

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.

Registrierungen in situ im Nordatlantik mit der Bathysonde und einem neuen Meßgerät für Schallgeschwindigkeit im Meerwasser mit extrem hoher Genauigkeit

Von WERNER KROEBEL und JOHANNES WICK

Zusammenfassung: Es werden Registrierungen der Leitfähigkeit und der Temperatur als Funktion der Tiefe aus Messungen im Nordatlantik vorgetragen und zur Darstellung gebracht. Die Registrierungen wurden mit einer Bathysonde der Kieler Howaldtswerke im März 1963 erhalten. Zur Überprüfung der Genauigkeiten dieser Registrierungen wurden nach bekannten Methoden mit Kippwasserschöpfern Salzgehalt und Temperatur in Abhängigkeit von der Tiefe bestimmt. Aus diesen Daten konnten Vergleichswerte für die mit der Bathysonde aus den Registrierungen entnommenen Leitfähigkeiten und Temperaturen gewonnen werden. Der Vergleich ergab bei Benutzung der Bathysonde mit einem sogenannten Spreizgerät, daß die Meßgenauigkeit höher lag als der mittleren Ablesegenauigkeit entspricht, die für die Leitfähigkeit zu $\pm 0,005$ mS/cm und für die Temperatur zu $\pm 0,005^\circ\text{C}$ bestimmt wurde. Dies stimmt überein mit Messungen der Frequenzstabilität der Bathysonde im Labor, nach denen die relative Meßgenauigkeit, die über mehrere Stunden erhalten bleibt, bei $\pm 0,003$ mS/cm für die Leitfähigkeit und $\pm 0,003^\circ\text{C}$ für die Temperatursonde liegt. Für die Langzeitkonstanz, für deren Bestimmung ein Zeitraum von vier Monaten zur Verfügung stand, ergab sich aus den Registrierungen eine Absolutgenauigkeit von $\pm 0,02$ mS/cm für die Leitfähigkeit und $\pm 0,02^\circ\text{C}$ für die Temperatur.

Des weiteren wurden Registrierungen der Schallgeschwindigkeit mit einem neuen speziellen Schallgeschwindigkeitsmesser auf mehreren Stationen durchgeführt. Sie ergaben in Übereinstimmung mit den Labormessungen eine Schwankungsbreite des Fehlers von $0,7-1 \cdot 10^{-5}$ der Schallgeschwindigkeit für die relative Meßgenauigkeit über mehrere Stunden entsprechend einem Fehler etwa $1-1,5$ cm/sec und einer Schwankungsbreite für die Langzeitkonstanz entsprechend einem Meßfehler von $\pm 10-15$ cm/sec.

In-situ recordings in the Northatlantic Ocean with the bathysonde and a new instrument for measuring the sound velocity in sea water with extreme high accuracy (Summary): Recordings of conductivity and temperature as a function of depth are described and represented from measurements carried out in the Northatlantic Ocean. The recordings were obtained in 1963 with a bathysonde of the Kieler Howaldtswerke. To prove the accuracy of these recordings salinity and temperature in dependence from depth were determined at the same time with conservative methods by using Nansen bottles. From these data values of comparison were obtained for the conductivity and temperature recordings of the bathysonde. When the bathysonde was used together with a so-called range expansion set it was found that the exactitude of the measurements was better than the accuracy of the reading offs, which are about $\pm 0,005$ mS/cm*) for the conductivity and $\pm 0,005^\circ\text{C}$ for the temperature. This is corresponding to measurements of the frequency stability of the bathysonde carried out in the laboratory. It was proved that the relative exactitude of measurements is $\pm 0,003$ mS/cm*) for the conductivity and $0,003^\circ\text{C}$ for the temperature sonde which are maintained for several hours. The recordings of the constancy of long term registrations was found to have an absolute accuracy of $\pm 0,02$ mS/cm*[for the conductivity and $\pm 0,02^\circ\text{C}$ for the temperature. For these determinations a period of four month was at disposal.

Furthermore, recordings of sound velocity were carried out at several stations with a new special sound velocity recorder. In accordance with laboratory measurements they proved to have a range of error from 0.7 to $1 \cdot 10^{-5}$ of the sound velocity for the relative accuracy of measurements over several hours which corresponds to an error of approx. 1 to 1.5 cm/sec and to a variation range for the long term constancy corresponding to an error of measurement from ± 10 to 15 cm/sec.

Vor mehr als zwölf Jahren wurde der erstgenannte Verfasser von dem damaligen Direktor des Institutes für Meereskunde an der Universität in Kiel, Herrn Prof. Dr. Wüst, angeregt, sich als Physiker auch für die Lösung meßtechnischer Probleme in der

*) $1 \text{ mS/cm} = 10^{-3} \text{ mho/cm}$.

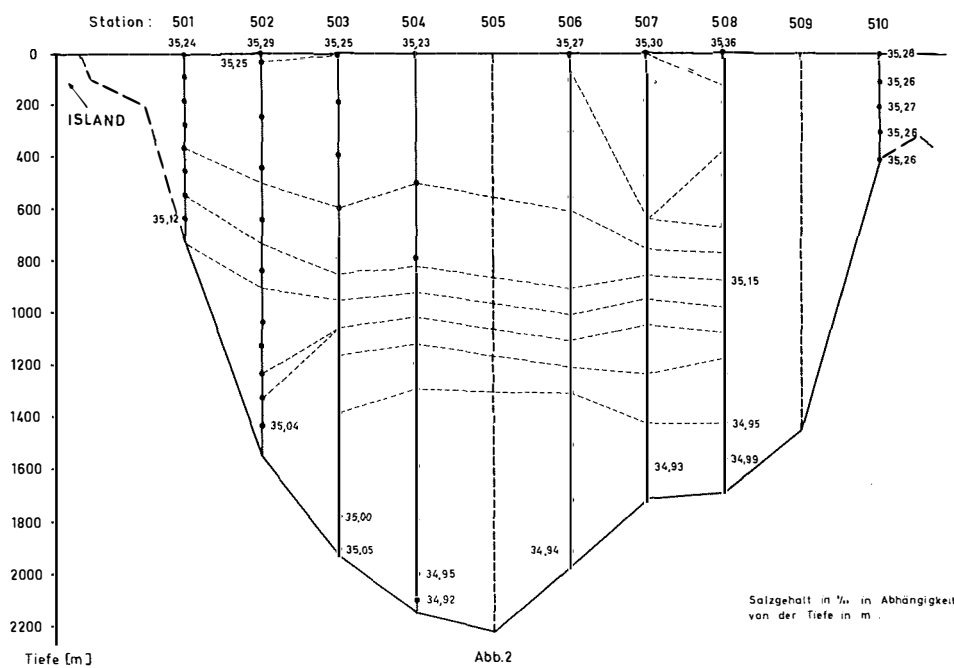
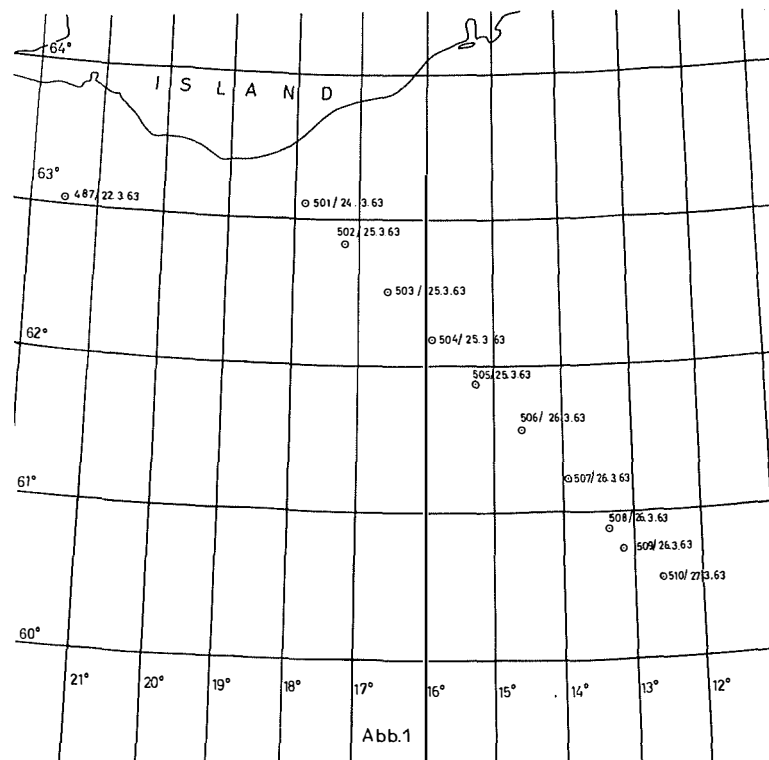
Ozeanographie zu interessieren. Dies führte zu Überlegungen über die für eine Modernisierung ozeanographischer Meßmethoden in Betracht zu ziehenden Verfahren. Der Verfasser ging dabei von der Auffassung aus, daß für eine Ermittlung unbekannter Strukturen im Wasser der Ozeane Punktmessungen, wie sie mit den technisch gut entwickelten Wasserschöpfern über viele Jahrzehnte für die ersten Pionierforschungen ausreichten, bei dem inzwischen erreichten Stand der ozeanographischen Forschung nicht mehr genügen und durch kontinuierlich durchführbare Meßverfahren ersetzt werden müßten. Es gab zwar auch damals schon kontinuierlich arbeitende Meßverfahren, die sich auf spezielle Sonden in Brückenschaltungen stützten. Sie hatten aber den Nachteil, daß sie die Anwendung mehradriger Kabel als Zuleitungen zum Brückenweig in der Sonde verlangten, die selbst Teil des Brückenweiges waren und dadurch die Meßgenauigkeiten, vor allem in größeren Tiefen, erheblich verminderten. So entstand der Gedanke, die Messungen der gewünschten physikalischen Größen des Seewassers unmittelbar am Ort der Sonde durchzuführen und das Zuleitungskabel sowohl für die Stromversorgung zur Sonde von oben nach unten, als auch als Nachrichtenträger für die Übertragung der erhaltenen Meßdaten von unten nach oben an Bord des Meßschiffes zu verwenden und dies Kabel gleichzeitig als Trageil zu benutzen. Zur Vermeidung komplizierterer Kabelausführungen war für das zu entwerfende Verfahren zweckmäßig, außerdem die Bedingung zu erfüllen, die Meßergebnisse aller gleichzeitig zu verwendenden Sonden wie auch die Stromversorgung über ein Einleiterkabel zu realisieren.

Für diese Aufgabenstellung gibt es mehrere Lösungen. Von ihnen schien eine, als Frequenzmeßverfahren zu bezeichnende, so vorteilhaft zu sein, daß sie zuerst in Angriff genommen wurde. Nach diesem Verfahren werden die gewünschten physikalischen Meßgrößen unmittelbar als Frequenzen von Wechselspannungen eines bestimmten Frequenzintervalls erhalten und diese für die einzelnen Meßsonden so auf der Frequenzskala verteilt, daß sie durch elektrische Filter in einem Bordgerät voneinander getrennt und einzeln ausgewertet werden können. Das Verfahren impliziert damit die Aufgabe, für die einzelnen Meßgrößen geeignete Sonden zur Umsetzung der Meßgrößen in Wechselspannungsfrequenzen zu entwickeln. Hierfür standen mehrere bekannte Möglichkeiten offen. Zum Beispiel gab es für Druckmessungen mit Manometern verschiedener Art Einrichtungen, bei denen auf dem beweglichen Teil des Druckmeßkörpers angebrachte Eisenkerne von Spulen in Abhängigkeit vom Druck so gegeneinander verschoben wurden, daß beträchtliche Induktivitätsänderungen resultieren. In geeigneten Brückenschaltungen wurden dann diese Selbstinduktionsänderungen in auf Drucke geeichte Instrumentenausschläge umgewandelt.

Durch Einbeziehen einer solchen Spule als frequenzbestimmendes Element in einen elektrischen Schwingungskreis ließ sich somit der elastische Zustand des Manometers auch in die Frequenz einer Wechselspannung übertragen. Im Hinblick auf die Entwicklung der sogenannten RC-Generatoren, bei denen sich die erregte Wechselspannungsfrequenz mit einer Variation von Widerständen oder Kondensatoren ändert, gelingt es auch, Widerstands- und Kapazitätsänderungen in Frequenzänderungen von Wechselspannungen umzuformen. Es gab somit von vornherein verschiedene Ansatz-

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 1)

- Abb. 1: Lage der Meßstationen auf dem Schnitt, auf den sich die behandelten Meßergebnisse beziehen.
 Abb. 2: Ergebnisse der Salzgehaltsbestimmungen aus Wasserschöpferdaten längs des Schnittes nach Unterlagen von Dr. Krause aus dem Institut für Meereskunde, Kiel. Der Abstand der gestrichelten Linien beträgt $0,05 \text{ ‰}$ Salzgehalt.



Tafel 1 (zu W. Kroebel und J. Wick)

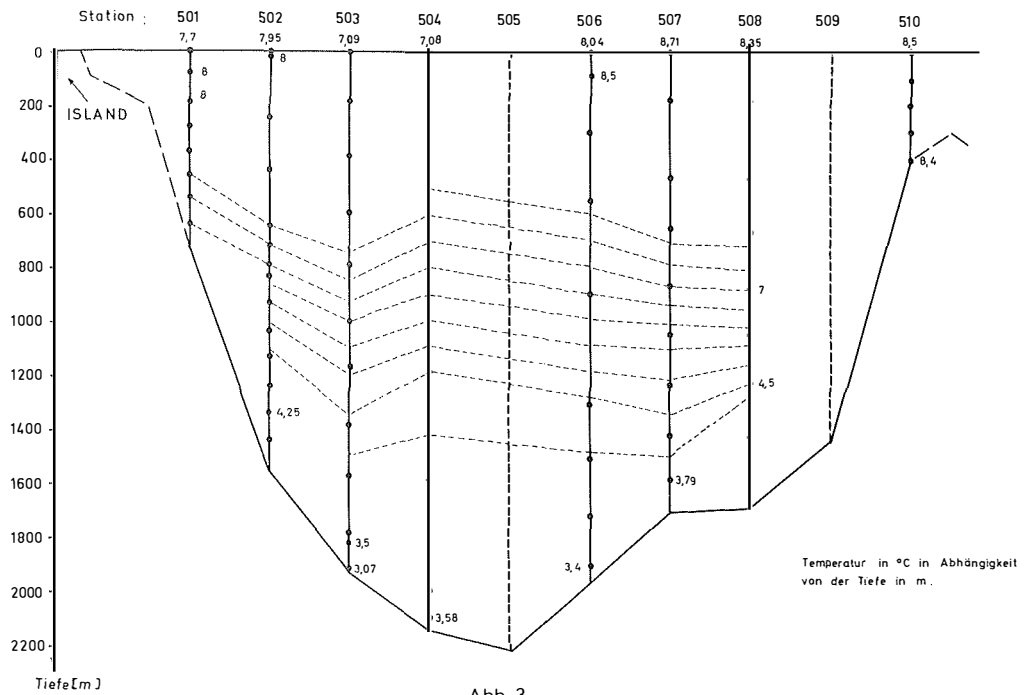


Abb. 3

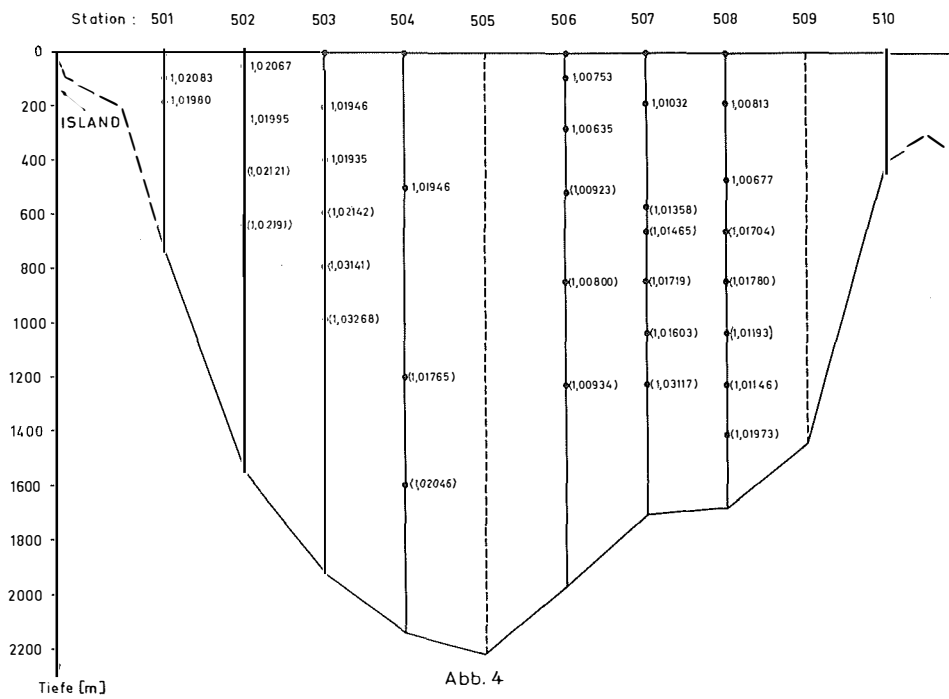


Abb. 4

Tafel 2 (zu W. Kroebe und J. Wick)

punkte für die Entwicklung von Sonden für das gesteckte Ziel. Diese Entwicklungen wurden zunächst im Rahmen von Doktorarbeiten durchgeführt. Mein Schüler HINKELMANN (1957) fand hierbei für die Schaffung einer Temperatur- und einer Leitfähigkeitssonde eine sehr gute Lösung. Sie bestand in der Verwendung eines speziellen Vierpols in einer Rückkopplungsschaltung, in dem sich im Falle des Temperaturfrequenzwandlers der temperaturabhängige Widerstand eines Platindrahtes in einer Brückenschaltung befand, durch die schon mit relativ geringen Widerstandsänderungen ausreichend große Frequenzänderungen erzielt werden können. Für die Messung der Leitfähigkeit fand HINKELMANN (1958) auf der gleichen Basis eine Lösung, durch die die Seewasserleitfähigkeit zudem ohne Elektroden gemessen werden konnte.

Von der mit den erwähnten Schaltungen grundsätzlich gegebenen Lösung für die Schaffung eines Sondenmeßgerätes, mit dem fortlaufend während des Fierens und Hievens Temperatur und Leitfähigkeit als Funktion der Tiefe über ein Halte- und Zuführungseinleiterkabel als Überträger an Bord registriert werden können bis zur Herstellung eines zuverlässigen und mit hoher Präzision arbeitenden und für Bordbedingungen geeigneten Meßgerätes ist indessen ein weiter Schritt. Er erforderte systematische Detailuntersuchungen und häufige Erprobungen sowie mannigfache Verbesserungen der ursprünglich angewandten Schaltung. Diese Arbeit ist in Zusammenarbeit außer mit HINKELMANN mit verschiedenen Mitarbeitern sowie mit Herren der Kieler Howaldtswerke durchgeführt worden. Letztere Firma erstellte dann auf Grund der erzielten Ergebnisse schließlich mehrere bis in Details technisch sauber durchgebildete Geräte, die als Bathysonden bezeichnet werden. Mit solchen Geräten sind auf einigen Forschungsfahrten ins Mittelmeer und in den Nordatlantik Erprobungen durchgeführt worden. Sie zeigten, daß eines der Geräte zunächst noch nicht endgültig in Ordnung war. Auch bestanden einige Unklarheiten bezüglich der verschiedenen Druckeinflüsse auf die angezeigten Meßwerte, was einer einwandfreien Klärung bedurfte. Dies gab für den erstgenannten Verfasser den Anlaß, eine weitere Erprobungsfahrt in den Nordatlantik zu planen, um auf ihr die offen gebliebenen Fragen zu klären; zugleich sollten Erprobungen eines anderen, unten näher beschriebenen neuen Gerätes durchgeführt werden.

Die Erprobungsfahrt ließ sich einrichten mit der „Anton Dohrn“ in der Zeit zwischen dem 19. 3. und 2. 4. 1963 in die Gewässer südlich von Island. Der zweitgenannte Verfasser, der schon seit zwei Jahrzehnten an der experimentellen Durchführung vieler Untersuchungen des Verfassers mitgewirkt hat, und die zu verwendenden Geräte bis in die Schaltungsdetails bestens kannte, hat bei der Erprobung und bei der Auswertung des ermittelten Materials in vollem Umfange mitgewirkt. Über die hierbei erzielten und zur Beurteilung der Bathysonde entscheidenden Ergebnisse sei nachstehend berichtet.

Von zwei der mitgenommenen Bathysonden der Kieler Howaldtswerke hatte die eine bei der Messung der Leitfähigkeit bei veränderlichen Drucken im Bereich zwischen 0 und etwa 200 m Wassertiefe merkwürdige Unregelmäßigkeiten gezeigt, die bei Messungen im Mittelmeer erstmalig offenbar geworden waren. Diese Irregularitäten konnten auf der Reise schnell aufgeklärt werden. Ihre Ursache lag an einem Isolierrohr durch

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 2)

- Abb. 3: Ergebnisse der Temperaturmessungen mit Wasserschöpfern längs des Schnittes nach Unterlagen von Dr. Krause aus dem Institut für Meereskunde, Kiel. Der Abstand der Temperaturlinien ist $0,5^{\circ} \text{C}$.
- Abb. 4: Korrekturfaktoren zu dem vermessenen Schnitt zur Beurteilung der Meßgenauigkeit der Bathysonde durch Vergleich mit Wasserschöpferwerten. Die Werte von den Stationen 501 bis 504 stützen sich auf Messungen mit Spreizgerät, die Werte von den Stationen 506 bis 508 auf Messungen ohne Spreizgerät.

den Sondenkern, durch welches, vermutlich an einer Kittstelle, durch Eindringen von Seewasser unter Druck eine zusätzliche irreguläre Oberflächenleitfähigkeit entstand, die die Ergebnisse fälschte. Durch Anstreichen der Sonde mit einem isolierenden Lack konnte der Effekt vollständig beseitigt werden. Da jedoch die Eichung der Sonde mit dieser Lackierung nicht mehr ganz in Ordnung war, wurde bei den Erprobungsmessungen nur mit der zweiten mitgenommenen Bathysonde gearbeitet. Bei ihr war eine andere Kernrohrkonstruktion angewandt worden, die zudem eine völlige Druckunabhängigkeit der Sonde garantierte.

Die für die Messungen benutzte Bathysonde umfaßte für die Temperaturmessung einen Bereich von -2°C bis $+35^{\circ}\text{C}$. Für Grobmessungen wird er als Übersichtsbereich benutzt und für genaue Messungen in neun einander genügend überlappende Teilbereiche aufgeteilt. Die Bereiche sind über Druckknopfschalter vom Bordgerät aus zu betätigen, womit eine Zu- oder Abschaltung eines Bereichswiderstandes in der Brücke der Sondenschaltung im versenkten Sondenkörper erfolgt. Die verwendete Sondenschaltung läßt sich auch auf andere, insbesondere schmalere Temperaturintervalle für den Gesamt- und entsprechend für die Teilbereiche einstellen. Das Gleiche gilt für die Leitfähigkeitssonde. Damit wird im gleichen Verhältnis eine höhere Meßgenauigkeit erzielt.

Die Messung der Leitfähigkeit bei der benutzten Bathysonde konnte über einen Gesamtbereich von 20 mS/cm bis 70 mS/cm durchgeführt werden. Auch dieser Gesamtbereich war unterteilt in 9 einander überlappende Teilbereiche, deren jeder einzelne für eine Meßgenauigkeit kleiner als 0,5% ausgelegt war. Ein 10. Übersichtsbereich umfaßte eine Leitfähigkeit von 25–65 mS/cm.

Die beschriebene Sonde konnte sowohl mit als auch ohne ein sogenanntes Spreizgerät (KROEBEL 1961) benutzt werden. Die Verwendung dieses Spreizgerätes geht auf eine Überlegung des erstgenannten Verfassers zurück, nach der die Frequenzstabilität der Frequenzwandler der einzelnen Sonden mindestens einen Faktor 10 höher liegt als bei einer direkten Auswertung ausgenutzt werden kann, bei der die angezeigte Frequenz über Frequenzmesser in Gleichspannungen umgesetzt und über Gleichspannungsregistriergeräte gemessen wird. Beim vorliegenden Gerät wurde von diesem Umstand Gebrauch gemacht, indem mittels des Spreizgerätes jeder der neun genannten Bereiche sowohl für die Temperatur als auch für die Leitfähigkeit in je fünf Unterbereiche nach Wahl aufzugliedern war. Die Einschaltung dieser Unterbereiche erfolgte über einen Knebelschalter am Spreizgerät.

Ohne Verwendung des Spreizgerätes betrug die reine Ablesegenauigkeit für die Temperatur aus der Registrierkurve weniger als etwa $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$ und für die Leitfähigkeit weniger als $\pm 0,02$ mS/cm, was unter den Salzgehalts- und Temperaturverhältnissen im Nordatlantik etwa einem Salzgehalt von $0,02\text{‰}$ entspricht. Mit Einschaltung des vorliegenden Spreizgerätes kann diese Ablesegenauigkeit je nach Bereich für die Temperatur auf etwa $\pm 0,005^{\circ}\text{C}$ heraufgesetzt werden und für die Leitfähigkeit auf etwa $\pm 0,005$ mS/cm entsprechend einem Salzgehalt von etwa $\pm 0,005\text{‰}$ unter den gegebenen Bedingungen. Da die Anzeige in den einzelnen Bereichen nicht linear ist, beziehen sich die gemachten Angaben auf diejenigen Bereiche, die für die durchgeführten Messungen im Nordatlantik zur Anwendung kamen.

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 3)

Abb. 5: Originale Registrierkurven mit der Bathysonde von der Station 504. Aufgenommen mit Spreizgerät beim Hieven. Kurve I Leitfähigkeit in mS/cm, Kurve II Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ (1,55fache Verkleinerung des Originals). Die Tiefenangaben stützten sich auf eine Druckmessung, die für Süßwasser geeicht ist.

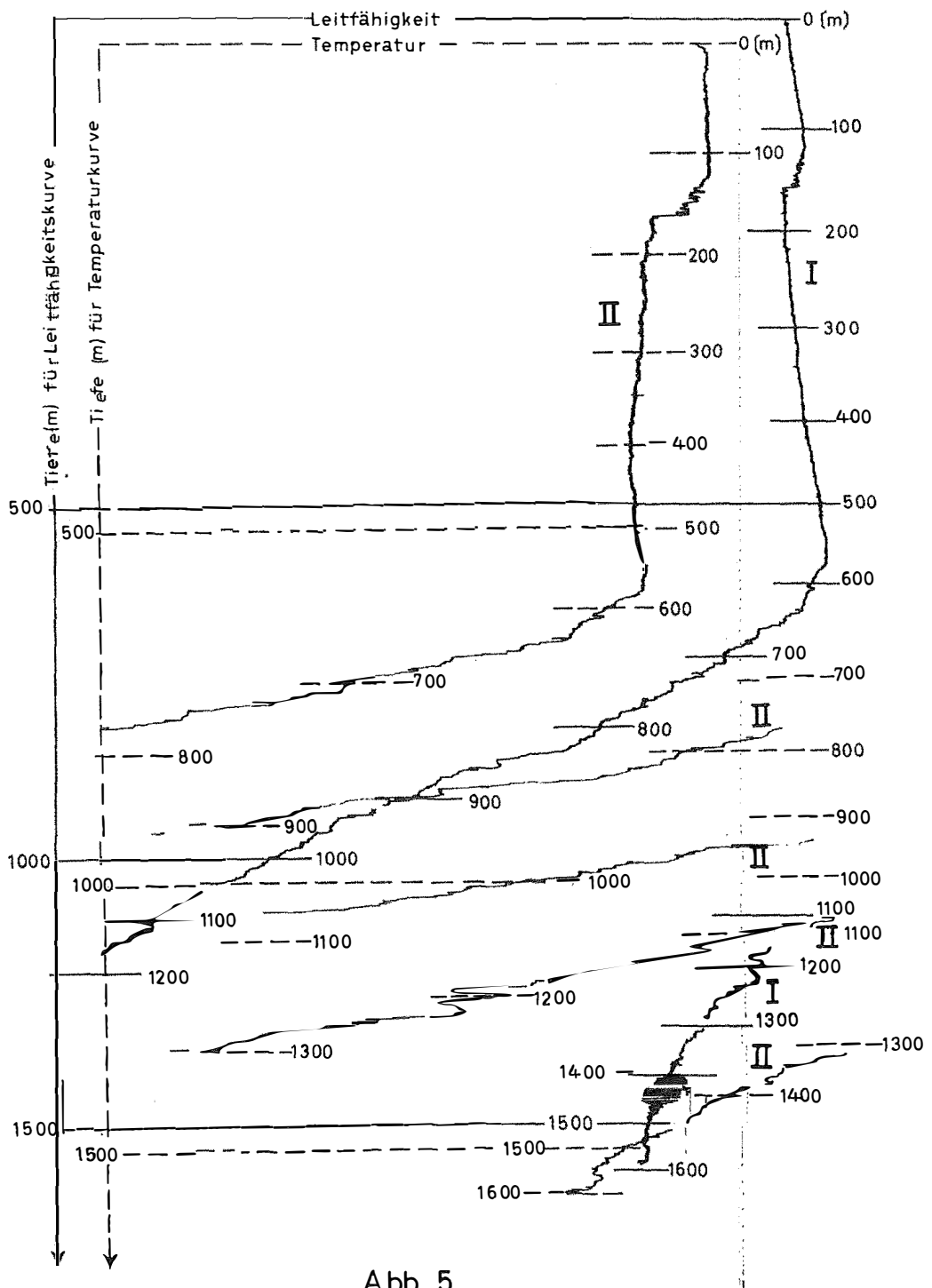


Abb. 5

Tafel 3 (zu W. Kroebel und J. Wick)

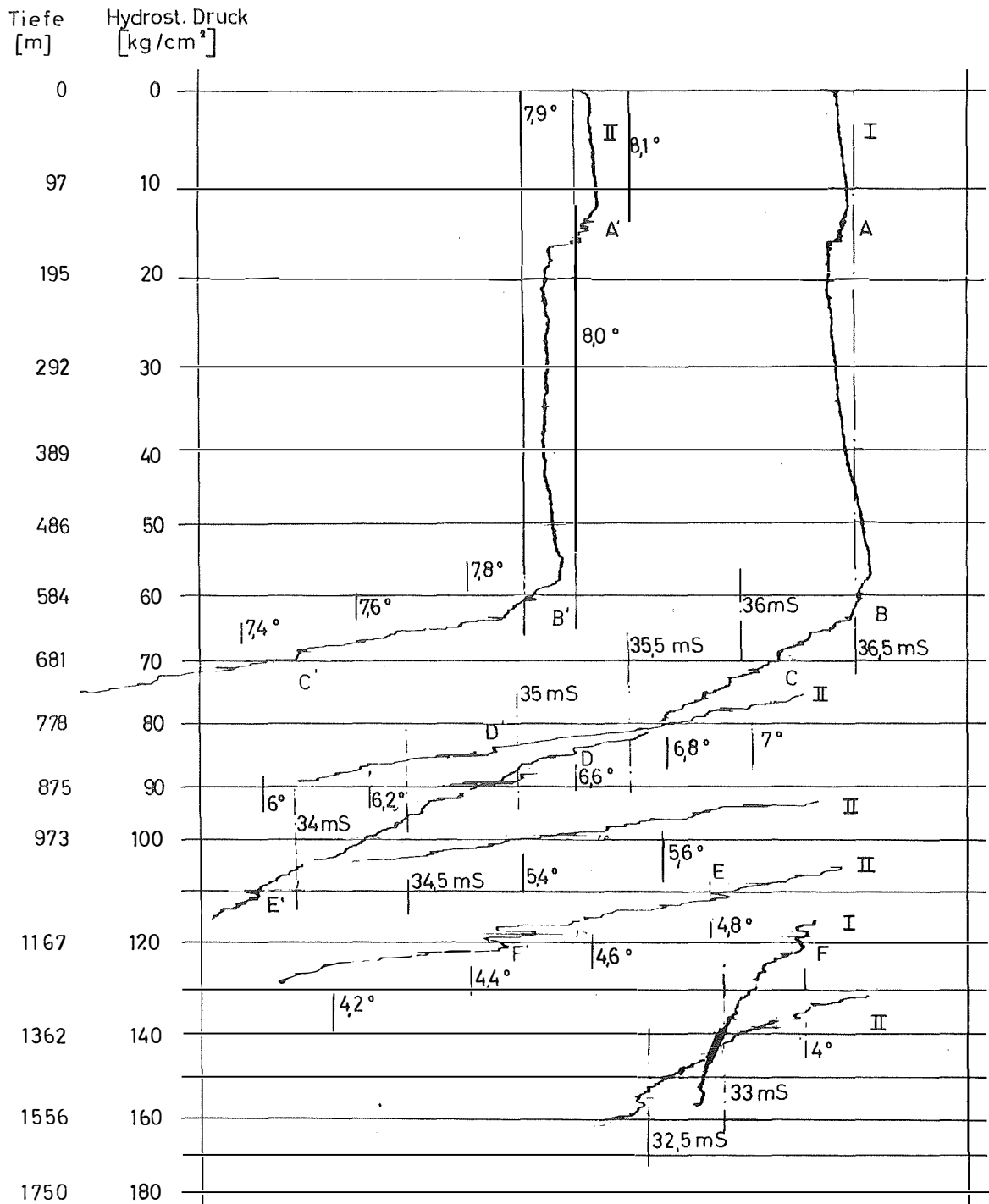


Abb. 6

Tafel 4 (zu W. Kroebel und J. Wick)

Wegen des Umstandes, daß die absolute Langzeit-Konstanz der Frequenzwandler zunächst nicht bekannt war, mußte bei den Messungen vorerst davon ausgegangen werden, daß der Grenze der Ablesegenauigkeit der Registrierkurven mit Spreizgerät nur für relative Messungen, also innerhalb bestimmter Meßzeiten, eine reelle Bedeutung zukam.

Das Gerät war während der gesamten Fahrtdauer auf praktisch allen Stationen eingesetzt worden. Von diesen Einsätzen seien im Zusammenhang mit diesem Aufsatz jedoch nur die auf den Stationen 504 und 508 (s. Abb. 1) erhaltenen Meßergebnisse einer näheren Erörterung unterzogen. Von diesen Stationen liegen außer den Bathysondenmessungen zum Vergleich auch Messungen mit Wasserschöpfern und mit weiter unten näher gekennzeichneten Schallgeschwindigkeitsmessern vor. Die für den Vergleich benutzten Wasserschöpferwerte stammen von Dr. Krause vom Institut für Meereskunde in Kiel, der sie auch mit Mitarbeitern ausgewertet hat und uns freundlicherweise für Vergleiche als Unterlage zur Verfügung stellte. Nach diesen Wasserschöpfermessungen herrschten auf dem durchmessenen Schnitt (s. Abb. 1) Wasserverhältnisse bezüglich des Salzgehaltes und der Temperatur vor, wie sie aus der Abb. 2 und 3 hervorgehen. Diese Abbildungen sind nach den von Dr. Krause zur Verfügung gestellten Werten angefertigt worden. Danach lag für den gesamten Schnitt bis zu einer Tiefe von etwa 400, an einigen Stellen bis 600 m eine relativ konstante Temperatur von etwa 7—8°C vor. Sie fiel nach größeren Tiefen mit einem Gradienten von etwa 0,4—0,8°C pro 100 m ab. Der Salzgehalt lag für die geringeren Tiefen bei ca. 35,2⁰/₀₀ und änderte sich nach der Tiefe sehr langsam und wenig bis auf ca. 34,9⁰/₀₀. Die mit der Bathysonde erhaltenen Registrierkurven sind für die Station 504 bei kontinuierlichem Hieven mit einer Geschwindigkeit von ca. 60 m pro Minute aufgenommen worden. Das Meßergebnis ist in Abb. 5 wiedergegeben.

Die gemessenen Kurven mußten noch einer Korrektur unterworfen werden. Für die Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung wurde diese Korrektur aus den Salzgehaltswerten gewonnen, die mit den Wasserproben der Wasserschöpfer mittels eines Salinometers im Schiffs- und später im Institutslabor ermittelt wurden. Aus ihnen ergab sich mit der gleichfalls gemessenen Temperatur als Funktion der Tiefe der reale Tiefenverlauf der Leitfähigkeit aus einer Rechnung. Für diese Rechnung wurde die Tabelle nach THOMAS, THOMPSON, UTTERBACK (1934) benutzt. Die zur Berücksichtigung des hydrostatischen Druckes außerdem noch anzubringende Korrektur wurde nach einer aus vorläufigen Messungen von BRADSHAW (1962) ermittelten Formel bestimmt. Die daraus erhaltenen Werte wurden dann mit den Bathysondenmessungen direkt verglichen. Daraus ergab sich eine geringfügige konstante Abweichung zwischen den berechneten und den direkt gemessenen Werten. Diese Abweichung hat ihren Grund in der für die Bathysonde angewandten Methode der Eichung und kann bei den künftigen Eichungen berücksichtigt werden. Diese Eichung mußte nämlich in einem relativ kleinen Wasservolumen durchgeführt werden, durch das sich für das elektrische Strömungsfeld durch den Sondenkern etwas andere Verhältnisse ergeben als für Messungen im freien Wasser. Dieser dadurch bedingte Eichfehler ist konstant und durch einen Korrekturfaktor zu eliminieren, der sich aus dem Verhältnis der mittels der Wasserschöpfer gewonnenen Werte für die Leitfähigkeit und den mit der Bathysonde direkt gemessenen ergibt. Er weicht um etwa 2%

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 4)

Abb. 6: Korrigierte Registrierkurve nach dem im Text angegebenen Verfahren. Die Korrekturkurven wurden unter Verwendung von Kurvenausschnitten aus den Originalkurven der Abb. 5 hergestellt. Kurve I Leitfähigkeit in mS/cm, Kurve II Temperatur in °C (1,66 fache Verkleinerung des Originals).

von 1 ab. Da dieser Faktor konstant sein muß, kann daher die mit der Bathysonde erzielbare Meßgenauigkeit aus den Abweichungen dieses Faktors von seinem Mittelwert beurteilt werden.

Für diesen Faktor ergaben sich nun für die einzelnen Stationen und Tiefen die in der Abb. 4 angegebenen Werte. Von diesen Werten sind jedoch nur die nicht eingeklammerten der Stationen 501 bis 504 verwertbar. Denn um den zu ermittelnden Korrekturfaktor auch auf nur 1⁰/₁₀₀ bestimmen zu können, müßte die Temperatur bereits auf etwa $\pm 0,03^{\circ}\text{C}$ bekannt sein. In den Tiefen über 400 m hat die Temperatur aber schon einen Gradienten von 0,4⁰ bis 0,8⁰C pro 100 m. Damit daher die Temperatur bis auf 0,03⁰ C bekannt ist, müßte die Tiefe der Wasserschöpfer bei den fraglichen Tiefen auf ca. 4 bis 8 m konstant gehalten werden, was jedoch bei den auf dieser Fahrt herrschenden Wetterverhältnissen nicht möglich war. Für die Bestimmung des Korrekturfaktors sind daher in der Tat nur die nichteingeklammerten Werte sinnvoll.

Der aus den nichteingeklammerten Werten bestimmte Korrekturfaktor liefert einen Mittelwert von 1,01993. Aus ihm ergibt sich eine absolute Meßgenauigkeit von $-0,6^0/_{100}$ bis $0,9^0/_{100}$ vom Leitfähigkeitsmeßwert. Da der Korrekturfaktor aus Messungen ermittelt wurde, die sich über eine Dauer von zwei Tagen erstreckte, handelt es sich bei dieser Korrektur um eine Langzeitkonstanzangabe für das Gerät. Das steht in bester Übereinstimmung mit der Nachprüfung bestimmter Eichpunkte, die vier Monate später von den Kieler Howaldtswerken vorgenommen wurde. Nach ihr hat sich die Eichung in dem betrachteten Zeitraum von vier Monaten für die Leitfähigkeit in den benutzten Bereichen einseitig um etwa $-0,5\%$ pro Bereich verschoben. Bei einer Absolutgenauigkeit, ohne Verwendung des Spreizgerätes, die nach den obigen Ausführungen für die Leitfähigkeit bei $\pm 0,02$ mS/cm liegt, entsprechend einem Salzgehalt von etwa $\pm 0,02^0/_{100}$, das ist etwa $\pm 0,7^0/_{100}$ vom Meßwert, stimmt somit die Langzeitkonstanz mit der Ablesegenauigkeit überein.

Für die Bathysonde mit Spreizgerät erhöht sich diese Ablesegenauigkeit um ca. einen Faktor 4. (Früher stand für Versuchszwecke ein Spreizgerät mit 21 gut überlappenden Bereichen zur Verfügung. Mit ihm konnte die Ablesegenauigkeit um einen Faktor 16 heraufgesetzt werden). Für das bei den Messungen benutzte Spreizgerät ergibt sich aus dem Faktor 4 eine Ablesegenauigkeit für die Leitfähigkeit von ca. $\pm 0,005$ mS/cm, d. h. unter den bei den durchgeführten Versuchen gegebenen Bedingungen eine Salzgehaltsbestimmungsgenauigkeit auf $\pm 0,005^0/_{100}$. Sie korrespondiert damit gut mit der Konstanz, die während der Dauer einer Messung, also etwa über eine oder mehrere Stunden eingehalten wird und die für die Bathysonde nach Messungen im Labor bei $\pm 0,003$ mS/cm liegt.

Bei der Registrierung der Temperaturkurve war eine Irregularität aufgefallen. Sie äußerte sich in einem im allgemeinen fortschreitenden Absinken der angezeigten Temperaturwerte. Wie sich aus Überprüfungen im Labor nach der Reise ergab, hatte diese Irregularität ihren Grund in einer mangelhaften Lötstelle eines Eichwiderstandes im frequenzbestimmenden Brückenweig der Temperatur-Sondenschaltung. Dennoch ließen sich auch diese Messungen korrigieren. Das geschah zunächst auf Grund der Temperaturwerte, die von den Wasserschöpfermessungen stammten und dann für feinere

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 5)

Abb. 7: Originale Registrierkurven von einer Grönlandfahrt nach Beseitigung des Lötkontaktfehlers in der Thermometersondenschaltung. Die Kurven beziehen sich auf Messungen ohne Spreizgerät (Aus dem Institut für Meereskunde, Kiel). Kurve I Leitfähigkeit in mS/cm, Kurve II Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ (1,63fache Verkleinerung des Originals). Die Tiefenangaben beziehen sich auf eine Druckmessung, die für Süßwasser geeicht ist.

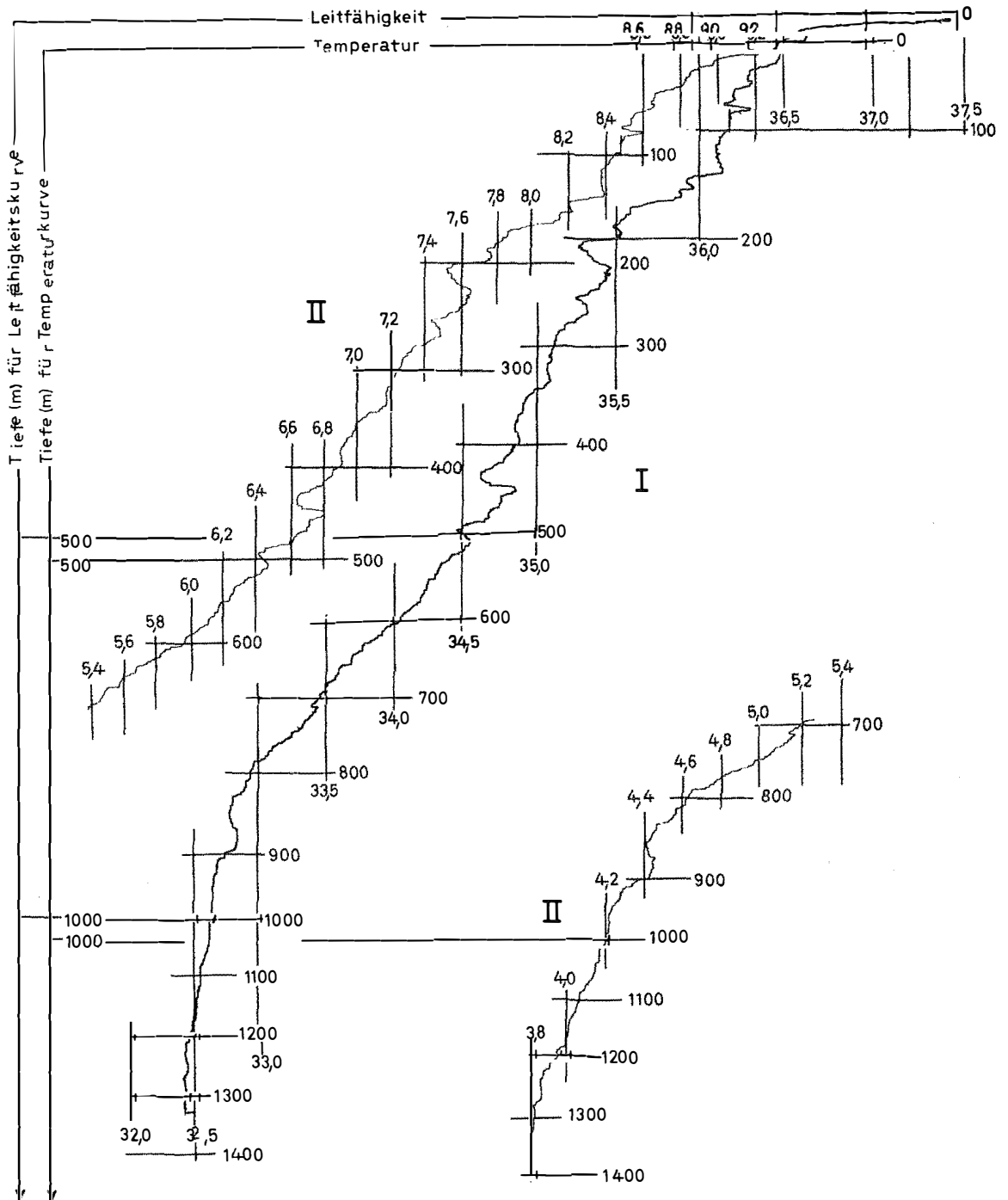


Abb. 7

Tafel 5 (zu W. Kroebel und J. Wick)

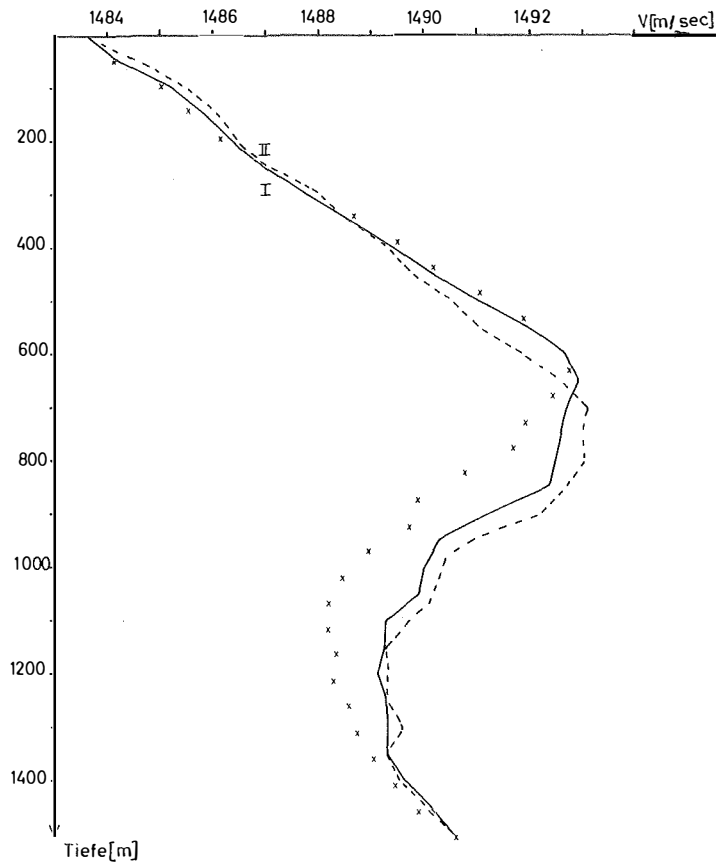


Abb. 8

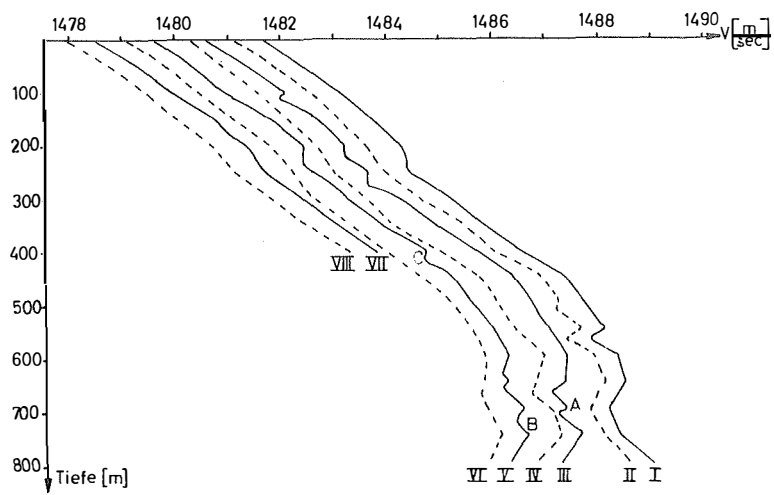


Abb. 9

Tafel 6 (zu W. Kroebel und J. Wick)

Korrekturen, und vor allem für die größeren Tiefen, aus einer Bestimmung der Temperatur aus der korrigierten Leitfähigkeitskurve und den mit den Wasserschöpfern bestimmten nur geringfügig mit der Tiefe schwankenden Salzgehaltswerten. Die Korrektur ließ sich dadurch unter Erhaltung der wirklich registrierten Temperaturkurve stückweise durchführen, indem passende Kurvenabschnitte aus der originalen Registrierkurve der Abb. 5 ausgeschnitten und so zu einer korrigierten Temperaturkurve wieder zusammengestellt wurden, daß sich eine Übereinstimmung mit den aus der gemessenen Leitfähigkeit und der Salzgehaltsbestimmung berechneten Temperaturwerten ergab. Das Ergebnis ist aus der Abb. 6 zu entnehmen.

Eine Bestimmung der absoluten Langzeitkonstanz der Temperatursonde im Labor führt auf einen Wert von etwa $\pm 0,015^\circ\text{C}$. Sie entspricht damit ebenfalls der Ablesegenauigkeit der Bathysondenregistrierkurven ohne Spreizgerät. Die Kurzzeitkonstanz, bezogen auf eine bis mehrere Stunden umfassende Betriebsdauer, bei Messungen im Labor ergab eine Toleranz von $\pm 0,003^\circ\text{C}$. Nun beträgt die Ablesegenauigkeit der korrigierten Temperaturkurve nach Abb. 6, die mit Spreizgerät aufgenommen wurde, $\pm 0,005^\circ\text{C}$. Da das Gerät andererseits für relative Messungen eine Konstanz bis auf $\pm 0,003^\circ\text{C}$ hat, sind somit die Feinstrukturen in der Kurve reell. Das geht sehr deutlich aus dem Vergleich der Feinheiten der aufgenommenen Registrierkurven für Leitfähigkeit und Temperatur untereinander hervor. Denn sie zeigen bis zur Ablesemöglichkeit, der für die Leitfähigkeit eine Unsicherheit von etwa $\pm 0,005\text{‰}$ Salzgehalt und für die Temperatur von $\pm 0,005^\circ\text{C}$ zuzuordnen ist, praktisch völligen Gleichlauf, wie dies aus einem Vergleich an den Stellen A,A'; B,B' bis F,F' der Registrierkurven in der Abb. 6 hervorgeht. Dieses Meßergebnis steht somit in voller Übereinstimmung mit den Toleranzmessungen im Labor für kürzere Meßzeiten.

Die Messungen der Leitfähigkeit auf den Stationen 506, 507 und 508 führten zu Korrekturfaktorwerten von im Mittel 1,00782. Diesem Mittelwert gegenüber schwanken die Werte untereinander um etwa $-1,5\text{‰}$ bis $+2,5\text{‰}$. Die Schwankungen stehen in voller Übereinstimmung mit der Ablesegenauigkeit der Bathysonde, wenn sie ohne Spreizgerät benutzt wird, wie es für die genannten Stationen der Fall war. Ohne Spreizgerät beträgt nämlich die Ablesegenauigkeit für die Leitfähigkeit etwa $\pm 0,02\text{ mS/cm}$ entsprechend einem Salzgehalt von etwa $\pm 0,02\text{‰}$ für die dortigen Wasserhältnisse und für die Temperatur von $\pm 0,02^\circ\text{C}$. Der Unterschied der Mittelwerte für die Korrekturfaktoren auf den Stationen 506 bis 508 gegenüber 501 bis 504 macht 1,2% des Korrekturfaktors aus. Diese Differenz erklärt sich aus einer Eichabweichung der Bathysonde mit und ohne Spreizgerät, die innerhalb der Fehlerbreite der Ablese- und Eichgenauigkeit ohne Spreizerät liegt. Es liegen aus diesem Grunde nicht nur die festgestellten Toleranzen der Korrekturfaktoren untereinander völlig innerhalb der Fehlerbreite, sondern auch die Differenzen der Mittelwerte zwischen den Stationen 501 bis 504 und 506 bis 508. Daraus geht hervor, daß mit einer Aufnahme von Registrierkurven der Bathysonde ohne Spreizgerät nicht die mit ihr an sich erzielbare

Legenden zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 6)

- Abb. 8: Verlauf der Schallgeschwindigkeit in m/sec als Funktion der Tiefe für die Station 504. Kurve I Fieren, Kurve II Hieven. Kreuze: berechnete Schallgeschwindigkeiten aus korrigierten Bathysondenmessungen.
- Abb. 9: Messungen der Schallgeschwindigkeit als Funktion der Tiefe für die Station 487. Die Kurven I, II bis VIII sind jeweils zur besseren Beurteilung des Übereinstimmungsgrades von Kurve zu Kurve in der Geschwindigkeitskoordinate um 0,5 m/sec gegeneinander versetzt gezeichnet. Die geradzahligten Kurven geben die Registrierung beim Hieven, die ungeradzahligten geben die Registrierung beim Fieren wieder.

Meßgenauigkeit auszuschöpfen ist bzw. daß die Ablesegenauigkeit der Registrierkurven ohne Spreizgerät nur mit der absoluten Langzeitkonstanz der Bathysonde korrespondiert bzw. selbst diese noch nicht einmal ganz erreicht.

Das geht auch aus Registrierkurven hervor, die mit der gleichen Bathysonde nach Beseitigung des Lötkontaktfehlers in den grönländischen Gewässern auf einer anschließenden Forschungsfahrt erhalten wurden. Die sehr zahlreichen während dieser Fahrt aufgenommenen Registrierkurven sind bis zur Ablesegenauigkeit ohne Korrekturen absolute Werte der Leitfähigkeit und Temperatur. Das zeigen deutlich die uns freundlicherweise von dem Kieler Institut für Meereskunde überlassenen Kurven der Abb. 7 von dieser Fahrt. Sie sind sehr reich an feinen Strukturen, die in der Kurve für den Leitfähigkeitsverlauf als Funktion der Tiefe mit denen des Temperaturverlaufs völlig parallel gehen.

Wie eingangs bereits erwähnt, wurde auf der Fahrt noch ein weiteres Gerät erprobt. Hierbei handelte es sich um einen Schallgeschwindigkeitsmesser. Seine Schaltung war schon vor mehreren Jahren vom erstgenannten Verfasser entworfen und nach ihr in den letzten Jahren, vor allem mit dem zweitgenannten Verfasser, ein Meßgerät gebaut worden. Mit diesem Gerät wird der Wert für die Schallgeschwindigkeit in einer speziellen Schaltung, über die an anderer Stelle ausführlich berichtet werden wird, ebenfalls durch die Frequenz einer Wechsellspannung gemessen. Das angewandte Meßverfahren erlaubt nach Laborerfahrungen noch bei Schallweglängen von nur etwa 10—20 cm die relative Schallgeschwindigkeit innerhalb etwa der Dauer einer vollständigen Meßreihe bis auf $1 \cdot 10^{-5}$ genau zu ermitteln. Nach den bislang vorliegenden Erfahrungen beträgt demgegenüber die Langzeitkonstanz etwa $0,7—1 \cdot 10^{-4}$ von der Schallgeschwindigkeit entsprechend einer Änderung der Schallgeschwindigkeit um etwa ± 10 bis 15 cm/sec. Durch Wahl größerer Schallweglängen läßt sich diese Meßgenauigkeit noch erheblich heraufsetzen.

Bei dem Meßverfahren wird eine Schallwegstrecke benutzt, durch die ein von der einen Seite herkommender Schallstrahl eines Ultraschallstrahlers an dem anderen Ende der Wegstrecke von einem Schallempfänger aufgenommen wird unter Ausschaltung von Störungen, die durch stehende Wellen entstehen können. Damit wird jeweils die Schallgeschwindigkeit des Seewassers in der Schallstrecke ausgemessen.

Bei der Erprobung des Gerätes ging es vornehmlich um die Frage, inwieweit eine direkte Messung der Schallgeschwindigkeit für die physikalische Ozeanographie interessant sein kann. Zu diesem Zwecke kam es zunächst darauf an, zu ermitteln, mit welcher Genauigkeit die Schallgeschwindigkeit unter praktischen Bedingungen zu messen ist. Leider mußte die endgültige Beurteilung dieser Frage bei den vorgenommenen Versuchen offen bleiben, weil die Schallgeschwindigkeitssonde keinen Tiefenfühler hatte und ihre Tiefe nur aus der abgespulten Seillänge des Haltekabels und dem Drahtwinkel bestimmt werden konnte. Da die Messungen dazu noch bei Windstärken von etwa 7—8 und Wellenhöhen von 5—6 m durchgeführt werden mußten, war diese Tiefenbestimmung für größere Tiefen recht ungenau. Dennoch kam noch ein recht brauchbares Ergebnis heraus. Es ist in Abb. 8 wiedergegeben. In dieser Abbildung ist die Schallgeschwindigkeit direkt als Funktion der Tiefe aufgetragen. Dabei bezieht sich die Kurve I auf die Meßergebnisse, die beim Fieren, und die Kurve II, die beim Hieven erhalten wurden. Wie sich aus der Darstellung ergibt, ist die Übereinstimmung der beim Fieren und Hieven gewonnenen Werte bis zu Tiefen von etwa 400 m recht befriedigend und liegt bei größten Abweichungen von ± 15 cm/sec. Die größeren Abweichungen bei den größeren Tiefen sind durchaus mit den geschätzten Unsicherheiten in der Tiefenbestimmung miteinander verträglich.

Eine Überprüfung der erhaltenen Ergebnisse, mit denen sich aus den zuvor gewonnenen Daten der Bathysondenmessungen nach einer von WILSON (1960) angegebenen

Formel der Schallgeschwindigkeitsverlauf mit der Tiefe berechnen läßt, führte zu den mit einem Kreuz versehenen Werten. Bis zu einer Tiefe von 700 m stimmen sie mit den erhaltenen Meßergebnissen mit einer überraschenden Genauigkeit überein. Für größere Tiefen treten demgegenüber größere Abweichungen auf. In welchem Maße diese Abweichungen auf Unsicherheiten in der Tiefenbestimmung für die Schallsonde zurückzuführen sind und in welchem Umfange und zusätzlich dadurch, daß sich der Schiffsort zwischen beiden nacheinander durchgeführten Messungen sicher um mehr als 20 km verändert haben dürfte, ist nicht zu beantworten. Jedenfalls scheinen die Messungen mit der benutzten Schallsonde recht zuverlässig zu sein. Sehr gut kommt übrigens bei den Messungen der bekannte Sachverhalt heraus, nach dem die Zunahme der Schallgeschwindigkeit mit der Tiefe durch einen nach unten abnehmenden Temperaturgradienten in einer bestimmten Tiefe wieder eine Abnahme erfährt und dadurch zu einem Maximum des Schallgeschwindigkeitsverlaufes mit der Tiefe führt.

Die Zuverlässigkeit der Schallgeschwindigkeitsmessung mit der verwendeten Sonde kann auch aus den Messungen entnommen werden, die in Abb. 9 dargestellt sind. Die Werte dieser Kurven wurden durch mehrmaliges Fieren und Hieven, abgesehen von der Schiffsdrift, am gleichen Ort durchgeführt. Da sie recht genau aufeinander fallen, sind sie der Darstellung wegen jeweils um 0,5 m/sec versetzt in Abb. 9 wiedergegeben worden. Die Werte der Kurven sind Mittelwerte aus Registrierungen, die während des Fierens und Hievens unter Eintragung von Tiefenmarken mit einem Enograph der Firma Rohde & Schwarz aufgenommen worden waren. Die an einigen Stellen, z. B. A, B und C auftretenden Schwankungen der Schallgeschwindigkeit mit der Tiefe beim Fieren bzw. Hieven rühren von den Schiffsbewegungen her. Aus ihnen lassen sich die Höhenschwankungen der Sonde in der Tiefe bestimmen. Sie entsprechen z. B. für die Schwankung an der Stelle A der Kurve einer fast periodischen Höhenversetzung der Sonde während des Messungsablaufs um ca. 12 m.

Auf Grund der erhaltenen Ergebnisse soll die Einsatzfähigkeit der Schallsonde für ozeanographische Messungen weiter verfolgt werden.

Literaturverzeichnis

- HINKELMANN, H. (1957): Gerät zur Schnellregistrierung in der Ozeanographie. *Z. Angew. Physik*, **9** (10), 505—513. — HINKELMANN, H. (1958): Ein Verfahren zur elektrodenlosen Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Elektrolyten. *Z. Angew. Physik*, **10** (11), 500—503. — KROEBEL, W. (1961): Zur Meßmethodik von ozeanographischen Sondenmeßgeräten. *Kiel. Meeresf.* **17** (1), 17—24.
- THOMAS, B. D., THOMPSON, T. G. and UTTERBACK, C. L. (1934): The Electrical Conductivity of Sea Water. *J. du Cons.* **9** (1), 28—35. BRADSHAW, A. L. (1962): Vorläufige Ergebnisse von Untersuchungen zur Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit vom Druck im Seewasser (unveröffentlicht). — WILSON, W. D. (1960): Speed of Sound in Sea Water as a Function of Temperature, Pressure, and Salinity. *J. Acoust. Soc. Am.* **32**, S. 641.