©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Das Licht im Meer.

Von Univ.-Prof. Dr. Friedrich Lauscher, Wien.

Vortrag, gehalten am 19. März 1952.

Mehr als 70 Prozent der Erdoberfläche sind von Wasser bedeckt. Die grenzenlos streichende Luft trägt weithin den thermischen Einfluß der Meere. In erster Linie aus den großen Gewässern stammt der Wasserdampf der Luft. Er ist die Substanz ihrer Hauptphänomene, der Wolken und des Niederschlags.

Die Energie aber, die den Wärmevorrat der Meere schafft und die das Wasser verdunstend zum Aufschwung in die Atmosphäre beflügelt, gibt fast ausschließlich die Sonnenstrahlung. Sie ermöglicht auch pflanzliches Leben in den genügend lichten Zonen der Wassertiefen und damit tierisches Leben im Wasser überhaupt. Somit erscheint die Kenntnis der Strahlungsverhältnisse namentlich in den Meeren in vieler Hinsicht bedeutungsvoll.

Die Fragestellungen, welche sich dabei für den Geophysiker ergeben, betreffen Farbe des Wassers, Sichttiefe, Reflexion an der Oberfläche, Brechung, Absorption, das heißt Umwandlung der Strahlung in andere Energieformen, besonders Wärme, Streuung, das heißt Ablenkung aus der ursprünglichen Richtung in eine allseitige Strahlung und schließlich

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

die Summenwirkung aller Einflüsse, der Energiehaushalt und die aus ihm für die Erwärmung und für die Verdunstung nutzbaren Anteile.

Versuchen wir die historische Entwicklung dieses Wissenschaftszweiges zu überblicken, so stoßen wir als erste quantitative Notiz auf die aus 1676 stammende Behauptung von Wood, er habe bei Novaja Semlja den 145 m tiefen Meeresboden gesehen. Solche Sichttiefen wurden aber später nie festgestellt. Newton (1706) beschäftigte sich in seiner Optik mit der Meeresfarbe, welche er offenbar beeinflußt durch die englischen Gewässer, als grün bezeichnet. Schon ab 1708 machte die Besatzung des Schiffes Coquille Sichttiefemessungen mit weißen Scheiben, sie so weit versenkend, bis sie dem Auge eben entschwanden. Die großen Klassiker der Optik Bouguer und Lambert „errechneten", unabhängig voneinander, die maximale Sichttiefe im Wasser zu 60 bis 70 m, ein Wert, der tatsächlich stimmt, wenn auch die Rechenmethodik der weiteren Entwicklung nicht standhielt. Hingegen ist Bouguers Formel über den Betrag der Reflexion an Wasserflächen praktisch sehr brauchbar. Einem glücklichen Umstande verdanke ich ihre Wiederentdeckung, wodurch die Integration verschiedener Strahlungsprobleme der Ozeane wesentlich erleichtert wird.

Zu Ende des 18. Jahrhunderts gab es schon viele Kenntnisse über die Wasserfärbung der Meere, welche in den Lehrbüchern der Seefahrt erörtert und

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

zur Nutzung bereitgestellt wurden: „Discoloured water“, also verfärbtes Wasser weise auf Untiefen hin; bei Navigation im Eis habe man auf die Färbung des Himmels in Horizontnähe zu achten und zu unterscheiden zwischen „ice blink“ über Packeis und dem dunkleren „water sky“, dem Himmel über offenen Wasserflächen, auf den man zustreben solle.

Besprochen wurden auch die Namen der Meeresteile, welche bestimmte Farben nannten: So sei die Benennung „Gelbes Meer“ auf die Trübung des Hoangho zurückzuführen. Das „Schwarze Meer“ führe seinen Namen wegen der dunkleren Farbe im Vergleich zum strahlend blauen Mittelmeer, nicht im Gegensatz zum erst später erforschten „Weißen Meer“, dessen Name natürlich mit der Eisbedeckung zusammenhängt.

Die Bezeichnung „Rotes Meer“ wurde schon im Mittelalter auf die rötliche Färbung der „terra circumjacens“ zurückgeführt, während rote Färbung durch Organismen nur selten ist. In Wahrheit ist das Rote Meer auch blau, wenngleich nicht besonders tiefblau und nicht überragend klar. Der Tiefseeforscher Hass hat es offenbar nicht wegen seiner besonderen Durchsichtigkeit, sondern wegen seiner Wärme zu seiner Domäne gemacht.

Wir wollen gleich bei dieser Gelegenheit auf den Einfluß von Organismen auf das Licht im Meer ganz kurz hinweisen, da nicht Probleme der organischen, sondern der anorganischen Natur unser

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Hauptthema sind. So erwähnen wir bloß das „Meeresleuchten“, einen durch Organismen bedingten Schimmer der Oberfläche tropischer Meere, der bei Aufwirbelung ganze Leuchtgarben emporschießen läßt. Bekannt sind auch die grünen Pflanzenteppiche, die Großvegetation der Algenbestände, die treibenden, bis zu 60 m langen Tange der südlichen Westwindzone und die goldfarbenen Bandstreifen der sonst tiefblauen Sargassosee in den Roßbreiten des Nordatlantik. Heißt doch das Wort „sargaco“ auf portugiesisch Pflanzenteppich. Schon die Antike kannte die Fabel vom Steckenbleiben der Schiffe in diesen Pflanzenteppichen, ein Märchen, welches noch den Matrosen Columbus Schrecken bereitete, als sie in das Sargassogebiet kamen. Trotz der oberflächlichen teilweisen Pflanzenbedeckung ist dort das reinste Wasser aller Meere anzutreffen. Maximale Sichttiefe bis zu 66.5 m wurden dort gemessen.

Mit dem Eintritt in das 19. Jahrhundert wurden die Beobachtungen über die Optik der Gewässer systematischer und durch Einführung verschiedener apparativer Methoden vertieft. Bezüglich der Sichttiefemessung verweisen wir auf Kotzebue (1817) und besonders auf Pater Secchi (1863), welcher für die verwendeten Scheiben eine Normgröße von 30 cm vorschlug. Auch lehrte er, den Einfluß des Oberflächenreflexes, der doch ganz von der Art des Himmelszustandes abhängt, auszuschalten, indem man die Scheiben durch ein ein wenig ins Wasser

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

eingetauchtes Rohr beobachtet. Krümmel und viele andere machten nach diesen Vorschriften viele Messungen auf allen Weltmeeren. Als Merkregel ergab sich eine durchschnittliche Sichttiefe von grünem Wasser von 16 m, bei blauem Wasser von 27 m.

Qualitative Farbangaben der Meere sammelte Abegg. Zum Beispiel beschrieb er den Farbton des Roten Meeres bei Suez als grün, in den offenen Teilen als grünblau bis hellblau, bei Aden wieder als grün, indessen die Farben des Indischen Ozeans bei Weiterfahrt nach Hinterindien als blaugrün, hellblau, rein blau und schließlich als tiefblau (wie bei den meisten tropischen Meeren) geschildert wurden. Später hat Wattenberg im Atlantik einen Zusammenhang zwischen Farbe und Plankton kartenmäßig festgelegt. Die südlichen Meere sind tiefblau und arm an organischen Schwebestoffen. Doch darf man nach quantitativen Überlegungen nicht annehmen, daß der Planktongehalt unmittelbar die Abänderung des Farbtons erklärt. Mit den qualitativen Farbbeschreibungen haben sich in unserem Jahrhundert Lundquist 1936, K. Ström 1943 und mehrfach unser Wiener F. Sauberer beschäftigt. Sie fanden, daß die Grundfarben blau, grün, gelb und braun, zusammen mit allen davon möglichen Kombinationen, wie blaugrün, gelbbraun usw. nicht nur die Farben der Meere, sondern auch der Binnengewässer bis zu den dunkelsten Mooren zu beschreiben gestatten. Eine große Ge-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

nauigkeit und Abstufungsfeinheit wird dabei allerdings nicht erreicht.

Schon A. v. Humboldt versuchte daher eine quantitative Farbbestimmung. Er benützte das „Kyanometer", mit welchem Saussure auf dem Mont Blanc das Himmelsblau bestimmt hatte. Der Erfolg war gering, da das Kyanometer nur Mischungen von blau und weiß verwendete. Erfolgreicher war Forel 1889, welcher aus dem blauen Kupfervitriol und dem gelben Kaliumchromat Mischungen in 13 Abstufungen herstellte. Als Ule noch den Grundfarbton braun hinzunahm, war die „Forel-Ule"-Skala geschaffen, mit der jahrzehntelang und auch heute noch gearbeitet wurde.

Für die Erklärung der Farbtönung, besonders der Binnengewässer, war die Entdeckung Bunsens 1847 wichtig, daß die Humusstoffe schon in Spuren eine Gelbfärbung beginnen lassen. Wo Kalk die Humusstoffe fällt, können Seen viel blauer sein als die Gewässer der Gegend ansonsten. So sind zum Beispiel im Gebiet von Berlin die Seen des Havel—Spree-Systems grünlich, der kleine See bei den Rüdersdorfer Kalkklippen aber so blau wie zum Beispiel der Achensee in Tirol.

Schon im vorigen Jahrhundert setzten jedoch über die bloße Schätzung von Sichttiefe und Farbtönung hinaus Versuche ein, mit verschiedenen Methoden die Absorption des Wasser in verschiedenen Spektralbereichen zu messen. Der berühmte Erforscher

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

des Genfer Sees, Forel, hatte 1871 ein gewöhnliches Schwarzkugelthermometer im Vakuum ins Wasser versenkt, um zu beobachten, ob dieses durch Strahlungsaufnahme eine Übertemperatur über die Wasserwärme annehmen werde. 1875 aber beobachtete H. F. Vogel schon mit einem Spektralphotometer die Absorption des Meeres im Golf von Neapel und trennte so die Wirkung der einzelnen Farbbereiche der Strahlung voneinander. Doch sollten noch Jahrzehnte vergehen, bevor sich diese aufschlußreichste Methodik in verbreitetem Maße mit neuen und handlichen Geräten durchsetzte. In der Zwischenzeit versuchte Regnard, Monaco, die Lichtmessung durch Bestimmung der sich bildenden Chlorwasserstoffmenge in dem von ihm eigens konstruierten Gerät. Gleichfalls eine chemische Methode, die aber für die Pflanzenwelt im Wasser von unmittelbarer Bedeutung ist, nutzte der weltbekannte Leiter der Biologischen Station Lunz am See, Prof. F. Ruttner: Er bestimmte mit Algen die Kohlensäureassimilation in verschiedenen Wassertiefen. Auf die Verwendung des Thermoelements durch Birge 1912 sei gleichfalls hingewiesen.

Die erfolgreichst benützte Methode war aber lange Zeit hindurch die photographische. 1885 versenkten Fol und Sarasin an der Französischen Riviera eine wasserdichte Kamera in verschiedene Wassertiefe und beobachteten die durch das Licht innerhalb bestimmter Zeiten hervorgerufene Schwär-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

zung. Bald darauf gelang es Ing. Petersen der Zoologischen Station Neapel diese Methodik bei Capri bis zu einer Wassertiefe von 550 m anzuwenden.

Der Wiener Luksch machte dann viele derartige Messungen im östlichen Mittelmeer und im RotenMeer (ab 1901). Die für die Meereskunde bedeutendsten Messungen dieser Art waren aber jene, welche der Norweger Helland-Hansen im Jahre 1910 bei den Azoren ausführte: In 1000 m Tiefe wurden seine Platten in 80 Minuten noch merklich geschwärzt, während in 1700 m Tiefe selbst nach 120 Minuten keine Wirkung zu merken war. Natürlich muß man sich dessen bewußt sein, daß es eine absolute Lichtgrenztiefe nicht gibt, sondern daß die erreichbare Tiefe auch von der Empfindlichkeit der Apparatur abhängt. Interessant ist es, zu erwähnen, daß Helland-Hansen auch die Lichtwirkung auf verschieden gerichtete Würfelflächen untersuchte und dabei fand, daß ab 500 m Tiefe praktisch nur abwärts gerichtetes Licht vorhanden war. Auf dem Gebiete der ozeanischen Lichtuntersuchungen fand er in dem Salzburger v. Grein einen eifrigen Helfer und Mitarbeiter, welcher von Monaco und von Bergen, der norwegischen Westküstenmetropole aus, zahlreiche selbständige Meßfahrten durchführte.

In der gleichen Zeit, ab 1913 und etwas später, beobachteten der Finne Witting im Bottnischen

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Meerbusen, der Russe Shouleikin im Weißen und Schwarzen Meer, Vercelli im Mittelmeer usw.

Auf eine ganz neue, für die Praxis günstige Basis wurden aber die Versuche durch die Anwendung der moderneren lichtelektrischen Methoden gebracht. Ab 1920 etwa verwendeten Shelford und Gail Photozellen mit verschiedenen Farbfiltern. Zum Teil arbeiteten sie mit Verstärkern. Diese aber wurden überflüssig, als ab 1932 die ergiebige Lichtstromquelle der Sperrschichtphotozellen von Lange zur geophysikalischen Anwendung gelangt. Der damalige Direktor der Wiener Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Prof. Wilhelm Schmidt, besorgte sogleich einige Exemplare vom Erfinder Lange persönlich. So kam es, daß die durch den Verfasser gemeinsam mit E. Friedl und E. Niederdorfer am Lunzer See ausgeführten Lichtmessungen mit den Sperrschichtphotozellen mutmaßlich die ersten dieser Art in Gewässern überhaupt waren. Doch wurden die Zellen sicher fast gleichzeitig auch von Pettersson in der Ostsee, von dem Botaniker Seyboldt im Mittelmeer, von Suchlandt im Davoser See, in den englischen Gewässern von Poole und Atkins und im Pazifik von Utterback angewendet.

Da wir somit in unsrer Beschreibung der historischen Entwicklung bis zur Gegenwartsmethodik angelangt sind, ist es wohl am Platze, die Durchfüh-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

rung von Lichtmessungen in Gewässern näher zu beschreiben. Die Silberselenschicht, die bei Belichtung elektrische Ströme produziert, ist auf einer kleinen Scheibe aufgetragen und diese „Zelle“ wird in einem wasserdichten zylindrischen Metallgefäß montiert, dessen Oberseite ein Glasfenster trägt. Ober dem Fenster sind eventuelle Opalglasscheiben montierbar, sowie Filtergläser. Mit diesen hat es folgende Bewandtnis: Die Empfindlichkeit der Langezellen ist stark von der Wellenlänge des Lichtes abhängig und hat ihr Maximum, ähnlich wie die Augenempfindlichkeit, im Gelbgrün. Durch möglichst nur auf engen Spektralbereichen durchlässige Filter gelingt es, Messungen der Durchlässigkeit des Wassers für ziemlich gut definierte Teilbereiche des Spektrums zu machen. Die Wiener O. Eckel und F. Sauberer verwendeten z. B. folgende Auswahl von 2 mm dicken Schottgläsern (Farbe und zugehöriger „optischer Schwerpunkt“ in Millimikron):

ultraviolett und violett	blau	grün	gelborange	hellrot	dunkelrot
377	435	525	590	660	700

Die Apparatur wird gewöhnlich am Gummikabel der elektrischen Leitung zum Millivoltmeter im Boot oder am Ufer aufgehängt und fortschreitend in verschiedene Wassertiefen versenkt. Einigermaßen konstante Wetterbedingungen sind nötig, damit nicht die Außenhelligkeit zu stark schwankt. Man ist aber keinesfalls nur auf heitere Meßtage an-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

gewiesen. Im Gegenteil haben verschiedene Forscher gleichmäßig trübem Wetter den Vorzug gegeben.

Man könnte nun fragen, warum man denn nicht einfach den Gewässern Proben entnehme und deren Lichtdurchlässigkeit im Laboratorium untersuche. Auch das wurde selbstverständlich schon gemacht, so zum Beispiel von Clarke und James des Biologischen Laboratoriums der Haward Universität. Doch zeigten Vergleiche mit Durchlässigkeitsmessungen in natura im Atlantik, daß die Probeflaschenmethode eine etwa dreifach zu hohe Absorption vortäuschten. Eine etwas bessere Übereinstimmung fand der Finne Witting mit Ostseewasser, das aber an sich schon viel trüber ist als das Ozeanwasser. Außerdem machte er sich die Mühe, je 50 Liter einer Probe mitzunehmen, während die Amerikaner mit etwa je 1 Liter arbeiteten.

So wird lieber in natura selbst gearbeitet und zumeist die Durchlässigkeit des Wassers, zumindestens in den obersten Metern, von Meter zu Meter bestimmt. Fallweise werden diese Untersuchungen ergänzt durch Messungen der Oberflächenreflexion des Wassers, indem man eine Zelle zuerst nach oben gegen den Himmel, dann nach unten gegen den Wasserspiegel richtet. Man muß aber berücksichtigen, daß dann das von unten kommende Licht zum Teil auch aus dem Wasser selbst stammt und als Streulicht aufwärts dringt. Dieses „Unterlicht“ mißt man, indem man die nach unten gerichtete

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Zelle ein wenig unter die Wasseroberfläche eintaucht. Schließlich sind auch schon Versuche gemacht worden, das aus einer beliebigen Streurichtung im Wasser kommende Licht zu ermitteln, weil dadurch die Natur der Streuwirkung erforscht werden kann.

Wenden wir uns nun den Ergebnissen der Untersuchungen zu, so wollen wir Messungen herausgreifen, die wirklich in den Weiten freier Weltmeere angestellt wurden. Dazu sind die Messungen von Utterback und Young a. Gordon im Pazifik zu rechnen, die von George L. Clarke im Nordatlantik und last not least die des Schweden Nils G. Jerlov von Pettersons Ozeanographischem Institut in Göteborg. Im Vorjahr (Jan. bis Juli 1951) hatte ich Gelegenheit, während eines Studienaufenthaltes in Oslo sowohl G. L. Clarke als auch N. G. Jerlov kennenzulernen und ihre neuesten Forschungsergebnisse zu erfahren.

Zu den interessantesten Resultaten von Clarke zählen seine Forschungsquerschnitte von der Ostküste der USA. quer durch den Golfstrom bis in das Sargassomeer, also etwa von New York zu den Bermudas. Bei 490 Millimikron Wellenlänge, also nahe der Welle der größten Durchlässigkeit reinen Wassers fand er die Absorption pro 1 m im Küstenwasser bis 22%, im nur bis 200 m tiefen „Schelf“ zu 11%, im Abhang des Kontinentbodens vom überfluteten Schelf bis zur eigentlichen Tiefsee zu 5.7%, im reinsten Sargassowasser aber nur zu 3.9%.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Jerlovs Weltreise mit dem Schiff Albatros dauerte vom Mai 1947 bis zum Juli 1948. Auch er arbeitete mit Photozellen. Nicht weniger als elf Farbfilter konnten bei ihm hintereinander mittels eines Motors vor die Zelle gedreht werden. Ab 500 m Untersuchungstiefe griff er auf die Anwendung der Photokamera wieder zurück und konnte so im Sargassomeer Messungen bis zu Tiefen machen, in welchen nur mehr ein Zehnmillionstel der Außenhelligkeit vorhanden war. In solchen Tiefen betrug der Helligkeitsschimmer von oben nur mehr ein Zwanzigstel der Beleuchtung der Erde durch den Vollmond.

Als die klarsten Meeresteile fand Jerlov natürlich auch wieder die Sargassosee, aber auch die entsprechenden ruhigen Gebiete des tropischen Pazifik. Trüber war das Wasser z. B. des Nordatlantik, des westlichen Mittelmeers, der Westküste Afrikas, auch des Roten Meeres. Dem mit Ozeanographie Vertrauten sei mitgeteilt, daß sogenannte „Divergenzgebiete“ mit starkem Aufquellen von Tiefenwasser Herde zusätzlicher Wassertrübung sind.

Die reinsten Meere, in denen das Wasser sozusagen unendlich lange verweilt und alle Trübung sich absetzt, erwiesen sich als rein wie reinstes Laboratoriumswasser. Bei 475 Millimikron, im Blau, hat reinstes Wasser pro 1 m eine Lichtdurchlässigkeit von 99.5%. Im Sargassomeer waren es 98.2%.

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Die Tiefen, in welchen das Außenlicht auf 1% herabgesetzt ist, sind für die folgenden Wellenlängen in Millimikron die folgenden in Metern:

Wellenlänge	300	400	475	500	600	700	800
(Sargassosee) nach Jerlov	17!	110	142	110	28	—	— m
Laboratorium	1	141	510	298	19	4	1 m

In dieser Tabelle fällt vor allem die große Überlegenheit des reinsten Meerwassers bezüglich der Durchlässigkeit für ultraviolettes Licht auf. Trotz aller Sorgfalt gelingt es nicht, im Laboratorium bezüglich der Ultraviolettstrahlen so reines Wasser herzustellen, wie es die Meere, Jahrmillionen zum „Experiment" verwendend, produzieren. Schon 1939 hatten Clarke und James die besten Laboratoriumswerte Sawyers für 300 Millimikron als zu hoch befunden. Sie zeigten übrigens, daß diese hohe Ultraviolettdurchlässigkeit von etwa 83% pro 1 m nur für die freien Meere gilt, während näher zur Küste der Wert rasch auf etwa 5% und weniger absinkt.

Nachdem wir so einen ganz kurzen Überblick über einige hauptsächliche Messungsergebnisse geboten haben, wollen wir abschließend nicht versäumen, auch eine kleine Betrachtung der Theorie beizufügen. Selbstverständlich gilt das Snelliussche Gesetz der Brechung ebenso wie im Kleinen auch im Großen. Für Wasser ist unter allen vorkommenden natürlichen Bedingungen der Sinus des

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Einfallswinkels genügend genau gleich dem Vierdrittelfachen des Sinus des Brechungswinkels. Dies hat zur Folge, daß vom Wasser aus alles Außenlicht aus einem Kegel mit dem halben Öffnungswinkel 48.6° erscheint. Durch die Brechung zum Lot wird das Eindringen der Strahlung im Wasser begünstigt, denn die relative Weglänge eines Strahles kann selbst bei ganz streifenden Einfall nie mehr als 151 cm pro 100 cm Tiefenunterschied betragen, während in der Luft Strahlen der untergehenden Sonne einen etwa 32mal so langen Weg durch die Erdatmosphäre zurückzulegen haben wie bei zenitalem Sonnenstand.

Für die Reflexion gelten genau die Fresnelschen Gesetze, wie für schwach absorbierende Flächen überhaupt. Der Betrag der Reflexion wächst mit zunehmendem Einfallswinkel bis zum Brewsterschen Polarisationswinkel von 53.1° zunächst nur wenig, darüber hinaus aber sehr stark, so daß vom streifend einfallenden Licht alles reflektiert wird. Von welch eminent großem klimatischen Interesse diese Tatsachen sind, zeigt die folgende Gegenüberstellung der Tageswerte der Gesamtreflexion von Wasserflächen im Verhältnis zur Tagessumme der Sonnen- und Himmelstrahlung in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe zu Mittag:

Sonnenhöhe zu Mittag	90°	60°	30°	15°	5°	0°
Tagesreflexion in Proz.	3	4	11	28	64	100%

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Tropische Gewässer oder Gewässer in unseren Breiten zur Sommerszeit nehmen also bis auf wenige Prozente Verlust alle Strahlung auf, während offene Wasser in der Polarzone nur im Hochsommer einige Einstrahlung erfahren.

Das diffuse Himmelslicht wird nach meinen theoretischen Berechnungen zu 6.6% reflektiert, wogegen das diffuse Licht aus dem Wasser nur zu 51.7% aus der Oberfläche austreten kann. Die starke innere Reflexion einer dünnen Wasserhaut hat ja nach A. Ångström zur Folge, daß feuchter Boden viel dunkler ist als trockener.

Aus der Theorie der Reflexion ergibt sich auch mühelos das Emissionsvermögen des Wassers zu 0.9535 von dem eines ganz schwarzen Körpers. Wasser gibt also verhältnismäßig viel Wärme durch Ausstrahlung wieder ab. Besonders im Winter strahlen offene Gewässer viel mehr aus als zum Beispiel eine Schneefläche, die als „guter Strahler“ gilt. Während aber beim Wasser der Wärmeverlust der obersten Schicht durch Mischungen mühelos ersetzt wird, fehlt beim Schnee der Wärmenachschub vom Erdboden her, weshalb Schneedecken so stark erkalten.

Leichte Wellen verändern den Betrag der Reflexion kaum, starke erhöhen ihn im allgemeinen, besonders wenn Schaumbildung auftritt.

Für die Schwächung der Strahlung im Wasser ist vor allem die Absorption verantwortlich. Im

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Ultrarot ist sie so stark, daß nach W. Schmidt schon im obersten Zehntelmillimeter pro Minute ohne Vermischung eine Erwärmung um 3.7° C vor sich gehen würde. In der Hauptsache wird diese Energiezufuhr zur obersten Wasserschicht übrigens zur Verdunstungswärme verwandelt.

Daß die geringste Absorption im Blau stattfindet, erwähnten wir bereits. Davy (1860) hat mit Recht darauf hingewiesen, daß diese Tatsache in erster Linie die blaue Farbe des Wassers erklärt. Der Salzgehalt der Meere erhöht nach Collins die Gesamtabsorption nur um 1.3%.

Mit der Streuung des Lichtes im Wasser haben sich seit Tyndall (1898) unter anderen Smoluchowski, Einstein, Gans, Raman, Whitney, Joseph und der Verfasser befaßt. Es zeigt sich, daß die „Packung" der Moleküle im Wasser eine zu enge ist, als daß sie selbst eine Lichtstreuung ergäben, wie sie die Luftmoleküle nach Lord Rayleigh in der Atmosphäre bewirken. Doch bringen nach Smoluchowski statistische Dichteschwankungen von Molekülen eine ganz analoge Wirkung mit sich. Ich habe den Streuungskoeffizienten für Wasser durch folgende Funktion dargestellt:

$$s = 2{,}7 \,.\, 10^{-22} \lambda^{-4{,}15}.$$

Kurze Wellen werden also außerordentlich mehr gestreut als lange Wellen. In der Atmosphäre ist der analoge Effekt ausschlaggebend für die blaue

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Farbe des Himmelslichtes. In der Hydrosphäre aber darf der starke Einfluß der Absorption nicht vernachlässigt werden. Die Streuungswirkung beträgt sowohl bei 300 wie bei 600 Millimikron nur etwa 1% der Gesamtschwächung, hingegen bei der Welle geringster Absorption, nämlich 475 Millimikron, volle 77%. Das Streulicht im Wasser ist nach der Theorie proportional diesem Verhältnis Streuungskoeffizient: (Streuung + Absorption). Als „Unterlicht" können primär höchstens 13% der Außenhelligkeit wieder an die innere Begrenzungsfläche des Wassers wieder heraufkommen.

Die „Farbe" des Wassers ist eine komplizierte Funktion, abhängig von dem eben erwähnten Streulicht (also von Streuung und Absorption), ferner von der spektralen Empfindlichkeitskurve des Auges und,was nicht übersehen werden darf, auch von der spektralen Zusammensetzung des Lichtes von Sonne und Himmel. Absorptionsmessungen modernen Stils ergeben daher viel klarere Resultate als die früher üblichen Farbbestimmungen, etwa mit der Forel-Ule-Skala. Besonders kompliziert ist aber die Theorie der Sichttiefe. In der Hauptsache gilt für die Erkennbarkeit der Secchi-Scheibe in der „Sichttiefe" die Bedingung, daß die Beleuchtung in dieser Tiefe mal dem Reflexionsvermögen der Platte um den Schwellwert der Augenempfindlichkeit größer sein muß als das neben der Platte aufwärts dringende Streulicht des Wassers, das „Unterlicht". Kein

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Wunder, daß so verwickelte Versuchsbedingungen keine eindeutigen Resultate liefern.

Neben der Eigenabsorption und Eigenstreuung des Stoffes Wasser an sich kommen die analogen Eigenschaften aller Schwebestoffe, sowie der Lösungen in Betracht. Der Chemismus der Lösungen und ihre Strahlungswirkung ist noch das große offene Problem der Lichtverhältnisse der Meere, besonders in Küstennähe.

Die organischen Schwebestoffe, das „Plankton", ist in den reinsten Meeresteilen nur spurenweise vorhanden und daher wenig wirksam. Im Tropenwasser gibt es bis 50 m hinab nur etwa 10 dieser mikroskopisch kleinen Teilchen von bloß einem Tausendstel Zentimeter Querschnitt. In 1000 m Tiefe ist überhaupt nur mehr 1% davon vorhanden. Küstennah gibt es freilich 1000 Planktonteilchen und mehr in einem Kubikzentimeter.

Drücken wir alle Absorptions- und Streuungskoeffizienten pro 1 m Weglänge in der Einheit eines Zehntausendstels aus, so erhalten wir folgende Vergleichstabelle der verschiedenen Einflüsse auf die Lichtschwächung:

	Ultraviolett	Blau	Gelb	Rot
Absorption	200	0.1	3	400
Streuung	2	0.4	0.2	0.05
Plankton				
a) Sargasso	0.1	0.1	0.1	0.1
b) Küsten	10	10	10	10

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Die Lösungen verschlucken analog hauptsächlich Ultraviolett und Blau, woraus sich die Vielfalt der Farben natürlicher Gewässer ergibt.

Die Meteorologie interessieren vor allem die energetischen Probleme der Meeresoberfläche. Selbst auf Wetterschiffen, wie dem ständig im Nordatlantik auf fester Position kreuzenden Schiff „Polarfront" der Norweger werden daher Lichtdurchlässigkeitsmessungen des Meerwassers regelmäßig vorgenommen. Das auf Aristoteles zurückgehende Problem des ständigen Kreislaufes des Wassers infolge von Verdunstung und Niederschlag nähert sich seiner quantitativen Lösung vor allem auf dem Wege über den Energiehaushalt der Wasserflächen. Die Messung des Niederschlages auf Schiffen ist schwierig und unsicher. Um den Deformationen des Stromfeldes über dem Schiff zu entgehen, hat man sogar schon versucht, die Niederschlagsmesser zu den Mastspitzen hoch zu ziehen, wo die Luft gleichmäßig strömt und nicht allen Niederschlag verwirbelt. Vielleicht sind auch Radarmessungen des Niederschlages in der Luft über dem Meere aussichtsreich. Die Tropfen reflektieren ja Radarwellen. Zur Zeit aber ist es noch einfacher, den Wärmehaushalt der Meeresoberfläche zu analysieren und daraus abzuleiten, wieviel der Strahlungsenergie zur Verdunstung abgegeben wird. Nach diesen Forschungen ist der Durchschnittsniederschlag im Mittel aller Meere bloß 875 mm im Jahr, während man bisher, sich teil-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

weise fälschlich auf Inselmessungen stützend, mit 1000 mm rechnete.

Auf den Festländern fallen durchschnittlich 670 mm, wovon 470 wieder verdunsten, bevor sie in Strömen abfließend das Meer erreichen. Der Überschuß von 200 mm reduziert sich auf bloß 80 mm, wenn wir berücksichtigen, daß die Meeresflächen viel größer sind als die Landflächen. Die Verdunstung auf den Ozeanen ist daher im Mittel $875 + 80 = 955$ mm im Jahr, wozu die Strahlung die Verdunstungsenergie bereitstellen muß.

Für solche Probleme planetarischen Ausmaßes sind die Fortschritte der Theorie und der Beobachtung des Lichtes im Meer höchst bedeutungsvoll. Es muß daher als ein wertvoller Fortschritt der ozeanographischen Erkenntnisse angesehen werden, daß es uns gelang, den früheren irrigen Wert der Gesamtreflexion einer von Wasser ganz bedeckten Kugel von 21.5% auf den wahren Wert von 6.6% zu berichtigen. Obwohl vom Meere ausgeschlossen, können wir so auch an der Entwicklung dieses Forschungszweiges teilnehmen.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien

Jahr/Year: 1952

Band/Volume: 92

Autor(en)/Author(s): Lauscher Friedrich

Artikel/Article: Das Licht im Meer. 83-103