, nämlich durch Weglassen des Thermostaten und Verwendung einer Temperaturkompensation über einen gewissen Temperaturbereich mittels eines Thermistors, erreichen BROWN und HAMON etwa gleiche Genauigkeiten. In diesem Falle erfolgt die Messung mit einer induktiven Meßzelle in folgender Weise:

Die Wasserproben und das Standard- bzw. Substandardwasser werden auf Raumtemperatur gebracht (maximal zulässige Abweichung ca. $\pm 2^\circ\text{C}$), und der passende Temperaturbereich am Salinometer wird eingestellt. Die Meßzelle wird durch Ansaugen der Standardwasserprobe gefüllt und eine Eichung vorgenommen. Anschließend werden nacheinander die unbekanntem Meerwasserproben eingefüllt und ihr Widerstand relativ zu dem des Standardwassers bestimmt. Nach 10 bis 20 Messungen wird eine erneute Messung mit Standardwasser ausgeführt, die bei Drift der Anzeige zur Korrektur herangezogen werden kann. Störungen können in erster Linie durch Gasbläschenbildung hervorgerufen werden. Den jeweiligen Salzgehaltswert entnimmt man wieder Tabellen. Die Genauigkeit dieser Meßmethode beträgt bei Ozeanwasser $\Delta S = \pm 0,0030/_{00}$.

In-situ-Leitfähigkeitsmeßgeräte: Für Messungen im küstennahen Flachwasserbereich, wo die Genauigkeitsforderungen nicht besonders hoch sind, werden in-situ-Meßgeräte mit Elektroden oder mit induktiven Sonden für die Salzgehaltsbestimmung benutzt. Als Beispiel sei das tragbare Salinometer nach J. WILLIAMS genannt. Als Meßfühler werden für die Leitfähigkeit ein induktiver Aufnehmer und für die Temperatur zwei parallelgeschaltete Thermistoren verwendet. Die Meßsonde wird jeweils in bestimmte Tiefen gebracht. Es wird eine Temperaturmessung mit Hilfe einer normalen Wheatstone-Brücke vorgenommen. Anschlie-

ßend schaltet man die Thermistoren in eine zweite Brücke zusammen mit einem Potentiometer, das über die Leitfähigkeitssonde eingestellt wird. Durch passende Wahl der Brückenwiderstände läßt sich eine Kompensation des Temperatureffekts auf die elektrische Leitfähigkeit und damit eine direkte Anzeige des Salzgehaltes mit einer Genauigkeit von $\Delta S = \pm 0,30/_{00}$ erreichen. Der Brückenabgleich erfolgt bei diesem Gerät automatisch.

Neben einfachen Geräten des genannten Typs sind in-situ-Meßgeräte für den Gebrauch im offenen Ozean im Einsatz, mit denen sich eine Meßgenauigkeit von $\Delta S = \pm 0,03/_{00}$ erreichen läßt.

5. Optische Messungen

Die Einwirkung der Sonnenstrahlung spielt wegen ihrer Bedeutung für die photosynthetischen Prozesse als Grundlage allen Lebens im Meer bei meeresbiologischen Untersuchungen eine wesentliche Rolle. Es sollen im Rahmen dieser Einführung mehrere Meßmethoden behandelt werden, die es erlauben, einige zur Beschreibung der Strahlungsbilanz bedeutsame Größen zu bestimmen. Es geht hierbei um die physikalischen Koeffizienten, die die Absorption und Streuung im Innern des Meeres kennzeichnen.

Die auf die Meeresoberfläche auftreffende Sonnenstrahlung dringt nur zum Teil in das Meerwasser ein, da ein gewisser Bruchteil reflektiert wird. Im Wasser gelangt wieder nur ein Teil direkt in größere Tiefen, die restliche Strahlung wird absorbiert oder gestreut. Die Absorption ist für verschiedene Wellenlängen, also auch für die Spektralfarben des sichtbaren Lichtes, unterschiedlich groß. Sie besitzt im reinen Meerwasser ihr Minimum im Blau; wegen des Gehalts gelöster Stoffe kann sich die Lage des Minimums jedoch verschieben. Die Streuung erfolgt ebenfalls wellenlängenabhängig (Rayleigh-Streuung), vor allem an den im Wasser schwebenden Partikeln. Ein Teil des gestreuten Lichtes verläßt das Meer wieder durch die Wasseroberfläche und bestimmt damit im wesentlichen den Farbeindruck für den Beobachter. Es ist möglich, durch Vergleich mit mehreren Standardfarben diese Farbe des Meerwassers festzustellen und daraus grobe Rückschlüsse auf den Gehalt an gelösten und suspendierten Stoffen zu ziehen.

Zur Beschreibung der Wirkung von Absorption und Streuung im Meerwasser eignen sich eine Reihe von physikalischen Koeffizienten, die die Größe der Strahlungsintensität J_0 vor und J nach Durchlaufen einer Strecke z beschreiben durch das Gesetz:

$$J = J_0 e^{-kz}$$

(e = Basis des natürlichen Logarithmus, k = Abschwächungskoeffizient).

Man muß unterscheiden zwischen den Koeffizienten für ein Strahlenbündel und denjenigen für die gesamte diffuse Strahlung. Zur Beschreibung der Vorgänge an Strahlenbündeln verwendet man die Koeffizienten der Vorwärts- und der Rückwärtsstreuung und deren Summe, den Streukoeffizienten, sowie den physikalischen Extinktionskoeffizienten, der den Gesamtverlust eines Strahlenbündels durch Absorption und Streuung kennzeichnet. Für die diffuse Strahlung benutzt man den vertikalen Extinktionskoeffizienten, der die Abschwächung der diffusen, nach unten gerichteten Strahlung kennzeichnet, und den diffusen Reflexionskoeffizienten, der das Verhältnis von Oberlicht zu Unterlicht angibt. Zur vollständigen Beschrei-

lung genügt es, drei dieser Koeffizienten zu messen; die übrigen lassen sich dann daraus berechnen. Es werden in folgenden einige Meßverfahren zur Bestimmung dieser Koeffizienten angegeben. Als Strahlungsempfänger dienen Alkali-Photzellen, Selen-Photzellen oder Cadmiumsulfid-Photowiderstände; zur Feststellung der spektralen Abhängigkeit werden Glasfilter verwendet.

a) Bestimmung des physikalischen Extinktionskoeffizienten im Labor

In ein Pulfrich-Photometer wird in den Strahlengang eine seewassergefüllte Küvette gebracht. Durch Vergleich der Intensität eines Lichtstrahlenbündels, das die Küvette durchlaufen hat, mit derjenigen eines Strahlenbündels, das eine Vergleichsstrecke durchquerte, erhält man hinter einem Monochromator das Verhältnis I/I_0 und damit den physikalischen Extinktionskoeffizienten. Ein Vorteil der Methode ist, daß die Messung für viele Wellenlängen durch wählbare Filter leicht durchführbar ist, ein Nachteil sind die Fehler, die durch zusätzliche Streuung infolge Gasbläschenbildung in der geschöpften Wasserprobe auftreten können.

b) Bestimmung des physikalischen Extinktionskoeffizienten in situ

Ein vielverwendetes Gerät ist das Durchsichtigkeitsmeßgerät nach JOSEPH (Abb. 12). Ein paralleles Lichtstrahlenbündel durchläuft eine 1 oder 2 m lange Meßstrecke und wird dabei abgeschwächt. Die verbleibende Lichtintensität wird über ein rotes bzw. blaues Filter mit einer Selenzelle gemessen. Die resultierende Spannung wird über ein mehradriges Kabel zusammen mit einem Temperaturmeßsignal zu einem Registriergerät an Bord geleitet. Die maximal zulässige Tiefe beträgt bei diesem Instrument ca. 600 m. Neuere Entwicklungen solcher Meßgeräte haben zu einer Einsatzmöglichkeit bis zu 6000 m Wassertiefe geführt.

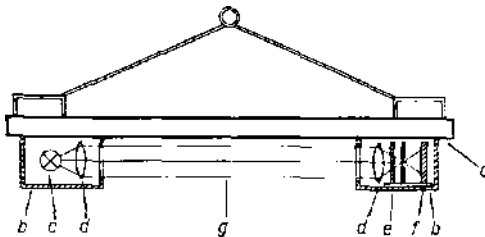


Abb. 12.

Durchsichtigkeitsmeßgerät nach JOSEPH.
a Rahmen, b Gehäuse, c Lampe, d Linse,
e Filter, f Photozelle, g Meßstrecke

c) Bestimmung des vertikalen Extinktionskoeffizienten

Die Abhängigkeit der Intensität des Oberlichtes von der Tiefe wird in einfacher Weise mit der Secchi-Scheibe gemessen. Eine weiße runde Scheibe mit ca. 50 cm Durchmesser wird so lange abgesenkt, bis sie nicht mehr erkannt werden kann. Nach JOSEPH gilt als Beziehung zwischen der so gemessenen Sichttiefe s und dem vertikalen Extinktionskoeffizienten b :

$$b \cdot s \approx 0,95$$

Ein anderes Verfahren zur Messung der Tiefenabhängigkeit von h benutzt eine Sonde mit nach oben gerichteter Selen-Photozelle und wahlweise einschaltbaren Filtern. Die Signale werden über ein mehradriges Kabel an Bord übertragen und mit der Spannung einer Photozelle an der Oberfläche verglichen.

d) Bestimmung des diffusen Reflexionskoeffizienten

Verwendet man bei der zuletzt genannten Methode neben der nach unten gerichteten gleichzeitig eine nach oben gerichtete Photozelle, so läßt sich das Verhältnis von Unterlicht zu Oberlicht und damit der diffuse Reflexionskoeffizient ermitteln.

6. Strömungsmessungen

Horizontale Strömungsverteilungen können grundsätzlich auf zwei verschiedene und im Prinzip gleichwertige Arten erhalten werden, einmal durch Bestimmung der Bahnlinien einzelner Wasserteilchen über Driftmessungen, zum anderen durch Aufnahme der Stromlinien, die durch die Strömung an mehreren festen Punkten gegeben sind.

Driftmessungen im Oberflächenstrom: Die Hauptgrundlage der heutigen Oberflächenstromkarten bilden die in den Hydrographischen Ämtern gesammelten Daten über Schiffsversetzungen. Bei dieser Methode wird das ganze Schiff als Driftkörper angesehen und aus der Abweichung vom vorgesehenen Kurs auf die Stärke und Richtung des Oberflächenstromes geschlossen. Ein Problem bildet dabei die störende Größe der Verdriftung infolge direkten Winddrucks. Für spezielle Meeresgebiete führt man Untersuchungen mit Flaschenposten oder Driftkarten in Plastiktüten durch (Abb. 13 A). Viele hundert oder tausend dieser Körper werden an ausgewählten Punkten ausgebracht. Von Findern an der Küste werden auf den inliegenden Karten Fundort und Zeit angegeben und gegen Belohnung an die Absender zurückgeschickt.

a) Bestimmung von Bahnlinien

Driftmessungen in mittleren Wassertiefen: Man verwendet zwei Gerätetypen. Bei der Fallschirmboje (Abb. 13 B) ist an einer kleinen Oberflächenboje, die Markierungen, Radarreflektoren oder einen Funksender besitzt, über einen dünnen Draht an einem Gewicht ein fallschirm- oder drachenartiges Gebilde mit hohem Strömungswiderstand angebracht. Die gesamte Anordnung bewegt sich im wesentlichen mit dem Strom in der Tiefe des Fallschirmes, der damit durch Beobachtung der Oberflächenboje verfolgt werden kann. Bei der Swallow-Boje

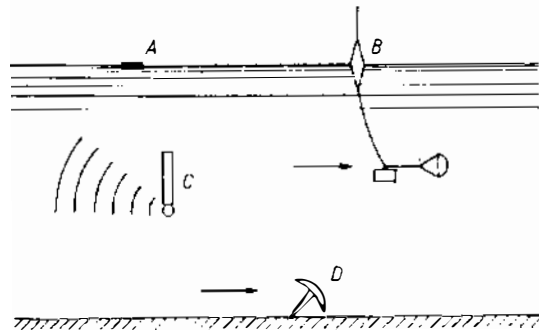


Abb. 13.
Methoden der Driftmessung:
Driftkarte (A), Fallschirmboje
(B), Swallow-Boje (C) und
Woodhead-Drifter (D)

(Abb. 13 C) wird ein röhrenförmiges Gebilde mit automatischem Schallsender in einer Tiefe von einigen hundert Metern zum Schweben gebracht und durch gleichzeitiges Abhören mit zwei Hydrophonen vom Schiff aus angepeilt und verfolgt.

Driftmessungen im Bodenstrom: Pilzförmige Driftkörper nach WOODHEAD (Abb. 13 D), die mit ihrem Fuß leicht auf den Meeresboden aufsetzen, werden in großer Zahl an bestimmten Stellen ausgesetzt und dann vom Bodenstrom mitgeführt. Bei Wiederauffinden in Grundschnepnetzen ist die Verdriftung feststellbar.

b) Bestimmung von Stromlinien

Strommessungen vom verankerten Schiff: Als Meßelemente für die Bestimmung der Stromstärke finden Propeller oder Savonius-Rotoren Verwendung, die Stromrichtung wird durch Bewegung einer Stromfahne oder des Gesamtgehäuses relativ zu einer Kompaßnadel oder zur Schiffslängsachsenrichtung bestimmt. Das Schiff muß verankert sein.

Beim früher viel verwendeten Ekman-Strommesser wird die Registrierung im Strommesser, der an einem Draht bis zu beliebigen Tiefen vom verankerten Schiff ausgebracht wird, durch Entarretierung des Propellers mittels eines Fallgewichtes ausgelöst. Der Propeller bewegt ein Zählwerk und gibt gleichzeitig nach einer bestimmten Zahl von Umdrehungen jeweils den Weg für eine Bronzekugel frei, die dann über eine Rinne auf der Kompaßnadel in eine Fächeranordnung fällt. Durch ein zweites Fallgewicht wird der Propeller (meist nach 10 Minuten) wieder arretiert. Nach dem Heraufholen des Gerätes läßt sich die Zahl der Umdrehungen am Zählwerk ablesen und über eine Eichentabelle daraus die Stromgeschwindigkeit ermitteln. Die Häufigkeitsverteilung der Kugeln in den Fächern stellt ein Maß für die Richtung dar.

Bei Messungen in Oberflächennähe wird der Kompaß durch den Schiffsmagnetismus gestört, man muß deshalb eine andere Art der Richtungsmessung verwenden. Bis zu maximal 50 m Tiefe wird an zwei Drähten der Rahmen eines Bifilarstrommessers nach RAUSCHELBACH ausgebracht. Der Rahmen hängt stets parallel zur Schiffslängsachse, die Stromrichtung läßt sich daher aus der Verdrehung einer Richtungsfahne relativ zum Rahmen mit Hilfe des Schiffskompasses bestimmen. Die Stromgeschwindigkeitsmessung erfolgt mit einem Propeller. Die Richtungs- und Geschwindigkeitswerte werden elektrisch über ein mehradriges Kabel an Bord übertragen und dort angezeigt bzw. registriert. Für kontinuierliche Messungen in großen Tiefen werden Geräte eingesetzt, die Savonius-Rotoren zur Geschwindigkeitsmessung und eine Stromfahne zur Richtungsmessung besitzen. Die Registrierung erfolgt auf einem Streifenblattschreiber im Unterwassergerät oder nach einer Übertragung der Meßgrößen über Kabel an Bord.

Strommessungen mit verankerten, automatisch registrierenden Geräten: Durch Verankerung automatisch registrierender Strommeßgeräte in ausgewählten Tiefenhorizonten lassen sich Registrierungen über viele Wochen gewinnen. Aus der Vielzahl der benutzten Geräte sollen hier zwei ausgewählt werden.

Beim Schaufelradstrommesser nach RAUSCHELBACH bzw. dem daraus weiterentwickelten Propellerstrommesser bewegen ein Schaufelrad oder ein Propeller ein Zählwerk in einem wasserdichten Gehäuse, das sich in Stromrichtung einstellt. Die Skalen des Zählwerkes und eines im Gehäuse eingebauten Kompasses wer-

den alle 5 Minuten photographiert. Der Registrierfilm wird nach Wiederaufnahme des Gerätes abgelesen, und über Eich Tabellen wird die Stromgeschwindigkeit ermittelt.

Beim Rotorstrommesser nach RICHARDSON werden ein Savonius-Rotor, eine Stromfahne und ein Kompaß mit Hilfe spezieller Kodierungseinrichtungen in bestimmten Zeitintervallen so abgetastet, daß die Information sich in digitaler Form als Punktmuster auf einem photographischen Film oder als Impulsfolge auf einem Magnetband aufzeichnen läßt. Film oder Magnetband werden mit Hilfe automatischer Lese- und Zeichengeräte ausgewertet.

Für Messungen niedriger Stromgeschwindigkeiten werden bei verschiedenen anderen Verfahren Pendel verwendet, deren Neigungswinkel im Strom ein Maß für die Stromgeschwindigkeit darstellt.

7. Schlußbemerkungen

Die Meßmethoden der physikalischen Ozeanographie müssen im allgemeinen den folgenden Forderungen angepaßt werden: Unempfindlichkeit gegen Schiffsbewegungen oder Eigenbewegungen der Geräte, vor allem gegen Stöße; Schutz gegen hohen Druck; Seewasserbeständigkeit; hohe Meßgenauigkeit. Hinzu kommen heute noch andere Überlegungen. Die Entwicklungsrichtung der physikalischen Meßmethoden in der Meereskunde wird heute zu einem wesentlichen Teil bestimmt durch die Erkenntnis, daß die zeitlichen Änderungen der Schichtung und Strömung in vielen Meeresgebieten auch in der Tiefe erheblich größer sind, als man zunächst annehmen konnte. In Zukunft werden daher vor allem die Meßverfahren zunehmende Bedeutung gewinnen, die zeitlich und räumlich engabständige Messungen und eine automatische Verarbeitung der großen Zahl der dabei anfallenden Meßdaten ermöglichen.

Literatur

Zusammenfassende Darstellungen:

- VON ARX, W. S. (1962): An Introduction to Physical Oceanography. 422 S. Reading.
- DEFANT, A. (1961): Physical Oceanography. Bd. 1, S. 32—63; Bd. 2, S. 31—65. Berlin.
- DIETRICH, G., und K. KALLE (1957): Allgemeine Meereskunde. 492 S. Berlin.
- DIETRICH, G. (1964): Ozeanographie. Das Geographische Seminar. 2. Aufl., 96 S. Braunschweig.
- JERLOV, N. G. (1963): Optical Oceanography. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. 1, 89—114.
- RILEY, J. P., and G. SKIRROW (1965): Chemical Oceanography. Bd. 1, 73—120. London.
- SVERDRUP, H. N., M. W. JOHNSON, and R. M. FLEMING (1954): The Oceans. 5. Aufl., 331—388. New York.
- U. S. Hydrographic Office (1959): Instruction Manual for Oceanographic Observations. 2. Aufl., 210 S. Washington.
- U. S. Hydrographic Office (1957): Processing Oceanographic Data. 2. Aufl., 114 S. Washington.
- WÜST, G., G. BÖHNECKE, und H. M. F. MEYER (1932): Ergebn. Dtsch. Atlant. Exp. „Meteor“ 1925—1927. Bd. 4 (1), 7—76 und 178—261. Berlin.