

**3. Die Polarisation des Lichtes in trüben Medien  
im Hinblick auf das Himmelslicht:  
von F. v. Hauer.**

---

Als Ursache für die Entstehung des Himmelslichtes und seiner komplizierten Polarisationsverhältnisse wird vor allem die Zerstreuung des Sonnenlichtes an den Luftmolekeln angesehen. Diese führt nach Rayleigh<sup>1)</sup> dazu, daß ein einfallender Lichtstrahl so zerstreut wird, daß die Intensität des in der Richtung  $\varphi$  zum einfallenden Strahl abgebeugten Lichtes, wenn  $J_0$  die einfallende Intensität ist, proportional wird zu

$$J \sim J_0 (1 + \cos^2 \varphi) / \lambda^4 \quad (\lambda = \text{Wellenlänge}).$$

Die Größe der Polarisation, d. h. die Intensität des polarisierten Lichtanteiles geteilt durch die Gesamtintensität in der betreffenden Richtung, soll dabei gegeben sein durch

$$P = \frac{1 - \cos^2 \varphi}{1 + \cos^2 \varphi}.$$

Daneben<sup>2)</sup> ist natürlich auch die Zerstreuung bzw. Reflexion und Brechung an *allen* in der Atmosphäre vorhandenen optischen Inhomogenitäten in Rechnung zu ziehen, dabei außer denen, die im Sinne der Rayleighschen Theorie klein gegen den Kubus der Lichtwellenlänge sind, auch solche, die groß gegen  $\lambda^3$  oder eventuell von der gleichen Größenordnung sind, also vor allem Wassertröpfchen und Staub, sowie Stellen von Temperatur- und Dichteschwankungen, kurz allen Stellen, an denen der Brechungsexponent verschiedene Werte durchläuft. Bei Temperatur- und Dichteschwankungen muß sowohl an Übergänge zwischen den verschiedenen Schichten der Atmosphäre

---

1) Lord Rayleigh, Phil. Mag. 41. p. 107 u. 274. 1871 sowie 12. p. 81. 1881.

2) Als zusammenfassende Darstellungen des ganzen Gebietes: Pernter-Exner, Meteorologische Optik, und Busch u. Jensen, Tatsachen und Theorien der atmosphärischen Polarisation.

gedacht werden als auch an die in jedem Gase vorhandenen spontanen Schwankungen infolge der thermischen Agitation. Ferner kann Fluoreszenzlicht vorhanden sein, und die sich aus allen diesen Faktoren ergebende Zerstreuung der Sonnenstrahlung in der Atmosphäre kann durch Absorption (Eigenfarbe) oder besonders durch sekundäre Zerstreuung, d. h. durch Zerstreuung des vom übrigen Himmel sowie von der Erdoberfläche kommenden Lichtes beträchtlich geändert werden. Das von anderen Himmelskörpern kommende Licht (Mond, Sterne, Zodiakallight) dürfte wahrscheinlich keine hervorragende Rolle spielen.

Die von der Rayleighschen Theorie geforderten Intensitäts- und Polarisationsverhältnisse können, wie kürzlich Born<sup>1)</sup> gezeigt hat, durch aus der Anisotropie der Molekel geforderte Kreiselbewegungen Abweichungen erleiden, so daß auch senkrecht zu der Richtung des einfallenden Strahles keine vollständige Polarisation vorhanden ist, wie sie sich aus obiger Formel für  $P$  ergäbe.

Es müssen zunächst die Gesetze aller dieser Erscheinungen festgestellt sein, um zu einer völligen Klarlegung zu gelangen; aber auch dann wird wohl eine eindeutige Lösung, d. h. eine Entscheidung, wieviel jeder einzelne dieser Faktoren tatsächlich zur Entstehung des Himmelslichtes beiträgt, schwer möglich sein.

Die zahlreichen, sowohl am Himmelslichte als auch im Laboratorium mit künstlich erzeugten trüben Medien vorgenommenen Messungen der *Intensität* des abgelenkten Lichtes<sup>2)</sup> (bezogen auf das einfallende als Funktion der Wellenlänge) haben gezeigt, daß einerseits die Zerstreuung des Lichtes an Teilchen, die klein sind gegen die Lichtwellenlänge, in bezug auf ihre Intensität der Rayleighschen Theorie folgt, und daß andererseits eine derartige Zerstreuung die *Hauptursache* für die Entstehung des Himmelslichtes bildet. Es wäre hierbei die Frage zu erwägen, ob nicht die in der Atmosphäre vorhandenen Ionen eine besondere Rolle spielen.

Über die Lichtzerstreuung an Teilchen, deren Durchmesser von der Größenordnung der Wellenlänge sind, liegen

1) M. Born, Ber. d. D. Physik. Ges. 19. p. 143. 1917 u. 20. p. 16. 1918.

2) Vgl. die zitierten ausführlichen Zusammenfassungen.

eine Reihe von Untersuchungen vor, die sich mit dem an einzelnen kolloidalen Teilchen abgelenkten Lichte befassen (vgl. unter anderem besonders die Theorie von Mie).<sup>1)</sup> Diese sowie auch eine aus den letzten Jahren stammende Berechnung Rayleighs<sup>2)</sup> können uns aber in Hinsicht auf das Himmelslicht wenig helfen, da die Zusammensetzung des abgelenkten Lichtes hier natürlich wesentlich von dem für die Größe der Teilchen herrschenden Verteilungsgesetz abhängt, das uns völlig unbekannt ist. Es kann aber wohl angenommen werden, daß derartige Teilchen in der Atmosphäre sehr selten sind, zumal so kleine Wassertropfen wegen der bei der stark gekrümmten Oberfläche hohen Dampfspannung rasch verdampfen müßten. Über die *Polarisation* des an Teilchen von der Größenordnung der Lichtwellenlängen abgelenkten Lichtes liegen meines Wissens keine Beobachtungen vor (außer dem wenigen weiter unten, p. 150, Gesagten). Einer ausführlichen Behandlung zugänglich wären vielleicht die aus den spontanen Dichteschwankungen in der Luft sich ergebenden Inhomogenitäten.<sup>3)</sup> Soweit die Ausdehnung derselben klein gegen die Wellenlänge ist, gilt auch für sie das Rayleighsche Zerstreuungsgesetz.

Warum auch in neuerer Zeit gelegentlich noch ein Zerstreuungsgesetz angenommen wird, bei dem die Intensität des abgelenkten Lichtes proportional zu  $\lambda^{-2}$  wäre, wie sie aus der alten, längst widerlegten Wasserbläschentheorie von Clausius gefolgert wurde, ist mir nicht recht verständlich.<sup>4)</sup> Die bisherigen, allerdings noch nicht abschließenden Ergebnisse hierüber scheinen die Annahme jedenfalls nicht zu rechtfertigen.<sup>5)</sup> Es ist bei Zerstreuung an groben Teilchen, deren Dimensionen groß gegen die Wellenlänge sind, zu unterscheiden, ob diese auf Flächen, deren Länge und Breite groß gegen die Wellenlänge sind, nur Unebenheiten kleiner als die Wellenlänge haben, oder ob jedes Teilchen unregelmäßig, wie

1) J. Mie, Ann. d. Phys. 25. p. 377. 1908.

2) Lord Rayleigh, Proc. Roy. Soc. 90. p. 219. 1914.

3) Ann. d. Phys. 25. p. 205. 1908.

4) Vgl. Busch u. Jensen, l. c. In den diesbezüglichen Arbeiten von Clausius ist das Gesetz nicht ausgesprochen (Clausius, Ann. d. Phys. 62. p. 294. 1847; 76. p. 161. 1849; 78. p. 543. 1853).

5) Vgl. besonders J. Stark, Ann. d. Phys. 62. p. 353. 1897 u. Compton, C. R. 128. p. 1226. 1899. Weitere Untersuchungen hierüber sind im hiesigen Institut im Gange.

ein Haufen kleinerer Teilchen, geformt ist. Im ersten Falle wird es spiegelnde Reflexion zeigen, im zweiten diffuse. Die Lichtzerstreuung an diffus reflektierenden Teilchen bzw. Flächen ist in neuerer Zeit von Dimmer<sup>1)</sup> und Navrat<sup>2)</sup> studiert worden. Es muß darnach angenommen werden, daß die Anwesenheit grober Teilchen vermindern auf die Polarisierung des Himmelslichtes einwirkt.

Für die Möglichkeit der Zumischung von Luminiszenzlicht zum Himmelslicht scheinen mir besonders die auch bei reiner Atmosphäre stets niedrigen Polarisationswerte am Himmel zu sprechen. Auf die Farbe des Himmelslichtes kann auch die Absorption der Luft einen Einfluß haben, besonders die blaue Farbe des Ozons<sup>3)</sup>; freilich kann dieser Einfluß nur untergeordneter Natur sein, denn die Sonne selbst erscheint ja nicht blau. Der Einfluß der sekundären Zerstreuung auf die Polarisierung wurde vor kurzem von F. Ahlgrimm<sup>4)</sup> studiert (dort auch ausführliche Literaturangaben). In bezug auf die Farbe, d. h. die spektrale Intensitätsverteilung, meinte Nichols<sup>5)</sup> im Himmelslichte das Chlorophyllspektrum als Folge des an der Erdoberfläche reflektierten und in der Luft sekundär zerstreuten Lichtes nachweisen zu können. Er beobachtete nämlich das Spektrum des Himmelslichtes bei beleuchteter und bei beschatteter Landschaft und trug das Verhältnis der Intensitäten als Funktion der Wellenlänge auf. Die so erhaltene Kurve zeigte dann ein Maximum bei  $0,625 \mu$  und ein Minimum bei  $0,525 \mu$ ; das Maximum soll mit der Stelle größter Durchlässigkeit im Spektrum des Chlorophylls und das Minimum mit einem der stärksten Absorptionsbänder zusammenfallen. In der folgenden Tabelle gebe ich Messungen von Engelmann<sup>6)</sup> wieder über die Durchlässigkeit lebender

1) G. Dimmer, Wiener Ber. 117. IIa. p. 913. 1908; 119. p. 1073. 1910; 120. p. 283 u. 973. 1911.

2) V. Navrat, Wiener Ber. 120. IIa. p. 1229. 1911; 121. p. 1289. 1911.

3) Neuerdings Pring, Proc. Roy. Soc. 90. p. 216. 1914, woselbst weitere Literatur.

4) F. Ahlgrimm, Zur Theorie der atmosphärischen Polarisation. Kieler Diss. 1915.

5) E. L. Nichols, Phys. Rev. 26. p. 497. 1908.

6) Th. W. Engelmann, Botanische Zeitung 1887; der Botaniker Hr. Prof. Ursprung hatte die Güte, mich auf diese Messungen hinzuweisen. Weitere Angaben vgl. Kayzers Handbuch der Spektroskopie, Bd. 4.

Blätter (1. Blätter von Festuca, 2. Blätter von Hedera); angegeben ist dabei der Quotient der durchgelassenen Intensität durch auffallende  $\times 100$ .

$\lambda$ in $\mu$	1.	2.	$\lambda$ in $\mu$	1.	2.
0,71	65	61	0,56	48,5	43,3
0,69	30	34,4	0,55	50,0	45,6
0,68	12,5	—	0,54	50,0	44,4
0,675	9,2	11,1	0,53	48,5	42,2
0,67	10,5	—	0,52	37,0	35,0
0,66	17,5	21,1	0,51	24,5	26,7
0,65	22,5	26,7	0,50	15,5	12,8
0,64	29,8	33,3	0,49	11,0	9,0
0,63	29,0	31,1	0,48	10,5	10,0
0,62	33,5	35,6	0,47	8,0	8,3
0,61	33,5	36,1	0,46	9,0	7,8
0,60	39,0	40,0	0,45	8,5	7,2
0,59	37,0	36,0	0,44	7,5	5,0
0,58	41,5	37,7	0,43	6,5	4,5
0,57	47,5	41,7			

Demnach ist bei  $\lambda = 0,525 \mu$  kein Minimum der Durchlässigkeit; die Stelle ist vielmehr in der Nähe des Maximums. Andererseits ist bei  $\lambda = 0,625 \mu$  kein Maximum der Durchlässigkeit. Nun werden allerdings über das Absorptionsspektrum des Chlorophylls sehr verschiedene Angaben gemacht, die zum großen Teil darauf zurückzuführen sind, daß dabei verschiedene Stoffe untersucht wurden (nach Extraktion aus dem Blatte). Deshalb wurden hier Messungen, die am lebenden Blatte selbst gemacht sind, wiedergegeben. Von Nichols selbst sind in einer früheren Veröffentlichung<sup>1)</sup> (gemeinsam mit E. Meritt) Messungen an einem alkoholischen Blattextrakt gegeben, die zwar ein wesentlich anderes Bild geben (wohl aus obgenannten Gründen), aber doch auch nicht die größte Durchlässigkeit und ein starkes Absorptionsband an den angegebenen Stellen zeigen. Es muß demnach das behauptete Auftreten des Chlorophyllspektrums im Himmelslichte als nicht erwiesen bezeichnet werden.

Es hat nun Pernter<sup>2)</sup> schon im Jahre 1901 einen neuen Weg für das Studium der Frage nach der Entstehung des Himmelslichtes gewiesen, indem er untersuchte, ob in künstlich hergestellten trüben Medien die Polarisation in den ein-

1) E. L. Nichols u. E. Meritt, Phys. Rev. 19. p. 26. 1904.

2) J. M. Pernter, Denkschriften d. Wiener Akad. d. Wiss. 1901.

zelenen Farben die nämlichen Verschiedenheiten aufweise, wie sie im Himmelslichte gefunden werden.

Zu diesem Zwecke ließ Pernter jeweils einen Teil des prismatischen Spektrums einer Bogenlampe in einen mit einer Mastixemulsion in Wasser gefüllten Trog fallen und maß mit dem Cornuschen Polarimeter die Polarisation des Lichtes senkrecht zu der Richtung des einfallenden Strahles. Seine dabei erhaltenen Resultate, die ich nur zum geringsten Teile bestätigen kann, waren:

1. Das seitlich zerstreute Licht ist um so weniger polarisiert, je weißlicher das Blau desselben ist, d. h. je mehr Mastix in der Lösung ist.

2. Für gut und ziemlich blaue Töne des zerstreuten Lichtes ist das Maximum der Polarisation im Grün, das Minimum im Rot.

3. Bei stark weißlichen Tönen hat die Polarisation ihren höchsten Wert im Rot und nimmt gegen die kürzeren Wellen stetig ab.

4. Die Größe der Polarisation hängt von der Intensität des auffallenden Lichtes ab.

Punkt 1 und 3 werden durch die Anwesenheit größerer Teilchen erklärt, die die Polarisation überhaupt herabsetzt, bzw. wenn der Durchmesser der Teilchen noch als klein gegen die Wellenlänge der roten Strahlen, aber nicht mehr gegen die der blauen aufgefaßt werden kann, besonders die Polarisation des blauen Lichtes herabsetzt.

Punkt 4 (und damit auch Punkt 2) wird, allerdings unter allem Vorbehalte, durch Auftreten von Fluoreszenzlicht zu erklären versucht, das unpolarisiert ist und dadurch die Polarisation herabsetzen soll.

Von Pernter wurden auch Polarisationsmessungen in der Atmosphäre ausgeführt, bei denen er für erträglich blauen Himmel das Polarisationsmaximum im Grün fand, für weißlichen Himmel jedoch im Rot. Dieses Ergebnis schien gut zu dem mit der Mastixlösung erhaltenen zu passen. Neben den Penterschen liegen auch heute noch recht wenig Messungen der atmosphärischen Polarisation in verschiedenen Farben vor. Der Grund hierzu mag wohl in der großen Veränderlichkeit der atmosphärischen Polarisationsverhältnisse zu suchen sein, die gewöhnlich nicht einmal während einer Mes-

sungsreihe konstant bleiben. Jensen und auch Hurion<sup>1)</sup> fanden keine bedeutenden Differenzen der Polarisationswerte beim Vorschalten eines roten oder grünen bzw. roten oder blauen Glases. Dagegen fand Piltchikoff<sup>1)</sup> besonders bei geringer Polarisation einen wesentlich höheren Wert für Blau als für Rot, und Nichols<sup>2)</sup> endlich gibt an, es könnten nahezu alle möglichen Fälle auftreten, d. h. Maximum bald im Rot, bald im Grün, bald im Blau, Minimum im Grün und höhere Werte an den Enden des Spektrums sowie gleiche Polarisationswerte für alle Farben. Nichols erklärt das Auftreten des Polarisationsmaximums im Blau durch das Vorhandensein grober Teilchen. Diese reflektieren unpolarisiertes Licht und da die Intensität desselben relativ zu dem an kleinen Teilchen zerstreuten Lichte im Rot größer sein muß als im Blau, so wird dadurch die Polarisation mehr im Rot herabgesetzt als im Blau, also ein Polarisationsmaximum im Blau hervorgerufen. Das Maximum im Rot wird wie bei Pernter erklärt. Das Maximum im Grün soll durch das Vorhandensein von Teilchen, die für das grüne Licht als klein gegen die Wellenlänge, für das blaue Licht aber nicht mehr als solche gelten können, hervorgerufen sein, neben groben Teilchen, die die Polarisation im Rot herabdrücken. Bedenkt man, daß die Wellenlängen des grünen und blauen Lichtes ja nicht gar so sehr verschieden sind (der größte Teil des Anstieges liegt zwischen 0,475 und 0,580  $\mu$ ), so erscheint diese Erklärung ungenügend. Durch Kombination dieser Fälle sollen die übrigen beiden erklärt werden, eventuell unter Beeinflussung durch Absorption.

Ich habe nun in der Absicht, den von Pernter gewiesenen Weg weiter zu verfolgen, zunächst die Pernterschen Ergebnisse nachgeprüft. Zu diesem Zwecke wurde ebenfalls ein (durch Blendung der Linse) möglichst parallelstrahliges Spektrum entworfen und durch einen 0,5 cm breiten Schlitz ein Teil hiervon ausgeblendet. Hinter diesem Schlitz befand sich ein innen mit gutem schwarzem Mattlack überzogenes Becherglas von ca. 11 cm Durchmesser durch dessen Mitte das parallele Strahlenbündel fiel. An Stelle eines parallelwandigen Troges war ein Becherglas gesetzt worden, um unter ver-

1) Vgl. Busch u. Jensen, *Tatsachen und Theorien*. p. 440.

2) E. L. Nichols, *Phys. Rev.* 26. p. 507. 1908.

schiedenen Winkeln ohne Störung durch polarisierende Wirkung der Wand beobachten zu können. Durch Verschieben des mit einer Schraube in einer Schlittenführung verstellbaren Spaltes konnten, ohne an Schlitz oder Becherglas rühren zu müssen, verschiedene Spektralbereiche benutzt werden. Die zur Beobachtung des seitlich zerstreuten Lichtes notwendige große Helligkeit bei doch ziemlich guter Parallelität der Strahlen geht natürlich auf Kosten der Reinheit des Spektrums, weshalb ich von einer Wellenlängenbestimmung der verwendeten Strahlen wie auch Pernter, überhaupt absah und mich mit Angabe der Farbe des betreffenden Spektralbereiches begnügte. Es wurde nun mit dem Cornu-Martensschen<sup>1)</sup> Polarimeter die Polarisation, d. h. der Quotient: Intensität des polarisierten Anteiles dividiert durch die Gesamtintensität gemessen. Neben der schon von Cornu erwähnten und bei Pernter (l. c.) besprochenen Unsicherheit in der Einstellung gegen die Polarisationssebene des einfallenden Lichtes kann auch noch ein beträchtlicher Fehler dadurch entstehen, daß die Durchlässigkeit des Apparates für die beiden Polarisationsrichtungen nicht gleich ist; denn auch bei Eintritt unpolarisierten Lichtes (als unpolarisiert daran kenntlich, daß nach Gleichstellung der beiden Felder durch Einstellen des Nicols, Drehen des ganzen Apparates die Gleichheit nicht stört) war die Schwingungsrichtung des Nicols nicht  $45^\circ$  gegen die Schwingungsrichtungen des Wollastonprismas gedreht. Es äußert sich dies darin, daß nach erfolgter Gleichstellung bei Drehung des Nicols um  $90^\circ$  keine Gleichheit mehr besteht. Dieser Fehler muß durch Anbringen einer ein für alle Mal ermittelten Korrektur ausgeglichen werden. Es ergibt sich leicht, daß, wenn das Intensitätsverhältnis der beiden das Wollastonprisma verlassenden Komponenten statt Eins, gleich ist  $1 + \delta$ , das Polarisationsverhältnis  $P$  statt  $\cos 2\alpha$  gleich

$$P = \cos 2\alpha - \delta/2 \sin^2 2\alpha$$

wird, wo  $\alpha$  den abgelegenen Winkel bedeutet. Ist nämlich  $p$  der polarisierte Anteil und  $N$  der unpolarisierte, so ist

1) A. Cornu, Assoc. franç. pour l'avancement des Sciences de la Rochelle 1882 (zitiert nach Pernter, l. c.) und M. Martens, *Physik. Zeitschr.* 1. p. 299. 1900. — Das Instrument wurde mir von Hrn. Prof. Gockel, auf dessen Anregung hin ich mich dem Studium der Polarisationserscheinungen zuwandte, gütigst zur Verfügung gestellt.



$$\frac{N/2}{N/2 + p} = \operatorname{tg}^2 \alpha (1 + \delta),$$

woraus sich für  $P = p/N + p$  ergibt

$$P = \frac{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha - \delta \sin^2 \alpha}{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha + \delta \sin^2 \alpha},$$

was für kleines  $\delta$  in obigen Ausdruck übergeht.

Beachtenswert ist ferner ein Umstand, der von Pernter anscheinend nicht berücksichtigt wurde, nämlich, daß das aus einem prismatischen Spektrum stammende Licht von vornherein durch Brechung polarisiert ist. Die Größe dieser Polarisation (für die ich merkwürdigerweise weder in Kayzers Handbuch der Spektroskopie, noch sonst irgendwo Angaben finden konnte) ergibt sich leicht aus den Fresnellschen Gleichungen. Sind nämlich  $\varphi$  und  $\psi$  Einfalls- und Brechungswinkel gegen die erste Prismenfläche, ferner  $\psi'$  und  $\chi$  gegen die zweite Prismenfläche, so erhalten wir das Polarisationsverhältnis  $R$  durch den Ausdruck

$$R = \frac{1 - \cos^2(\varphi - \psi) \cos^2(\psi' - \chi)}{1 + \cos^2(\varphi - \psi) \cos^2(\psi' - \chi)}.$$

Für ein  $60^\circ$  Prisma in der Stellung des Minimums der Ablenkung, wie es hier verwendet wurde, ist  $\varphi = \varphi'$  und  $\psi = \psi' = 30^\circ$ , also

$$R = \frac{1 - \cos^4(\varphi - 30)}{1 + \cos^4(\varphi - 30)}.$$

Dabei ist, wenn  $n$  das Brechungsverhältnis ist,  $\varphi$  gegeben durch  $\sin \varphi = 2n$ . Kennt man die Dispersion des Prismas, so lassen sich die genannten Winkel leicht angeben und mit Hilfe der beiden Ausdrücke (die Minimumstellung ist selbstverständlich nur für eine Wellenlänge vorhanden, für die anderen müssen alle vier Winkel ausgerechnet werden) die Polarisation in den verschiedenen Spektralbezirken angeben. Sie war im vorliegenden Falle

für $\lambda$	0,688 $\mu$	0,502 $\mu$	0,446 $\mu$
$R =$	- 0,17	- 0,18	- 0,191

An dem beobachteten Polarisationsverhältnis des seitlich zerstreuten Lichtes ( $p$ ) ist wegen dieser Polarisation des auffallenden Strahles noch eine Korrektur anzubringen, die sich auf folgende Weise ergibt. Es seien  $r$  und  $l$  die Intensi-

täten in den zwei senkrecht zueinander stehenden Schwingungsrichtungen des einfallenden Strahles, so ist sein Polarisationsverhältnis

$$R = \frac{r - l}{r + l}$$

und wenn  $\alpha r$  und  $\beta l$  die entsprechenden Intensitäten des zerstreuten Teiles sind, so ist das beobachtete Polarisationsverhältnis

$$p = \frac{\alpha r - \beta l}{\alpha r + \beta l},$$

während der beim Einfall von unpolarisiertem Lichte sich ergebende Wert wäre

$$p = \frac{\alpha - \beta}{\alpha + \beta}.$$

Da sich aus dem Ausdruck für  $p$  ergibt

$$\frac{\alpha r}{\beta l} = \frac{1 + p}{1 - p}$$

und aus dem für  $R$  ebenso

$$\frac{r}{l} = \frac{1 + R}{1 - R},$$

so finden wir durch Division  $\alpha/\beta$  und daraus schließlich das Polarisationsverhältnis, wie es für einfallendes unpolarisiertes Licht sich ergäbe zu

$$P = \frac{(1 + p)(1 - R) - (1 - p)(1 + R)}{(1 + p)(1 - R) + (1 - p)(1 + R)} = \frac{p - R}{1 - pR}.$$

Die so korrigierten Werte sind in den Tabellen mit  $P_e$  bezeichnet.

Diese Polarisation kann aber durch Staub und die Wirkung der Lösung auf den Strahl ein wenig verringert werden.

Bei den folgenden Messungen wurde immer von der nämlichen Mastixlösung ausgegangen (1 g Mastix auf 87 g Alkohol)<sup>1)</sup>, von der die jeweils entsprechenden Volumina einem Liter Wasser zugesetzt wurden. Beobachtet wurde zunächst immer senkrecht zur Richtung des einfallenden Strahles. Zur Bestimmung des Winkels zwischen einfallendem und zerstreutem Licht waren an dem Becherglase Marken angebracht, die

1) Nach E. Brücke, Ann. d. Phys. 88. p. 382. 1853.

anvisiert wurden. Die ersten Messungen schienen nun die Pernterschen Angaben, daß das Polarisationsmaximum bei schwachen Lösungen im Grün liege, zu bestätigen. Es wurde nämlich beobachtet:

Tabelle I.

Lösung <sup>1)</sup>	a) von 25‰		b) 1‰		c) 1‰	
	<i>P</i>	<i>P<sub>c</sub></i>	<i>P</i>	<i>P<sub>c</sub></i>	<i>P</i>	<i>P<sub>c</sub></i>
Rotorange	0,914	0,939	0,906	0,932	0,89	0,921
Grün . . .	0,881	0,916	0,923	0,946	0,92	0,943
Blau . . .	0,874	0,913	0,914	0,944	0,895	0,928

Bei der stärkeren Lösung war das Maximum, ebenfalls wie bei Pernter, im Rot. Freilich war es bei Pernter erst bei 2 Proz. im Rot gefunden worden, hier aber schon bei 2 Prom.

Es wurden nun einige Messungen gemacht, um die Wirkung eines Zusatzes von groben Teilchen zu beobachten (Tab. 2). Bei a) und b) waren als grobe Teilchen zerriebene Kreideteilchen genommen, die durch einen durch die Mastixlösung getriebenen Luftstrom am Absetzen verhindert wurden. Der Luftstrom, obwohl seitlich des Strahles, hatte zur Folge, daß auch kleine Luftbläschen sich an der Reflexion beteiligten. Bei c) und d) waren als grobe Teilchen bloß diese Luftbläschen genommen. Sie bewirken eine Totalreflexion, verhalten sich also insoferne wesentlich verschieden von anderen Teilchen.

Tabelle 2.

Lösung	a)		b)		c)		d)	
	<i>P</i>	<i>P<sub>c</sub></i>	<i>P</i>	<i>P<sub>c</sub></i>	<i>P</i>	<i>P<sub>c</sub></i>	<i>P</i>	<i>P<sub>c</sub></i>
Rotorange . .	0,689	0,769	0,496	0,613	0,542	0,652	0,405	0,538
Grün . . . . .	0,676	0,764	0,54	0,665	0,589	0,695	0,436	0,579
Blau . . . . .	0,638	0,738	0,569	0,685	0,617	0,722	0,455	0,594

Die Mastixlösungen der Tab. 2 sind die gleichen wie in Tab. 1, nur durch den Zusatz der groben Teilchen verändert, müssen also paarweise miteinander verglichen werden. Man sieht wie bei b) und c) das Polarisationsmaximum durch die groben Teilchen vom Grün in das Rot verrückt wird. d) entspricht

1) Die Lösungen sind stets in (Volum-) Promille der alkoholischen Mastixlösung gegen Wasser gegeben.

der gleichen Lösung wie c), die am nächsten Tage mit stärkerem Luftstrome nochmals gemessen wurde.

Es mußte aber neben dem schon erwähnten Umstande, daß das Maximum im Rot schon bei so niedrigen Konzentrationen auftrat, auch auffallen, daß das Maximum im Grün nur deutlich auftritt bei einer Lösung (1c), die trotz gleicher Konzentration niedrigere Polarisationswerte aufwies als die vorhergehende. Das schien darauf hinzuweisen, daß hier ein Nebenumstand die Polarisation herabgesetzt habe, und zwar besonders im Blau und Rot. Auch bei weiteren Messungen erwiesen sich die erhaltenen Resultate als unsicher, was auf störende Wirkung falschen Lichtes schließen ließ, die ja auch bei Pernter sich bemerkbar gemacht hatte. Wurde nun die Lösung noch peinlicher gegen alles falsche Licht geschützt, wobei besonderes Augenmerk darauf gerichtet wurde, daß überhaupt möglichst wenig falsches Licht die Apparatur verließ und das Zimmer erhellte, so ergab sich nun auch für die 1 prom. Lösung (Tab. 3) das Maximum im Rot. Wurde nun absichtlich etwas falsches Licht zugelassen, so zeigte die gleiche Lösung das Maximum im Grün (Tab. 3, b). Konzentriertere Lösungen hatten natürlich stets stark ausgeprägtes Maximum im Rot (Tab. 3, c). Noch weniger als 1 Prom. enthaltende Lösungen konnten nicht gebraucht werden, weil das zerstreute Licht dann zu schwach war.

Tabelle 3.

Lösung	a) 1‰		b)		c) 5‰	
	P	P <sub>c</sub>	P	P <sub>c</sub>	P	P <sub>c</sub>
Rotorange	0,959	0,971	0,892	0,923	0,906	0,932
Grün . . .	0,946	0,963	0,932	0,958	0,858	0,90
Blau . . .	0,931	0,952	0,895	0,927	0,791	0,853

Danach wurde als festgestellt betrachtet, daß das Auftreten des Polarisationsmaximums im Grün bei solchen Mastixlösungen nur auf die Gegenwart von falschem Licht zurückzuführen ist und die diesbezüglichen Resultate Pernters durch diesen Umstand entstellt sind. Das falsche Licht wirkt depolarisierend, und zwar depolarisiert es im Grün am wenigsten, weil hier die Helligkeit des zerstreuten Lichtes (es kommt hierbei auf die subjektive Helligkeit an) am größten ist, wäh-

rend Rot und Blau sehr lichtschwach sind, also durch die Beimischung des falschen Lichtes stärker beeinflußt werden. Es ist dabei zu bedenken, daß eben der Polarisationsapparat nicht spektral zerlegt, so daß zu dem zu messenden Lichte einer Spektralregion das *ganze* falsche Licht hinzukommt.

Das Auftreten des Polarisationsmaximums im Rot wird schon von Pernter zurückgeführt auf das Vorhandensein von Teilchen, die im Rot eher als im Blau als klein gegen die Wellenlänge gelten können, demnach im Rot besser den Voraussetzungen der Rayleighschen Theorie entsprechen, also hier vollständiger polarisieren als bei den kürzeren Wellenlängen. Diese Erklärung erscheint *soweit* (vgl. dagegen p. 151) plausibel. Das starke Hervortreten dieses Maximums bei höher konzentrierten Lösungen ist jedoch wahrscheinlich auch auf die sekundäre Zerstreuung zurückzuführen. Die sekundäre Zerstreuung wirkt, da hier verschiedene Winkel zwischen einfallendem und abgebeugtem Lichte vorkommen, depolarisierend auf die (primär) unter  $90^\circ$  abgebeugten Strahlen. Da die Zerstreuung im Blau am stärksten ist, wird sie hier auch am meisten depolarisieren, also das Polarisationsmaximum im Rot sehr ausgeprägt werden.<sup>1)</sup>

Bei diesen sowie allen anderen Messungen wurde eine Änderung des Polarisationswertes mit der Intensität des einfallenden Lichtes, wie sie von Pernter (l. c.) beobachtet worden war, nie gefunden, obwohl die Intensität der Bogenlampe manchmal recht beträchtlich variierte. Um hierüber Gewißheit zu erlangen, wurde der Versuch gemacht, die Polarisation, ebenso wie dies bei Pernter geschehen, als Funktion der Intensität zu bestimmen. Zu diesem Zwecke wurde vor dem Polarimeter ein Kästchen mit einem Vergleichslichte angebracht, in ähnlicher Form, wie es von Martens (l. c.) angegeben wurde, um die Intensität messen zu können. Als Lichtquelle wurde der notwendigen Konstanz halber jetzt ein Nernstbrenner verwendet, dessen Lichtintensität durch Ändern der

---

1) Diese Einflüsse sollen, wie mir Hr. Dr. Ahlgrimm gütigst brieflich mitteilt, in einer von ihm begonnenen, aber wegen des Krieges unterbrochenen Arbeit besonders untersucht werden. Hr. Ahlgrimm, der hierbei besonders auf die Rolle der sekundären Zerstreuung hinwies, konnte ebenfalls kein Maximum im Grün bei geringen Konzentrationen finden; ebensowenig beobachtete er etwas von den weiter unten behandelten Variationen der Polarisation mit der Intensität.

Stromstärke variiert werden konnte. Es wurde im blaugrünen Teil des Spektrums beobachtet und vor das Vergleichslicht natürlich ein entsprechendes Filter zum Farbausgleich vorgeschaltet. Der Nernstbrenner liefert zwar geringere Helligkeit als die Bogenlampe; aber in einer 5prom. Lösung (bei einer solchen sollte der Effekt besonders deutlich auftreten) war die Helligkeit vollständig ausreichend. Zudem sollte sich der Einfluß ja besonders bei geringen Intensitäten zeigen. Das Resultat der aufeinanderfolgenden Intensitäts- und Polarisationsmessungen war, daß bei den relativen Intensitäten 1, 0,144, 0,057 und 0,03 die Polarisation die gleiche war; dabei war die Intensität so stark abgeschwächt worden, als es möglich war, ohne das Photometrieren unmöglich zu machen. Da mein Auge an das Messen schwacher Lichter sehr gewöhnt ist, war das ziemlich weit. Eine Abhängigkeit zwischen Polarisation und Intensität besteht demnach nicht, und es entfällt daher auch die Notwendigkeit nach hypothetischen Erklärungen dafür zu suchen. Ein Fluoreszenzlicht, wie es bei diesem Anlasse vermutet wurde, konnte ich übrigens bei Beleuchtung mit kurzwelligem Lichte (durch ein Ultraviolettfilter) nicht finden; außerdem würde es, da das Fluoreszenzlicht immer proportional der erregenden Intensität ist, bei schwächerer Zerstreuung ebenso zur Geltung kommen wie bei stärkerer. Die Erklärung der Pernterschen Ergebnisse muß meines Erachtens wieder in einer Beimengung falschen Lichtes gesucht werden.

Ich ging nun dazu über, den (schon oben kurz behandelten) Einfluß grober Teilchen auf die Polarisation zu untersuchen. Um als grobe Teilchen einen einigermaßen definierten Körper zu haben, nahm ich Körnchen von Weizenstärke; ihre Korngröße war ca. 25  $\mu$  (Extremwerte 8—40  $\mu$ ). Vor jeder Mes-

Tabelle 4.

Lösung	1°/∞Mastix		1°/∞Mastix u. 0,03 g Stärke		1°/∞Mastix u. 0,06 g Stärke		8°/∞Mastix u. 0,06 g Stärke		8°/∞Mastix u. 0,06 g Stärke	
	P	P <sub>c</sub>	P	P <sub>c</sub>	P	P <sub>c</sub>	P	P <sub>c</sub>	P	P <sub>c</sub>
Rotorange . . . .	0,951	0,965	0,576	0,68	0,452	0,578	0,663	0,749	0,771	0,83
Grün . . . . .	0,948	0,963	0,681	0,767	0,555	0,668	0,708	0,797	0,712	0,791
Blau . . . . .	0,94	0,958	0,736	0,813	0,603	0,711	0,751	0,824	0,676	0,768

sung mußte kräftig durchgerührt werden, um die Stärke am Absetzen zu verhindern. Die vorstehende Tabelle gibt die erhaltenen Polarisationswerte an einer Lösung, bei der sukzessive der Mastixgehalt und der Stärkezusatz erhöht wurde.

Aus den Zahlen der Tabelle ist zu ersehen, daß der Zusatz der Stärkekörnchen die Polarisation stark herabsetzt und das Polarisationsmaximum ins Blau verschiebt, entsprechend der Behauptung, daß grobe Teilchen im Blau am schwächsten depolarisieren. Starker Mastixzusatz bringt das Maximum wieder in das Rot zurück, ohne daß dabei aber eine Tendenz zur Ausbildung eines Maximums oder Minimums im Grün bemerkbar würde. Sofern diese Maxima und Minima im Grün wirklich so stark im Himmelslichte auftreten, wie dies Nichols (l. c.) angibt, bedarf dieser Punkt noch einer Aufklärung.<sup>1)</sup>

Des weiteren wurden noch mit weißem Lichte Polarisationsmessungen unter verschiedenen Winkeln gemacht. Es wurde das unter 30, 60, 75 und 90° gegen die Richtung des einfallenden Strahles zerstreute Licht beobachtet, in möglichst reiner Mastixlösung (destilliertes Wasser), sowie bei Zusatz von Stärketeilchen. Die folgende Tab. 5 gibt die erhaltenen Polarisationswerte.

Tabelle 5.

	1‰ Mastix	1‰ Mastix u. 0,03 Stärke	1‰ Mastix u. 0,06 g Stärke
90°	0,968	0,84	0,721
75	0,85	0,713	0,569
60	0,583	0,497	0,446
30	0,156	0,07	0,056

Fig. 1 enthält diese Werte graphisch dargestellt zum Vergleich mit der sich aus der Theorie für ein Medium mit sehr kleinen Teilchen ergebenden Polarisation (gestrichelte Kurve).

Aus dem Verlaufe der Kurven ist zu ersehen, daß die reinen Mastixlösungen in ihrem Verhalten den theoretisch geforderten Werten sehr nahe kommen.

1) Hr. Ahlgrimm vermutet (vgl. Anm. p. 157), daß diese in dem Zusammenwirken von Diffusion und Extinktion zu suchen sei; doch bleibt das Resultat seiner Untersuchung noch abzuwarten.

Trotzdem ein Teil der Pernterschen Ergebnisse nicht bestätigt werden konnte, führen die hier mitgeteilten Ergebnisse doch auch zu dem Schlusse, daß die Polarisations-

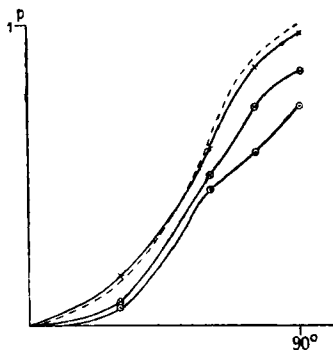


Fig. 1.

verhältnisse an trüben Medien zeigen, das Himmelslicht sei im wesentlichen als das in einem trüben Medium zerstreute Licht aufzufassen.

Freiburg i. Uechtland, 24. Juni 1918.

(Eingegangen 1. Juli 1918.)