

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.

Messungen der Streufunktion und der Polarisation des Meerwassers.

VON HANS HINZPETER

Zusammenfassung: Nach einer einleitenden Betrachtung über bislang bekannte Streufunktionen des Meerwassers wird über die Ausmessung der Streufunktion und der Polarisation von einigen geschöpften Proben aus der Beltsee berichtet.

Im Bereich einer Trübungsschicht wird eine Verflachung der Streufunktion gefunden. Die Polarisation nimmt mit zunehmender Trübung ab und ist im Spektralbereich bei 700 nm immer kleiner als bei 400 nm.

Die Streufunktion zeigt eine deutliche Farbdispersion, die bei klarem Wasser auf eine vorherrschende Teilchengröße von $0,5 \mu$ bis $1,5 \mu$ schließen läßt; d. h. diese Teilchengröße tritt häufiger auf, als nach einem Potenzgesetz zu erwarten wäre. Der Verlauf der Polarisation weicht bei klarem Wasser nur wenig von dem um einen konstanten Faktor verminderten Gang der Polarisation chemisch reinen Wassers ab. Bei größerer Trübung treten bei kleinen Streuwinkeln aber Abweichungen von diesem Verhalten auf. Bei klarem Wasser ist die Änderung der Polarisation mit dem Streuwinkel nahezu unabhängig von der Wellenlänge. In getrübbten Schichten ist dagegen eine deutliche Dispersion der Polarisation zu beobachten.

Measurements of the scattering function and polarisation of sea water (Summary): The scattering functions for sea water given by some authors are compared and measurements of the scattering function and polarisation of samples of the Baltic Sea are discussed.

In a turbidity layer a flatter scattering function than in clear water is found. The polarisation decreases with increasing turbidity and is smaller in the 700 nm region than in the 400 nm region.

The scattering function shows colour dispersion, from which a predominant size of particles with radii of $0,5 \mu$ — $1,5 \mu$ is concluded (that means predominant against a concentration given by a potenz law for the particle distribution). The angular distribution of the polarisation in clear water is nearly the same as that for chemical clean water reduced by a constant factor. But in turbidity layers a deviation from this is observed for small scattering angles. In clear water the variation of the polarisation with scattering angle is independant from the wavelength, in a turbidity layer a dispersion of the polarisation is measured.

Allgemeine Bemerkungen

In den letzten Jahren ist mehrfach die Streufunktion des Meerwassers gemessen worden (JERLOV 1961, TYLER 1961, SASAKI 1960), und man hat versucht, daraus Aussagen über das Hydrosol des Meerwassers abzuleiten. Obwohl das Hydrosol sicher nicht nur aus kugelförmigen Teilchen besteht, erfolgte die Interpretation der gemessenen Werte nach der MIESCHEN Theorie. Diese gibt die von einem Teilchen in den Winkel Θ (siehe Abb. 4) gestrahlte Streustrahlungsdichte in Abhängigkeit von dem Verhältnis Teilchenradius zu Wellenlänge der Strahlung $\left(\frac{r}{\lambda}\right)$ und vom Brechungsindex m des Teilchens. Da meist beide Größen nicht bekannt sind, ist eine eindeutige Bestimmung des Teilchenradius um so sicherer möglich, je mehr optische Parameter des Streulichts verfügbar sind. Die durch Streulichtmessungen möglichen Informationen werden durch die Bestimmung der Stokesparameter (CHANDRASEKHAR 1950) ausgeschöpft. Da das Streulicht des Hydrosols aber — soweit bisher bekannt — nur linear polarisiert ist, genügt die Bestimmung der Komponenten $I_{\perp}(\Theta)$ und $I_{\parallel}(\Theta)$ des Streulichts.

$I_{\perp}(\Theta)$ und $I_{\parallel}(\Theta)$ sind die senkrecht und parallel zur Beobachtungsebene schwingenden Komponenten des Streulichts; die Beobachtungsebene wird durch den Primärstrahl und den gestreuten Strahl aufgespannt. Dann sind

$$(1) J(\Theta) = \frac{I_{\perp}(\Theta) + I_{\parallel}(\Theta)}{2}$$

die Strahlungsdichte und

$$(2) \mathbf{P}(\Theta) = \frac{I_{\perp}(\Theta) - I_{\parallel}(\Theta)}{I_{\perp}(\Theta) + I_{\parallel}(\Theta)}$$

die Polarisation des Streulichts. Relativwerte von $J(\Theta)$, etwa gegeben durch $I(\Theta) = \frac{J(\Theta)}{E}$, sollen als Streufunktion bezeichnet werden. E kann hier als Eichgröße aufgefaßt werden.

Eine bedeutende Schwierigkeit bei der Interpretation von Streulicht- und Polarisationsmessungen liegt in der Tatsache, daß das Hydrosol aus Teilchen mit sehr verschiedener Größe und verschiedenem Brechungsindex besteht. Aus den gemessenen optischen Parametern müßte deshalb die Häufigkeit der Teilchen in Abhängigkeit von Größe und Brechungsindex ermittelt werden. Eine solche Bestimmung ist deshalb immer etwas unsicher und sehr mühevoll. Sie kann nur durch den Vergleich der gemessenen Parameter mit den für Modellhydrosole berechneten erfolgen. Solche Rechnungen werden meist nur für Teilchenspektren mit einem Brechungsindex durchgeführt. Hierbei sind zwei Wege beschränkt worden.

1. Das Teilchenspektrum wird durch eine Gaußverteilung beschrieben. Dies wird immer dann geschehen, wenn aus den Eigenarten der gemessenen Parameter bereits das bevorzugte Auftreten einer bestimmten Teilchengröße zu vermuten ist.
2. Das Teilchenspektrum kann durch ein Potenzgesetz beschrieben werden, d. h. die Zahl N der Teilchen vom Radius r ist gegeben durch

$$(3) \quad dN(r) = c r^{-\nu} dr,$$

wobei c ein Massenfaktor und ν ein Formparameter sind. Eine solche Verteilung ist für das Aerosol und technische Stäube nachgewiesen (JUNGE 1952). Wenn sich ein solches Teilchenspektrum über einen so großen Bereich erstreckt, daß man von $r = 0$ bis $r = \infty$ integrieren kann, ohne größere Fehler zu begehen, dann ergeben sich wesentliche und leicht überprüfbare Aussagen für die Extinktion, die Streufunktion und die Polarisation des Aerosols.

Stellt man den Extinktionskoeffizienten η dar durch

$$(4) \quad \eta = \beta \lambda^{-\alpha},$$

dann ist

$$(5) \quad \alpha = \nu - 3,$$

wobei α nicht kleiner als 0 werden kann. (4) ist der ANGSTRÖMSCHE Ansatz, worin λ die Wellenlänge, β der Extinktionsfaktor und α der Wellenlängenexponent sind. Für die Streufunktion und die Polarisation kann gezeigt werden, daß beide keine Farbdispersion besitzen, d. h. die Änderung von $I(\Theta)$ und $P(\Theta)$ mit dem Streuwinkel ist unabhängig von der Wellenlänge (VOLZ, 1956).

Vorliegende Ergebnisse

Die von JERLOV gemessene Streufunktion zeigt für das Teilchenstreulicht eine sehr große Vorwärtsstreuung; die maximale Strahlungsdichte des Streulichts verhält sich zur minimalen wie $10^4 : 1$. Diese Vorwärtsstreuung ist wesentlich größer als sie z. B. für das Aerosol bekannt ist und spricht für das Auftreten sehr vieler großer Teilchen ($r > 5 \mu$). Eine Auszählung von Teilchengrößen durch JERLOV (1955) aus einem schwedischen Fjord zeigt, daß die Häufigkeitsverteilung zwischen 5μ und 80μ ebenfalls durch ein Potenzgesetz dargestellt werden kann, wobei der Formparameter den Wert 2,5 hat. Nimmt man an, daß diese Verteilung auch im Meer gültig ist, dann würde unter den oben genannten Einschränkungen gelten, daß die Extinktion des Hydrosols

von der Wellenlänge unabhängig ist. Tatsächlich folgt aus den von JERLOV (1961) mitgeteilten Werten, für den Wellenlängenexponenten des Angströmschen Ansatzes der Wert 0,1 und auch IVANOFF (1960) leitet aus seinen Messungen eine wellenlängenunabhängige Extinktion ab.

Beide Messungen gelten nicht für reines Ozeanwasser. Jedoch liegen für Tiefen von 600—3000 m des Japanischen Meeres Messungen von SASAKI (1960) vor. Dieser findet in seinen Proben eine um etwa eine Zehnerpotenz geringere Vorwärtsstreuung als JERLOV und deutliche Feinstrukturen bei Streuwinkeln zwischen 70° und 140° . Diese Streufunktion konnte SASAKI gut durch ein monodisperses Hydrosol von 10^5 Teilchen pro cm^3 mit einem Teilchenradius von $0,32 \mu$ und einem Brechungsexponenten 1,20—1,25 wiedergeben. In Abb. 1 sind die Streufunktionen von JERLOV und SASAKI zusammengestellt. Überlagert man die Extinktion des monodispersen Hydrosols der Extinktion reinen Wassers, dann erhält man einen spektralen Verlauf der Strahlungsschwächung, der dem in der Sargassosee gemessenen sehr ähnlich ist. (Abb. 2). Leider liegen von den Proben Sasaki keine Polarisationsmessungen vor. In Abb. 3 ist die durch dieses Hydrosol zu erwartende Polarisationsfunktion dargestellt; sie zeigt, welche Hilfe Polarisationsmessungen bei der Bestimmung von Hydrosolen liefern könnten.

Messungen der Streufunktion und der Polarisationsfunktion an Wasserproben der Beltsee

Um einen Überblick zu gewinnen, wie weit Streulicht – und Polarisationsmessungen zur Untersuchung des Ostseehydrosols brauchbar sind, wurden am 12. 10. 61 mehrere Wasserproben aus 1 bis 40 Meter Tiefe an einer 65 Meter tiefen Stelle vor der Insel Langeland entnommen und die Streufunktion und die Polarisation derselben im Laboratorium bestimmt¹⁾. Dazu wurde ein konisches Glasgefäß benutzt, das zur Vermeidung von zusätzlichem Streulicht mit einem Tubus zum Lichteintritt und einer diesem gegenüber liegenden Lichtfalle versehen war. (Abb. 3). Die Messungen erfolgten bei 400 nm und 700 nm²⁾. Jede Filterkombination hatte eine Halbwertsbreite von etwa 80 nm. Als Lichtquelle diente eine Xenonhochdrucklampe und als Empfänger ein Multiplier. Absolutmessungen waren nicht möglich und auch der Anteil des reinen Wassers an der Streu- und der Polarisationsfunktion ist leider nicht gegeben. Von den Proben wurde außerdem der Salzgehalt gemessen und die Extinktion mehrere Tage nach den Streulichtmessungen spektralfotometrisch bestimmt.

¹⁾ Die Messungen wurden mit Hilfe von Herrn Dr. BULLRICH am Meteorologischen und Geophysikalischen Institut der Universität Mainz durchgeführt. Herrn Dr. BULLRICH bin ich für seine Unterstützung sehr zu Dank verpflichtet.

²⁾ 1 nm = 1 Nanometer = 1μ .

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 1)

- Abb. 1: Streufunktionen
 gemessen von Jerlov (465 nm) — — —
 gemessen von Sasaki (546 nm) —————
 konstruiert aus reinem Wasser und 10^5 Teilchen pro cm^3 mit $0,32 \mu$ Radius und Brechungsexponent 1,25
- Abb. 2: Wellenlängenabhängigkeit der Extinktion
 reinen Wassers
 der Sargassosee —————
 des gleichen synthetischen Hydrosols wie in Abb. 1 — — — —
- Abb. 3: Polarisation des Streulichts
 reinen Wassers —————
 eines Teilchens von $0,32 \mu$ Radius mit dem Brechungsindex 1,25 — — — —
 des gleichen synthetischen Hydrosols wie in Abb. 1

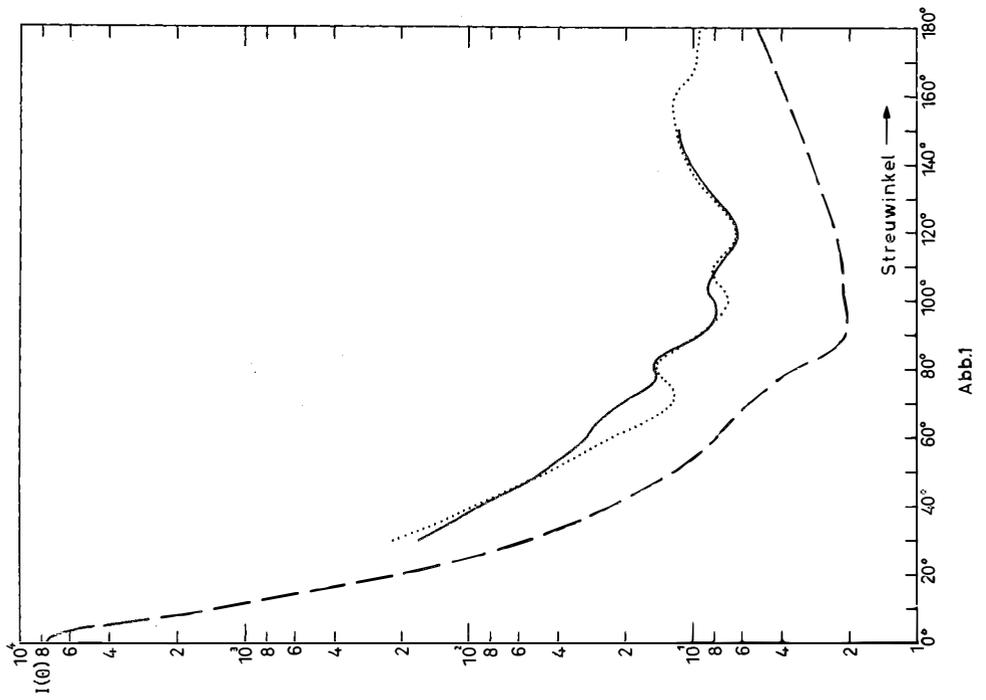


Abb.1

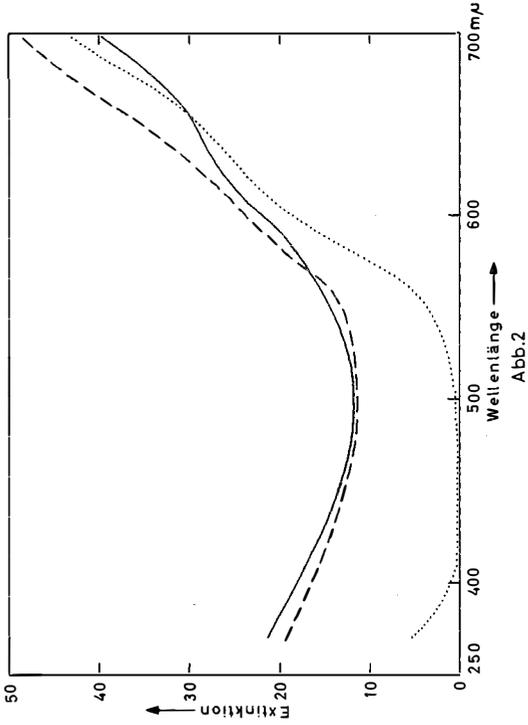


Abb.2

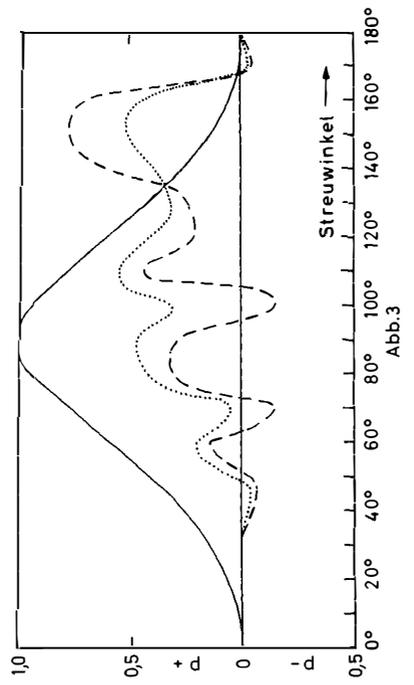


Abb.3

Tafel 1 (zu H. Hinzpeter)

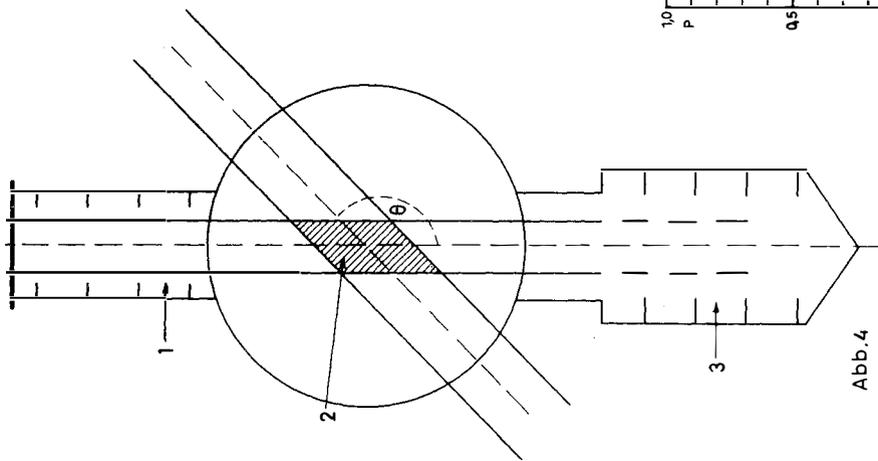


Abb. 4

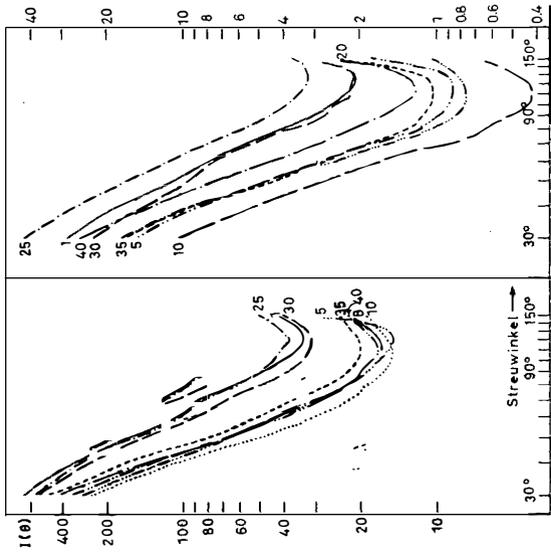


Abb. 5

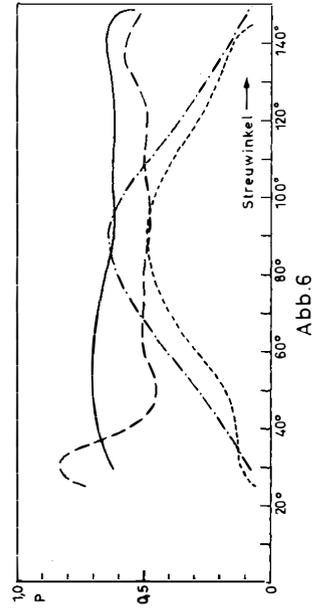


Abb. 6

Die gemessenen Streufunktionen sind in Abb. 4 dargestellt. Sie zeigen ein Minimum bei 120° — 130° und meist einen geringeren Anstieg als die von JERLOV gegebene Kurve. Allgemein ist das Minimum bei 700 nm stärker ausgeprägt als bei 400 nm. Eine Feinstruktur ist nur im langwelligen Spektralbereich für die Proben aus 25 und 30 Meter Tiefe angedeutet. Jedoch sind die Werte für 30 Meter Tiefe nicht zuverlässig, da sich bei dieser Probe Lackschwaden aus der Lichtfalle gelöst hatten und in das Streuvolumen diffundiert waren. Die Polarisation $P(\theta)$ zeigt für alle Proben ein sehr ähnliches Aussehen. Zwischen 60° und 120° hat sie einen Verlauf, der der Polarisation des Wassers proportional ist, und erst bei kleinen Streuwinkeln treten Abweichungen davon auf. Beispiele hierfür gibt Abb. 5. Im langwelligen Bereich ist die Polarisation bei Streuwinkeln um 90° stets geringer als im kurzwelligen.

Einige einfache Parameter des Streulichts und der Polarisation sowie die Extinktion sind zusammen mit dem für jede Probe bestimmten Salzgehalt in Abb. 6 in Abhängigkeit von der Tiefe dargestellt.

Hierfür wurden folgende Größen gewählt:

- I (40°) in relativen Einheiten als Maß für das Gesamtstreulicht,
- η , der Extinktionskoeffizient (da er in größerem zeitlichen Abstand nach den Streulichtmessungen durchgeführt wurde, ist er nur von begrenzter Genauigkeit),
- C, das Verhältnis der maximalen Strahlungsdichte zur minimalen Strahlungsdichte einer Streufunktion, als ein die Streufunktion beschreibender Parameter,
- P (90°), als Parameter der Polarisation.

In der Abbildung sind die Wellenlängenbereiche, für die die Parameter gelten, als Indizes angeschrieben worden.

Die Abbildung läßt am Salzgehalt die Schichtung von Ostsee- und Kattegatwasser erkennen. Unter der Sprungschicht liegt eine Schicht mit erhöhter Trübung, in der das Streulicht in beiden Spektralbereichen und die Extinktion zunehmen.

Der Parameter C_{700} verläuft invers dazu, d. h. mit zunehmender Dichte des Hydrosols wird der Verlauf der Streufunktion flacher, was man durch eine Anreicherung kleiner Teilchen deuten kann. (Der nicht eingezeichnete Parameter C_{400} zeigt den gleichen Verlauf).

Die Polarisation P (90°) zeigt in beiden Spektralbereichen ein zum Streulicht inverses Verhalten. Man kann dies durch ein Hydrosol positiver Polarisation, die aber geringer als die des reinen Wassers ist, leicht erklären. Dies entspricht auch den Befunden von IVANOFF (1960) und WATERMAN und WESTELL (1956). So läßt sich die Eigenschaft der trübenden Schicht durch ein Hydrosol, das seine Konzentration erhöht, dabei aber auch besonders kleine Teilchen anreichert, interpretieren.

Für die Trübung in der oberen Schicht versagt diese Deutung, denn diese nimmt zwischen 1 und 5 Meter Tiefe stark ab, während gleichzeitig die Polarisation gleich

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 2)

- Abb. 4: Schema der Meßanordnung (1 = Lichteintrittstube, 2 = Streuvolumen, 3 = Lichtfalle)
- Abb. 5: Gemessene Streufunktion in den Spektralbereichen 400 (linke Hälfte) und 700 nm (rechte Hälfte der Abb.).
(Als relative Werte sind unmittelbar die Ausschläge des Anzeigeinstrumentes aufgetragen)
- Abb. 6: Gemessene Polarisation $P_{400}(\theta)$
 - der Probe aus 8 m Tiefe — . . . —
 - der Probe aus 20 m Tiefe - - - -
 - relative Polarisation $F(P_{400}(\theta))$
 - der Probe aus 8 m Tiefe —————
 - der Probe aus 20 m Tiefe - - - - -

bleibt und im langwelligen Bereich sogar zunimmt. Dies kann nicht mit abnehmender Konzentration eines Hydrosols erklärt werden, sondern man muß annehmen, daß es sich in 1 und 5 Meter Tiefe um zwei Hydrosole mit verschiedenen optischen Eigenschaften handelt.

Zur Klärung der Frage, wie weit die gemessenen Größen mit der Annahme eines Potenzgesetzes für das Teilchenspektrum des Hydrosols übereinstimmen, sind in Abb. 7

D_1 , die Dispersion der Streufunktion

$$[I_{400}(\Theta) : I_{700}(\Theta) \text{ für } 30^\circ < \Theta < 90^\circ \text{ mit } I_{400}(90^\circ) : I_{700}(90^\circ) = 1],$$

$$F(P_{400}(\Theta)) = \left[\frac{P(\Theta)}{P_w(\Theta)} \right]_{400} ; P_w(\Theta) = \text{Polarisation reinen Wassers,}$$

D_p , die Dispersion der Polarisation $[P_{400}(\Theta) : P_{700}(\Theta)]$, dargestellt.

Von der Dispersion der Streufunktion ist bei einem Potenzgesetzspektrum zu erwarten, daß in einem Winkelbereich, in dem der Einfluß des Wasserstreulichts zu vernachlässigen ist, keine Wellenlängenabhängigkeit auftritt. Tatsächlich nimmt in allen Tiefen die Größe D_1 mit kleiner werdendem Winkel zunächst ab, was man dem zurückgehenden Einfluß des Wasserstreulichts zuschreiben kann. Sie nähert sich jedoch keinem konstanten Wert, sondern erreicht in den meisten Fällen ein Minimum bei etwa 50° , um dann wieder zuzunehmen. Dies gilt für alle Tiefen mit Ausnahme derjenigen starker Trübung in 1, 25 und 30 Meter Tiefe. Offenbar kann man das Teilchenspektrum nicht durch ein Potenzgesetz beschreiben. Faßt man dieses Minimum als das erste Beugungsminimum der Strahlung bei 400 nm an kugelförmigen Teilchen auf, dann kann man den Radius der Teilchen abschätzen, die hierfür verantwortlich sind. Nach BUCERIUS (1946), DE BARY und BULLRICH (1958) gilt für den Radius r großer kugelförmiger Teilchen die Formel

$$(6) \quad v = \frac{\text{Konst.}}{\sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)}$$

Die hierin auftretende Konstante ist allerdings vom Brechungsindex abhängig, so daß der Teilchenradius insbesondere bei den kleinen Brechungsindizes des Hydrosols sehr nur unsicher erfaßt werden kann. Es läßt sich deshalb nur sagen, daß für Teilchen mit Radien von etwa 0,5 bis 1,5 μ das Potenzgesetz nicht gilt und diese Größe häufiger vertreten ist, als nach einem Potenzgesetz anzunehmen wäre.

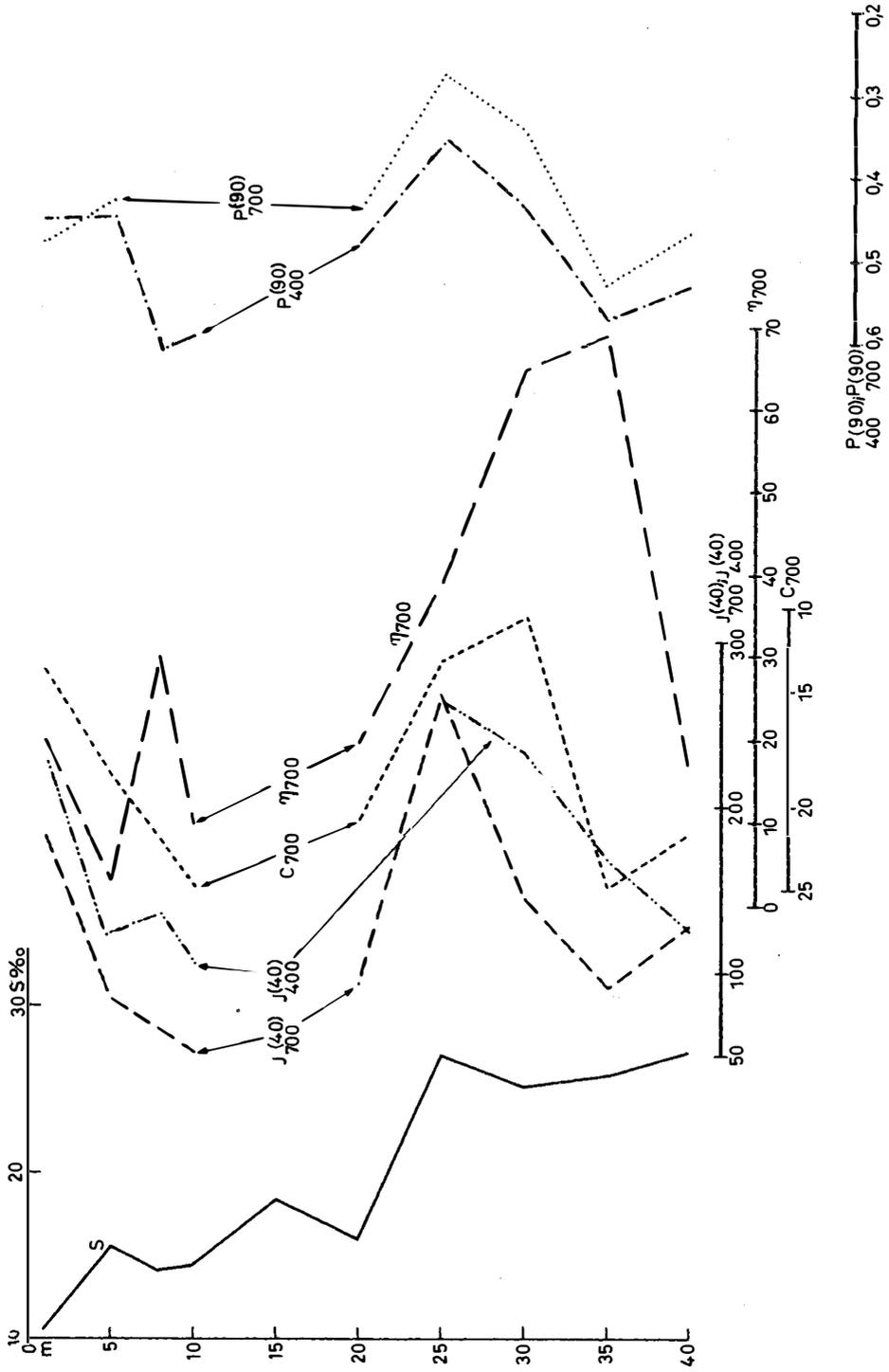
In 1 Meter und in 25 und 30 Meter Tiefe ist das Minimum wesentlich stärker ausgeprägt, was vielleicht auf eine noch stärkere Anreicherung gerade dieser Teilchengrößen zurückgeführt werden kann. Wie bereits erwähnt, sind die Streulicht- und Polarisationsmessungen der Probe aus 30 Meter Tiefe gestört. Die Größe $F(P(\Theta))$ zeigt, daß die Polarisation im Winkelbereich $50^\circ < \Theta < 120^\circ$ sich prozentual genau so ändert wie die reinen Wassers. In Proben geringer Trübung gilt dies sogar für den gesamten durchgemessenen Winkelbereich. Der Verlauf dieser Größe, wie auch die Dispersion der Polarisation in 1 und 5 Meter Tiefe, weisen ebenfalls darauf hin, daß es sich in

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 3)

Abb. 7: Änderung mit der Tiefe von

Salzgehalt ($S^0/_{00}$), Streulichtintensitäten von $I_{400}(40^\circ)$, und $I_{700}(40^\circ)$, Extinktionskoeffizient bei 700 nm τ_{700} , Streufunktionsparameter C_{700} , Polarisation $P_{400}(90^\circ)$ und $P_{700}(90^\circ)$.

(Um ein einheitliches Bild zu geben, laufen die Skalen für S , $I(40^\circ)$ und τ_{700} von links nach rechts, die für $P(90^\circ)$ und C von rechts nach links.)



Tafel 3 (zu H. Hinzpeter)

Abb.7

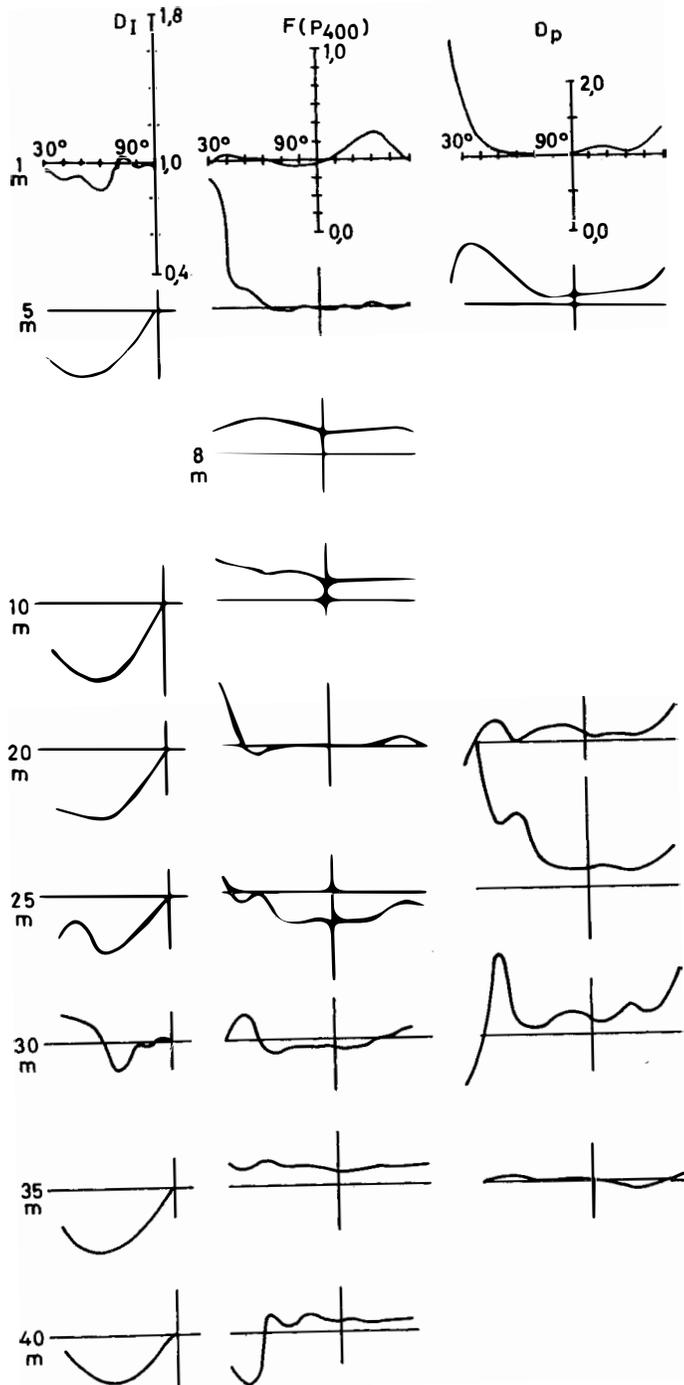


Abb. 8

Tafel 4 (zu H. Hinzpeter)

diesen beiden Tiefen um verschiedene Hydrosole gehandelt haben muß. Die Dispersion der Polarisation scheint bei Proben geringer Trübung sehr klein zu sein. Wegen des nur schwachen Streulichts im langwelligen Spektralbereich fehlt diese Größe für einige Tiefen mit geringer Trübung. In den stark getrübbten Schichten tritt jedoch auch eine sehr markante Dispersion der Polarisation auf.

Die Messungen hatten nur orientierenden Charakter. Quantitative Analysen der gemessenen Größen wurden deshalb nicht vorgenommen. Die Streufunktionen zeigen jedoch, daß so viel große Teilchen den Streuvorgang bestimmen, daß im Bereich der Vorwärtsstreuung nicht die Ergebnisse der exakten Mieschen Theorie benötigt werden, sondern daß die Streufunktionen gut mit den für große Teilchen gegebenen Näherungen beschrieben werden können.

Literaturverzeichnis

- DE BARY, E. und K. BULLRICH (1958): Zur Theorie des Bischopringes. Meteorol. Rdsch. **12**, H. 3. — BUGERIUS, H. (1946): Theorie des Regenbogens und der Glorie. Optik **1**, 188. — CHANDRASEKHAR, S. (1950): Radiative transfer. Oxford Clarendon Press. — IVANOFF, A. (1960): Quelques resultats concernant les proprietes diffusantes des eaux de mer. Symposium on radiant energy in the sea. UHHI Monographie Nr. 10, S. 45. — JERLOV, N. G. (1955): The particulate matter in the sea as determined by means of the Tyndall meter. Tellus **7**, Nr. 6, S. 218. — JERLOV, N. G. (1961): Optical measurements in the eastern north atlantic. Medd. oceanogr. Inst. I Göteborg **30**, Ser. B, Nr. 11. — JUNGE, CHR. (1952): Gesetzmäßigkeiten in der Größenverteilung atmosphärischer Aerosole über dem Kontinent. Ber. Dtsch. Wetterd. US-Zone Nr. 35, S. 261. — SASAKI, T., N. OKAMI, G. OSHIBA and S. WATANABE (1960): Angular distribution of scattered light in deep sea water. Rec. of oceanogr. works Japan **5**, No. 2, S. 1. — TYLER, J. E. (1961): Scattering properties of distilled and natural water. Limnology and Oceanography **6**, Nr. 4, S. 451. — VOLZ, F. (1956): Optik des Dunstes. Handbuch der Geophysik VIII, Kap. 14. — WATERMAN, T. H. and W. E. WESTELL (1956): Quantitative effect of the sun position on submarine light polarisation. Journ. Marine Res. **15**, S. 149.

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 4)

- Abb. 8: Schematische Darstellung
 der Dispersion der Streufunktion D_I
 der relativen Polarisation $F(P_{400}(\theta))$
 der Dispersion der Polarisation D_P in verschiedenen Tiefen