

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.

Untersuchungen über Durchsichtigkeit und Farbe des Seewassers. I.

Von H. WATTENBERG, Kiel.

Meereskundliche Arbeiten der Universität Kiel Nr. 44.

Einleitung.

Die meereskundlichen Ziele, die heute bei Untersuchungen über die Lichtdurchlässigkeit des Wassers und über die Beleuchtung im Meere verfolgt werden, lassen sich in 4 Gruppen zusammenfassen, welche folgendermaßen kurz gekennzeichnet werden können:

1. Zur Beurteilung des Wärmehaushalts des Meeres ist es notwendig, die Dicke der Schicht zu kennen, in der die von Sonne und Himmel eingestrahlte Energie absorbiert und in Wärme verwandelt wird (vgl. z. B. W. R. G. ATKINS 1932).

2. Durch die optischen Eigenschaften (Absorption in verschiedenen Spektralgebieten) lassen sich oft Wassermassen gut charakterisieren, da diese Eigenschaften vom Gehalt an gefärbten gelösten Stoffen und an festen Partikeln abhängig sind. (Vgl. z. B. H. PETTERSSON 1935, K. KALLE 1937).

3. Bei quantitativen Untersuchungen über die Photosynthese der Pflanzen im Meere ist die genaue Kenntnis der in verschiedenen Tiefen zur Verfügung stehenden Lichtmenge und -qualität erforderlich (vgl. z. B. A. SEYBOLD 1934, H. PETTERSSON, H. HÖGLUND und S. LANDSBERG 1934, G. L. CLARKE und R. H. OSTER 1934).

4. Die bekannten tageszeitlichen Vertikalwanderungen gewisser Meerestiere, vor allem der Copepoden, sind zum größten Teil phototaktische Effekte, deren nähere Untersuchung eine Kontrolle der Lichtverhältnisse erfordert (vgl. F. S. RUSSEL 1934, G. L. CLARKE 1936, J. HENSCHEL 1938).

Bei den zur Bearbeitung dieser Probleme in Frage kommenden photometrischen Verfahren können wir zwei grundsätzlich verschiedene Meßprinzipien unterscheiden, von denen das eine die Messung der in verschiedenen Tiefen vorhandenen Beleuchtung durch das Tageslicht betrifft, das andere die Messungen des Absorptionskoeffizienten des Seewassers, also der Lichtabsorption einer Wasserschicht bekannter Länge darstellt. Unter diesen beiden Verfahren hat man je nach dem Ziel der Untersuchung zu wählen.

I. Die Messung der Beleuchtung im Meere kommt vor allem für die unter 1, 3 und 4 genannten Probleme in Frage. Die dazu notwendige Apparatur ist von verschiedenen Seiten beschrieben worden (z. B. H. PETTERSSON 1935, C. L. UTTERBACK 1936). Bei ihrer Anwendung ist eine Reihe von wichtigen Punkten zu beachten, die neuerdings auf Veranlassung des International Council for the Exploration of the Sea von H. PETTERSSON und H. H. POOLE (1937) genau festgelegt worden ist. In manchen Fällen, wenn es sich nicht um sehr große Genauigkeit handelt, ist es nicht unbedingt notwendig, die Beleuchtung in situ selbst zu messen, wenn man nur die Intensität des auf das Meer einfallenden Tagelichtes verfolgt. Kennt man nämlich die Lichtdurch-

lässigkeit des Seewassers in dem betreffenden Meeresgebiet, so läßt sich die Beleuchtung in verschiedenen Tiefen berechnen. Dies Verfahren ist allerdings nur bei einigermaßen homogenem Wasser anwendbar, z. B. im offenen Ozean. In stark geschichtetem Wasser, in dem auch die optischen Eigenschaften große vertikale Unterschiede aufweisen, wie z. B. in der Ostsee, ist eine Messung in situ erforderlich.

Kommt es auf die Ermittlung des Absorptionskoeffizienten des Seewassers zwecks Charakterisierung der Wassermassen an, so kann man zwar prinzipiell diese Größe auch aus den Beleuchtungsmessungen ableiten, denn der Unterschied der Beleuchtung zwischen zwei Tiefen ergibt ohne weiteres die Absorption in dieser Wasserschicht, aber dieses Verfahren ist wegen der unvermeidlichen Fehler in der Bestimmung der Tiefe nicht sehr genau, zum anderen ist es nur beschränkt anwendbar, nämlich nur bis in solche Tiefen, in denen das Tageslicht gut meßbar ist. Außerdem wird die Lichtabsorption durch trübende Teilchen im diffusen Tageslicht durch Rückstrahlung stark verkleinert, ein Effekt, der bei der Messung nach dem direkten Verfahren in Wegfall kommt.

II. Man bestimmt bei den direkten Verfahren die Durchlässigkeit des Wassers durch Messung der Schwächung des Lichts einer konstanten Lichtquelle durch eine bestimmte Wasserschicht. Grundsätzlich sind dabei zwei Ausführungsarten möglich, die beide verwirklicht sind: Entweder man versenkt das Meß-Aggregat, bestehend aus Lichtquelle und Photozelle, ins Meer und leitet den Photostrom mit Hilfe eines Kabels zur Messung an Bord, oder man schöpft das Wasser aus der betreffenden Tiefe und mißt die Absorption im Laboratorium. Beide Verfahren haben ihre Vor- und Nachteile und ihr bestimmtes Anwendungsbereich. Bei der Messung in situ kann man durch langsames Herablassen und dauerndes Ablesen die Durchlässigkeit kontinuierlich bestimmen und auf diese Weise auch sehr dünne opake Schichten, wie sie tatsächlich im Meere vorkommen, erfassen. Solche Schichten werden bei dem anderen Verfahren kaum festgestellt werden können, da man die Wasserproben aus praktischen Gründen in vertikalen Abständen von mehreren Metern entnimmt. Dafür hat man bei der Untersuchung der Wasserproben im Laboratorium die Möglichkeit, die Absorption in verschiedenen Spektralbereichen zu messen, was in situ nur umständlich zu bewerkstelligen wäre; außerdem kann man das Wasser filtrieren und durch Messung der Absorption vor und nach der Filtration die Anteile trennen, die den gelösten Stoffen und andererseits den festen Teilchen an der Durchlässigkeit und Farbe des Wassers zukommen. Schließlich ist man bei der Entnahme der Wasserproben weniger vom Wetter und von eingearbeiteten Beobachtern abhängig als bei der Messung in situ. Infolgedessen sind die Beobachtungen an Wasserproben in räumlich ausgedehnterem Umfange und zeitlich dichter Folge durchführbar.

Da unsere Ziele im Rahmen der unter II genannten Aufgaben liegen, kommen für uns die beiden letzten Meßverfahren in Betracht, von denen jedes für sich unersetzlich ist, und die sich gegenseitig ausgezeichnet ergänzen. In der vorliegenden Arbeit wird über die für die Durchlässigkeitsmessungen in situ verwendete Apparatur und einige damit im Fehmarn-Belt ausgeführte Beobachtungen berichtet werden. In einem zweiten Teil soll die Methode der Lichtabsorptionsmessung im Laboratorium beschrieben und die in der Kieler Bucht damit erhaltenen Ergebnisse behandelt werden.

Der Lichtdurchlässigkeits-Messer.

Die einfachste Anordnung zur Messung der Absorption des Wassers in situ besteht aus einer Lampe und aus einer Photozelle, die in festem Abstand voneinander angebracht sind. Um genügend große und daher mit einiger Genauigkeit meßbare Unterschiede im Photostrom für die Änderungen in der Transparenz des Wassers zu bekommen, muß man die Schichtdicke zwischen Lampe und Photozelle um so länger wählen, je geringer die zu erwartenden Unterschiede in der Durchsichtigkeit sind. In Fjorden z. B., in denen infolge des Zustroms humusreichen Süßwassers sehr erhebliche optische Gradienten auftreten, kommt man, wie H. PETERSSON (1935) gezeigt hat, mit einer Weglänge des Lichtstrahls von 1 m und weniger aus. In der offenen Ostsee wird man größere Schichtdicken (etwa 2 m) wählen.

Nun sind die Schichten stärkerer Absorption, wie sie z. B. durch Anhäufungen von Detritus an Dichtesprungschichten entstehen, oft von sehr geringer Mächtigkeit, zum Teil nur von wenigen cm Dicke. Es leuchtet ein, daß bei Verwendung eines vertikalen Abstandes von 2 m zwischen Lampe und Photozelle die feinere Struktur in den optischen Eigenschaften des Meeres unter diesen Umständen stark verwischt werden muß.

Um beiden Anforderungen, die an einen Durchlässigkeits-Messer gestellt werden müssen, nämlich große Weglänge des Lichtstrahls und geringe Dicke der verwendeten Wasserschicht, zu vereinigen, wurde der in Abb. 1 wiedergegebene Apparat konstruiert. Wie man sieht, wurden die beiden Forderungen durch mehrfache Reflexion des Lichtstrahles zwischen zwei Spiegeln erfüllt¹⁾. Der Abstand zwischen den Spiegeln beträgt 35 cm, so daß der Lichtstrahl einen Weg von $6 \times 35 \text{ cm} = 2,10 \text{ m}$ zurückzulegen hat. Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Konstruktion war ferner die so erreichbare gedrungene Bauart und große Handlichkeit des Apparates (vgl. Abb. 1).

Von der 4-Voltlampe L wird durch den Kondensator K ein annähernd paralleles Lichtbündel ausgesendet, das an den beiden Spiegeln Sp 1 und Sp 2 insgesamt fünfmal reflektiert wird und schließlich durch die Glasplatte G auf die Photozelle Ph 1 auftrifft. Die Photozelle Ph 2 empfängt direktes Licht von der Lampe. Durch das 5adrige Kabel wird der Lampenstrom zugeleitet und die Photoströme der beiden Photozellen den Galvanometern zugeführt. Die Einzelheiten des mechanischen Aufbaus gehen aus der Zeichnung hervor²⁾.

Durch die mehrfache Reflexion an den beiden Spiegeln ist allerdings das System optisch nicht so klar definiert wie bei dem von H. PETERSSON und H. H. POOLE vorgeschlagenen Apparat, bei dem die Lampe in dem notwendigen Abstand der Photozelle gegenübersteht. Doch wird es *ja nur* selten darauf ankommen, Absolutwerte der Transparenz mit diesem Verfahren zu messen — dies wird vorläufig viel einfacher und sicherer durch Messungen im Laboratorium erreicht —, sondern die Untersuchungsziele werden im allgemeinen mit Relativmessungen durchaus verfolgt werden können.

¹⁾ Bei dem von H. PETERSSON (1935) verwendeten Instrument findet eine einfache Reflexion bei einem Abstand von 1 m zwischen Lampe bzw. Photo-Zelle und Spiegel statt. Schichten geringerer Dicke (bis herab zu 15 cm) konnten durch waagerechtes Versenken des Instrumentes erfaßt werden.

²⁾ Der Apparat wurde von der Firma W. Schweder, Kiel, gebaut.

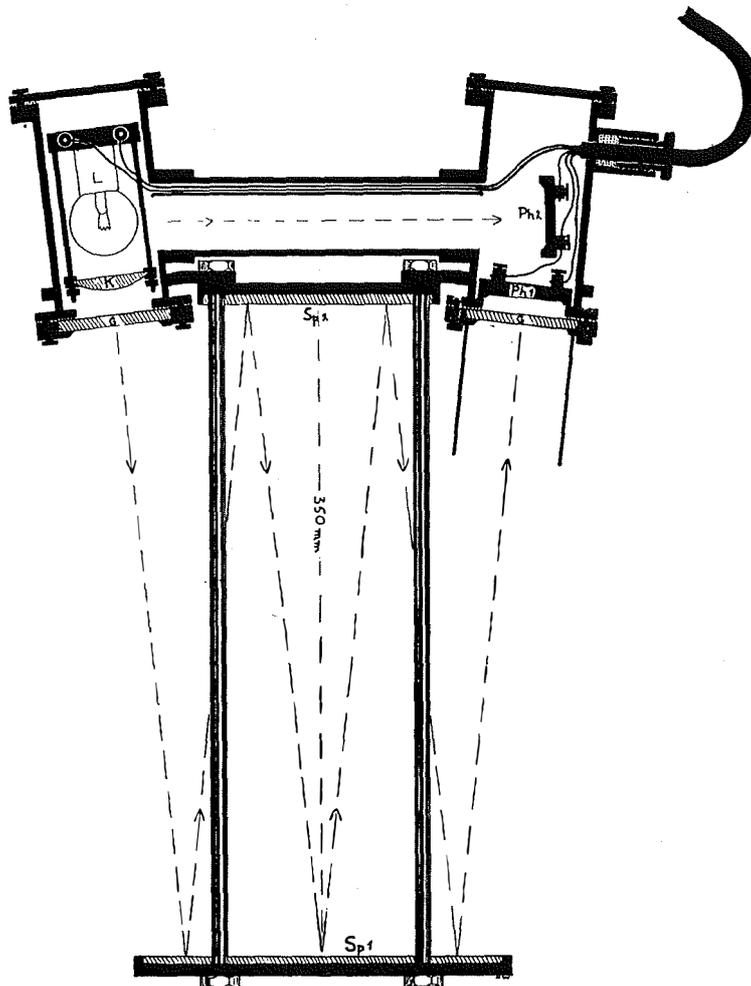


Abb. 1. Der Lichtdurchlässigkeitsmesser. L Glühlampe; K Kondensator; G Glasplatten; Sp 1, Sp 2 = Spiegel; Ph 1, Ph 2 = Photozellen.

Will man mit unserem Instrument die Durchsichtigkeit horizontaler Schichten von noch geringerer Mächtigkeit als 35 cm erfassen, so versenkt man es in horizontaler Lage, indem man die Aufhängevorrichtungen an den Ecken der beiden Spiegelhalter befestigt. Die durchstrahlte Schicht ist dann nur noch etwa 5 cm dick. Wenn man den Durchsichtigkeitsmesser unmittelbar unter einem Wasserschöpfer befestigt, so kann man durch Verfolgen des Photometers den Schöpfer in bestimmten optisch gekennzeichneten Schichten schließen lassen und auf diese Weise Wasserarten erfassen, die man bei schematischer Anordnung der Schöpftiefen mit großer Wahrscheinlichkeit versäumen würde.

Das Schaltungsschema ist aus Abb. 2 zu erkennen. Die Glühlampe wird an einer Akkumulatorenbatterie (A) über einen Widerstand (W) angeschlossen. Der Lampenstrom kann am Amperemeter III verfolgt werden. Zur Messung des Photostroms der

Hauptphotozelle (Ph 1) dient ein sehr empfindliches Mikroamperemeter (I). Wir verwendeten das Luxmeter von B. LANGE, Berlin-Dahlem, das etwa eine Empfindlichkeit von $0,5 \times 10^{-6}$ Ampere pro Skalenteil hat. Die zweite Photozelle (Ph 2), die zur Kontrolle der Konstanz der Lichtstärke der Lampe dient, wird mit einem weniger empfindlichen, einfachen Mikroamperemeter (II) (z. B. „Monavi“ von HARTMANN und BRAUN) verbunden, evtl. unter Zwischenschaltung eines Widerstandes.

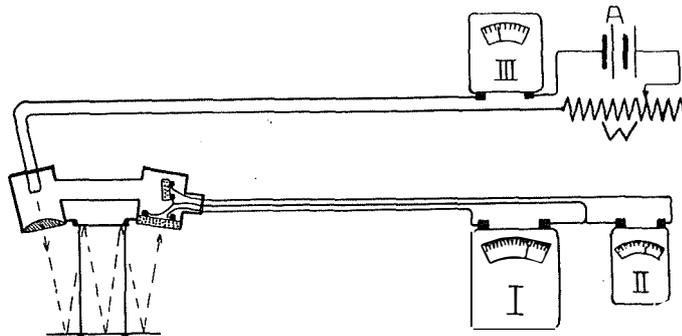


Abb. 2. Schaltungsschema. A Akkumulatorenbatterie; W Widerstand; I, II Mikroamperemeter; III Amperemeter.

Vor jeder Messungserie wird das Instrument nach sorgfältiger Säuberung sämtlicher Glasflächen in einem Trog mit möglichst reinem Wasser in Betrieb gesetzt. Der Lampenstrom wird so reguliert, daß der Photostrom der Hauptzelle so stark ist, daß der Zeiger des Mikroamperemeters etwa über $\frac{3}{4}$ der Skala ausschlägt. Dann wird der Durchsichtigkeitsmesser mit Hilfe einer hydrographischen Winde ins Meer hinabgelassen, wobei das elektrische Kabel von Hand nachgesteckt wird, sodaß kein zu großer Zug darauf kommt. Nun wird ganz langsam gefiert und der Photostrom der Hauptzelle notiert und gleichzeitig die Lampenhelligkeit der Photozelle II kontrolliert und durch den Widerstand konstant gehalten. Das Amperemeter III dient nur zu Beginn der Messung dazu, die zulässige Belastung der Glühlampe nicht zu überschreiten; es braucht nachher nicht mehr beachtet zu werden.

Messungen der Lichtdurchlässigkeit im Fehmarn-Belt.

Zur Erprobung des Instruments wurden gelegentlich eines Aufenthalts auf dem Feuerschiff „Fehmarnbelt“ einige Messungen ausgeführt. Die Position des Feuerschiffs ist für derartige Messungen insofern günstig, als dort eine sehr starke Dichteschichtung vorhanden ist. Das salzreiche Bodenwasser aus dem Kattegatt dringt nämlich durch den Fehmarn-Belt mit etwa 25–30‰ Salzgehalt in die Mecklenburger Bucht vor. Seine obere Grenze lag zur Zeit der Messungen bei etwa 18 m, während die Gesamttiefe 27 m betrug (vgl. Abb. 3). Leider wird das Arbeiten im Fehmarn-Belt häufig durch den bisweilen sehr starken Strom gestört, der sich naturgemäß auf das dicke elektrische Kabel besonders unangenehm auswirkt.

¹⁾ Dem Wasserbauamt Kiel sowie den Kapitänen THOMSEN und MAKARINUS und den Maschinisten des Feuerschiffs, welche die Arbeit in entgegenkommendster Weise unterstützten, sei auch an dieser Stelle gedankt.

Als Beispiel für die vertikale Verteilung der Durchlässigkeit des Seewassers sind in Tabelle 1 die Ergebnisse der Messungen vom 18. Juli 1936 angeführt. Die Zahlen geben unmittelbar die gemessenen Photoströme an. Auf eine Wiedergabe der absoluten Absorptionskoeffizienten wurde wegen der Unsicherheit ihrer Berechnung verzichtet. Am 18. 7. wurde der Apparat einmal in normaler aufrechter Lage und unmittelbar anschließend in horizontaler Lage verwendet, da sich herausstellte, daß die absorbierenden Schichten zum Teil von sehr geringer Mächtigkeit waren.

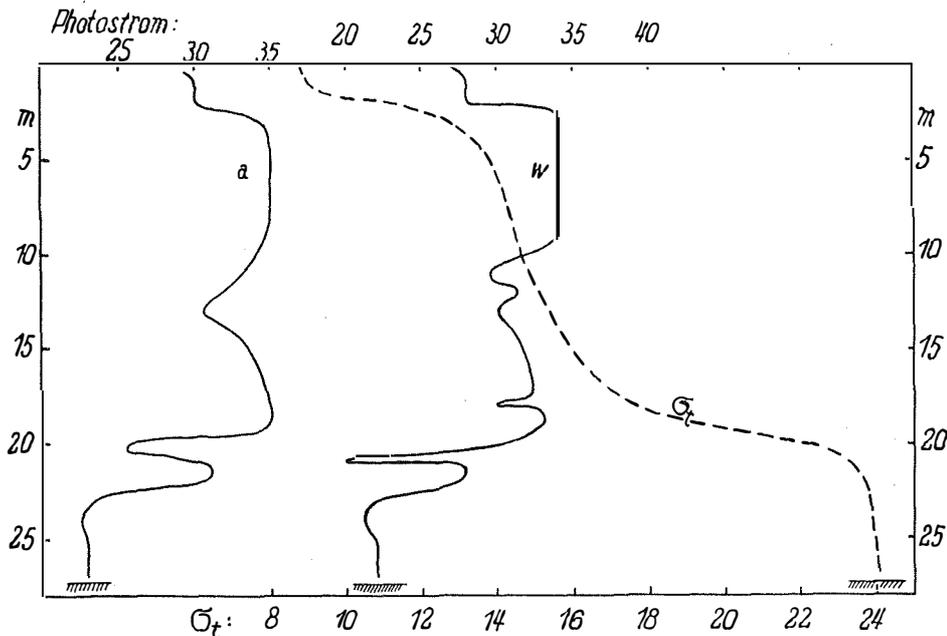


Abb. 3. Vertikalverteilung der Lichtdurchlässigkeit im Fehmarnbelt am 18. 7. 1936. a Durchlässigkeitsmesser in aufrechter Stellung; w Durchlässigkeitsmesser in waagerechter Stellung (siehe Text). Die gestrichelte Kurve gibt die Vertikalverteilung der Dichte.

An Hand der graphischen Darstellungen (Abb. 3) kann man die gesamte Wasserschicht von der Oberfläche bis zum Boden nach ihrem optischen Verhalten — wenn man zunächst die großen Züge betrachtet — in drei Stockwerke aufteilen:

1. eine stark absorbierende Oberschicht von 0—2 m,
2. eine ziemlich durchlässige Mittelschicht, welche die Hauptmasse ausmacht, von 3 bis etwa 20 m,
3. eine stark absorbierende Bodenwasserschicht von 23 m bis zum Boden.

Über die Natur der lichtabsorbierenden Beimengungen — seien es gelöste Stoffe oder suspendierte feste Teilchen — läßt sich auf Grund dieser Messungen allein naturgemäß nichts aussagen. Diese Frage wird im zweiten Teil der Untersuchungsreihe bei dem Bericht über die spektrophotometrischen Messungen im Laboratorium behandelt werden. Wahrscheinlich haben in der Oberflächenschicht außer dem Plankton die gelösten gelb gefärbten humusartigen Stoffe einen erheblichen Anteil an der Absorption. Auf die allgemeine Bedeutung dieser Stoffe für die Farbe des Meerwassers, selbst im

offenen Ozean hat soeben K. KALLE (1938) nachdrücklich hingewiesen. In der Bodenschicht dürfte es sich zum großen Teil um aufgewirbelte feinste Sedimentteilchen handeln.

Innerhalb dieser Hauptstockwerke des Wassers fallen nun oft sehr schmale Zonen stark verminderter Lichtdurchlässigkeit besonders auf. An ihren Grenzflächen kann der Photostrom plötzlich um über 30% sinken bzw. steigen. Am deutlichsten ist eine derartige Schicht in 21 m zu finden, wobei ihre Untergrenze besonders scharf markiert ist. Bei dieser Schicht erkennt man auch sehr schön den Einfluß der Lage des Photometers: Die Kurve a ist mit aufrecht hängendem Photometer (vertikale Länge = 35 cm), die Kurve w mit waagrechtem Apparat (vertikale Länge etwa 5 cm) aufgenommen worden. In der zweiten Kurve ist die opake Schicht viel schärfer ausgeprägt. Eine in der Form ganz ähnliche, jedoch weniger intensive absorbierende Schicht wurde in 18 m angetroffen, zwei weitere mit unscharfen Grenzen in 11 m und 13 m.

Wir müssen annehmen, daß es sich bei diesen absorbierenden Zwischenschichten um Ansammlungen von Detritus handelt. Bei der starken Ansammlung in 21 m besteht offenbar ein enger Zusammenhang mit der außerordentlich scharfen Dichtesprungschicht, die um diese Zeit in etwa 19—20 m liegt. Da auch H. PETTERSSON die stärksten Detritusschichten jeweils in der oberen Grenzschicht des dichteren Wassers fand, kommt dieser Erscheinung offenbar allgemeinere Bedeutung zu.

Literatur.

- ATKINS, W. R. G. (1932). Solar radiation and its transmission through air and water. *Journal du Conseil VII*, 171—211.
- CLARKE, G. L. (1936). Light penetration in the western North Atlantic and its application to biological problems. *Rapp. et Proc.-Verb. Cons. Int.* **101**, No. 3.
- CLARKE, G. L. und OSTER, R. H. (1934). The penetration of the blue and red components of daylight into Atlantic coastal waters and its relation to phytoplankton metabolism. *Biol. Bull.* **67**, 59.
- HENSCHEL, J. (1938). Untersuchungen über Vertikalwanderungen und unperiodische Schwankungen des Copepoden-Planktons im Fehmarnbelt Juni/Juli 1936, erscheint in: *Kieler Meeresforschungen III*.
- KALLE, K. (1937). Nährstoffuntersuchungen als hydrographisches Hilfsmittel zur Unterscheidung von Wasserkörpern. *Annalen d. Hydrogr. usw.* **65**, 1—18.
- KALLE, K. (1938). Zum Problem der Meereswasserfarbe. *Annalen d. Hydrogr. usw.* **66**, 1—13.
- PETTERSSON, H. (1935). Submarine daylight and the transparency of sea water. *Journal du Conseil X*, 48—65.
- PETTERSSON, H., HÖGLUND, H. und LANDBERG, S. (1934). Submarine daylight and the photosynthesis of phytoplankton. *Göteborgs K. vetensk. och vitterh. — samh. handl.* 5. F. B4, No. 5. *Medd. Oceanogr. Inst. Göteborgs Högskol.* No. 10.
- PETTERSSON, H. und POOLE, H. H. (1937). Measurements of submarine daylight. *Ebenda* 5. F. B5, No. 5. *Medd. Oceanogr. Inst. Göteborgs Högskol.* No. 13.
- RUSSEL, F. S. (1936). Submarine illumination in relation to animal life. *Rapp. et Proc. — Verb. Cons. Int.* **101**, No. 1.
- SEYBOLD, S. (1934). Über die Energiebilanz submerser Wasserpflanzen, vornehmlich der Meeresalgen. *Jahrb. wiss. Botanik* **79**, 593—654.
- UTTERBACK, C. L. (1936). Spectral bands of submarine solar radiation in the North Pacific and adjacent inshore waters. *Rapp. et Proc. — Verb. Cons. Int.* **101**, No. 4.