4. *Die Farbe der Seen;* *von Otto Erhr. v. u. z. Aufsess.*

(Auszug aus der Münchener Inaugural-Dissertation, 1903.)

Die Untersuchungen über die Farbe natürlicher Gewässer scheinen damit begonnen zu haben, daß man sich fragte, ob auch reines, von allen fremden Bestandteilen befreites Wasser eine Farbe besitze. Schon Davy¹⁾ fand eine blaue Eigenfarbe für Wasser; später füllte Bunsen²⁾ eine 2 m lange Röhre mit Wasser an, welche bei durchfallendem Lichte ebenfalls eine blaue Farbe erkennen ließ. Halleys³⁾ Versuch in einer Taucherglocke, bei dem er die Oberfläche seiner Hand rötlich, die Unterfläche grün gefärbt sah, gab Arago⁴⁾ zu der Behauptung Veranlassung, daß das Wasser zwei Farben habe, die des durchgelassenen Lichtes und die des reflektierten. Bei seinen eigenen Untersuchungen in der Natur beobachtete er die Wasserfarbe, indem er ein mit Luft gefülltes Hohlprisma aus Glas so unter Wasser brachte, daß das horizontal unter der Wasseroberfläche hinziehende diffuse Licht von der Hypotenusenfläche total reflektiert wurde.

Durch Bunsens Versuche stand es fest, daß reines Wasser eine blaue Eigenfarbe habe. Es fragte sich nun, woher stammen die Abweichungen von Blau, das Grün, Gelb und Braun. Wittstein⁵⁾ begründete zuerst eine Theorie der Wasserfarbe auf der Annahme, daß der chemische Gehalt allein für die Farbe ausschlaggebend sei. Seine Proben für die chemische Analyse entnahm er verschiedenen bayerischen

1) H. Davy, Edinburgh, Journ. 34. p. 88.

2) R. Bunsen, Jahresber. über d. Fortschr. i. d. Chemie p. 1236. 1847—1848.

3) E. Beetz, Pogg. Ann. 115. p. 137. 1862.

4) F. Arago, Pogg. Ann. 45. p. 468. 1838.

5) G. C. Wittstein, Sitzungsber. d. k. bayer. Akad. d. Wissensch. p. 603. München 1860.

Gewässern. Dabei kam er zu dem Resultat, daß gelbes und braunes Wasser viel reicher an organischen Substanzen sei als blaues oder grünes. Auch sprach er direkt den Satz aus, daß die verschiedenen Farben von gelöster organischer Materie herrühren. Durch Bunsen, Wittstein und Beetz¹⁾ schien die Frage nach dem Grund und der Art der Wasserfarbe erledigt zu sein; da trat, verursacht durch die Versuche Tyndalls²⁾, ein neuer Gesichtspunkt in die Forschung ein. Man fragte sich, ob nicht die Wasserfarbe als Farbe eines trüben Mediums aufgefaßt werden könnte, wodurch schon Leonardo da Vinci und später Newton und Goethe³⁾ das Blau des Himmels zu erklären versucht hatten. Tyndall bemühte sich in der Tat zu zeigen, daß das Himmelsblau keine Eigenfarbe sei, sondern durch Diffusion an kleinsten farblosen Teilen entstehe, eine Theorie, die J. W. Strutt⁴⁾ (der spätere Lord Rayleigh) dann tatsächlich mathematisch begründet hat. Tyndall schloß, daß ein Körper, der keine Spur eines fremden Körpers enthält, das Licht hindurchlasse, ohne daß dabei der Lichtstrahl sichtbar wird, d. h. daß er „optisch leer“ sei. Die Größe der seitlichen Erhellung einer Flüssigkeit ist also ein Maß für seine Trübung. Sind nun die Fremdkörperchen sehr klein, sogar klein im Verhältnis zur Lichtwellenlänge, so hat eine mit solchen Teilchen vermischte an sich farblose Flüssigkeit die Eigenschaft, im seitlichen gebeugten Licht bläulich, im durchgelassenen Licht rötlich zu erscheinen. Das Licht, das aus einer solchen Flüssigkeit austritt, ist polarisiert, die brechbareren Strahlen werden hauptsächlich reflektiert und haben ihr Polarisationsmaximum senkrecht zum einfallenden Strahl. Soret⁵⁾ kam nun, durch die blaue Farbe des Genfersees aufmerksam gemacht, auf die Idee, daß die Wasserfarbe auch teilweise durch Diffusion an solchen feinsten suspendierten Partikelchen bedingt sein könne. Besonders die von ihm gefundene Polarisation des aus dem

1) E. Beetz, l. c.

2) J. Tyndall, Arch. de sciences phys. et nat. **33**. 1868; **34**. p. 156. 1869.

3) J. W. v. Goethe, Farbenlehre, didakt. Teil, X, §§ 145–172.

4) J. W. Strutt, Phil. Mag. (4) **1**. p. 274. 1871; (5) **47**. p. 375. 1899.

5) Ch. Soret, Arch. de sciences phys. et nat. **35**. p. 54. 1869.

Wasser austretenden Lichtes senkrecht zum einfallenden Strahl bestärkte ihn in dieser Ansicht. Hagenbach¹⁾ bestätigte die Resultate Sorets am Vierwaldstättersee. Neuerdings wird die Ansicht von Soret besonders von Abegg²⁾ vertreten.

Die von Soret begründete Diffraktionstheorie³⁾ der Wasserfarbe stieß auf mancherlei Widerspruch von den verschiedensten Seiten. Spring⁴⁾, der die einschlägigen Fragen in neuester Zeit einer besonders sorgfältigen Prüfung unterzog, kam wieder auf den Standpunkt der Beetzschen Auffassung zurück, indem er durch zahlreiche Versuche nachwies, daß das Blau des reinen Wassers eine Eigenfarbe sei. Die anderen Farben rühren nach ihm von fremden Bestandteilen her. Im Gegensatze zu Wittstein glaubt Spring allerdings hier nicht die im gelösten Zustande vorhandenen organischen Substanzen als einzigen Grund der Farbe annehmen zu dürfen, sondern will hier, aber nur bei den Abweichungen von Blau, die Rayleighsche Theorie mit zur Erklärung herbeigezogen wissen.

Ablehnend gegenüber der Diffraktionstheorie verhält sich Lallemant⁵⁾ indem er nachwies, daß die Erhellung beleuchteter Flüssigkeiten durch polarisiertes Licht beinahe ausnahmslos in der Polarisationssebene stattfindet und nicht senkrecht dazu, wie dies nach der Diffraktionstheorie sein müßte.

Aus neuester Zeit sind zu erwähnen die Untersuchungen von Schwager⁶⁾ und Reindl.⁷⁾ Beide stehen ganz auf dem Standpunkt der chemischen Theorie.

1) A. Hagenbach, Arch. de sciences phys. et nat. 37. p. 176. 1870.

2) R. Abegg, Naturw. Rundschau 13. Nr. 14. 1894.

3) Ich unterscheide zwei Theorien zur Erklärung der Wasserfarbe: die „Diffraktionstheorie“ und die „Chemische Theorie“. Nach der ersteren soll die Wasserfarbe als die Farbe eines trüben Mediums aufgefaßt werden können, während die Vertreter der chemischen Theorie behaupten, daß die verschiedenen Farben ausschließlich durch die Farben der im Wasser gelösten Substanzen erklärt werden müssen.

4) W. Spring, Bull. Acad. Roy. Belg. 5. p. 55. 1883; 12. p. 814. 1886; 31. p. 94. 1896.

5) C. Lallemant, Compt. rend. 69. p. 189 u. 282. 1869.

6) A. Schwager, Geognostische Jahreshefte. 10. p. 50—80. 1897.

7) J. Reindl, Münchner geogr. Studien 10. p. 1. 1903.

Aus Vorstehendem ersieht man, daß die scheinbar so einfache Frage nach der Entstehungsursache der Farbe der Seen und Meere selbst heute noch in sehr verschiedener Weise beantwortet wird. Augenscheinlich ist es überhaupt nicht möglich, diese Frage endgültig zu entscheiden, wenn man sich nicht entschließt, eine wirkliche Analyse der in Rede stehenden Farbennuancen vorzunehmen, d. h. wenn man nicht *spektrophotometrisch* die prozentuale Zusammensetzung der „Wassersfarbe“ aus den einzelnen Spektralelementen quantitativ feststellt. Wohl kennt man schon lange die spezifische Eigenschaft des Wassers, die roten Strahlen selektiv zu absorbieren. Der erste, welcher wirkliche *Messungen* über den von Wasser überhaupt absorbierten Lichtanteil anstellte, dürfte Bouguer¹⁾ gewesen sein.

Erst 100 Jahre später treffen wir wieder auf Angaben, die sich auf die relative Zusammensetzung des durch Wasser gegangenen Lichtes beziehen. Pater Secchi²⁾ reichte der Pariser Akademie im Jahre 1867 eine Mitteilung ein, in der er zeigte, daß im Spektrum des Meerwassers schon in dünnen Schichten das Rot fehle, zum Teil auch das Gelb und Grün. Schön³⁾ konstatierte wohl als erster zwei Absorptionsstreifen im Spektrum des reinen Wassers, einen schwachen in der Nähe der Fraunhoferschen Linie C, zwischen 670 und 660 $\mu\mu$ gelegen, und ein deutliches breites Band im Orange zwischen 620 und 610 $\mu\mu$. J. L. Soret⁴⁾ gibt an, daß Wasser für ultraviolette Strahlen sehr durchlässig sei. Im Jahre 1881 maß Boas⁵⁾ durch Vergleichung des durch vorgeschaltete Gläser oder selektiv absorbierende Lösungen gefärbten Lichtes mit dem durch eine Wassersäule hindurchgegangenen einige Absorptionskoeffizienten.

Hüfner und Albrecht⁶⁾ stellten die ersten genaueren Beobachtungen über die Größe der Absorption des Wassers

1) P. Bouguer, *Optice*. p. 30. Vienne 1762.

2) A. Secchi, *Naturforscher* p. 149. 1868.

3) J. L. Schön, *Pogg. Ann., Ergbd. VI*, p. 670. 1878.

4) J. L. Soret, *Fortschr. d. Phys.*, 33. p. 479. 1877.

5) H. Boas, *Beiträge zur Erkenntnis der Farbe des Wassers*. Kiel 1881.

6) G. Hüfner und E. Albrecht, *Wied. Ann.* 42. p. 1—17. 1891.

an. Sie füllten eine 2 m lange Glasröhre mit destilliertem Wasser und verglichen die Intensität des durchgelassenen Lichtes mit der des auffallenden für verschiedene Spektralbereiche. Da aber das durch eine Wassersäule von 2 m Länge hindurchgegangene Licht nur wenig gefärbt ist und da die Angaben der Absorptionskoeffizienten sich nur auf ausgedehntere Gruppen von Lichtwellenlängen beziehen, so kommen hier die charakteristischen Eigentümlichkeiten der Absorption des Wassers noch nicht deutlich zum Ausdruck. Ausführlichere bolometrische Messungen über die Absorption des Wassers hat auch Aschkinass¹⁾ angestellt.

Eine andere Methode, wenigstens einen ungefähren quantitativen Anhalt über die Wasserfarbe zu erhalten, ohne auf spektralanalytische Untersuchung zurückzugehen, beruht auf der Vergleichung der natürlichen Gewässerfarben mit sogenannten Farbenskalen. Durch Mischung verschieden gefärbter Lösungen sucht man hierbei die Farbe des betreffenden Sees nachzuahmen. Eine solche Skala ist zuerst von Forel angefertigt worden.²⁾ Er benutzte Lösungen von ammoniakalischem Kupfersulfat und von Kaliumchromat. Durch verschiedene Mischungsverhältnisse dieser beiden Substanzen erhielt er elf Abstufungen vom reinsten Blau bis zum Gelbgrün.

Ule³⁾ erweiterte die Skala, indem er den blauen und grünen Tönen noch braune hinzufügte mit Hilfe einer Lösung von stark ammoniakalischem Kobaltsulfat. Später hat Ule⁴⁾ eine Skala nach einem anderen Prinzip angefertigt, wodurch er eine noch größere Mannigfaltigkeit der Farben, besonders auch ihrer Intensität nach, erzielte. Als Färbeflüssigkeiten verwendete er Methylenblau, Kaliumchromat und Kaliumdichromat in bestimmten Konzentrationen.

Die Farbe eines Sees oder Gewässers suchte man vielfach auch dadurch zu erklären, daß man sagte, die Farbe rühre überhaupt nicht allein vom Wasser her, sondern, was man sehe, sei die Färbung des Seegrundes⁵⁾, der je nach der Tiefe des

1) E. Aschkinass, Wied. Ann. 55. p. 401. 1895.

2) F. A. Forel, Le Léman 2. p. 462—487. 1895.

3) W. Ule, Petermanns Mitteilungen 1892.

4) W. Ule, Der Würmsee p. 160. 1901.

5) J. Wallmann, Jahrbuch des österr. Alpenvereins 4. 1868.

Sees heller oder dunkler erscheine. Auch der Reflex vom Himmel¹⁾ oder von der nächsten Umgebung²⁾ soll die Wasserfarbe beeinflussen; auch die Temperatur³⁾ und damit die verschiedene Dichtigkeit des Wassers, die im See befindlichen Pflanzen⁴⁾ etc. werden zur Erklärung mit herbeigezogen. Außerdem führt Spring⁵⁾ noch als Grund der verschiedenen Färbung das Webersche psychophysische Grundgesetz an. Er bemerkt dazu, daß die Empfindung einer Farbe verlischt oder sich abschwächt, wenn das Auge durch die Wahrnehmung anderer Farben oder durch starke äußere Reize beansprucht ist. Daher wird die Farbe eines Sees bei vollem Sonnenschein weniger lebhaft sein als bei trübem Himmel. Dazu gesellt sich aber noch die Wirkung infolge größerer oder geringerer Durchsichtigkeit des Wassers. Die maximale Farbenempfindung ist also scharf gebunden an die Stärke der Beleuchtung und an die dabei auftretende Reizung der Augen.

Überblicken wir die im Vorstehenden angegebene Litteratur, so fällt es auf, daß Messungen, wenn überhaupt, so meist nur im Laboratorium ausgeführt worden sind. Wenn auch einige Forscher ihre Beobachtungen in der Natur auf einem See vorgenommen haben, so fehlen doch *quantitative* Untersuchungen über die Lichtabsorption des Wassers in der Natur selbst vollständig. Durch solche ist es aber allein möglich, sich darüber Rechenschaft zu geben, in welcher Weise die verschiedenen Faktoren, wie Beleuchtung, Trübung des Wassers, Temperaturveränderung voneinander abhängen und welchen Einfluß sie auf die Farbe ausüben.

Diese Lücken auszufüllen, ist der Zweck meiner Arbeit. Zwei Reihen von Untersuchungen mußten angestellt werden, um die Frage zu klären, nämlich solche im Laboratorium, und zweitens solche in der Natur selbst. Bei ersteren ging ich vom vollkommen reinen, optisch leeren Wasser aus und

1) A. Schwager, l. c.

2) J. Wallmann, l. c.

3) Ebenda und G. H. v. Boguslawsky, Handb. der Ozeonographie 1. 1884.

4) J. Brun, Jahresber. über d. Fortschr. d. Chem. p. 1512. 1880.

5) W. Spring, Bull. Acad. Roy. Belg. 12. p. 814. 1886.

dehnte dann meine Untersuchungen auf Mischungen des reinen Wassers mit chemischen Substanzen und auf künstlich getrübttes Wasser aus. Die Beobachtungen in der Natur erstrecken sich auf Messungen über die Lichtabsorption des Wassers verschiedener Seen. Hierbei wurde die Intensität des aus dem Wasser austretenden Lichtes verglichen mit der des direkten Himmelslichtes. Die Lichtquelle ist also für beide Lichtarten, nämlich für das Vergleichslicht und für das aus dem Wasser austretende Licht, die gleiche. Bei diesen Messungen zeigte es sich, daß auch Beobachtungen über die Durchsichtigkeit, die Temperatur und die Polarisationsverhältnisse des aus dem Wasser kommenden Lichtes notwendig waren.

Apparate.

1. Zur Bestimmung der spektralen Farbenzusammensetzung der verschiedenen Gewässer benutzte ich ein *Spektrophotometer*, eine nach Angabe von F. F. Martens¹⁾ angefertigte Neukonstruktion des von A. König²⁾ erfundenen Photometers von der Firma Schmidt & Hänsch in Berlin. Das Photometer wurde von mir in dreierlei verschiedenen Ausrüstungsformen verwendet:

a) Mit der von der Firma mitgegebenen Spaltbeleuchtungs-*vorrichtung* gebrauchte ich es zur Bestimmung der Absorption von Farblösungen, die zum Vergleich mit der Wasserfarbe gedient haben, ferner zur Feststellung der Nulllage und zur Eichung des Apparates.

b) Bei den Beobachtungen im Laboratorium kamen die Lichtstrahlen von der Seite, deshalb konnte ich hier die ebenfalls mitgegebene Fassung mit den beiden total reflektierenden Prismen benutzen.

c) Bei den Messungen auf den Seen kam das eine Licht (Wasserfarbe) von unten, das Vergleichslicht (Himmelslicht) von oben, daher wurden (Fig. 1) seitlich von den Prismen

1) F. F. Martens, Verhandl. d. Deutschen Physik. Gesellsch. 1. p. 278 u. 280. 1899.

2) A. König, Wied. Ann. 53. p. 785. 1894.

R_1 und R_2 noch zwei total reflektierende Prismen P_1 und P_2 in geschwärztem Messinggehäuse angebracht, welche durch je einen Konus K das entsprechende Licht erhielten. Der zum See gerichtete Trichter K_1 mußte so lang sein, daß er eben ins Wasser eintauchte, um dadurch die Oberflächenspiegelung zu beseitigen. Der andere K_2 erhielt als oberen Abschluß eine Halbkugel aus Mattglas. Die von dieser in den Apparat gelangende Helligkeit stellte dann die Summe für alle einzelnen Partien am Himmelsgewölbe dar.

Werden die beiden Spalte des Photometers von zwei gleich starken Lichtquellen beleuchtet, so haben wir, um gleiche Helligkeit im Gesichtsfeld zu erhalten, das Nicol gegen die Nullstellung um einen gewissen Winkel φ

(bei diesem Instrument $\varphi = 45^\circ$) zu drehen. Kommt Licht von verschiedener Helligkeit J_1 und J_2 , so erhält die eine Hälfte des Okulargesichtsfeldes die Intensität $J_1 \sin^2 \alpha$, die andere $J_2 \cos^2 \alpha$. Stellt man durch Drehen des Nicols wieder auf gleiche Helligkeit ein, so wird $J_1 \sin^2 \alpha = J_2 \cos^2 \alpha$, oder $J_1/J_2 = \text{ctg}^2 \alpha$. Der Drehungswinkel sei α , von der Dunkelheitsstelle desjenigen Bildes aus gerechnet, welches das Licht von der Intensität J_1 erhält. Wird J_1 ferner noch durch ein vorgeschaltetes absorbierendes Mittel geändert, so kommt Licht von den Intensitäten $i = a J_1$ ($a < 1$) und J_2 in den Apparat und es ist

$$\frac{a J_1}{J_2} = \text{ctg}^2 \alpha',$$

wenn α' den neuen Winkel bedeutet. Dabei ist $\alpha' > \alpha$. Es ergibt sich also

$$(1) \quad a = \frac{\text{ctg}^2 \alpha'}{\text{ctg}^2 \alpha}.$$

Fig. 1.

Nun ist aber unter Einführung des Absorptionskoeffizienten A

$$i = aJ = e^{-Ad} \times J,$$

also

$$(2) \quad a = e^{-Ad}$$

und aus (1) und (2).

$$(3) \quad A = - \frac{\log^e \frac{\text{ctg}^2 \alpha}{\text{ctg}^2 \alpha'}}{d} = \frac{\log^e \frac{\text{ctg}^2 \alpha}{\text{ctg}^2 \alpha'}}{d} = \frac{\log^{10} \frac{\text{ctg}^2 \alpha}{\text{ctg}^2 \alpha'}}{d \log^{10} e}.$$

Diese Formel wurde verwendet zur Berechnung der Absorptionskoeffizienten sämtlicher Gewässer. Bei der Anordnung, bei welcher die Martenssche Spaltbeleuchtungsanordnung gebraucht werden kann, also bei den Farbstoffen, vereinfacht sich die Formel etwas; da nämlich α für alle Farben $= 45^\circ$ ist, so wird $\text{ctg} \alpha = 1$; verwendet man schließlich statt des α den β , so lautet die Formel

$$(4) \quad A = \frac{1}{d} \frac{\log \text{ctg}^2 \beta}{\log e}.$$

Der Absorptionskoeffizient A bedeutet hier den reziproken Wert derjenigen Schichtdicke d , bei welcher die Intensität des einfallenden Lichtes auf $1/e$ gesunken ist.

Der Absorptionskoeffizient konnte gemäß der Lichtstärke des Photometers auf den Seen innerhalb des Spektralbereiches von 650 und 470 $\mu\mu$ gemessen werden. Bei künstlicher Beleuchtung konnte man im Rot bis 660 $\mu\mu$ gelangen. Die erhaltenen Werte wurden graphisch aufgetragen in der Weise, daß die Abszissen die Lichtwellenlängen angeben, die Ordinaten die Größe von A . Aus einer solchen Kurve kann man also die Stärke der Absorption für jede Stelle des Spektrums ersehen.

Die Vorbedingungen, um auf dem See eine brauchbare Messungsreihe mit dem Photometer ausführen zu können, sind zahlreich. Vor allem muß man ein geräumiges stabiles Boot haben; am besten eignen sich hierzu die großen Kähne mit breitem Boden, wie sie an vielen unserer bayerischen Seen angetroffen werden. Kielschiffe sind gänzlich unbrauchbar. Die Beleuchtung muß während der Messung gleichmäßig sein, man braucht also entweder wolkenlosen oder ganz bedeckten

Himmel. Im letzterem Falle ist aber der Apparat meist zu lichtschwach. Teilweise wechselnde Bewölkung ist schädlich wegen der stets sich ändernden Menge an polarisiertem Himmelslicht. Ich mußte daher immer auf wolkenlose Tage warten. Das Boot ließ ich durch einen Gehilfen stets so einstellen, daß der Apparat direkt gegen die Sonne gerichtet war, dann war die Beleuchtung der Scheibe im Wasser am intensivsten und eine Beschattung durch das Schiff ausgeschlossen. Diese Stellung mußte der Gehilfe während der Messung genau einhalten. Eine weitere wesentliche Vorbedingung ist die, daß der See vollkommen glatt ist, weil schon durch die kleinsten Wellen ein Flimmern auf der Scheibe eintritt, wodurch eine genauere Messung unmöglich wird. Messungen im Schatten, auch bei wolkenlosem Himmel, sind zu vermeiden. Die Temperatur der benutzten Wasserschicht soll möglichst konstant sein, da sonst Schlieren auftreten können. Die geeignetsten Zeiten sind daher der Winter oder der Hochsommer.

2. Zur Bestimmung der Sichttiefe und zur Abgrenzung einer Wasserschicht von beliebiger Dicke d (vgl. Formel 3) versenkte ich eine *weiße kreisförmige Scheibe* in den See. Sie bestand aus dickem Zinkblech und war mit einem dreifachen stark glänzenden Anstrich von weißem Emaillack versehen. Ihr Durchmesser betrug 1 m; diese Größe war erforderlich, um bei den bedeutenderen Sichttiefen noch ein deutlich wahrnehmbares Objekt zu haben. Andererseits ist aber eine noch größere Scheibe nicht mehr handlich. In das Seil, an welchem sie befestigt war, waren von Meter zu Meter Marken eingeknüpft. Am Rand des Bootes war eine Rolle angebracht, über welche das Seil gleiten konnte. Was die Größe der Scheibe betrifft, so ist es ja zwar nicht ganz leicht, besonders in bedeutenden Tiefen, mit ihr zu operieren. Aber es wäre doch für weitere Sichttiefenmessungen sehr wünschenswert, wenn der Durchmesser von 1 m als Normalmaß beibehalten würde.

Die Messung der Sichttiefe konnte, wie später ausgeführt wird, bei jeder Witterung und Beleuchtung vorgenommen werden, doch durfte der See auch hier nicht sehr bewegt sein wegen des sonst unvermeidlichen Treibens des Schiffes. Bei einiger Übung sind Fehler von 0,5 m das Maximum.

3. Zu einer zuverlässigen Bestimmung der Sichttiefen und um die Eigenfarbe eines Sees unabhängig von den Einflüssen der Umgebung erkennen zu können, war es notwendig, den Reflex der Oberfläche zu eliminieren. Ich bediente mich hierzu eines *geschwärzten Rohres aus Zinkblech*, das in Form eines Sprachrohres nach vorn sich erweiterte. Die Länge betrug 1 m, die engere Öffnung hatte einen Durchmesser von 4 cm, die weite einen solchen von 25 cm.

4. Die Messung der Temperatur geschah mit einem *Minimumthermometer*, demselben, das schon Geistbeck¹⁾ benutzt hatte. Es stammt von der Firma Kappeller in Wien.

5. Um im Laboratorium Wasser auf seine Farbe zu untersuchen, kann man eine Röhre entweder vertikal oder horizontal

Fig. 2.

aufstellen. Das erstere würde den Verhältnissen in der Natur am meisten entsprechen. Ich habe zuerst eine vertikale Röhre von 2 m Höhe probiert. Am Boden war ein Spiegel angebracht, der, an Messingkettchen befestigt, in verschiedene Höhenlagen eingestellt werden konnte. Das Licht trat durch ein total reflektierendes Prisma in die Röhre ein und durch ein ebensolches wieder aus, von wo es dann in den Apparat gelangte. Eine solche Röhre muß einen ziemlich großen Durchmesser haben, damit das Licht, welches von der Oberfläche, und das, welches vom Spiegel reflektiert wird, getrennt werden kann. Aber da auch beim klarsten Wasser eine Trübung des Spiegels durch Sedimentationen zu befürchten ist, so entschied ich mich bei den definitiven Versuchen für die Anordnung in horizontaler Richtung, wie sie auch von Spring bei seinen Versuchen benutzt wurde. Eine $5\frac{1}{2}$ m lange Röhre *R* (vgl. Fig. 2) aus Zinkblech mit einem Durchmesser von 6 cm wurde

1) A. Geistbeck, Die Seen der deutschen Alpen p. 36. 1885.

horizontal auf sechs verstellbare eiserne Träger aufgelegt. Die Öffnungen an den Enden, die auf 5 cm Durchmesser abgeblendet waren, damit keine Reflexe an der Röhrenwand auftreten können, wurden verschlossen durch Platten aus Spiegelglas; oben waren zwei Röhrchen E_1 und E_2 angebracht zum Eingießen des Wassers. Die ganze Anordnung ist aus Fig. 2 ersichtlich. Das Licht wurde durch eine Linse L_1 mit einer Brennweite von 20 cm parallel gemacht, von wo es auf eine Spiegelglasplatte S_1 traf. Hier ging ein Teil durch, der andere wurde reflektiert. Der erste Teil ging durch die Röhre und die Linse L_2 (16 cm Brennweite) direkt zum Prisma R_2 , der andere Teil (das Vergleichslicht) gelangte durch Reflexion an den Spiegeln S_2 , S_3 und S_4 und durch die Linse L_3 (16 cm Brennweite) zum Prisma R_1 .

Zur Beleuchtung ist wegen der Länge der absorbierenden Wassersäule eine ziemlich starke Lichtquelle nötig. Eine gewöhnliche Vakuumglühlampe genügt hier nicht. Ich versuchte es zuerst mit Bogenlicht, doch ist dieses wegen seiner Inkonstanz an Helligkeit und wegen des häufigen Umspringens des Lichtbogens (auch bei Benutzung einer Kugel aus Mattglas) unbrauchbar. Ganz vorzüglich geeignet dagegen ist das Licht der Nernstlampe mit ihrer sehr großen spezifischen Helligkeit. Diese brennt ruhig und hell, so daß ich fast alle Beobachtungen mit dieser ausführte. Die beim Übergang des Lichtes in ein anderes Medium auftretenden Spiegelungen hatten, wie ich mich überzeugen konnte, keinen meßbaren Einfluß auf die Einstellung, während Aschkinass¹⁾ mit Flußspatplatten einen Helligkeitsverlust von einigen Prozenten bemerkte.

6. In vielen Fällen hat mir ein geradsichtiges *Taschen-spektroskop* nach H. W. Vogel von der Firma Schmidt und Hänsch in Berlin gute Dienste geleistet.

7. Zur Untersuchung der Polarisation des aus dem Wasser austretenden Lichtes verwendete ich eine *Haidingersche Lupe*.

Beobachtungen über die Farbe des Wassers.

Wie schon erwähnt, ging ich bei meinen Messungen über die Farbenzusammensetzung der Seen von ganz reinem, „optisch

1) E. Aschkinass, l. c.

leerem“ Wasser aus, d. h. von einer Flüssigkeit, welche der chemischen Verbindung H_2O möglichst nahe kommt.

Um wirklich reines Wasser zu erhalten, muß man gewöhnliches Wasser wiederholt destillieren über Kalilauge und übermangansaurem Kali. Ich wandte eine zweimalige Destillation an, was bei der großen Reinheit des Münchener Wasserleitungswassers vollkommen genügt.

Fig. 3.

Die Zinkröhre, in welche das Wasser schließlich eingefüllt wurde, war zuerst gründlich mechanisch gereinigt und dann öfters mit destilliertem Wasser ausgespült worden. Die Beobachtung geschah an demselben Tage, an welchem das Wasser destilliert worden war. Die Resultate sind folgende (vgl. auch Fig. 3, wo die folgende Absorptionskurve graphisch dargestellt ist):

Doppelt destilliertes Wasser.

(λ = Lichtwellenlänge, A = Absorptionskoeffizient pro Meter.)

λ	A	λ	A
658	0,320	602	0,173
643	0,291	590	0,089
622	0,239	579	0,049
617	0,244	558	0,038
612	0,233	522	0,002
607	0,200	494	0,002

Um nun dieses reine Wasser optisch leer zu machen, kann man auf verschiedene Weise verfahren. Hr. Prof. Spring hatte die Liebenswürdigkeit, mir einige von ihm selbst erprobte Methoden mitzuteilen. Hiernach kann man den Zweck erreichen entweder durch 12—15maliges Filtrieren durch Tierkohle oder durch Fällung der im Wasser suspendierten Staubteilchen mit einem farblosen Elektrolyten, z. B. Zinkchlorid. Da das Filtrieren einer so großen Wassermasse zu viel Zeit in Anspruch nahm und man dabei doch nicht sicher ist, daß wirklich kein Staub mehr im Wasser ist, so entschied ich mich für den Fällungsprozeß. Ich vermischte das reine Wasser mit einer Lösung von Zinkchlorid und füllte das Ganze in die oben erwähnte Röhre ein. Diese wurde, um den Inhalt vor Temperaturschwankungen möglichst zu schützen, mit Watte umwickelt und in einem gleichmäßig temperierten, vor Zug geschützten Kellerraum des Laboratoriums aufgestellt. Nachdem das Wasser einen Monat gestanden war, wurde die Farbe untersucht. Das Resultat ist folgendes:

Optisch leeres Wasser.

Kurve auf Fig. 4.

λ	A	λ	A
658	0,328	590	0,095
643	0,293	579	0,051
617	0,247	558	0,028
607	0,205	522	0,002
602	0,166		

Von $\lambda = 522$ an ist keine Absorption mehr zu beobachten.

Vergleicht man diese Werte mit den Werten, die beim reinen Wasser vor Behandlung mit Zinkchlorid gewonnen

worden waren, so sieht man, daß die Farbenzusammensetzung, aber auch die Durchsichtigkeit die gleiche geblieben ist, ein Zeichen, daß in dem doppelt destillierten Wasser die Staubteilchen schon so außerordentlich selten sind, daß sie in einer Wassersäule von $5\frac{1}{2}$ m Länge keine merkliche Trübung mehr erzeugen können. Blickte man durch die beleuchtete Röhre hindurch, so war das Wasser von einer wundervollen Klarheit, das gegenüberliegende Ende erschien etwas bläulich gefärbt. Nur an dieser Färbung erkannte man, daß überhaupt etwas anderes als Luft in der Röhre war. Sehen wir uns das Absorptionsspektrum des reinen Wassers etwas näher an, so

Fig. 4.

können wir aus den Kurven folgendes erkennen: Im Rot ist starke Absorption vorhanden bis herab zur Wellenlänge $\lambda = 620 \mu\mu$. Zwischen 620 und 610 $\mu\mu$ tritt ein charakteristischer Absorptionsstreifen auf. Dann nimmt die Absorption rasch ab und verliert sich gegen das blaue Ende des Spektrums zu fast ganz. Wie schon in der Einleitung erwähnt, hat Soret nachgewiesen, daß auch im Ultraviolett große Lichtdurchlässigkeit herrscht. Was den Verlauf der Absorption im Rot betrifft, jenseits des Meßbereiches des Spektrophotometers, so nimmt dieselbe mit wachsenden Wellenlängen immer mehr zu. Der auch früher schon erwähnte Absorptionsstreifen in der Nähe der C-Linie ist mit einem lichtstarken Spektralapparat bei einer Wassersäule von $5\frac{1}{2}$ m eben noch sichtbar, dann aber folgt fast vollkommene Absorption. Nach Desains und Aymonnet¹⁾

1) P. Desains u. Aymonnet, Compt. rend. 81. p. 423. 1875.

sind im Infrarot auch noch einige Absorptionsstreifen vorhanden.

Alle Abweichungen vom Blau des reinen Wassers sind durch Anwesenheit von Fremdkörpern verursacht. Ob diese im Zustand der Lösung vorhanden sind, oder ob es ungelöste suspendierte Teilchen sind, soll jetzt noch nicht entschieden werden. Diese Abweichungen habe ich nun ihrer Größe nach an verschiedenen Seen des bayerischen Hochgebirges, des oberbayerischen Vorlandes und des bayerischen Waldes festgestellt. (Vgl. Fig. 3.)

Aus den Messungen im Kochelsee, zu welchen das Wasser ganz verschiedener Stellen und zu verschiedenen Jahreszeiten benutzt wurde, ergibt sich das wichtige Resultat, *daß die Farbenzusammensetzung eines Sees, vielleicht bis auf minimale Abweichungen, konstant bleibt, daß also auch eine Trübung, welche die Sichttiefe um mehrere Meter verändert, auf die Art der Farbe keinen Einfluß hat.* Es wechselt bloß ihre Intensität.

Die Farbenverteilung beim Achensee nähert sich, wie man aus dem Vergleich der entsprechenden Kurven ersieht, am meisten der des reinen Wassers, nur ist der See ziemlich trüb (Sichttiefe nur 12 m), daher die größeren Werte von *A*. Die Farbe ist, wenn man sie mit der des Himmels vergleicht, gleich dem helleren, schon etwas grünlicheren Blau am Horizont.

Kochelsee, Walchensee, Eibsee, Königsee, Obersee (südliche Fortsetzung des Königsees) und Würmsee haben grünes Wasser; die Absorption des blauen Teiles im Spektrum ist bedeutender als beim Achensee, aber noch nirgends sehr stark. Beim Staffelsee jedoch und beim Arbersee im Bayerischen Wald (einem sogenannten schwarzen See) ist Blau fast vollständig absorbiert, das sichtbare Spektrum ist daher nur mehr sehr kurz. Die Farbe des ersteren ist, durch das Sehrohr betrachtet, ein herrliches leuchtendes Braungrün, fast Gelb, die des letzteren ist ein dunkles Kastanienbraun.

Eine Diskussion der Absorptionskurven kann erst später erfolgen.

Vergleich der durch Farbenskalen bestimmten Wasserfarben mit der wirklichen Seefarbe.

Um mich von der Brauchbarkeit der anfangs erwähnten Farbenskalen zu unterrichten, habe ich die Absorptionskurven für die drei von Ule verwendeten Substanzen (Methylenblau, Kaliumchromat und Kaliumdichromat) in der angegebenen Konzentration spektrophotometrisch hergestellt.

Setzt man die Kurven der drei Substanzen entsprechend den Verschiebungen in der Uleschen Skala additiv zusammen

Fig. 5.

(Fig. 5), so sollte man eine Kurve erhalten, die die gesuchte Farbe des Wassers angibt. Ule hat z. B. auf p. 160 mitgeteilt, durch welche Einstellung seiner Skala die Farbe des Würmsees erhalten wird. Auf Fig. 5 ist die diesen Angaben entsprechende Addition der Kurven ausgeführt und dazu die wirkliche Absorptionskurve des Würmseewassers eingezeichnet worden. Man ersieht auf den ersten Blick den fundamentalen Unterschied: während nämlich jedes Wasser, vom reinsten bis zum trübsten, eine ganz ausgesprochene Absorption im Rot zeigt, die um so größer wird, je länger die Lichtwellen werden, so fällt hier die Kurve im Rot steil ab, so daß also die resul-

tierende Mischfarbe immer an Rot sehr viel reicher sein wird, als sie der Wasserfarbe entsprechend sein dürfte. Keinesfalls darf daher eine Lösung von Methylenblau als färbende Flüssigkeit verwendet werden. Man müßte einen anderen blauen Farbstoff ausfindig machen, der der Eigenschaft des Wassers, die roten Strahlen fast vollständig zu absorbieren, mehr Rechnung trüge. Auch die beiden anderen Substanzen, vor allem das Kaliumdichromat, sind nicht geeignet; denn kein Wasser, nicht einmal das an Blau ärmste, absorbiert die kurzen Wellenlängen in der Weise, wie es dieser Farbstoff tut. Auch die Forel-Ulesche Skala habe ich mir hergestellt und die Substanzen spektralanalytisch untersucht. Dabei treten ähnliche Unzuträglichkeiten auf. Die ammoniakalische Kupfersulfatlösung absorbiert Gelb sehr stark, aber je größer im Rot die Wellenlängen werden, um so durchlässiger ist sie für die Lichtstrahlen. Die Kobaltsulfatlösung würde sich von allen angegebenen Substanzen noch am meisten zur Darstellung von Wasserfarben eignen, da sie das Blau mäßig absorbiert, das rote Licht jedoch läßt sie immer noch zu stark durch, um wirklich zu dem angegebenen Zwecke brauchbar zu sein.

Um nun auf andere Weise wenigstens eine ungefähre Schätzung (denn um eine solche allein handelt es sich ja auch bei den Skalen nur) von der Farbe eines Sees zu gewinnen, möchte ich einen anderen Vorschlag machen, der jedenfalls den Vorteil der Einfachheit hat. Wie ich am Schluß meiner Abhandlung zeigen werde, kann man sämtliche Gewässer bezüglich ihrer Farbe in vier Gruppen unterbringen.

1. Gruppe: blau wird nicht absorbiert,
2. „ „ „ schwach absorbiert,
3. „ „ „ stark absorbiert,
4. „ „ „ vollständig absorbiert.

Diese Unterschiede lassen sich aber mit Hilfe eines Taschenspektroskopes bei einiger Übung mit großer Genauigkeit konstatieren. Ein solches Instrument ist stets leicht in der Tasche mitzuführen, man braucht zur Ausführung der Bestimmung nur mehr ein kleines geschwärztes Rohr, um die Oberflächenreflexe abblenden zu können. Damit man vergleichbare Resultate bekommt, muß der Spalt des Spektroskopes immer eine

und dieselbe Breite haben. Dies läßt sich leicht dadurch erreichen, daß man an der Vorrichtung, durch die der Spalt reguliert wird, eine Marke anbringt. Die Angabe einer der erwähnten Typen genügt aber vollkommen, um den Charakter der Wasserfarbe eines Sees feststellen zu können, und man hat zudem den Vorteil, eine wirkliche physikalisch richtige Vorstellung von der Zusammensetzung des Wassers gewonnen zu haben.

Durchsichtigkeit des Wassers.

Die Durchsichtigkeit eines Gewässers hängt aufs engste zusammen mit der scheinbaren Farbe, in der uns dasselbe erscheint. Wir haben am Kochelsee gesehen, daß eine Trübung die relative Farbenzusammensetzung an sich zwar nicht zu ändern vermag, daß uns aber ein klarer See mit durchsichtigem Wasser viel dunkler erscheint, als ein solcher mit trübem Wasser.

Bevor ich meine Messungsergebnisse anführe, möchte ich einige Bedenken zerstreuen. Es ist vielfach geäußert worden, man müsse solche Messungen zu einer bestimmten Jahreszeit ausführen, wenn die Sonnenstrahlen unter einem gewissen Winkel in den See einfallen und man müsse überhaupt jedesmal dieselben äußeren Bedingungen haben. Ich kann aber auf Grund vieler Beobachtungen mit Sicherheit die Behauptung aufstellen, daß alle solche Vorsicht unnütz ist. Nach dem psychophysischen Grundgesetz von Weber und Fechner empfindet das menschliche Auge die Unterschiede zweier Reize nur dann, wenn das Verhältnis dieser Reizintensitäten ein nahezu konstantes Maß überschreitet. Helmholtz konnte dieses Verhältnis auf $\frac{1}{133}$ festsetzen. Wir nehmen aber auch hier bei dem Versenken der Scheibe nur Helligkeitsunterschiede wahr, die fast unabhängig sind von der Lichtstärke der Umgebung. Die Scheibe wird also dem Auge dann nicht mehr sichtbar sein, wenn der Unterschied der Helligkeit vom Wasser und der eingetauchten Scheibe das Verhältnis von $\frac{1}{133}$ erreicht hat. Dementsprechend fand ich auch die Sichttiefe an einem Tage bei vollem Sonnenschein und bei starker Bewölkung, ja selbst einmal im Sommer noch abends 9 Uhr nach Eintritt der Dunkelheit, als schon Sterne schienen, völlig kon-

stant zu 6 m, wohl ein sicherer Beweis dafür, daß man sich hier nicht nach Sonnenstand oder Bewölkung zu richten habe.

Ich teile hier nur meine Beobachtungen über Sichttiefen im Kochel- und Walchensee mit.

Kochelsee.

Datum	Sichttiefe in m	Temp. in C.°		Wetter	Beschaffenheit des Wassers
		oben	unten		
Januar 1901	10,0	—	—	—	—
11 Mai 1902	8,0	8,0	—	etwas Sonne	—
19. „	7,5	8,0	6,5	bedeckt	ziemlich rein
22. „	6,0	8,0	8,0	Regen	trüb
23. „	6,0	8,5	8,5	bedeckt	ziemlich rein
31. „	7,0	10,0	8,5	sonnig	„ „
2. Juni	6,0	15,5	9,5	„	„ „
15. „	4,5	14,5	13,0	bewölkt	„ „
16. „	5,0	14,0	13,0	bedeckt	„ trüb
29. „	5,5	22,0	16,0	sonnig	trüb
27. Juli	4,5	19,2	17,8	„	sehr trüb
16. Aug.	6,0	17,4	17,4	wolkenlos	ziemlich rein
18. „	6,0	19,6	17,1	bedeckt	„ „
22. „	7,0	18,0	16,5	„	„ „
26. „	7,0	18,3	16,5	„	„ „
28. „	6,0	20,6	17,5	sonnig	trüb
30. „	5,0	—	—	„	„
2. Sept.	4,5	19,8	18,8	„	„
3. „	4,2	—	—	wolkenlos	„
5. „	4,3	20,3	19,4	„	„
29. „	5,2	15,3	15,2	sonnig	mäßig trüb
1. Nov.	6,0	9,6	9,8	neblig	ziemlich klar
7. Dez.	9,5	5,2	5,0	Nebel	sehr klar
3. Jan. 1903	9,5	3,4	3,4	trüb	„ „
1. Febr. ¹⁾	8,0	3,0	3,4	sonnig	mäßig klar
20. März ²⁾	5,0	3,8	3,8	wolkenlos	trüb
22. März	6,0	3,8	3,8	„	„

1) Am 1. Februar 1903 war der See fest zugefroren. Zur Beobachtung wurde ein Loch in das Eis geschnitten.

2) Den Beobachtungen im März 1903 ging die Eis- und Schneeschmelze vorher. Später konnten keine Messungen mehr vorgenommen werden, da der ganze See infolge der Loischregulierungsarbeiten unnatürlich getrübt war; so betrug z. B. im Mai 1903 die Sichttiefe kaum 1 m.

Walchensee.

Datum	Sichttiefe in m	Temp. in C.°		Wetter	Beschaffenheit des Wassers
		oben	unten		
19. Mai 1902	19,5	6,0	5,0	bedeckt	mäßig klar
24. „	17,0	7,0	6,0	etwas Sonne	ziemlich unrein
15. Juni	18,5	11,0	5,0	bewölkt	klar
16. „	19,5	11,3	5,0	bedeckt	sehr klar
29. „	16,0	13,5	6,4	sonnig	ziemlich unrein
19. Aug.	20,2	18,6	6,9	wolkenlos	sehr klar
27. „	20,5	17,4	7,0	sonnig	„ „
1. Sept.	21,0	17,8	6,5	neblig	„ „
3. „	20,5	18,4	7,6	wolkenlos	„ „
29. „	18,0	14,6	8,0	neblig	mäßig klar
8. Dez.	22,5	5,0	5,0	sonnig	sehr klar
5. Jan. 1903	24,0	4,0	—	sehr trüb	„ „
22. März	25,0	3,2	3,2	wolkenlos	„ „
16. Mai	18,0	7,8	5,1	sonnig	mäßig klar

Aus diesen beiden Tabellen kann man deutlich ersehen, wie die Trübung der Seen im Frühjahr, wohl unter dem Einfluß der den See umgebenden Vegetation zunimmt und dann zur Zeit der Hauptvegetationsperiode ihr Maximum erreicht. Im Herbst beginnt sich das Wasser wieder zu klären, bis es Ende des Winters seine größte Durchsichtigkeit erlangt hat.

Wie weit das Licht in ein Gewässer eindringt, hängt natürlich mit der Größe der Absorption für die einzelnen Farben aufs engste zusammen. Da nach der Definition der Absorptionskoeffizient der reziproke Wert derjenigen Schichtdicke ist, bei welcher die Intensität des einfallenden Lichtes auf $1/e$ gesunken ist, so kann man mit seiner Hilfe die Helligkeit für eine bestimmte Strahlengattung in beliebiger Tiefe angeben. Zahlenwerte hierfür haben schon Hüfner und Albrecht gerechnet.

Temperatur, Farbe und Durchsichtigkeit in ihrer gegenseitigen Abhängigkeit.

Die Tatsache, daß alle Seen im Winter dunklere Farbe zeigen als im Sommer, legte die Vermutung nahe, daß die Temperatur auf die Wasserfarbe einen gewissen Einfluß haben könnte. Wallmann¹⁾ nennt die erwähnte Erscheinung direkt

1) J. Wallmann, l. c.

eine Änderung der Farbe, wenn er damit offenbar auch nur den Wechsel der Intensität meint. Wild¹⁾ prüfte die Frage experimentell, indem er die Intensität des aus einer mit Wasser gefüllten Röhre austretenden Lichtes verglich mit der Helligkeit der ursprünglichen Lichtquelle. Dabei fand er wirklich eine Zunahme der Absorption mit wachsender Temperatur. Jedoch sind die Variationen so gering, daß sie für das Auge nicht in Betracht kommen können. Zudem operierte Wild mit Temperaturdifferenzen (Wasser von 7° und von 50°), die in der Natur nie auftreten.

Man könnte auch vermuten, daß an der Sprungschicht, wo die Temperaturgradienten rasch aufeinander folgen, irgend welche Unregelmäßigkeiten in der Reflexion, Brechung oder Absorption auftreten könnten, die von Einfluß auf die Farbe sind. Da ferner der Brechungsexponent des Wassers sich mit der Temperatur ändert, so wäre es möglich, daß beim Auftreten von Schlieren ähnliche Erscheinungen vorkommen, wie sie erhalten werden, wenn man Glaspulver in eine Mischung von Benzol und Schwefelkohlenstoff bringt.²⁾ Man kann nämlich aus den beiden Flüssigkeiten eine solche Mischung herstellen, daß ihr Brechungsverhältnis für eine beliebige Wellenlänge genau gleich dem des Glases ist. Licht von solcher Wellenlänge geht dann ohne Reflexion oder Brechung durch die Mischung von Flüssigkeit und Pulver hindurch, während die anderen Farben teils zurückgeworfen, teils gebrochen werden. Die ganze Masse erscheint also gefärbt. Unterscheidet sich aber das Brechungsverhältnis der Mischung nur um wenig von dem des Glases, so kann das Licht nicht ungehindert durch das Pulver hindurchgehen. Es treten vielfache Reflexionen und Brechungen ein und die Flüssigkeit wird getrübt sein. Daß solche Erscheinungen bei der Vermengung von Wasserschichten verschiedener Temperatur auch vorkommen können, ist sehr wahrscheinlich. Aber hier interessiert nur die Frage, ob sie auch von solcher *Intensität* sind, daß sie die Durchsichtigkeit eines Sees zu beeinflussen imstande sind. Sehen wir uns daher die Lage der Sprungschicht in den Seen etwas näher an.

1) H. Wild, Pogg. Ann. **134**. p. 582. 1868.

2) C. Christiansen, Wied. Ann. **23**. p. 300. 1884.

Bei trüben Seen, wie beim Kochelsee, wo die Sprungschicht bei 7—8 m beginnt, liegt sie schon unterhalb der Sichtbarkeitsgrenze der weißen Scheibe, kann also zu der Farbe des Wassers nichts mehr beitragen. In klaren Seen, wie beim Walchensee, wo sie etwa bei 10 m Tiefe beginnt, liegt sie ihrer ganzen Ausdehnung nach allerdings noch innerhalb des Sehbereiches. Direkte photometrische Messungen in dieser Tiefe vorzunehmen ist nicht gut möglich, da die Scheibe dann riesige Dimensionen haben müßte, um noch den ganzen Strahlenkegel im Photometer erfüllen zu können. Auch wäre dort unten die Lichtstärke für Messungen schon zu gering. Wohl aber verfolgte ich beim Versenken die Scheibe mit dem Auge, konnte aber beim Passieren der Sprungschicht nie auch nur den geringsten Unterschied in der Farbe gegen andere Tiefen wahrnehmen. Man könnte nun einwenden, daß durch die Bewegung der Scheibe die Sprungschicht überhaupt zerstört würde, doch konnte ich mit dem Thermometer konstatieren, daß eine Vermischung der verschiedenen Wärmezonen bei vorsichtigem Hinablassen nicht eintritt, ein Umstand, auf den auch Ule aufmerksam macht. Dies beweist nebenbei, daß der Zustand, der dort unten herrscht, sehr stabil sein muß, wodurch auch verständlich wird, daß sich derselbe viele Tage hindurch fast unverändert erhalten kann.

Wir können also sagen, daß bei den von mir untersuchten Seen ein Einfluß der Temperatur auf die Farbe nicht nachweisbar ist.

Umgekehrt hat aber die Farbe gar wohl einen Einfluß auf die Temperatur eines Sees insofern, als Wasser die roten Strahlen stärker absorbiert als die andern.

Daß auch die Sichttiefe die Temperaturverhältnisse in einem See beeinflusst, ist einleuchtend, denn klares Wasser läßt die Sonnenstrahlen tiefer eindringen als trübes; während also ein klarer Gebirgssee in seinen oberen Schichten sich nur langsam erwärmen wird, da die eindringende Wärmemenge sich auf einen größeren Bereich der Tiefe nach verteilt, werden die Oberflächenschichten in einem undurchsichtigeren See schneller erwärmt werden. In den tiefer gelegenen Regionen herrschen dann allerdings noch niedere Temperaturen vor.

Man wird also aus der Absorptions- und Sichttiefenkurve eines Sees direkt auf seine thermischen Verhältnisse schließen können.

Um schließlich noch den Einfluß der Temperatur auf die Durchsichtigkeit der Seen zu untersuchen, gehen wir aus von den Erscheinungen, die sich beim reinen Wasser darbieten. Maßgebend sind in dieser Beziehung die Untersuchungen von Spring¹⁾ über thermische Konvektionsströme im Wasser. Er brachte optisch leeres Wasser in eine Röhre von 52 m Länge. Dabei konnte man immer noch durch die Röhre hindurch die Öffnung an der entgegengesetzten Seite als kreisrund erkennen. Wurde aber das thermische Gleichgewicht an einer Stelle nur im geringsten gestört, so trat vollständige Dunkelheit auf, da das Licht infolge von Schlierenbildung nicht mehr ins Auge gelangen konnte. Für eine Röhre von 26 m Länge konnte Spring feststellen, daß ein Temperaturunterschied von 0,6° genügt, um vollständige Undurchsichtigkeit zu erzeugen.

Anders stehen die Verhältnisse bei nicht optisch leerem Wasser. Ich füllte in die schon mehrfach erwähnte 5 1/2 m lange Röhre gewöhnliches destilliertes Wasser. Die Helligkeit des durchgelassenen Lichtes wurde photometrisch mit der ursprünglichen Lichtquelle verglichen. An beiden Enden wurde je ein Thermometer eingetaucht. Eine Erwärmung der Röhre mit der Hand veränderte nichts an der Durchsichtigkeit. Erst bei Erwärmung einer Stelle des Rohres mit einer Gasflamme trat Undurchsichtigkeit ein, die aber nach Entfernung der Wärmequelle schnell wieder der früheren Helligkeit Platz machte, obwohl noch große Temperaturunterschiede an beiden Enden der Röhre bestanden. Man erkennt aus diesem Versuch, daß im gewöhnlichen Wasser, das nicht optisch leer ist, sehr wohl große Temperaturunterschiede nebeneinander bestehen können, ohne daß hierdurch die Durchsichtigkeit vermindert wird, wenn dieselben nur stationär sind, d. h. wenn keine Konvektionsströme auftreten.

Nun haben wir aber gesehen, daß in einem See während des Sommers die Schichten verschiedener Temperatur sehr ruhig übereinander liegen, weshalb keine oder nur sehr geringe

1) W. Spring, Bull. Acad. Roy. Belg. 31. p. 94. 1896.

Konvektionsströme auftreten, so daß die Durchsichtigkeit dadurch nicht beeinträchtigt wird. Tatsächlich habe ich auch bei meinen zahlreichen Sichttiefenbestimmungen während des Sommers selbst bei Durchquerung einer sehr ausgeprägten Sprungschicht niemals eine plötzliche Trübung oder eine plötzliche Verminderung der Helligkeit der Scheibe wahrnehmen können.

Anders stehen die Verhältnisse bei der Abkühlung der Seen. Infolge Untersinkens des schwereren kalten Wassers treten lebhaftere Zirkulationen der Temperatur auf. Wiederum werden hierdurch die Sichttiefen trüber Seen verhältnismäßig weniger beeinflußt werden als die klareren Seen. So konnte ich eine solche plötzliche Abnahme der Helligkeit der Scheibe im Walchensee in der Tiefe der Sprungschicht (bei 14—15 m) am 29. September 1902 feststellen, ein Umstand, der auch in der Sichttiefe zum Ausdruck kam.

Wenn es richtig wäre, daß durch Konvektionsströme im Sommer die Sichttiefe stark vermindert wird, so müßte dieselbe auch innerhalb eines Tages großen Schwankungen ausgesetzt sein. Nehmen wir an, an einem sonnigen heißen Tag sei der See stark erwärmt worden, so müßte infolge der eintretenden thermischen Bewegung seine Durchsichtigkeit sich sehr vermindert haben. Folgt nun eine warme Nacht darauf, in der der Himmel bedeckt ist, so daß die Ausstrahlung gering ist, so würden sich die Schichten verschiedener Temperaturen im See in einer gewissen Weise einstellen können und man hätte am Morgen eine bedeutend größere Sichttiefe zu erwarten, was aber den Beobachtungen nicht entspricht.

Wir können also sagen: die thermischen Störungen beeinflussen die Durchsichtigkeit in einem trüben See überhaupt so wenig, daß sie nicht in Betracht kommen, während sie in klaren Seen allerdings wenigstens im Herbst bei der Abkühlung einige Wirkung auf die Sichttiefe auszuüben vermögen.

Prüfung der Theorien der Wasserfarbe.

Wir haben schon in der Einleitung gesehen, daß es zwei Theorien gibt, welche die Wasserfarbe zu erklären suchen, eine physikalische (Diffractionstheorie), welche behauptet, die

Wasserfarbe könne teilweise als Farbe trüber Medien aufgefaßt werden, und eine rein chemische, welche die Farbe als Eigenfarbe deutet.

Wir wollen uns zuerst mit der physikalischen Theorie beschäftigen.

1. Diffractionstheorie.

Durch kleine Teilchen, die klein sind im Verhältnis zur Lichtwellenlänge, wird nach der Rayleighschen Theorie das auffallende Licht diffundiert. Es ist dann polarisiert und das Maximum der Polarisation tritt auf senkrecht zum einfallenden Strahl. Wie schon in der Einleitung erwähnt, fanden Soret und Hagenbach dieselben Polarisationsverhältnisse auch bei dem Licht, das aus dem Wasser austritt. Die Erscheinung ist nach ihrer Angabe und wie ich mich selbst überzeugt habe, allerdings nur schwach, etwa so „wie bei mäßig blauem Himmel“. Damit man die Polarisation überhaupt wahrnehmen kann, müssen die Sonnenstrahlen direkt auf die Wasseroberfläche fallen. Auch muß die Grenzfläche zwischen Luft und Wasser eben sein, damit die eindringenden Strahlen parallel bleiben. Taucht man nun das Soretsche Rohr, dessen „Objektiv“ aus einer wasserdicht anliegenden Glasplatte, dessen „Okular“ aus einem Nicolschen Prisma oder besser einer Haidingerschen Lupe besteht, schief ins Wasser ein, so sieht man, wenn das Wasser klar ist, eine schwache Polarisation, deren Ebene durch die Achse des Rohres und durch die Sonne geht. Ich konnte aber bei den von mir untersuchten Gewässern in der Richtung senkrecht zum einfallenden Strahl kein Maximum konstatieren, vielmehr fand ich die Polarisation auch in Richtung des einfallenden Strahles gleich groß. Beim Arbersee war sogar in letzterer Richtung ein Maximum, wobei das Licht seine Schwingung in der Einfallsebene ausführte. Die Verhältnisse scheinen also, nach Sorets und meinen Beobachtungen zu schließen, folgendermaßen zu liegen: in sehr klarem Wasser, wie dem des Genfersees, ist das austretende Licht fast ausschließlich infolge von Diffusion an den sehr kleinen suspendierten Teilchen polarisiert. Bei trüberen Gewässern kommt noch Polarisation durch Reflexion an größeren Teilchen hinzu, weshalb kein Maximum mehr in Richtung senkrecht zum ein-

fallenden Strahl zu konstatieren ist. In den schwarzen Seen scheint ausschließlich, oder wenigstens in sehr überwiegendem Maße, die Lallemandsche Erscheinung aufzutreten, daß nämlich das Licht in der Einfallsebene schwingt, wobei ein Maximum in Richtung des einfallenden Strahles vorhanden ist. Ich glaube auf Grund meiner Beobachtungen sagen zu dürfen, daß durch das Vorhandensein dieser schwachen Polarisationserscheinungen die Auffassung der Wasserfarbe als der eines trüben Mediums noch nicht genügend gerechtfertigt erscheint, zudem die Resultate meiner weiteren Untersuchungen auf diesem Gebiete das Gegenteil zeigen, denn

1. konnte ich durch photometrische Messungen konstatieren, daß destilliertes Wasser, das noch mit suspendierten Staubpartikelchen erfüllt ist, auch im durchgelassenen Licht eine vollkommen blaue Farbe hat (vgl. Kurve auf Fig. 3), daß hierbei kein merklicher Verlust an kurzwelligen Strahlen auftritt, wie es bei einem trüben Medium im durchgelassenen Licht sein müßte.

2. Ferner beweisen die Absorptionskurven des Kochelsees, die bei verschiedenen Sichttiefen aufgenommen wurden, daß mit einer Trübung keine Änderung der Farbenzusammensetzung verbunden ist.

3. Auch behandelte ich Kochelseewasser mit einer Lösung von Zinkchlorid, wodurch die suspendierten Teilchen zu Boden geschlagen werden. Nach einem Monate untersuchte ich dieses nunmehr optisch leere Wasser auf seine Farbe und fand dieselbe unverändert, während sie, wenn die kleinen Teilchen einen Einfluß gehabt hätten, im durchgelassenen Lichte ärmer an Rot und reicher an Blau hätten werden müssen.

4. Nach der Rayleighschen Theorie wird Licht zerstreut durch Teilchen, die sehr klein sind im Vergleich zu den Lichtwellenlängen. Das Amplitudenverhältnis der Schwingungen des zerstreuten Lichtes ändert sich umgekehrt mit dem Quadrat der Wellenlänge und das Verhältnis der Intensität der Strahlen selbst daher mit der vierten Potenz. Bedeutet J_0 die Intensität des einfallenden Lichtes, J_1 die des reflektierten, so erhält man

$$\frac{J_1}{J_0} = \frac{k}{\lambda^4},$$

wo k ein Faktor ist, der von der Größe und Anzahl der Teilchen abhängt; dringt das Licht eine Strecke x in das trübe Medium ein, so ist

$$J_1 = J_0 e^{-k \lambda^{-4} x}.$$

Danach würde z. B. das Rot von der Wellenlänge $\lambda_1 = 650 \mu\mu$ gegenüber dem Blau der Wellenlänge $\lambda_2 = 450 \mu\mu$ im Verhältnis

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^4 = 1,44^4 : 1 = 4,30 : 1$$

schwächer reflektiert werden. Im durchgelassenen Licht jedoch wird das Rot viel stärker vorhanden sein als das Blau.

Um dies experimentell zu untersuchen, stellte ich mir optisch leeres Wasser und dann ein trübes Medium her. Letzteres erhält man leicht durch eine alkoholische Mastixlösung, die dem zu untersuchenden Wasser beigemischt wird. Um die Teilchen recht klein zu erhalten, muß man nach Abney und Festing¹⁾ kleine Quantitäten der Lösung in große Mengen von Wasser einschütten und dabei fortwährend umrühren oder schütteln.

Ich brachte nun diese Mastixlösung in das optisch leere Wasser; so daß der Gehalt an gelöstem Mastixpulver etwa 5 mg in 12 Liter Wasser betrug. Dieses Gemisch ließ ich über Nacht stehen und bekam dann für die Farbe des durchgelassenen Lichtes folgende Werte:

Optisch leeres Wasser, das mit etwas Mastixlösung getrübt ist.

(Kurve vgl. Fig. 4.)

λ	A	λ	A
658	0,386	579	0,220
648	0,365	558	0,237
617	0,351	522	0,290
602	0,333	494	0,380
590	0,249	473	0,365

Der Zweck der ganzen Untersuchung ist nun der, zu prüfen, ob die Absorption eines künstlich getrübbten Wassers mit der eines natürlichen Wassers übereinstimmt, ob also die Farbe des Wassers ganz oder teilweise als Farbe eines trüben Mediums aufgefaßt werden darf. Vergleichen wir daher die

1) W. Abney u. Festing, Beibl. 10. p. 622. 1886.

zuletzt gewonnene Kurve mit denen auf Fig. 3. Da bemerken wir vor allem, daß beim trüben Medium schon bei einem geringen Grad von Trübung (die sich durch die absolute Größe des Absorptionskoeffizienten ausdrückt) eine große Abschwächung der Absorption im Rot auftritt, während die im Blau sehr stark zunimmt, eine Erscheinung, die in dem Grade bei keinem Wasser in der Natur vorkommt; denn bei allen den Seen, bei denen eine mäßige Absorption im Blau vorhanden ist, ist doch die Absorption im Rot immer viel größer, sie wächst ungefähr proportional mit der Trübung. Erst bei den gelben Seen schwächt sie sich etwas ab. Da nun schon die Farbe des mit reinem Wasser hergestellten trüben Mediums mit keiner Wasserfarbe übereinstimmt, so würden sich noch viel größere Abweichungen ergeben, wenn das Wasser selbst noch Trübung aufweisen würde und sich außerdem noch eine grüne oder gelbe Eigenfarbe hinzugesellte, denn dann wird das Rot verhältnismäßig nur gering absorbiert, das Blau dagegen in einem solchen Maße, daß diese Kurven nimmermehr als Absorptionskurven des Wassers gedeutet werden könnten.

Wir müssen also zu dem Resultat gelangen, *daß die Wasserfarbe keinesfalls als die Farbe eines trüben Mediums aufgefaßt werden kann.*

2. Chemische Theorie.

Ich habe früher erwähnt, daß alle Abweichungen der Wasserfarbe vom Blau auf Fremdkörper zurückzuführen sind. Wir können dies nun genauer präzisieren, indem wir sagen: *es sind einzig und allein Lösungen verschiedener Substanzen, die, dem Wasser auf irgend einem Wege zugeführt, ihm seine spezifische Farbe verleihen.*

Welche Bestandteile sind es denn, die dem Wasser seine verschiedenen Farben zu erteilen imstande sind? Da liegt es nun sehr nahe, daß man als solche die am häufigsten und in größten Mengen vorkommenden Substanzen vermutet. Diese sind aber 1. *Kalk* in seinen verschiedenen Arten, als Dolomit, kohlensaurer und schwefelsaurer Kalk, und 2. *organische, humöse Stoffe*. Um diese Vermutungen auf ihre Richtigkeit zu prüfen, habe ich zwei Versuche angestellt. Einmal ver-

mischte ich reines Wasser¹⁾ mit Calciumhydroxyd, so daß etwa 1 g in 12 Liter Wasser (ca. 84 mg auf 100 g Wasser) gelöst war. Für die Farbe erhielt ich die in folgender Tabelle angegebenen Werte:

Kalk in Wasser gelöst.

A bedeuten die Werte für doppelt destilliertes Wasser.

A' bedeuten die Werte für das Kalkwasser.

λ	A	A'	λ	A	A'
658	0,320	0,390	579	0,049	0,131
643	0,291	0,353	558	0,038	0,126
622	0,239	0,322	522	0,002	0,112
617	0,244	0,327	494	0,002	0,108
602	0,173	0,266	473	—	0,098
590	0,089	0,176	458	—	0,103

Eine andere Wasserfarbe erhielt ich, indem ich Wasser über 250 g frischer Gartenerde filtrierte:

Organische Stoffe in Wasser gelöst.

A bedeuten die Werte für doppelt destilliertes Wasser.

A' bedeuten die Werte für die Lösung.

λ	A	A'	λ	A	A'
658	0,320	0,660	590	0,089	0,509
643	0,291	0,617	579	0,049	0,481
628	—	0,607	558	0,038	0,503
617	0,244	0,615	540	—	0,536
602	0,173	0,576	522	0,002	0,565

Die Kurven auf Fig. 6 lassen die Farbenzusammensetzung dieser beiden Lösungen erkennen. Beim Vergleich mit den Kurven auf Fig. 3 sieht man, daß es ausgesprochene Wasserfarbenkurven sind. Ferner kann man aus der Kurve für das Kalkwasser entnehmen, daß dieses eine grünliche Farbe hat, da schon etwas Absorption im Blau auftritt. Die andere Kurve zeigt, daß wir es hier mit einem gelblichen oder bräunlichen Wasser zu tun haben, dessen Farbe zwischen der des Staffelsees und Arbersees liegt.

1) Nachdem ich festgestellt hatte, daß sich das optisch leere Wasser vom doppelt destillierten nach Farbe und Durchsichtigkeit nicht merkbar unterscheidet, brauchte ich zu den weiteren Untersuchungen nicht mehr optisch leeres Wasser herzustellen, was natürlich eine große Zeitersparnis bedeutet.

Wir erhalten also daraus das Resultat, daß *großer* Kalkgehalt dem Wasser einen grünen Ton verleiht, während größere Mengen von gelösten organischen Bestandteilen die Farbe

Lösungen von Kalk und organischen Substanzen in Wasser.

Fig. 6.

über Grün nach Gelb führen. Wir wollen nun an der Hand einiger chemischer Analysen untersuchen, ob dieses Resultat auf die von mir auf ihre Farbe unteruchten Seen Anwendung finden kann. Ich gebe zuerst in einer Tabelle den Gehalt an Kalk und an organischen Bestandteilen für einige Seen an.

In 1000 g Wasser sind in Milligramm enthalten:

Seen	CaO	Org.
Walchensee ¹⁾	50,5	14,55
Kochelsee ²⁾	80,4	22,78
Würmsee ³⁾	49,8	23,86
Genfersee ³⁾	58,95	13,80

Wir ersehen zunächst hieraus, daß alle vier Seen einen großen Gehalt an Kalk besitzen. Ferner haben wir besonders bei Kochel- und Würmsee noch einen sehr großen Reichtum an organischen Substanzen. Die Kurven des Kochel- und Würmsees zeigen uns daher schon eine größere Absorption im Blau, die Farbe neigt sich also einem gelblichen Grün zu,

1) A. Schwager, l. c.

2) H. Gebbing, Hydrochem. Untersuch. des Würm-, Kochel- und Walchensees. München 1902.

3) F. A. Forel, Léman 2. p. 580. 1895. Analyse von R. Brandenburg.

während der Walchensee noch viel mehr Blau besitzt. In Ermangelung einer Analyse des Achensees habe ich eine solche des Genfersees hier beigelegt, der ja auch blaues Wasser hat. Dabei muß ich vorausschicken, daß die Wasserproben für die Analyse aus den ersten drei Seen zur Zeit ihrer größten Durchsichtigkeit im Februar und März geschöpft wurden, während die des Genfersees aus dem Monat Juli stammt, also aus der Zeit der größten Verunreinigung des Sees. Trotzdem fällt der sehr geringe Gehalt an organischen Bestandteilen auf. Man darf also annehmen, daß die blauen Gewässer auch am wenigsten gelöste Substanzen enthalten. Bezüglich der Analysen von gelbem und braunem Wasser nehme ich die Angabe Reindls¹⁾ zu Hilfe. Er behandelt in seiner Arbeit die schwarzen Gewässer Südamerikas, die in der Farbe unseren bayerischen Waldseen sehr nahe stehen. Immer wird von Reindl der überaus große Reichtum an organischen Bestandteilen hervorgehoben. Er betont auch, daß gerade dieser die schwarze Färbung verursacht. Betreffs der Löslichkeit der humussauren Stoffe bestehen Meinungsverschiedenheiten; man fragt sich nämlich, ob diese sich unter Einwirkung von kohlensauren Alkalien in Wasser lösen oder ob es eine einfache Lösung ist. Schwager behauptet letzteres, während Reindl die ältere Ansicht der vermittelten Lösung vertritt. Er beschreibt dabei auf p. 124 ff. einige Versuche, wodurch er seine Behauptung zu beweisen sucht. Eine auffallende Tatsache ist allerdings die, daß braunes Wasser beim Übertritt auf kalkreicheren Boden sich meist schnell entfärbt, d. h. das Calcium verdrängt dann die Alkalien und es entstehen schwer lösliche humussaure Calciumverbindungen. Schwager hingegen betont ausdrücklich, daß gerade in den Gewässern des bayerischen Waldes kein kohlensaures Alkali aufzufinden war. Wenn ich mir hierüber ein Urteil erlauben darf, so möchte ich die Ansicht aussprechen, daß zur Braunfärbung in dem Maße, wie sie die natürlichen Gewässer besitzen, wohl schon die freie Lösung ausreicht; denn bei der Herstellung meines oben erwähnten braunen Wassers löste sich ein Teil der Gartenerde in Wasser allein; durch Zusatz von kohlensaurem Alkali kann die

1) J. Reindl, l. c.

Löslichkeit bedeutend vergrößert werden, so daß man auch schon in kleinen Quantitäten die „schwarze“ Farbe deutlich wahrnehmen kann, wie aus den angegebenen Versuchen Reindls hervorgeht.

Außer den organischen Bestandteilen hat auch wohl das kohlensaure Eisenoxydul¹⁾ eine Wirkung auf die Färbung und Entfärbung mancher Gewässer.

Werfen wir noch kurz einen Blick auf die verschiedenen Seenkurven auf Fig. 3. Als besondere Eigentümlichkeit für das reine Wasser haben wir dreierlei erkannt: 1. die große Absorption im Rot, 2. den charakteristischen Absorptionsstreifen im Orange, 3. die große Lichtdurchlässigkeit für das Blau. Im ganzen treten dieselben Erscheinungen auch bei allen stark kalkhaltigen Gewässern mit mehr oder weniger großer Änderung im blauen Teil auf. Wir sehen dann, daß der Achensee genau die Farbenzusammensetzung des reinen Wassers zeigt, also jedenfalls nur sehr wenig gelöste Bestandteile enthält. Ferner erkennen wir, wie mit steigendem Gehalt an organischen Stoffen die Absorption im Blau wächst.

So kann man also in der Farbe deutlich den chemischen Gehalt des Wassers verfolgen, nachdem man nur erst einmal die Einwirkung der beiden wichtigsten Substanzen auf den Verlauf der Absorptionskurve erkannt hat.

Welche Substanz nun gerade ein See in überwiegendem Maße gelöst enthält, das entscheidet die geologische Beschaffenheit seines Beckens oder die seines Niederschlagsgebietes. Wir sehen, daß die tiefgrünen Gewässer hauptsächlich auf reinem Kalkboden vorkommen; viele Vorlandseen, wie Kochelsee, Würmsee, Ammersee, Chiemsee, liegen wohl auch noch im Kalkgebiete, grenzen aber doch größtenteils an moosige Gegenden, oder haben Zuflüsse, die aus solchen kommen. Daher ist ihre Farbe ein gelbliches Grün; überhaupt enthalten sie auch infolge der Nähe von Mooren viel mehr trübende schwimmende Teilchen, die zum Teil mit bloßem Auge sichtbar sind. Daher ist in diesen Seen die Sichttiefe geringer als in den klaren Gebirgsseen. Die gelben oder braunen Gewässer endlich treffen wir in solchen Gegenden, wo große verwesende Pflanzenmassen vorkommen. Sie sind also entweder ausgesprochene Moor-

1) W. Spring, Bull. Acad. Roy. Belg. 36. 1898.

wässer (Staffelsee), oder aber ihre Umgebung und ihr Zuflußgebiet ist reich an Verwitterungsprodukten, so daß sich große Mengen von Humus bilden können, wie dies im Urgebirge (Bayerischer Wald, Fichtelgebirge, Schwarzwald) so auffallend zutage tritt.

Wir können also jetzt am Schluß unserer Betrachtung feststellen, daß *die Farbe eines jeden Sees und auch die jedes anderen Gewässers eine Eigenfarbe ist, die ihre Ursache hat zunächst in der Eigenfarbe des reinen Wassers, welche dann modifiziert wird, durch den chemischen Gehalt, der seinerseits wiederum abhängt von den geologischen Verhältnissen der nächsten und weiteren Umgebung.* Aber nicht nur die Farbe des Sees hängt von der geologischen Bodenbeschaffenheit ab, sondern in hohem Maße auch die Vegetation, die den See umgibt. Nun haben wir gesehen, daß gerade auch diese Vegetation wieder einen großen Einfluß hat auf die Durchsichtigkeitsverhältnisse des Wassers. Ferner sind aber Farbe und Durchsichtigkeit die beiden Faktoren, welche die Temperaturverhältnisse regeln; durch diese endlich ist das organische Leben im See, die Pflanzen- und Tierwelt, bedingt.

Auf Grund dieser Resultate ist es naheliegend, eine neue Einteilung der Seen zu treffen, bezüglich ihrer Farbe, und zwar nach dem Merkmal, das uns bei unseren Betrachtungen am meisten beschäftigt hat, nämlich nach der Größe der Absorption, welche das betreffende Wasser auf die *blauen* Strahlen ausübt. Wir können demnach vier Gruppen unterscheiden:

I. Gruppe: Blau wird nicht absorbiert, Farbe: blau.
(Typus Achensee.)

II. Gruppe: Blau wird schwach absorbiert, Farbe: grün.
(Typus Walchensee.)

III. Gruppe: Blau wird stark absorbiert, Farbe: gelblich-grün. (Typus Kochelsee.)

IV. Gruppe: Blau wird vollständig absorbiert, Farbe: gelb oder braun. (Typus Staffelsee.)

Wie auf p. 695 erwähnt, kann man diese Unterschiede entweder schon mit bloßem Auge, ganz sicher aber mit Hilfe eines Taschenspektroskopes feststellen.

München, Physik. Inst. d. Techn. Hochschule 1903.

(Eingegangen 5. November 1903.)