

Licht und Farbe der Kärntner Seen.

Von Franz Sauberer.

Die Kärntner Seen weisen in ihren topographischen, biologischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften eine Mannigfaltigkeit auf, die nicht leicht zu überbieten ist. Es erscheint daher nicht unangebracht, an dieser Stelle einiges über die vom Verfasser gemeinsam mit seiner Frau in den Kärntner Seen angestellten optischen Untersuchungen zu berichten. ¹⁾ Zum besseren Verständnis sei für in diesem Gebiet nicht eingearbeitete Leser vorher noch in ganz kurzer Form auf die wichtigsten Grundtatsachen hingewiesen.

I. Allgemeines.

a) Die Lichtverhältnisse der Seen.

Bekanntlich stellt die zur Erdoberfläche gelangende Sonnenstrahlung ein Gemisch von Strahlen verschiedener Wellenlängen innerhalb des Bereiches von 0,2 bis etwa 4 μ ²⁾ dar. Die Wellenlängen von 0,4 bis 0,75 μ können vom menschlichen Auge wahrgenommen werden. Dies ist der Bereich der Lichtstrahlung, auf den wir hier hauptsächlich unsere Betrachtungen beschränken wollen.

In der Atmosphäre wird die durchgehende Sonnenstrahlung zu einem gewissen, von der Wellenlänge abhängigen Prozentsatz zerstreut. Die kürzesten Wellenlängen werden am stärksten zerstreut, weshalb auch der wolkenlose Himmel blau erscheint. Das zerstreute Sonnenlicht kommt zu einem Teil auch zur Erdoberfläche und wird kurz „Himmelsstrahlung“ genannt. Darunter verstehen wir sowohl das blaue Licht des Himmels als auch jenes, welches von den Wolken und Dunstschichten reflektiert wird.

Auf die Seeoberfläche fällt die tagsüber immer vorhandene Himmelsstrahlung und, soweit sie nicht durch Berge oder Wolken abgehalten wird, auch die Sonnenstrahlung. Ein Teil der auf fallenden Strahlung wird an der Wasseroberfläche reflektiert, ein anderer, weitaus größerer, dringt, nachdem durch die Brechung die Richtung der Strahlen verändert wurde, in das Wasser ein.

Das Wasser ist bekanntlich für die Lichtstrahlung bedeutend weniger durchlässig als die Luft. Die Intensität des Lichtes im

¹⁾ F. u. A. Sauberer: Beiträge zur Kenntnis der optischen Eigenschaften von Kärntner Seen. Archiv für Hydrobiologie, im Druck.

²⁾ 1 μ = 0,001 mm.

Wasser nimmt daher mit zunehmender Tiefe ziemlich rasch ab. Die „Extinktion“ (Auslöschung) des Lichtes im Wasser ist auf zwei Ursachen zurückzuführen, und zwar:

1. auf die Absorption, d. i. Überführung in andere Energieformen (meist in Wärme);
2. auf die Lichtzerstreuung im Wasser, die besonders durch Anwesenheit von Schwebestoffen verursacht wird.

Ein Teil des im Wasser zerstreuten Lichtes tritt nach abermaliger Reflexion an der Oberfläche aus dem Wasser aus und vermittelt so den wahren Farbeindruck des Gewässers. Bei freier Betrachtung der Wasseroberfläche gesellt sich zur Wirkung der wahren Wasserfarbe noch die Reflexion an der Oberfläche, die die wahre Wasserfarbe gänzlich übertönen kann. Die scheinbare Farbe eines Sees ist dann verschieden, je nachdem der Himmel blau, ganz oder teilweise mit Wolken bedeckt ist, je nachdem, ob sich grüne Wiesenhänge oder bewaldete Berge in den Wellen spiegeln usw. Um die wahre Farbe eines Gewässers richtig betrachten zu können, muß die Oberflächenreflexion ausgeschaltet werden, was am besten dadurch geschieht, daß man durch ein etwas eingetauchtes, innen geschwärztes Rohr ins Wasser blickt.

Bis vor kurzem beschränkten sich die optischen Untersuchungen an den Seen allgemein fast ausschließlich auf Farbbestimmungen mit der Forel-Uleschen Skala und auf Sichttiefmessungen. Letztere sind wohl ein recht brauchbares, einfaches Hilfsmittel, genügen aber den Bedürfnissen der Forschung nach gewissen Richtungen hin nicht mehr. Mit der Entwicklung der Photoelemente wurden in den letzten Jahren die Voraussetzungen für die Konstruktion einfacher und guter elektrischer Unterwasserphotometer geschaffen, die nun immer mehr in Anwendung kommen.

Es zeigt sich, daß die wahre Wasserfarbe viel über andere Eigenschaften der Seen auszusagen vermag, während die scheinbare Farbe praktisch bedeutungslos ist. Die wahre Wasserfarbe hängt nun, wie neuere Forschungen wieder bewiesen haben, in hohem Maße von der Durchlässigkeit der Gewässer für Lichtstrahlung verschiedener Wellenlängen ab. Aus diesem Grunde verdient das Studium dieser spektralen Durchlässigkeit das größte Interesse. Solche Messungen sind sehr gut mit Photoelementen ausführbar. Die spektrale Durchlässigkeit ist wohl im allgemeinen von See zu See verschieden, bleibt aber in einem und demselben Gewässer in den meisten Fällen ziemlich konstant. Die Ursachen der Verschiedenheit der spektralen Durchlässigkeiten der Seen sind noch lange nicht vollständig geklärt. Über die Durchlässigkeit des

reinen Wassers für Licht verschiedener Wellenlängen sind wir schon ziemlich gut informiert. Durch die in den Gewässern gelösten und schwebenden Beimengungen wird nun die wahre Farbe des reinen Wassers, die blau ist, gegen Grün, Gelb und sogar mitunter gegen Braun hin verändert. Dabei wird die Durchlässigkeit des Wassers durch die Beimengungen im allgemeinen verringert, und zwar, je nach den Wellenlängen, verschieden. Am meisten werden die kürzesten, also die violetten und blauen Strahlen, mit zunehmender Verunreinigung vom Wasser verschluckt.

Von ausschlaggebender Bedeutung für die optischen Eigenschaften eines Sees ist der Humusstoffgehalt des Wassers. Die im Seewasser gelösten Humussubstanzen absorbieren die kurzwelligeren Strahlen sehr stark und verursachen daher eine Verfärbung gegen Braun zu. Als Gegenspieler der hauptsächlich von Mooren und verwesenden Pflanzenresten in den See gelangenden Humusstoffe kommen gewisse gelöste Kalksalze in Betracht, die u. U. die Humusstoffe wieder zum Ausfallen bringen und das Wasser reinigen können. Diese Vorgänge sind noch ziemlich in Dunkel gehüllt. Im allgemeinen können wir aber feststellen, daß Flüsse und Seen der Kalkalpen im Normalzustand mehr zu blaugrünen Farbtönen neigen, Gewässer der Urgebirge mehr gegen Gelbgrün und daß Moorgewässer infolge ihres hohen Gehaltes an Humusstoffen gelblich bis braun aussehen.

Entsprechend den geologischen Verhältnissen zeigen oft Seen ganzer Landstriche ziemlich einheitliche Farbtöne, die dann gewöhnlich gemäß den vorhandenen Mooreinflüssen etwas wechseln.

II. Moderne Meßmethodik.

Wie schon im Abschnitt I ausgeführt wurde, benötigt man zu optischen Untersuchungen nun Meßgeräte, die die Verhältnisse in verschiedenen Farbbezirken zu studieren gestatten. Es wird sogar gefordert, das herausgegriffene Spektralbereiche ziemlich eng sein sollen. Diesen Anforderungen entsprechen am besten die moderneren Halbleiter- oder Sperrschichtphotozellen (Photoelemente) mit vorgeschalteten Glas-Farbfiltern.

Wird die empfindliche Fläche eines Photoelementes von der Lichtstrahlung getroffen, so liefert das Element einen elektrischen Strom. Die Stromstärke ist — mit gewissen Einschränkungen — der Beleuchtungsstärke proportional. Man braucht an das Photoelement nur ein geeignetes Strommeßgerät (Galvanometer) anzuschließen und erhält ein hochempfindliches Photometer. Bekanntlich beruhen auf diesem Prinzip auch die photographischen Belichtungsmesser.

Da Photozelle und Strommeßgerät durch ein verhältnismäßig langes Kabel verbunden werden können, ist man in der Lage, das Element — in einem wasserdichten Behälter mit Glasfenster eingeschlossen — in die Tiefen der Gewässer zu versenken und die jeweils herrschenden Lichtintensitäten in einem Boot festzustellen. Schaltet man vor das Glasfenster des Elementbehälters geeignete, wasserbeständige Lichtfilter, so kann man Messungen in verschiedenen Spektralbereichen anstellen. Wir benützten mit bestem Erfolg die bewährten Glasfilter von Schott u. Gen. Unter Berücksichtigung der spektralen Empfindlichkeit der verwendeten Photoelemente — die Photoelemente sind bekanntlich nicht für alle Wellenlängen der Lichtstrahlen und des nahen Ultravioletts und Ultrarots gleichmäßig empfindlich — ergeben sich für die benützten Filter und Filterkombinationen folgende Empfindlichkeitsbereiche und optische Schwerpunkte:

Tabelle 1

Benützte Filter und Filterkombinationen (Schottgläser, je 2 mm dick).						
Filter	UG 1+ BG 12	BG 12	VG 9	OG 2+ BG 18	RG 2	RG 5
Farbe	UV- violett	blau	grün	gelb- orange	hellrot	dunkel- rot
Bereich $m\mu$	320— 405	320— 510	435— 630	550— 670	600— 860	655— 860
Optischer Schwerpunkt $m\mu$	377	435	525	590	660	700

Normalerweise wird die auf die horizontale Fläche fallende Lichtintensität gemessen. Das Photoelement wird daher mit dem Behälter so an einem Bügel befestigt, daß beim Versenken ins Wasser die empfindliche Auffangfläche horizontal steht. Das Versenken geschieht zweckmäßig gleich am Gummileitungskabel, an dem das Element angeschlossen und der Bügel befestigt wird.

Das Unterwasserphotometer wird von einem Ausleger am Bug oder Heck des Bootes aus in das Wasser gelassen. Dabei muß das Boot so stehen, daß auf das Photometer womöglich kein Schatten fällt. Die Messungen sind am leichtesten und genauesten bei Vorhandensein einer gleichmäßigen hellen Wolkenschicht durchführbar, da in diesem Fall genügend Licht vorhanden ist und vor allem die argen Störungen durch Reflexion und Brechung an den Oberflächenwellen fehlen, die bei Sonnenschein die Messungen oft unmöglich machen. Gewöhnlich bestimmt man aus Messungen in zwei um einen Meter voneinander abweichenden Tiefen die Durchlässigkeit der dazwischenliegenden Schicht. Aus den so gefundenen Transmissionswerten kann man auch die Lichtintensitäten in verschiedenen Tiefen ableiten.

III. Die unterfuchten Seen.

Unsere Messungen wurden an 23 Seen und einem größeren Teich angestellt. Eine Liste der untersuchten Seen bringt die Tabelle 2, in der auch Angaben über wichtige Eigenschaften und Größen der Gewässer enthalten sind.

Tabelle 2
Angaben über die untersuchten Seent).

See	Seehöhe m	Oberfl. km ²	Tiefe††)		Farbe (Forel- Ule)	Sicht- tiefe m††)
			Max	Mittl:		
Wörther	439	19.4	84	43	7	7.1
Millstätter	580	13.3	140	86	9—10	5.9
Ossiacher	501	10.6	46	19	11—13	4.1
Weißer	930	6.6	99	36	5—6	6.8
Faaker	554	2.35	30	14.3	4—5	3.5
Keutschacher	506	1.44	15	9.4	9—11	4.2
Klopeiner	448	1.13	47	25.9	5	8.3
Läng	548	0.76	20	11.1	8—10	4.3
Pressegger	560	0.55	14	3.5	11—12	(5)
Afritzer	752	0.49	22	14.7	11—13	5.0
Brenn	739	0.41	26	15.9	10—12	4.7
Turner	481	0.38	13	6.3	11—12	(5)
Forst	601	0.29	35	22	(12—14)	(5)*
Gösselsdorfer	469	0.28	3	—	(10—13)*	(4)*
Rauschele	514	0.20	11**	6.5**	12—14	(3)
Turracher	1760	0.18	33	13.6	11—12	6.1
Häfner	510	0.17	10	—	12—15	(3)
Magdalenen	486	0.15	6	3.5	(7—10)*	(9)*
Saisser (Jeserzer)	593	0.10	—	—	(12—15)	(3)
Aichwald	634	0.03	8	—	(7—9)	(5)
Leonharder	521	0.03	—	—	(11—13)	(3)
Schwarz (Turr.)	1820	0.03	3	—	15—16*	(4)*
Grün (Turr.)	1780	0.01	12	5	(8—9)	(5)
Hallegger Teich	475	0.03	—	—	(14—17)	(2)

†) Hauptsächlich nach Arbeiten von: I. Findenegg, Findenegg und Turnowsky, V. Hartmann, Hoffer und Kraus, Menninger v. Lerchental, V. Paschinger.

() Unsichere Werte. — * Infolge zu geringer Tiefe unsicher. —

** Nach freundlicher Mitteilung H. Dr. Findeneggs.

††) Mittelwerte.

Wie aus dieser Tabelle zu ersehen ist, wurden bei dieser Durchmusterung alle größeren Seen des Landes untersucht. Mit Ausnahme der ausgesprochenen Hochgebirgsseen wurden alle vorkommenden Seehöhen erfaßt, ebenso sind Seen aus den wichtigsten geologischen Formationen vertreten. Auch bezüglich der Farben befinden sich unter den durchgemessenen Seen so ziemlich alle hier möglichen Abtönungen.

IV. Meßergebnisse.

Lichtuntersuchungen an Gewässern sollen Aufschlüsse über verschiedene Fragen liefern. Neben der Erwärmung des Wassers durch die eindringende Strahlung, auf welches Problem hier nicht näher eingegangen werden soll, interessieren vor allem die Lichtintensitäten im Wasser und die Farbe der Gewässer, daneben auch die Richtungsverteilung der Strahlung im Wasser und die Sichttiefe.

Das in verschiedenen Tiefen der Seen vorhandene Licht und dessen spektrale Zusammensetzung können mittels elektrischer Unterwasserphotometer gut und verhältnismäßig einfach direkt bestimmt werden. Es ist aber zweckmäßiger, in der vorn angegebenen Weise die Durchlässigkeiten (Transmissionskoeffizienten) der einzelnen Meterschichten zu bestimmen. Daraus kann dann die Lichtintensität in beliebigen Tiefen des Wassers berechnet werden, während bei direkten Messungen nur die Werte für die einzelnen Meßtiefen ermittelt werden.

Die Messungen werden unter verschiedenen Einstrahlungsbedingungen vorgenommen, d. h. bei verschiedenen Sonnenhöhen und vielfach auch bei bedecktem Himmel ohne Sonne. Hier wirft sich nun die Frage auf, inwieweit dadurch Fehler entstehen können und ob die so gewonnenen Resultate unmittelbar miteinander vergleichbar seien. Die hier besprochenen Messungen an den Kärntner Seen wurden bei bedecktem Himmel oder bei Sonnenschein und Sonnenhöhen von 35 bis 45° vorgenommen. Die Einflüsse der verschiedenen Einstrahlungsverhältnisse sind im Bereich dieser Unterschiede nicht groß, sie können nur Fehler bis etwa 2% verursachen. Aus diesem Grunde kann man die Wirkungen der verschiedenen Sonnenhöhen bei unseren orientierenden Messungen ruhig vernachlässigen.

An den meisten Seen konnte bisher nur eine Meßserie gemacht werden; in 5 Seen wurde zweimal, im Faaker See dreimal gemessen. Es muß hier vorausgeschickt werden, daß die erste Meßperiode (Mai bis Juni 1941) in mehreren Fällen verfälschte bzw. ungewöhnliche Ergebnisse zeitigte, da die in dieser Zeit gefallenen ergiebigen Niederschläge nicht ohne Einfluß auf die Trübung und die Farbe vieler Seen geblieben waren. Dies ist besonders aus Vergleichen zwischen den beiden Messungen im Längsee und im Faaker See 1941 zu ersehen.

Wir wollen hier vorerst die spektralen Durchlässigkeiten der Seen betrachten. Die Tabelle 3 enthält die in der Zeit Mai bis September 1941 gefundenen Durchlässigkeiten einer Wasserschicht von 1 m Mächtigkeit und die Meßergebnisse vom Faaker See im Mai 1942. Diese Angaben stellen Mittelwerte aus den Messungen

der obersten 5 m dar, soweit nicht vom Ufer aus gemessen wurde und daher nur eine Wasserschicht von 1 bis 2 m Mächtigkeit untersucht werden konnte.³⁾ Die Werte in Tabelle 3 gelten, wie schon erwähnt wurde, für trüben Himmel ohne Sonne oder für Sonnenhöhen von 35 bis 45°. Die Reihenfolge der Angaben erfolgte, wie in Tabelle 2, geordnet nach der Größe der Oberflächen der einzelnen Seen.

Tabelle 3

Ergebnisse der Durchlässigkeitsmessungen (bei Sonnenhöhe von 35—45° oder verdeckter Sonne).

See	Tag	Sichttiefe in m	Durchlässigkeit pro m in % bei μ					
			377	435	525	590	660	700
Wörther	10. 5.	5,0	45	66	78	75	58	33
"	12. 9.	5,4	53	72	82	78	59	34
Millstätter	26. 5.	2,1	26	52	68	70	53	30
Ossiacher	14. 5.	3,4	19	45	69	68	53	30
"	20. 7.	2,9	25	49	72	69	54	31
Weißen	25. 5.	7,0	55	77	85	79	62	36
Faaker	20. 5.	1,3	28	53	65	62	45	26
"	14. 7.	4,6	60	78	85	76	55	33
"	17. 5. 42	2,0	40	61	69	66	51	28
Keutschacher	1. 6.	2,9	10	40	64	65	52	30
"	23. 9.	3,0	20	51	72	70	52	30
Klopeiner	13. 6.	6,5	58	77	86	79	60	35
Läng	23. 5.	1,2	8,0	25	46	52	40	23
"	10. 9.	4,1	19	52	73	68	52	27
Pressegger	27. 7.	6,5	18	48	74	69	50	30
Afritzer	26. 5.	3,1	22	48	70	70	55	28
Brenn	26. 5.	3,2	20	45	69	70	55	27
Turner	13. 6.	3,7	16	51	71	71	56	31
Forst	8. 6.	4,9	4,0	33	63	65	53	31
Gösselsdorfer	15. 9.	3,5	13	44	67	67	49	25
Rauschele	1. 6.	3,1	20	41	69	68	53	29
Turracher	30. 9.	2,2	14	34	61	63	49	29
Hafner	1. 6.	3,1	1,3	26	54	60	51	29
Magdalenen	16. 6.	(5)	44	61	72	65	49	27
"	21. 9.	(8)	62	77	85	78	60	36
Saisser	8. 6.	(3,5)	3,2	32	64	65	52	30
Aichwald	20. 5.	(4)	30	55	76	73	53	32
Leonharder	21. 9.	2,2	4,0	22	47	51	40	24
Schwarz (Turr.)	30. 9.	(3,5)	1,2	16	56	59	45	25
Grün (Turrach)	30. 9.	(3,5)	34	54	77	75	56	33
Hallegger Teich	13. 8.	1,8	0,00000003	0,25	10	25	28	19

Auf den ersten Blick sehen wir in der Tabelle 3, daß die verhältnismäßig größten Unterschiede in den Transmissions-

³⁾ Die meisten Messungen wurden von Booten aus angestellt. Die Kabellänge unseres Photometers erlaubte Messungen bis 8 m Tiefe. An einigen Seen stand kein Boot zur Verfügung, so daß mittels einer Stange vom Ufer aus gemessen werden mußte.

koeffizienten bei den kürzesten Wellenlängen, also bei UV-Violett, vorhanden sind, die geringsten hingegen im dunklen Rot (bei $700\text{ m}\mu$). Diese Tatsache verdient besondere Beachtung, da infolge der bekannten Erscheinung, daß die Humusstoffe die kurzwellige Strahlung sehr stark absorbieren, umgekehrt aus der UV-Violett-Durchlässigkeit auf den Humusstoffgehalt der Gewässer Rückschlüsse gezogen werden können. Allerdings sagen die Transmissionskoeffizienten für $377\text{ m}\mu$ allein noch nichts Sicheres aus, da auch durch andere Verunreinigungen der Gewässer Durchlässigkeitsverminderungen eintreten. Solche Verminderungen der Durchlässigkeit sind aber meist gut von den Humusstoffeinflüssen zu unterscheiden, da sie viel gleichmäßiger für alle Wellenlängen wirksam sind. Besser als unmittelbar aus den Transmissionskoeffizienten für $377\text{ m}\mu$ kann man daher den Humusstoffgehalt der Gewässer abschätzen, wenn man die relative UV-Durchlässigkeit bildet, indem man die Durchlässigkeit für $377\text{ m}\mu$ durch jene für $590\text{ m}\mu$ (gelborange) dividiert. Auf diese Weise erhalten wir z. B. für die im Mai und Juni 1941 durchgeführten Messungen folgende Werte:

Klopeiner See	0,74	Millstätter See	0,37	Längsee	0,15
Weißensee	0,70	Airitzer See	0,31	Rauschelesee	0,13
Magdalensee	0,68	Feld(Brenn)see	0,29	Forstsee	0,06
Wörther See	0,60	Ossiacher See	0,28	Saisser See	0,05
Faaker See	0,45	Turnersee	0,23	Hafnersee	0,02
Aichwaldsee	0,41	Keutschacher See	0,15		

Je geringer nun diese relative UV-Durchlässigkeit ist, desto größer ist der Humusstoffgehalt des Wassers.

Das humusstoffreichste der bisher untersuchte Gewässer Kärntens ist der braune Hallegger Teich, der aus diesem Grunde in die Messungen einbezogen wurde. Von den Seen selbst sind der Turracher Schwarzsee und der Hafner See die humusstoffhaltigsten, die blaugrünen bis grünblauen die humusstoffärmsten. Dies macht sich ja auch in der Farbe der Gewässer bemerkbar: je größer die relative UV-Durchlässigkeit, desto mehr nähert sich der Farbton dem Blau, je geringer sie ist, desto mehr dem Gelbbraun. (Siehe Abb. 1.)

Besser als aus der tabellenmäßigen Zusammenstellung sind die Unterschiede der spektralen Durchlässigkeiten der untersuchten Seen aus der graphischen Darstellung in Abbildung 1 zu ersehen. In dieser Figur sehen wir gut, wie wenig die Transmissionskoeffizienten im dunklen Rot voneinander verschieden sind und wie sie mit abnehmender Wellenlänge auseinandergehen. Soweit geeignete Vergleichsmessungen aus anderen Seen vorliegen, können wir folgendes feststellen:

1. Der Hallegger Teich entspricht in seinen Durchlässigkeitswerten ungefähr den braunen skandinavischen Moorseen. 2. Turracher Schwarzsee und Hafner See ähneln, besonders in der UV-Durchlässigkeit, den blaugrünen bis gelbgrünen Spree- und Havelseen in der Berliner Umgebung. 3. Die Kärntner Seen mittlerer Durchlässigkeit entsprechen im wesentlichen den grünen Seen des Salzkammergutes. 4. Die blaugrünen und grünblauen Kärntner Seen erreichen oder übertreffen an Durchlässigkeit die klarsten Seen der übrigen Ostalpen, wie den Achensee und den Attersee.

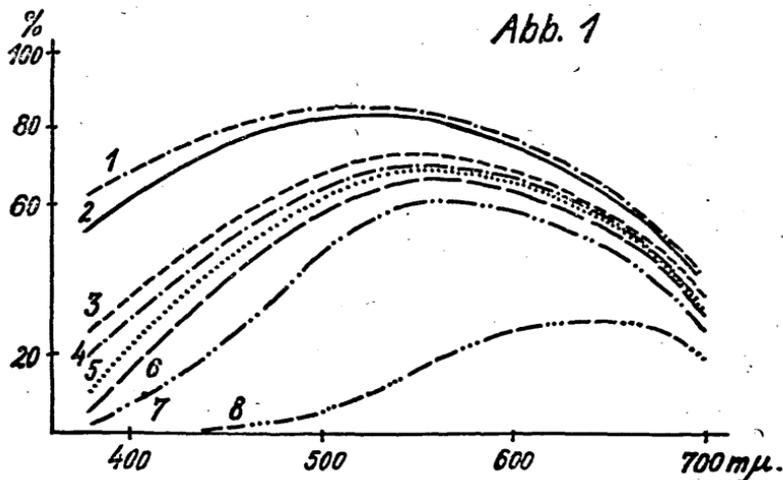


Abb. 1. Spektrale Durchlässigkeitskurven: 1. Magdalenensee, 21. September; 2. Wörther See, 12. September; 3. Ossiacher See, 20. Juli; 4. Brennsee; 5. Rauscheelsee; 6. Forstsee; 7. Turracher Schwarzsee; 8. Hallegger Teich.

V. Über die Farbe der Seen.

Nach dem heutigen Stand unseres Wissens haben wir uns, wie schon eingangs angedeutet wurde, das Zustandekommen der wahren Farben der Gewässer — kurz skizziert — ungefähr folgendermaßen vorzustellen: Das eindringende Licht erfährt im reinen Wasser infolge der vorhandenen Dichteschwankungen eine Zerstreuung. Ähnlich wie in der Luft werden die kürzesten Wellenlängen am stärksten zerstreut. Dieser Effekt ist an sich aber gering. Viel größere Wirkungen gehen von der Zerstreuung und Reflexion des Lichtes an schwebenden Partikelchen aus, die in den natürlichen Gewässern stets in großer Anzahl vorhanden sind. Die Reflexion und die Zerstreuung erfolgen nach allen Richtungen und viel-

fach. Dadurch wird der ganze Wasserraum durch Streustrahlung erfüllt. Begreiflicherweise wird diese aber im Wasser auch zu einem gewissen Teil selektiv absorbiert. Dieser Effekt ist derart wirksam, daß die wahre Farbe weitgehendst von der spektralen Durchlässigkeit abhängig ist.

Die wahre Farbe eines Gewässers kann nur bei genügender Tiefe des Beckens an der Beobachtungsstelle festgestellt werden, da sich ansonsten das am Grunde reflektierte Licht bemerkbar macht. Dies kann man gut an seichten Stellen der Seen beobachten. Solche zeigen z. B. bei blaugrünen Seen hellgrüne bis gelbgrüne Tönungen. In seichten, klaren Seen, z. B. im Magdalensee, sind diese Reflexionen vom Grunde derart wirksam, daß die den optischen Eigenschaften des Wassers entsprechende wahre Wasserfarbe überhaupt nicht festgestellt werden kann. Dieser See erscheint infolge des Chara-Rasens auf dem 4—6 m tiefen Grund schwach grünlich, während ein genügend tiefes, mit dem gleichen Wasser gefülltes Becken grünlichblau aussehen müßte. Aus diesen Tatsachen erhellt, daß die Bestimmung der spektralen Durchlässigkeiten der Gewässer wichtiger ist und sicherere Rückschlüsse auf sonstige Eigenschaften erlaubt als die Bestimmung der Wasserfarbe. Zur weiteren Erforschung der Strahlungsvorgänge im Wasser muß aber an einer möglichst genauen Bestimmung der Wasserfarbe festgehalten werden. Auch ist die Bestimmung der Wasserfarbe im allgemeinen einfacher als die Messung der spektralen Durchlässigkeit.

Die Bestimmung der Wasserfarbe geschieht, wie erwähnt, meist in der Weise, daß man unter möglichster Abhaltung der Reflexstrahlung (im Boots- oder Körperschatten) die Wasserfarbe mit der Forel-Uleschen Farbskala vergleicht. Mit Hilfe des elektrischen Unterwasserphotometers kann man auch objektive Farbabstimmungen durchführen, indem man die nach oben gerichtete Komponente der Streustrahlung im Wasser, das sogenannte „Unterlicht“, mißt. Zu diesem Zwecke wird das Photometer nach unten gehalten und knapp unter die Oberfläche eingetaucht. Derartige Messungen wurden gleichzeitig mit den Durchlässigkeitsmessungen vorgenommen. Einen Auszug der Ergebnisse beinhalten die Tabelle 4 und die Abbildung 2.

Die Mannigfaltigkeit der Unterlichtverhältnisse ist besonders aus der Abbildung 2 deutlich zu ersehen. Je intensiver das Unterlicht ist, desto ausgeprägter, desto leuchtender ist die Farbe eines Gewässers. Aus der Lage des Maximums der Kurven kann man auch schon ohne Umrechnungen auf die physiologische Wirksamkeit annähernd den Farbton eines Gewässers bestimmen. Es ist z. B. aus den Kurven herauszufinden, daß der Faaker See

zur Zeit der Messung eine leuchtende blaugrüne Farbe hatte, daß die Farbe des Forstsees ein schwach erkennbares, schwärzliches Grüngelb war, usw. Bei Vergleichen mit den bisher vorliegenden Ergebnissen aus anderen Seen zeigt sich, daß der Faaker See be-

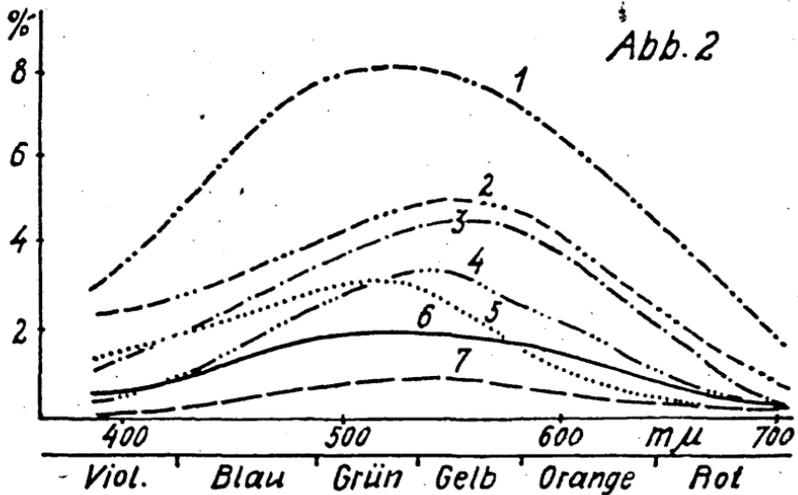


Abb. 2. Unterlichtkurven. Nach den Ergebnissen der Messungen im Mai und Juni 1942. (Nach F. u. A. Sauberer, 1942.) 1. Faaker See, 2. Längsee, 3. Millstätter See, 4. Klopeiner See, 5. Wörther See, 6. Forstsee, 7. Forstsee.

züglich seiner Farbe eine außerordentliche Seltenheit darstellt. Auf verhältnismäßig engem Raum finden wir in Kärntner Seen die verschiedensten Farbtöne.

Tabelle 4

Unterlichtmessungen (Mai—Juni 1941).

See	Unterlicht in % der eindringenden Intensität.					
	$m\mu$ 377	435	525	590	660	700
Wörther	0.5	1.0	1.9	1.5	0.7	0.0
Millstätter	0.9	2.3	4.2	4.2	1.4	0.2
Ossiacher	0.3	0.7	1.5	0.8	0.4	0.0
Weißer	0.6	1.8	2.4	2.0	0.6	0.0
Faaker	2.7	5.5	8.1	6.8	3.6	1.5
Keutschacher	0.4	1.0	2.1	2.5	0.8	0.0
Klopeiner	1.2	2.1	3.2	1.3	0.3	0.0
Läng	2.4	3.1	4.8	4.5	1.9	0.9
Afritzer	0.1	0.9	2.3	2.0	0.8	0.0
Feld	0.2	1.2	2.6	2.0	0.8	0.0
Turner	0.3	1.2	3.3	2.4	0.7	0.1
Forst	0.0	0.3	0.8	0.6	0.2	0.0

Naturgemäß wirkt sich die Bodenreflexion auf das Unterlicht in gleicher Weise aus wie auf die Farbe der Gewässer. So wurde z. B. im seichten Westteil des Weißensees ein erheblich intensiveres und mehr gelbliches Unterlicht gemessen als im tiefen Ostbecken. Auf Einzelheiten und auf Veränderungen des Unterlichtes kann hier nicht näher eingegangen werden.

VI. Licht und Farbe in den Tiefen der Seen.

Wir wollen nun versuchen, mit Hilfe der bestimmten spektralen Durchlässigkeiten die Lichtverhältnisse in den Tiefen der Seen zu schildern. Da unsere Messungen nur bis in Tiefen von 8 m ausgeführt werden konnten, müssen wir auf die tieferen Schichten extrapolieren. Dies ist, soweit die heutigen Erfahrungen reichen, in den meisten Fällen erlaubt, wenn es sich um Gewässer handelt, die keine übergroße Planktonproduktion und keine eingelagerten Trübungsschichten enthalten. Unsere Messungen zeigten in den obersten 8 m nur in einem Fall, am 20. Mai, im Faaker See eine stärkere Änderung der Durchlässigkeit mit der Tiefe. Die dort gefundenen Mittelwerte können also nicht zu Extrapolationen verwendet werden. Die Änderungen der Transmissionskoeffizienten mit der Tiefe bei allen anderen Messungen waren gering und können bei den nun folgenden allgemeinen Betrachtungen vernachlässigt werden. Diese Ansicht wird noch gestützt durch die Messungen O. Eckels (1935), der in einigen Kärntner Seen bis zu 45 m Tiefe gemessen und ebenfalls keine so großen Änderungen gefunden hatte, daß Extrapolationen unerlaubt scheinen würden.

Wir wollen hier auf vorübergehende Änderungen durch Hochwassertrübungen, üppige Planktonproduktionen usw. nicht eingehen und versuchen, die durchschnittlichen Verhältnisse zu bestimmen. Dies ist aus den wenigen bisher vorliegenden Meßergebnissen nur mit gewissen Vorbehalten möglich. Es muß aber betont werden, daß die vor 7 Jahren durchgeführten Messungen Eckels teilweise auch als Beweis für die Beibehaltung der optischen Eigenschaften der Seen herangezogen werden können. Diese Messungen wurden — im ersten Versuchsstadium mit der photoelektrischen Apparatur — mit für derartige Zwecke wenig brauchbaren Lichtfiltern angestellt und können mit den heutigen Messungen im allgemeinen nicht verglichen werden. Die von Eckel mit dem Rotfilter RG 2 bestimmten Durchlässigkeiten können aber — sie wurden auf zenitalen Sonnenstand reduziert — auf die bei unseren Messungen vorhanden gewesenen Verhältnisse umgerechnet werden. Wir finden dann, daß die Durchlässigkeit des Millstätter Sees bei unseren Messungen um 4—5% geringer,

die des Faaker Sees (2. Messung!) um etwa 4% größer war als bei Eckel, während die Transmissionskoeffizienten des Wörther-, Weißen- und Klöpeiner Sees gleich sind. Tatsächlich zeigt der Faaker See infolge wechselnden Gehaltes an feinsten mineralischen Trübungsstoffen größere Schwankungen in seiner Durchlässigkeit, während aus den Sichttiefen- und Farbangaben Findeneggs, im Vergleich zu unseren Beobachtungen am Meßtag, die normale Durchlässigkeit des Millstätter Sees tatsächlich größer sein dürfte als bei unserer Messung. Für die nun folgenden Betrachtungen gelten also die Einschränkungen, daß die Verhältnisse im Faaker See größeren Schwankungen ausgesetzt sind und die Lichtverhältnisse im Millstätter See normalerweise etwas günstiger sein dürften.

Das in die Tiefen der Seen eindringende Tageslicht wird, wie aus Tabelle 3 und Abbildung 1 deutlich hervorgeht, nicht in allen Wellenbereichen in gleichem Ausmaß geschwächt. Es findet eine selektive Filterung statt; das Wasser wirkt, natürlich in größeren Schichtdicken, wie farbiges Filterglas. Ist z. B. die Durchlässigkeit der Meterschicht für eine bestimmte Wellenlänge 0,8 oder 80%, so gelangen an die untere Begrenzungsfläche noch 80% der die obere durchdringenden Lichtstrahlung. Von diesen verbleibenden 80% durchdringen die zweite Meterschicht wieder 80%, so daß dann nur mehr 64% der Anfangsintensität vorhanden sind, usw. Beträgt die Durchlässigkeit etwa nur 10%, so ist nach 2 m Schichtdicke nur mehr eine Intensität von 10%, d. i. 0,1mal 0,1, oder 1% der Anfangsintensität vorhanden. Je geringer also die Durchlässigkeit ist, desto schneller wird das Licht mit zunehmender Tiefe ausgelöscht. Die Folge davon ist, daß eine zunehmende Verengung des vorhandenen Spektralbereiches eintritt und das Licht mit wachsender Tiefe immer deutlicher eine der maximalen Durchlässigkeit entsprechende Farbtonung erhält. Dies ist z. B. in Abbildung 3 gut zu erkennen, in der die Lichtzusammensetzung in 10 und in 40 m Tiefe des Faaker Sees, Wörther Sees und Forstseewassers graphisch dargestellt ist. Wir sehen dort deutlich, wie die Breite des Spektralbereiches von 10 bis 40 m abnimmt. In letzterer Tiefe wäre also in den genannten Seen (der Forstsee ist bekanntlich nicht ganz so tief) ein ausgesprochen farbiges Licht vorhanden, u. zw. im Faaker See grünblaues, im Wörther See blaugrünes und im Forstsee grünlichgelbes. Einige zahlenmäßige Angaben über den Lichtabfall mit der Tiefe sind in der Tabelle 5 enthalten, aus der auch gut hervorgeht, in welchem ungleich schnellerem Maße die Wellenlängen mit geringerem Transmissionskoeffizienten ausgelöscht werden.

Abb. 3

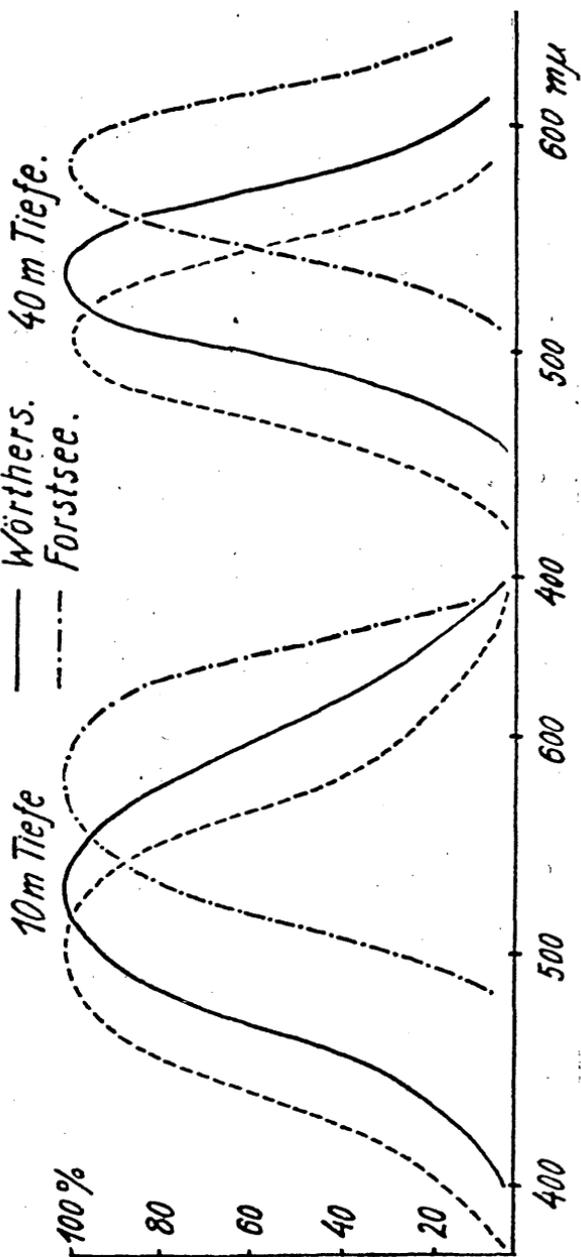


Abb. 3. Spektrale Lichtzusammensetzung in drei Seen. (Jeweiliges Maximum — 100% gesetzt, Nach F. u. A. Sauberer, 1942.) Faaker See (gestrichelte Kurve), Wörther See (ausgezogene), Forstsee (strichpunktierete Kurve).

Tabelle 5

Spektrale Lichtintensitäten in verschiedenen Tiefen zweier Seen (Mai 1941) in % der eindringenden Intensitäten. (Nach F. u. A. Sauberer, 1942.)

See	Tiefe	377 m μ	525 m μ	660 m μ
Wörther	1	45	78	58
	5	1,8	29	6,4
	10	0,034	8,3	0,42
	15	0,00064	2,5	0,027
	20	0,000012	0,66	0,0017
Ossiacher	1	19	69	53
	5	0,025	16	4,2
	10	0,000006	2,6	0,17
	15	0,0000000015	0,41	0,0069
	20	0,00000000000036	0,068	0,00028

Eine erweiterte Darstellung auf Grundlage der für Tabelle 5 angewandten Berechnungsart ist wegen Raummangels nicht möglich. Um dennoch Anhaltspunkte über die spektrale Intensitätsverteilung in den Seen geben zu können, wurden in Tabelle 6 jene

Tabelle 6

Tiefen (in m), in denen die eindringende Lichtstrahlung verschiedener Wellenlängen auf 1% herabgemindert wird. (Nach F. u. A. Sauberer, 1942.)

See	m μ	377	435	525	590	660	700
Magdalenen	9,6	17,2	27,5	18,0	9,0	4,5	
Faaker	9,0	18,0	27,5	16,4	7,6	4,2	
Klopeiner	8,4	17,2	29,4	19,4	9,0	4,4	
Weißer	7,6	17,2	27,5	19,4	9,6	4,5	
Wörther	7,2	13,8	23,5	18,0	8,7	4,3	
Grün	4,3	7,4	17,2	15,7	7,8	4,2	
Aichwald	3,8	7,6	16,4	14,4	7,2	4,3	
Millstätter	3,4	7,0	11,8	12,7	7,2	3,8	
Ossiacher	3,3	6,5	13,8	12,2	7,4	3,9	
Afritzer	3,0	6,3	12,7	12,7	7,6	3,6	
Feld (Brenn)	2,8	5,8	12,2	12,7	7,2	3,5	
Keutschacher	2,8	6,8	13,8	12,7	7,0	3,8	
Läng	2,7	7,0	14,4	11,8	7,0	3,5	
Pressegger	2,6	6,3	15,0	12,2	6,6	3,8	
Turner	2,5	6,8	13,3	13,3	7,8	3,9	
Turracher	2,3	4,3	9,3	9,9	6,5	3,6	
Gösselsdorfer	2,2	5,7	11,4	11,4	6,5	3,3	
Rauschle	1,9	5,2	12,2	11,8	7,2	3,7	
Forst	1,4	4,2	9,9	10,6	7,2	3,9	
Leonharder	1,4	3,0	6,1	6,8	5,0	3,2	
Saisser	1,3	4,0	10,2	10,6	7,0	3,8	
Hafner	1,1	3,4	7,4	9,0	6,8	3,7	
Schwarz	1,1	2,5	7,8	8,7	5,8	3,3	
Hallegger Teich	0,2	0,8	2,0	3,3	3,6	2,7	

(Bei Vorhandensein mehrerer Meßreihen wurden die jeweils höchsten gemessenen Durchlässigkeiten verwendet.)

Tiefen angegeben, in denen für die einzelnen Wellenbereiche die eindringende Intensität auf 1% herabgemindert wird. Diese Werte geben schon ein Bild über die unterschiedlichen Lichtverhältnisse in den Seen, sagen aber nichts über die Sehmöglichkeiten im Wasser aus. Bei Beleuchtungsstärken von 1% der Außenhelligkeit kann man untermits meist noch gut sehen. Die *Sichtweite* unter Wasser ist aber sehr von der Trübung abhängig. Entsprechend der Anpassungsfähigkeit des menschlichen Auges für verschiedene Beleuchtungsstärken dürfte bei voller Tageshelligkeit in den Tiefen mit 1% des Außenlichtes ungefähr die Grenze liegen, bis zu der die Außenhelligkeit nur wenig Einfluß auf die Sichtweite im Wasser hat. Bis zu diesen Tiefen kann angenommen werden, daß die Trübung für die Sichtweite maßgebend ist und daß man — mit verschiedenen Einschränkungen — ungefähr maximal soweit sehen könnte, als die mit der Secchischeibe bestimmte Sichttiefe ergibt. Dabei ist natürlich vorausgesetzt, daß die Trübung des Wassers in allen in Betracht kommenden Tiefen die gleiche ist. Eine andere Bedeutung der 1%-Tiefen liegt darin, daß sie Anhaltspunkte über die Tiefengrenzen der Assimilationsmöglichkeiten geben; es sei aber ausdrücklich betont, daß es nur Anhaltspunkte und keinerlei direkte Angaben sein sollen.

Oft wurde und wird die Frage aufgeworfen, bis in welche Tiefen das Tageslicht überhaupt einzudringen vermag. Die Frage ist nicht zu beantworten, wenn nicht gesagt wird, wie groß die Grenzintensität angenommen wird. In der genannten Arbeit¹⁾ gaben wir auch die in den tiefsten Stellen einiger Seen vorhandenen Lichtintensitäten in Prozenten der Außenhelligkeit an. Wir beschränkten uns dabei auf die Lichtstärke im Bereich des Maximums der Empfindlichkeit des menschlichen Auges, also im Gelb. Es wurden folgende Intensitäten berechnet (Tabelle 7).

Wir stellen in der Tabelle 7 fest, daß die Helligkeit im Gelb an den tiefsten Stellen des Magdalenenensees noch 30% der Außenhelligkeit beträgt, im Turracher Schwarzsee noch 19%, und daß umgekehrt am tiefsten Grunde des Millstätter Sees praktisch immer Dunkelheit herrscht. An den tiefsten Stellen des Wörther Sees und des Weißensees könnte das an die Dunkelheit angepaßte menschliche Auge von oben her bei sonnigem Wetter wahrscheinlich noch einen schwachen grauen Lichtschimmer wahrnehmen. Ausgesprochen lichtlose Regionen dürfte es demnach nur im Millstätter See unter 80—100 m Tiefe geben.

*) Fußnote Seite 44.

-Tabelle 7

An den tiefsten Stellen vorhandene Intensität im Gelb. (Nach F. u. A. Sauberer, 1942.)

See	%	See	%
Magdalenen	30	Läng	96.10 ⁻³
Schwarz	19	Afritzer	41.10 ⁻³
Aichwald	9.5	Klopeiner	13.10 ⁻³
Grün	3.7	Feld	86.10 ⁻³
Rauschele	1.7	Forst	17.10 ⁻⁶
Turner	1.2	Turracher	13.10 ⁻⁶
Pressegger	0.90	Ossiacher	12.10 ⁻⁶
Keutschacher	0.60	Weißen	32.10 ⁻⁸
Hafner	0.35	Wörther	86.10 ⁻⁹
Faaker	0.15	Millstätter	77.10 ⁻²⁸

Das Licht des Vollmondes beträgt nur etwa 1/500.000 von jenem der Sonne. Wieder für gelbes Licht gerechnet, finden wir für die Tiefen, in denen bei voller Sonnenbestrahlung der Oberfläche die Lichtintensität auf die des Vollmondes herabgemindert wird, etwa folgendes: (Tabelle 8.)

Tabelle 8

Tiefen, in denen nur mehr Licht von der Stärke des Vollmondes vorhanden sein könnte.

See	m	See	m
Klopeiner	64	Millstätter	34*
Weißen	63*	Läng	34
Magdalenen	61	Afritzer	34
Faaker	57	Rauschele	33
Wörther	57*	Gösselsdorfer	31
Grün	46	Saisser	29
Aichwald	43	Forst	29*
Pressegger	37	Turracher	26*
Keutschacher	36	Schwarz	23
Turner	36	Hafner	22
Ossiacher	35*	Leonharder	18
Brenn	34	Hallegger Teich	7

(Die nötigen Tiefen werden nur in den mit * bezeichneten Seen erreicht.)

In der Tabelle 8 kann festgestellt werden, daß die Tiefen, in denen bei Sonnenschein auf die Oberfläche des Sees nur mehr Vollmondintensität herrschen würde, nur von 6 der untersuchten Gewässer erreicht werden. Demnach gibt es in den übrigen 18 Seen keine Tiefe, in der nicht wenigstens zeitweise die Lichtintensität vom Ausmaße des Vollmondlichtes vorhanden wäre.⁵⁾

⁵⁾ Die Einschränkung, daß diese Betrachtungen für gelbes Licht gelten, stört nicht merklich, da die zugrunde gelegten Durchlässigkeiten ohnehin für einen weiteren Spektralbereich mit dem Maximum bzw. Schwerpunkt im Gelb gelten.

Die Lichtunterschiede in bestimmten größeren Tiefen sind zwischen den einzelnen Seen oft derart groß, daß es an Vergleichsmöglichkeiten mangelt. Betrachten wir z. B. nebeneinander eine Fläche frisch gefallenen Schnees und eine solche ausgestreuten, trockenen Rußes im Sonnenlicht. Die von den beiden Flächen ausgehenden Reflexstrahlungen verhalten sich etwa wie 1:500 bis 1:1000. Schon in 10 m Tiefe beträgt z. B. der Unterschied in der vorhandenen UV-Violett-Intensität zwischen Wörther- und Ossiacher See ein Vielfaches dieses Wertes. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Gewässern sind, wie schon ausgeführt wurde, im UV-Violett am größten; sie steigen mit der Tiefe ins Unermeßliche. Es muß allerdings angenommen werden, daß Intensitäten von weniger als 0,0001% der Intensität im Freien schon bedeutungslos sind. Ansonsten kommt dieser UV-Strahlung sicher eine hohe biologische Bedeutung zu. Es ist aber nicht geplant, hier in diese Probleme näher einzugehen.

Im wesentlichen wurde hier ein Auszug aus der eingangs genannten Arbeit gebracht. Die Zahl der Messungen nach den hier angewandten neuen Methoden ist noch gering und es wäre ein dankbares Betätigungsfeld für wissenschaftlich interessierte Freunde der Kärntner Seen, derartige Messungen fortzusetzen und die Untersuchungen auf größere Tiefen auszudehnen.

Für die Anregung dieser Untersuchung bin ich Herrn Prof. Dr. F. Ruttner, Lunz, für die Beistellung des nötigen Schrifttums und für verschiedene Ratschläge den Herren Dr. I. Findenegg und F. Turnowsky zu Dank verpflichtet.

Schriftenverzeichnis.

- Eckel, O. (1935): Strahlungsuntersuchungen in einigen österreichischen Seen. SB. Akad. Wiss. Wien, 144.
- Findenegg, I. (1941): Einige phys. u. chem. Beobachtungen an Kärntner Seen. Carinthia II.
- Sauberer, F. u. A. (1942): Beiträge zur Kenntnis der optischen Eigenschaften der Kärntner Seen. Archiv für Hydrob. im Druck. (Enthält Schriftennachweis über die Kärntner Seen.)

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Carinthia II](#)

Jahr/Year: 1942

Band/Volume: [132_52](#)

Autor(en)/Author(s): Sauberer Franz

Artikel/Article: [Licht und Farbe der Kärntner Seen 44-61](#)