

8. *Ein Chromoskop;* *von Leo Arons.*

Die Bedeutung der Newtonschen Interferenzfarben für die Chromatik ist früh erkannt worden.¹⁾ Freilich ist ihre exakte Bestimmung nicht ganz einfach; man hat deshalb statt ihrer den chromatischen Betrachtungen die sehr ähnlichen Farben zugrunde gelegt, die dünne Kristallplättchen im polarisierten Licht zeigen. Brücke²⁾ hat einen einfachen Apparat angegeben, den er „Schistoskop“ nennt und der dazu dient, „teils weißes, teils farbiges gemischtes Licht in zwei Teile zu spalten“. In diesem Apparat werden Gipsplättchen, die nach der natürlichen Spaltungsrichtung von einem Gipskristall abgelöst sind, zwischen ein polarisierendes Nicol und ein Rochonsches Prisma gebracht. Beim Anvisieren einer weißen Fläche zeigen die beiden Bilder Komplementärfarben; kommt das zu „spaltende“ Licht von einer gefärbten Fläche, so zeigen die Bilder Farbentöne, die für das Studium der von Brücke³⁾ als Merochromie bezeichneten Farbentechnik von Bedeutung sind.

Statt der Farben dünner Kristallplättchen kann man sich — wie mir scheint mit Vorteil — für die genannten Zwecke auch der Mischfarben bedienen, die senkrecht zur Achse geschnittene Quarzplatten in polarisiertem Licht zeigen. Abgesehen davon, daß der Quarz ein besonders beständiger, vorzüglich definierter Körper ist — Quarzplatten der hier zu benutzenden Art werden von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geeicht —, bieten die Erscheinungen an Quarzplatten den Vorteil, daß dieselbe Quarzplatte bei der Drehung des Analysators in einem Bereich von 180° eine Folge von

1) Vgl. bei Brücke, Pogg. Ann. 74. p. 582. 1849.

2) Brücke, Die Physiologie der Farben für die Zwecke der Kunstgewerbe p. 44. Leipzig 1887.

3) l. c. p. 262.

Farbentönen zeigt, die sich über das gesamte Farbengebiet verteilen, während ein Gipsblättchen nur eine Farbe und ihre Komplementärfarbe liefert, die bei allen möglichen Stellungen der Nicols gegeneinander und gegen die Richtung der Achse im Blättchen durch Weiß oder Schwarz ineinander übergehen. Als den wesentlichsten Vorteil aber betrachte ich es, daß bei der Verwendung von Quarzplatten jede einzelne Farbennuance, die überhaupt mit ihnen erhältlich ist, durch zwei sehr leicht zu bestimmende Zahlen gewissermaßen absolut festgelegt ist — nämlich durch die Dicke der Quarzplatte in Millimetern und den Winkel zwischen den Schwingungsrichtungen der beiden Nicols in Graden. Wird dieses Maß allgemein eingeführt, so läßt sich eine Farbennuance nach Angabe der zwei Ziffern überall und jederzeit wieder auffinden, ohne daß weitere Angaben nötig werden als die ein für allemal festgelegte Bestimmung, daß das benutzte Licht diffuses weißes Tageslicht ist; ich bediene mich bei meinen Versuchen des Lichtes, das von einer mineralogischen Strichplatte bei Tagesbeleuchtung ausgeht.

Für die Zwecke der Technik sind derartig festgelegte Farbentöne von Wichtigkeit, und wäre es auch nur, um die bisher vielfach benutzten farbigen Normalgläser, wenn nicht zu ersetzen, so doch zu kontrollieren und nach ihrem Ton genau zu bezeichnen. Derartige Gläser werden z. B. in den Kolorimetern¹⁾ bei Untersuchung von Bier, Petroleum, Erdölen, Parfümerien usw. verwendet. Für die Textilindustrie ist das „Tintometer“ von Loviband²⁾ bestimmt; Loviband mißt kolorimetrisch mit farbigen Glasplatten, deren jede mit einer Farbennummer und einer Stärkenummer bezeichnet ist.

Daß die Quarzfarben im Kolorimeter selbst verwendet werden können, beweist das Kolorimeter von Meisling.³⁾ Meisling benutzte, wie es hier vorgeschlagen, eine Quarz-

1) G. u. H. Krüss, Kolorimetrie und quantitative Spektralanalyse p. 10. Hamburg und Leipzig 1909; Schmidt & Haensch, Katalog III. A.-Kolorimeter. September 1903. p. 8.

2) Loviband, Journ. Soc. Dyers and Col. p. 186. 1887, zitiert in Löwenthal, Handbuch der Färberei 2. p. 1398.

3) Meisling, Zeitschr. f. analytische Chemie 43. p. 137. 1904; auch bei G. u. H. Krüss, l. c. p. 63.

platte zwischen zwei Nicolschen Prismen im Kolorimeter zur Bestimmung des Hämoglobingehaltes im Blute. Die Dicke der Quarzplatte ist nicht angegeben; ebensowenig in der Arbeit von Oerum¹⁾, der mit dem Meislingschen Apparat Bestimmungen von Eisen im Blut als Rhodaneisen und als Berliner blau ausführte. Hier findet sich nur die Bemerkung, daß für die beiden Versuchsreihen Winkel von 96 bzw. 43° die geeigneten Färbungen gaben. Die Quarzfarbe dient nur als Vergleichsmittel zwischen Lösungen mit bekanntem und unbekanntem Gehalt, nicht zur Angabe eines absoluten Wertes.

Will man sich der „Quarzfarben“ nur zu chromatischen Studien bedienen, so kann man eine beliebige einfache Polarisationseinrichtung benutzen, etwa wie bei dem oben erwähnten Brückeschen Schistoskop. Mit einem Satz von sechs Quarzplatten, die die Dicke $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, 2, 4 und 8 mm haben, kann man durch einfaches Übereinanderlegen der geeigneten — eine Orientierung der Platten ist im Gegensatz zu den Gipsplättchen nicht nötig, da sie senkrecht zur Achse geschnitten sind — alle Dicken von $\frac{1}{4}$ mm bis $15\frac{3}{4}$ mm in Stufen von je $\frac{1}{4}$ mm fortschreitend herstellen. Da mit jeder der 63 Dicken durch Drehung des Analysators im Bereich von 180° eine Farbensreihe erzeugt wird, so erhält man eine Fülle von Farbennuancen, die durch die reichhaltigste Sammlung von Gipsplättchen nicht erreicht werden kann. Sollen aber die einzelnen Farbennuancen, wie oben angegeben, quantitativ festgelegt oder nach Angabe der zwei Ziffern absolut genau aufgesucht werden können, so müssen nicht nur die Dicken der Quarzplatten sehr genau hergestellt sein, sondern es muß auch Vorsorge getroffen werden, daß die Platten von den Lichtstrahlen genau parallel der optischen Achse durchsetzt werden. Zu diesem Zwecke habe ich von der Firma Schmidt & Haensch einen Apparat bauen lassen, der im folgenden beschrieben wird. Vorher werden die Verhältnisse der Farben der Newtonschen Ringe, der dünnen Kristallplättchen und der Quarzplatten zueinander und zwei einfache Vorrichtungen besprochen, die diese Verhältnisse erläutern. Sie sind nach meinen Angaben von der Firma Leppin & Masche hergestellt worden.

1) Oerum, Zeitschr. f. analyt. Chem. 43. p. 147. 1904.

Die Newtonschen Farbenringe.

Nach der strengen von Poisson und Airy zum Abschluß gebrachten Theorie¹⁾ der Newtonschen Farbenringe ist bei senkrechtem Einfall im reflektierten Licht die Intensität des Lichtes von der Wellenlänge λ an der Stelle, die einer Luftschicht von der Dicke d entspricht, gegeben durch

$$J_r = \frac{4 a^2 r^2 \sin^2 2 \pi \frac{d}{\lambda}}{(1 - r^2)^2 + 4 r^2 \sin^2 2 \pi \frac{d}{\lambda}} .$$

Hierin bedeutet a die Amplitude des einfallenden Lichtes, r den „Schwächungskoeffizienten“ bei der Reflexion (Reflexionsvermögen). Da r für Glas und Luft etwa $0,04^2$) ist, so kann der Nenner unbedenklich gleich 1, mithin

$$J_r = 4 a^2 r^2 \sin^2 2 \pi \frac{d}{\lambda}$$

gesetzt werden. Für das durchgehende Licht kann man schreiben

$$J_a = a^2(1 - 4 r^2) + 4 a^2 r^2 \cos^2 2 \pi \frac{d}{\lambda} ,$$

da $J_r + J_a = a^2$ sein soll. Von der Absorption des Lichtes ist bei der Theorie abgesehen.

Der periodische Betrag lagert sich hier über einen konstanten, der fast gleich dem einfallenden ist; die Farben im durchgehenden Licht sind deshalb, wie bekannt, sehr matt. Fassen wir auch hier *nur* den periodischen Betrag ins Auge, so kann man sagen, daß die Intensität des Lichtes von bestimmter Wellenlänge von Ort zu Ort proportional $\sin^2 2 \pi (d/\lambda)$ im reflektierten, $\cos^2 2 \pi (d/\lambda)$ im durchgehenden Licht ist. Am gleichen Ort entsprechend einem bestimmten d wird die Intensität des Lichtes von verschiedener Wellenlänge verschieden sein; die dort zu beobachtende Farbnuance entspricht, wenn wir die Amplitude kürzer mit A bezeichnen, der „Summe“

$$\sum_{\lambda} A^2 \sin^2 2 \pi \frac{d}{\lambda}$$

1) Vgl. z. B. A. Wüllner, Lehrbuch der Experimentalphysik 4. p. 539 ff. 1879.

2) F. Kohlrausch, Lehrb. d. prakt. Physik 1910. p. 358.

für das reflektierte und der „Summe“

$$\sum_{\lambda} A^2 \cos^2 2\pi \frac{d}{\lambda}$$

für das durchgehende Licht, alles was wir über die Summen zunächst aussagen können, ist, daß die ihnen entsprechenden Farben komplementär sind. In Fig. 1 stellt die mit *N* bezeichnete Kurve die Intensitätsverteilung für die einzelnen

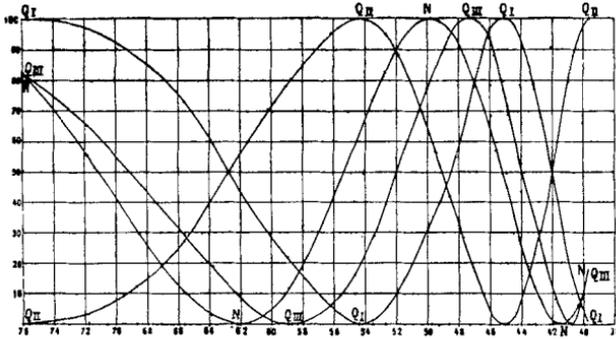


Fig. 1. $\frac{1}{4}$ der Originalzeichnung.

Wellenlängen an der Stelle dar, die einer Dicke der Luftschicht $d = 0,622 \mu$ entspricht; die Abszissen sind die Wellenlängen — beginnend mit der Fraunhoferschen Linie $A = 0,780 \mu$, schließend mit $H = 0,397 \mu$, wobei $0,02 \mu$ gleich 10 mm — die Ordinaten die Werte von $A^2 \sin(2\pi d/\lambda)$, wobei die Maximalintensität A^2 für alle Wellenlängen gleich 100 mm angenommen ist. Die Kurve hat Minima bei $0,622 \mu$ (Orange) und $0,415 \mu$ (Ultramarin), ein Maximum bei $0,498 \mu$ (Blaugrün); die Farbe ist ein grünlich Blau der dritten Ordnung.¹⁾ Man kann sich von der Intensitätsverteilung für die einzelnen Lichtarten auch in einer etwas anderen Art ein Bild machen. Man zeichne ein Spektrum so, daß der Abstand der einzelnen Fraunhoferschen Linien von einem bestimmten Nullpunkt *P* umgekehrt proportional der Wellenlänge ist. Man mache z. B. die Abstände $x = 20/\lambda$ cm, wenn λ in 0,001 mm ausgedrückt ist; in diesem Fall erstreckt sich das Spektrum zwischen

1) F. Kohlrausch, Lehrb. d. prakt. Phys. Tab. 26 (vgl. übrigens unten p. 806).

$A = 0,760 \mu$ und $H = 0,397 \mu$ von $x = 26,3$ bis $x = 50,4$ cm. Seine Höhe sei $y = 10$ cm. Über dieses Spektrum zeichne man die Kurve

$$y = A^2 \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda} = A^2 \sin^2 p x,$$

so daß z. B. $p x$ für $x = 50,4$ cm den Wert 360° habe. A^2 sei gleich 10 cm. Die wechselnde Höhe des Spektrums zwischen seinem unteren Rand, d. h. der x -Achse und der Kurve gibt dann ein Bild für die Intensität der einzelnen Farben im Newtonschen Ringe, der einer Dicke der Luftschicht von $d = 0,397 \mu$ entspricht bei reflektiertem Licht. Denn bei $x = 50,4$ cm ergibt sich für $\lambda = 0,397 \mu$

$$p x = \frac{2\pi d}{\lambda} = \frac{360 d}{\lambda} = 360, \text{ also } d = \lambda = 0,397 \mu$$

und alle übrigen Argumente sind nach der Konstruktion λ umgekehrt proportional.

Die Höhe des Spektrums zwischen der Kurve und dem oberen Rand, d. h. der Geraden $y = 10$ cm gibt die Intensitätsverteilung des entsprechenden Ringes im durchgehenden Licht. Denkt man sich die Kurve parallel der x -Achse um $\pi/2$ verschoben — in unserem Fall um $12,6$ cm —, so gilt das Umgekehrte.

Hätte man für $x = 50,4$ cm den Betrag von $p x = 720^\circ$ bzw. 180° angenommen, so würden die durch die neuen Kurven gekennzeichneten Intensitätsverteilungen Luftschichten von der Dicke $d = 2 \cdot 0,397 = 0,794 \mu$ bzw. $\frac{1}{2} \cdot 0,397 = 0,198 \mu$ entsprechen. Nennt man das Argument für $x = 50,4$ cm entsprechend $\lambda = 0,397 \mu$ allgemein x° , so liefert die Kurve die Intensitätsverteilung für die Schichtdicke

$$d = \frac{x \lambda}{360}.$$

Man kann also jede beliebige Kurve von der Form $y = A^2 \sin^2 p x$ über dasselbe Spektrum legen, um die Intensitätsverteilung für leicht berechenbare Newtonsche Ringe zu erhalten. Umgekehrt kann man auch die gleiche Kurve $y = A^2 \sin^2 p x$ benutzen, um die Intensitätsverteilung für verschiedene Newtonsche Ringe zu erhalten; man hat nur unter Festhalten des Nullpunktes P die Fraunhoferschen Linien so zu verschieben,

daß ihre Abstände von P umgekehrt proportional mit λ bleiben; verkleinert man von einer bestimmten Lage aus z. B. der für $d = 0,397 \mu$ diese Abstände im Verhältnis $q:1$, so gilt die durch die neue Lage gekennzeichnete Intensitätsverteilung für eine Luftschicht von der Dicke $q d$.

Von beiden Eigenschaften des Systems habe ich bei der Konstruktion eines Modelles Gebrauch gemacht. Der vertikal stehende Rahmen $ABGH$ (Fig. 2) von 116 cm Höhe und 52 cm Breite trägt einen um eine horizontale Achse durch A drehbaren Arm von 51 cm Länge, der durch eine einfache Vorrichtung in jeder Lage zwischen AB und AH festgehalten werden kann. Dieser Arm ist an acht Stellen durchbohrt zur Aufnahme von herabhängenden Fäden, die — in entsprechender Farbe gewählt — die Fraunhoferschen Linien A, C, D, E, F, G, H und zwischen F und G die blaue Strontiumlinie ($\lambda = 0,461 \mu$) vorstellen sollen. Ihre Abstände vom Drehpunkt des Armes betragen $x = 20/\lambda$ cm, wenn λ in 0,001 mm ausgedrückt ist, und liegen zwischen 26,3 cm für A

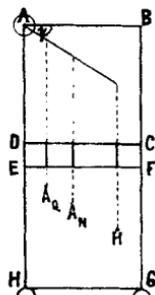


Fig. 2.

und 50,4 cm für H (vgl. oben p. 804) in Abständen, die zwischen 2,2 und 4,2 cm schwanken. Die Fäden sind 64 cm lang und werden durch um ihre Enden gepreßte Bleirohrstückchen gespannt gehalten. Die Stellen, an denen die Fäden aus dem Arm heraustreten, liegen auf einer Geraden, die durch den Drehpunkt A des Armes geht; hierdurch ist erreicht, daß bei der Drehung des Armes das Verhältnis der Abstände der Fäden vom Drehpunkt unverändert bleibt; bildet der Arm mit der Horizontalen AB einen Winkel von ψ° , so sind sämtliche Abstände im Verhältnis $\cos \psi:1$ verkleinert. Der Winkel kann bis auf 84° gebracht werden; die Abstände sind dann auf ein Zehntel ihres Wertes in horizontaler Lage gebracht. Denkt man sich den Arm mit den Fäden an der Rückseite des Rahmens, so ist die Vorderseite mit einer schwarzen Blechplatte bedeckt, die die Fäden nur in einem Ausschnitt $DCFE$ in Höhe von 10 cm sehen läßt. Der Winkel ψ kann an einem dem Arm parallelen Zeiger vor der Platte abgelesen werden. Die Platte trägt zwei Schienen, in die Schablonen eingesetzt

und vor dem Ausschnitt $DCFE$ verschoben werden können. Auf die Fläche, die eine Schablone liefern soll, wird zunächst eine der oben (p. 804) besprochenen Kurven

$$y = 10 \sin^2 px$$

so aufgezeichnet, daß nach dem Einsetzen die x -Achse parallel EF liegt; dementsprechend liegen die Maxima der Kurve auf DC . Dann wird der Teil der Fläche zwischen der x -Achse und der Kurve herausgeschnitten und die Schablone ist fertig. Ich habe drei solcher Schablonen (I, II, III) herstellen lassen, für die bei $x = 50,4$ cm das Argument px der Reihe nach 180 , 360 und 720° ist. Setzt man die Schablonen so ein, daß das erste Minimum der Sinuskurve auf E — senkrecht unter dem Drehpunkt A des beweglichen Armes — liegt, so gibt die sichtbare Länge der verschiedenfarbigen Fäden bei jeder Lage des Armes die Intensitätsverteilung der einzelnen Farben für einen bestimmten Newtonschen Ring im reflektierten Lichte: läßt man das erste Maximum auf E fallen, so erhält man die Verteilung für den entsprechenden Ring im durchfallenden Licht. Damit bei beiden Lagen der Schablone der ganze Ausschnitt $CDEF$ bedeckt bleibt, muß die Kurve auf der Schablone natürlich über einer längeren Basis als $50,4$ cm gezeichnet und ausgeschnitten sein.

Der horizontalen Lage des Armes entspricht für die drei Schablonen eine Dicke der Luftschicht von $0,198$, $0,397$ und $0,794 \mu$. Mit der Drehung des Armes bis zum Winkel $\psi = 84^\circ$ erhält man vor der Schablone III die Intensitätsverteilung für sämtliche Ringe, die den Dicken der Luftschicht zwischen rund $0,8$ und $0,08 \mu$ entsprechen. Der letztere Ring liegt mitten in der ersten Ordnung, der erstere nach Quinckes¹⁾ Tabelle noch in der dritten, nach Rolletts²⁾ bereits in der vierten Ordnung. Der Begriff der „Ordnung“ ist bei Newton nicht definiert; Quincke setzt die Grenzen der Ordnung dort an, wo die Ringe für $\lambda = 0,5506 \mu$ („mittleres Gelb“) im reflektierten Licht ein Minimum haben; Rollett macht eine derartige Angabe nicht; legt man die Grenzen möglichst in die Mitte zwischen den von ihm am Ende und am Anfang einer

1) G. Quincke, Pogg. Ann. 129. p. 179. 1866.

2) Rollett, Wiener Sitzungsber. 77. (3) p. 177. 1878.

jeden Ordnung angegebenen Ringen, so kommt man auf die entsprechende Minima für $\lambda = 0,5057$.¹⁾ Eine Kritik der Quinckeschen Tabelle, die sich auf die Beobachtungen von Newton und von Wertheim stützt, gibt Rollett l. c. p. 249; im folgenden werde ich nur von den Rollettschen Zahlen Gebrauch machen.

Kann man vor der Schablone III eine ganze Reihe von Ordnungen durchlaufen und zeigen, wie die Zahl der Maxima und Minima im Bereich des Spektrums mit wachsender Dicke der Luftschicht zunimmt, so erhält man mit der Schablone I Bilder der Intensitätsverteilung nur für Ringe der ersten Ordnung, entsprechend Luftschichtdicken von 0,02 bis 0,2 μ . Mit der Schablone II analysiert man am besten die wichtigen Farben bis über die Mitte der zweiten Ordnung hinaus. Natürlich ist es ein leichtes, weitere Schablonen herzustellen; mit einer solchen, bei der dem $x = 50,4$ cm das Argument $p x = 8 \pi = 1440^\circ$ entspricht, würde man bis an die sechste Ordnung gelangen und bei vier Maximis und ebensoviel Minimis dem Weiß höherer Ordnung bereits nahe sein.

Farben dünner Kristallplättchen.

Betrachtet man ein planparalleles Plättchen, das aus einem optisch einachsigen Kristall parallel zur Achse, oder aus einem optisch zweiachsigen parallel einer Hauptebene geschnitten ist, zwischen Nicolschen Prismen in parallelem monochromatischem Licht, bezeichnet man mit A und P die Schwingungsrichtungen der Nicols, mit K_1 und K_2 die Hauptschwingungsrichtungen in der Kristallplatte, ferner mit χ den Winkel zwischen A und P , mit φ den Winkel zwischen P und K_1 , so ist die Intensität des austretenden Lichtes gegeben durch

$$(1) \quad i = a^2 (\cos^2 \chi \cos^2 \Delta + \cos^2 (2 \varphi + \chi) \sin^2 \Delta);$$

hierin ist

$$\Delta = \frac{2 \pi d}{\lambda} (n_1 - n_2)$$

und d die Dicke des Plättchens, λ die Wellenlänge des Lichtes in Luft — beide in gleichem Maße gemessen —, endlich

1) Für die fünfte und sechste Ordnung liegen die Zahlen zu weit auseinander.

n_1 und n_2 die Brechungsexponenten für die beiden Hauptschwingungsrichtungen in der Platte z. B. für ein Gipsplättchen parallel der natürlichen Spaltungsebene gleich dem größten und kleinsten Brechungsexponenten. Gewöhnlich beobachtet man, während $\varphi = 45^\circ$, $\chi = 90^\circ$ oder 0° ist; in diesem Fall wird

$$i = a^2 \sin^2 \Delta \quad \text{bzw.} \quad i = a^2 \cos^2 \Delta.$$

Das Plättchen verhält sich gegenüber monochromatischem Licht wie eine Newtonsche Luftschicht von der Dicke

$$d_N = \frac{d}{2} (n_1 - n_2).$$

Die Erscheinung bei gekreuzten Nicols ($\chi = 90^\circ$) entspricht dem Fall des reflektierten Lichtes. Wäre $n_1 - n_2$ für alle Wellenlängen gleich, so würde die völlige Analogie auch gegenüber weißem Lichte gelten. Wie weit das der Fall, hat Rollett (l. c.) sehr ausführlich untersucht und zwar namentlich für Gips, dessen Brechungsexponenten von V. v. Lang¹⁾ sehr genau gemessen sind.

Rollett vergleicht seine Messungen mit den aus v. Langs dreigliedriger Interpolationsformel berechneten Werten, die ein Minimum der Differenz $n_1 - n_2$ für E zeigt. Da die Übereinstimmung nicht vollständig, benutzte er auch eine zweigliedrige Interpolationsformel, die v. Lang für ihn berechnete und die natürlich kein Minimum zeigt; aber auch mit den so erhaltenen Werten ist eine völlige Übereinstimmung nicht zu erzielen. Die Differenzen selbst sind sehr klein; die Werte für $n_1 - n_2$ sind nach v. Lang für die Fraunhoferschen Linien B bis G in Tab. 1 zusammengestellt.

Tabelle 1.

	gemessen	berechnet
<i>B</i>	0,009824	0,009807
<i>C</i>	9817	9793
<i>D</i>	9665	9766
<i>E</i>	9857	9756
<i>F</i>	9725	9771
<i>G</i>	9861	9856

1) V. v. Lang, Wiener Sitzungsber. (II) 76. p. 793. 1877; Tabellen und Formeln findet man in Beibl. 3. p. 200. 1879.

Die berechneten Werte entsprechen der Formel für die Brechungsexponenten

$$n = x + \frac{y}{\lambda^2} - \frac{z}{\lambda^4},$$

worin x, y, z nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt sind. Für unsere Betrachtung kann unbedenklich $n_1 - n_2$ als konstant gelten; v. Lang selbst schreibt später¹⁾, daß nach seinen Messungen „die Differenz $\mu_1 - \mu_2$ (d. h. zwischen dem größten und kleinsten Brechungsexponenten des Gipses) in der Mitte des Spektrums ein Maximum aufweist und daher nahezu für alle Farben einen konstanten Wert (0,0098) hat“. In der Tat ist auch bei Rollett die Übereinstimmung der empirisch gefundenen Werte für Gips und Luft eine recht gute. Zwar sagt Rollett selbst (l. c. p. 226): „Aus dem Vergleich beider wird man aber leicht entnehmen, daß auch die Verteilung der Farben in beiden Fällen etwas *abweicht*.“ Für die *Reihenfolge* der Farben trifft das jedenfalls nicht zu (vgl. l. c. Taf. I). Ein Gipsplättchen der angegebenen Art von der Dicke d zeigt also zwischen gekreuzten Nicols, wenn seine Achsen mit den Schwingungsrichtungen der Nicols Winkel von 45° bilden, wesentlich dieselbe Farbe wie der Newtonsche Ring im reflektierten Licht, der einer Luftschicht von der Dicke

$$d_L = \frac{d}{2} \cdot 0,0098 = 0,0049 d$$

entspricht. Das oben besprochene Modell erläutert also auch das Mischungsverhältnis der einzelnen Spektralfarben in den häufig benutzten Farben der Gipsplättchen — die entsprechenden Dicken sind nahezu zweihundertmal so groß wie die oben angegebenen Dicken der Luftschichten. Nennen wir die so erhaltene Farbe die Grundfarbe, so liefert die nämliche Platte in gleicher Lage zwischen parallelen Nicols die Komplementärfarbe der Grundfarbe. Ändert man die Stellung der Nicols gegeneinander und gegen die Achsen der Platte, so erhält man *keine* anderen Farben als diese beiden. Die allgemeine Formel (1) (vgl. oben p. 807) läßt sich auch schreiben

$$(2) \quad i = a^2 [\cos^2 \chi + \sin^2 \Delta \{ \cos^2 (2 \varphi + \chi) - \cos^2 \chi \}];$$

1) V. v. Lang, Einleitung in die theoretische Physik II. Aufl. p. 880. Braunschweig 1891.

ist der Ausdruck in der geschwungenen Klammer größer als Null, so liefert bei der „Summierung“ über alle Wellenlängen des sichtbaren Spektrums das zweite Glied rechts die Grundfarbe, nur ist die Intensität derselben im Verhältnis

$$\{\cos^2(2\varphi + \chi) - \cos^2\chi\}$$

geschwächt. Das von der Wellenlänge unabhängige Glied liefert Weiß von der Intensität $a^2 \cos^2\chi$. Ist

$$\cos^2(2\varphi + \chi) < \cos^2\chi,$$

so muß die Formel geschrieben werden

$$(3) \quad i = a^2 [\cos^2(2\varphi + \chi) + \cos^2\chi \{\cos^2\chi - \cos^2(2\varphi + \chi)\}];$$

sie sagt aus, daß die Komplementärfarbe mit geschwächter Intensität über Weiß von der Intensität $a^2 \cos^2(2\varphi + \chi)$ gelagert erscheint. Der Übergang findet durch mehr oder weniger helles Weiß (Grau) statt, wenn

$$\cos^2\chi = \cos^2(2\varphi + \chi)$$

wird; ist hierbei außerdem noch $\chi = 90^\circ$ (gekreuzte Nicols, die Kristallachsen den Schwingungsrichtungen parallel), so ist der Übergang Schwarz. Im Brückeschen Schistoskop liefert also jedes Gipsplättchen nur zwei Farben.

Es sei noch bemerkt, daß es nicht leicht ist, Gipsplättchen in der jedesmal erforderlichen Dicke absolut genau herzustellen. So erklären Nägeli und Schwendener¹⁾, daß „oft die gleichnamigen Nummern derselben Fabrik einen merklich abweichenden Ton hervorrufen“:

Farben von Quarzplatten (senkrecht zur Achse geschnitten).

Geht einfarbiges Licht zwischen zwei Nicolschen Prismen, deren Schwingungsrichtungen miteinander den Winkel γ bilden, parallel zur Achse durch eine senkrecht zur Achse geschnittene Quarzplatte von der Dicke δ Millimeter, so wird seine Intensität beim Austritt durch

$$J = a^2 \cos^2(\varphi_i \delta - \gamma)$$

1) Nägeli u. Schwendener, Das Mikroskop, II. Aufl., p. 330. Leipzig 1877.

ausgedrückt sein, worin φ_λ die spezifische Drehung (Drehung in 1 mm Quarz) für Licht von der betreffenden Wellenlänge ist; γ ist hierbei vom Polarisator zum Analysator im Sinne der Drehung des Quarzes gerechnet. Das Argument ($\varphi_\lambda \delta - \gamma$) kann negativ werden; es handelt sich stets nur um den absoluten Wert, da hier und im folgenden nur die Quadrate der trigonometrischen Funktionen auftreten. Zweckmäßig ist es, den Winkel, der die Stellung des Analysators zum Polarisator festlegt, von der zur Schwingungsrichtung des Polarisators Senkrechten aus ebenfalls im Drehungssinn des Quarzes zu rechnen. Nennen wir ihn α , so wird

$$J = a^2 \cos^2 \left(\varphi_\lambda \delta - \alpha + \frac{\pi}{2} \right) = a^2 \sin^2 (\varphi_\lambda \delta - \alpha).$$

Hat man es mit weißem Licht zu tun, so entspricht die Farbe, in der die Quarzplatte erscheint, der „Summe“

$$\sum_{\lambda} \sin^2 (\varphi_\lambda \delta - \alpha),$$

wenn die Intensität des Lichtes jeder Wellenlänge vor dem Eintritt in das System gleich 1 gesetzt wird. Für zwei Winkel α , die um 90° verschieden sind, erhält man Komplementärfarben, da die einzelnen Glieder sich zu Eins ergänzen. In den Zwischenlagen ergeben sich stets andere Farben, so daß beim Durchlaufen von 180° mit derselben Quarzplatte eine große Reihe verschiedener Farbnuancen erhalten wird. Die spezifische Drehung des Quarzes ist für eine große Zahl von Wellenlängen gemessen. Im sichtbaren Teil des Spektrums wird diese Größe sehr genau durch die Formel von Boltzmann¹⁾

$$\varphi_\lambda = \frac{a}{\lambda^2} + \frac{b}{\lambda^4} \quad \begin{array}{l} a = 7,108, \\ b = 0,14771 \end{array}$$

wiedergegeben. Die Formel zeigt, daß die Quarzfarben — dieses kurzen Ausdruckes werde ich mich in der Folge bedienen — theoretisch nirgends mit den Farben der Newtonschen Ringe übereinstimmen können, praktisch werden in bestimmten Fällen die Nuancen nicht unterscheidbar sein. In Fig. 1, in der die mit N bezeichnete Kurve die Intensitäts-

1) Vgl. Landolt, Opt. Drehungsvermögen, II. Aufl. p. 128. 1898.

verteilung der verschiedenen Farben für den Newtonschen Ring entsprechend einer Luftschicht von der Dicke $d = 0,622 \mu$ im reflektierten Licht darstellt (vgl. oben p. 803), sind einige mit Q bezeichnete Kurven gezeichnet, die der Intensitätsverteilung für eine Quarzplatte von der Dicke $\delta = 7,01$ mm bei verschiedenen α entsprechen.

Für Q_I ist $\alpha = 0^\circ$ (gekreuzte Nicols),

„ Q_{II} „ $\alpha = 90^\circ$ (parallele Nicols).

Die Kurve Q_I setzt bei $A = 0,760 \mu$ fast mit dem Maximalwert ein, $\varphi \delta$ ist hier $88,7^\circ$, das Maximum liegt bei $0,756 \mu$; sie hat ein Minimum im Grün bei $\lambda = 0,544$, ein zweites Maximum im Blau bei $\lambda = 0,451$ und ist im äußersten Violett wieder sehr nahe am Minimum: für $H = 0,397 \mu$ ist $\varphi \delta$ $358,8^\circ$, die Mischfarbe ist ein helles Rosaviolett; Q_{II} stellt das komplementäre Grün dar.

Die Dicke ($\delta = 7,01$ mm) ist für die Quarzplatte so gewählt, daß beim Drehen des Analysators — Änderung des Winkels α — zweimal beide Endpunkte der Q -Kurve bei A und H mit den beiden Endpunkten der N -Kurve zusammenfallen.¹⁾ Das gilt für $\alpha_1 = 23,4$ und $\alpha_2 = 154^\circ$. In der Figur entspricht die Kurve Q_{III} dem Werte α_2 . Sie stellt eine völlig andere Mischfarbe dar; sie weist gleichzeitig auf einen gewissen Parallelismus und auf den Unterschied mit der gewählten Newtonfarbe hin. Während, wie gesagt, die Endpunkte der Kurve Q_{III} mit denen der Kurve N zusammenfallen, erreicht die Kurve Q_{III} ihr Minimum im Gelb erst bei $\lambda = 0,586$, während N das Minimum schon im Orange bei $\lambda = 0,622$ hat. Die Maxima liegen für N im Blaugrün bei $\lambda = 0,498$, für Q_{III} im Blau bei $\lambda = 0,473$; noch näher liegen die zweiten Minima im Violett beieinander: für N bei $\lambda = 0,415$, für Q_{III} bei $\lambda = 0,408$; N charakterisiert nach Rollett ein Grün. Q_{III} entspricht einem Hellblau nahe dem Grünlichblau. Durch einen anderen Wert von α könnte man die Quarzfarbe der Newtonschen Farbe noch näher bringen, indem man etwa das erste Minimum von Q auf das Minimum von N im Orange fallen ließe oder die beiden Maxima zur

1) Vgl. unten p. 813.

Deckung brächte. Wählt man auch eine andere *Dicke* der Quarzplatte, so kann man erreichen, daß für ein bestimmtes α die *beiden* Minima beider Kurven aufeinander fallen. Man hat ganz allgemein für die Rechnung anzusetzen

$$(1) \quad \begin{cases} \frac{2\pi d}{\lambda_1} = \varphi_{\lambda_1} \delta - \alpha, \\ \frac{2\pi d}{\lambda_2} = \varphi_{\lambda_2} \delta - \alpha, \end{cases}$$

worin wie bisher d die Dicke der Newtonschen Luftschicht im gleichen Maße wie die Wellenlängen λ_1 und λ_2 für die beiden Minima bedeutet. Es ergibt sich

$$(2) \quad \begin{cases} \delta = \frac{360 d (\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1 \lambda_2 (\varphi_1 - \varphi_2)}, \\ \alpha = 360 d \frac{\varphi_1 \lambda_1 - \varphi_2 \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2 (\varphi_1 - \varphi_2)}. \end{cases}$$

Natürlich kann das Zusammenfallen zweier Minima beider Kurven auch erreicht werden, wenn man in den Gleichungen (1) auf einer Seite beliebige Vielfache von π hinzufügt; damit würde aber auf die Ähnlichkeit der Farben verzichtet sein; für diese ist es unerläßliche Bedingung, daß für beide Kurven zwei *aufeinanderfolgende* Minima ins Auge gefaßt werden.

In dem vorliegenden Falle gestaltet sich die Rechnung sehr einfach. Es ist

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0,415, & \lambda_2 &= 0,622, & d &= 0,622, \\ \varphi_1 &= 47,1, & \varphi_2 &= 19,5. \end{aligned}$$

Die linken Seiten der Gleichungen (1) sind 540 und 360°, mithin

$$\begin{aligned} \varphi_1 \delta - \alpha &= 540, \\ \varphi_2 \delta - \alpha &= 360, \\ \hline \delta &= \frac{180}{\varphi_1 - \varphi_2} = 6,52, \\ \alpha &= \varphi_1 \delta - 540 = -233^\circ; \end{aligned}$$

auf dem Teilkreis ist $\alpha + n \cdot 180$ aufzusuchen; hier ist $n = 2$ und $\alpha = 127^\circ$ zu wählen. Das Maximum liegt bei $\lambda = 482$. Die entsprechende Quarzfarbe ist immer noch ein Blaugrün; sie liegt aber der grünen Farbe des Newtonschen Ringes erheblich näher als die durch Q_{III} dargestellte.

Die vorangehende Betrachtung führt zu einer anderen Vergleichsmöglichkeit zwischen den Farben Newtonscher Ringe und den Quarzfarben. Der *Charakter* der Farben ist bedingt durch die *Zahl* der Maxima und Minima, die die entsprechenden Kurven haben; diese hängt wieder von dem Wertebereich ab, den das Argument der trigonometrischen Funktion zwischen den äußersten Wellenlängen des sichtbaren Spektrums durchläuft. Der Wertebereich ist für die Newtonschen Farben gegeben durch

$$W_N = 2 \pi d \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right);$$

nimmt man für die Wellenlängen die Werte für die Linien *A* und *H*, so findet sich

$$W_N = 2 \pi d \cdot 1,205 = 2,41 \pi d,$$

wenn *d* in μ ausgedrückt ist. Für die Quarzfarben ist

$$W_Q = (\varphi_{\lambda_2} - \varphi_{\lambda_1}) \delta$$

und für die Linien *A* und *H*

$$W_Q = (51,2 - 12,7) \delta = 38,5 \delta = 0,214 \pi \delta,$$

wenn δ in Millimetern gegeben.

Für die verschiedenen Wertebereiche des Argumentes, das kurz mit *K* bezeichnet werde, ergibt sich:

- I. $W < \pi/2$; es sind drei Fälle zu unterscheiden.
 - a) $\sin^2 K$ — (für $\cos^2 K$ gilt genau die gleiche Betrachtung) — ist an einer Stelle des Bereiches gleich Eins; dann kann es nirgends 0 sein; sein kleinster Wert sei ε ; dann entspricht der Bruchteil ε des zum Auge gelangenden Lichtes natürlichem Weiß; ihm sind die Farben aufgelagert, die deshalb einen hellen, aber nicht sehr ausgesprochenen Charakter haben;
 - b) $\sin^2 K$ hat an einer Stelle den Wert 0, dann kann es nirgends gleich Eins sein; sein größter Wert sei η ; der Bruchteil $1 - \eta$ ergibt schwarz und wirkt nicht auf das Auge. Die Farben sind ausgesprochen — bei verminderter Helligkeit;

- c) $\sin^2 K$ wird weder 0 noch 1; sein kleinster und größter Wert seien ε und η ; bei um den Bruchteil $1 - \eta$ verminderter Gesamthelligkeit liegen die Farben auf einem durch den Bruchteil ε gelieferten Weiß.

II. $\pi/2 < W < \pi$. Der unter I. c) besprochene Fall ist ausgeschlossen; die unter I. a) und I. b) erwähnten Fälle sind möglich; dazu kommt der Fall, daß $\sin^2 K$ sowohl Null wie Eins wird — das ganze Licht wird in den ausgesprochenen Farben zur Geltung kommen.

III. $W > \pi$. Stets wird innerhalb des Bereiches $\sin^2 K$ sowohl 0 wie 1. Mit wachsender Zahl der Maxima und Minima werden die Farben verwaschener, um schließlich in das Weiß höherer Ordnung überzugehen.

In der Tab. 2 enthält die erste Spalte bestimmte Größen des Wertbereiches — Vielfache von $\pi/2$, die zweite die Dicken der Luftschicht für den entsprechenden Newtonschen Ring in μ , die dritte die Dicke der Quarzplatte mit gleichem Bereich in Millimetern, die vierte die Zahl der Ordnung, der der Newtonsche Ring nach Rollett angehört. Die Werte geben eine Übersicht darüber, wie die Quarzfarben in ihrem *allgemeinen Charakter* den Newtonschen Farben entsprechen; es bleibt immer zu beachten, daß jedem d nur eine bestimmte Farbe, jedem δ eine ganze Farbenfolge entspricht. Vor allem zeigt die Tabelle auch, daß es für chromatische Arbeiten zwecklos wäre, mit den Quarzdicken über 15—16 mm hinauszugehen.

Tabelle 2.

W	d in μ	δ in mm	Ordnung
$\pi/2$	0,208	2,34	I
π	0,415	4,67	II
$3/2 \pi$	0,622	7,01	III
2π	0,830	9,34	IV
$5/2 \pi$	1,037	11,68	IV—V (Grenze)
3π	1,245	14,01	V
$7/2 \pi$	1,452	16,35	VI

Auch mit dem oben beschriebenen Modell zur Analyse der Newtonschen Farben läßt sich die Beziehung zwischen diesen und den Quarzfarben erläutern. Zu dem Zweck ist der bewegliche Arm nicht aus einem Stück gefertigt; das freie Ende, das die Fäden trägt, ist auswechselbar. Für die Analyse der Quarzfarben wird es ersetzt durch ein gleiches, das aber zur Aufnahme der Fäden in anderen Abständen durchbohrt ist. Die Abstände der Fäden vom Drehpunkt A müssen jetzt den spezifischen Drehungen für die betreffenden Wellenlängen proportional sein. Wählt man für H den gleichen Abstand von 50,4 cm, wie bei dem Apparat für die Newtonschen Farben, so sind die einzelnen Abstände in Zentimetern fast *gleich* den spezifischen Drehungen — sie sind im Verhältnis $\frac{50,4}{51,2}$, also um etwa 1,6 Proz. kleiner. Sie liegen von 12,5 cm Abstand für die A -Linie bis 50,4 cm für H in gegenseitigen Abständen, die zwischen 4,2 und 8,4 cm schwanken. Legt man Schablone II ein, die bei horizontaler Lage des drehbaren Armes einer Quarzdrehung von 360° für die H -Linie entspricht, und zwar so, daß das Kurvenmaximum senkrecht unter dem Drehpunkt A liegt, so gibt die Kombination die Intensitätsverteilung der einzelnen Farben in der Mischfarbe für eine Quarzdicke

$$\delta = \frac{360}{51,2} \text{ mm} = 7,03,$$

oder rund 7 mm und zwar bei gekreuzten Nicols. Wird der Arm gesenkt, so daß er mit der Horizontalen den Winkel ψ bildet, so entspricht die Intensitätsverteilung der Quarzdicke $\delta \cos \psi$; da man bis zu $\psi = 84^\circ$ gehen kann, erhält man mit der Schablone II die Intensitätsverteilung für alle Quarzdicken zwischen 7 und 0,7 mm. In der gleichen Lage entsprechen die Schablonen I und III den Quarzdicken von 3,5 bis 0,35 und 14 bis 1,4 mm. Läßt man ein Maximum der Schablonenkurve senkrecht unter dem Drehpunkt liegen, so erhält man die Komplementärfarben (parallele Nicols). Diese beiden Lagen der Schablonen waren für die Newtonschen Ringe (bzw. die Gipsfarben) allein zulässig. Anders hier: Verschiebt man von der Lage aus, in der ein Minimum der Kurve senkrecht unter A also bei E (Fig. 2) liegt, die Schablone in der Richtung von E

nach F bis wieder ein Minimum der Kurve bei E liegt, so läßt man den Winkel α in der Formel für die Quarzfarben

$$\sum_{\lambda} \sin^2(\varphi_{\lambda} \delta - \alpha)$$

alle Werte von 0 bis 180° durchlaufen. Um den Winkel α ablesen zu können, ist auf der festen Platte längs EF eine Teilung angebracht. Von E aus gerechnet ist die Länge von 50,4 cm in 360 Teile geteilt — bei E liegt der Nullpunkt. Wird das Minimum auf den n^{ten} Teilstrich gerückt, so hat bei der Schablone II α den Wert n° , bei den Schablonen I bzw. III den Wert $n/2$ bzw. $2n^{\circ}$. Man kann hiermit leicht faßlich zeigen, wie durch Drehung des Analysators die Farbenfolge entsteht, indem die Maxima und Minima durch das ganze Spektrum wandern, während bei den Newtonschen Ringen nur Maxima und Minima ihre Lage vertauschen können (reflektiertes und durchgehendes Licht).

Um die Mischung der einzelnen Farben in den Quarzfarben noch augenfälliger darzustellen, habe ich nach dem Verfahren von Biot¹⁾ in einem Kreise mit dem Radius 6 cm von einem festen Radius aus die Drehungswinkel für eine Reihe von Wellenlängen abgetragen und die Sektoren bis zur Peripherie eines konzentrischen Kreises von 1 cm Radius mit Wasserfarben gefärbt. Biot benutzte die alte Newtonsche Einteilung des Spektrums; ich habe mich der von Helmholtz²⁾ angegebenen bedient. Nach Helmholtz liegen charakteristische Grenzen im Spektrum bei den Fraunhoferschen Linien A , C , D , E , b , F , G und H ; außerdem gibt er die ungefähre Lage von drei weiteren schätzungsweise nach den Distanzen von den Nachbarn an und zwar zwischen C und D , D und E , F und G . Für die Farben innerhalb dieser Grenzen gibt Helmholtz der Reihe nach die Bezeichnungen: 1. Rot, 2. Orange, 3. Goldgelb (Gelbrot mit überwiegendem Gelb), 4. reines Gelb, 5. Grüngelb, 6. reines Grün, 7. Blaugrün, 8. Cyanblau, 9. Indigblau, 10. Violett. Für 1. bis 4., 6., 8.

1) Biot, Mém. sur les phénomènes rotatoires opérés dans le cristal de roche. Mém. de l'Acad. des Sciences de l'Inst. de France 20. p. 221. 1849.

2) v. Helmholtz, Physiol. Optik, II. Aufl. p. 278/279 u. p. 287. 1896.

und 9, nahm ich die von Helmholtz empfohlenen Metallfarben Zinnober, Mennige, Bleiglätte¹⁾, Chromgelb, Scheelsches Grün, Berlinerblau und Ultramarin; für Violett benutzte ich Magenta; Grüngelb und Blaugrün — schnelle Übergänge — deutete ich durch Farbenmischung an. Die spezifischen Drehungen für die Fraunhoferschen Linien sind gegeben; für die eingeschalteten Grenzen nahm ich sie zu 20° , $23,2^{\circ}$ und $36,1^{\circ}$ an. Die Zeichnungen wurden für die ganzzahligen Dicken der Quarzplatten von 1—15 mm ausgeführt. Fig. 3 macht die Abgrenzung der farbigen Sektoren für die Quarz-

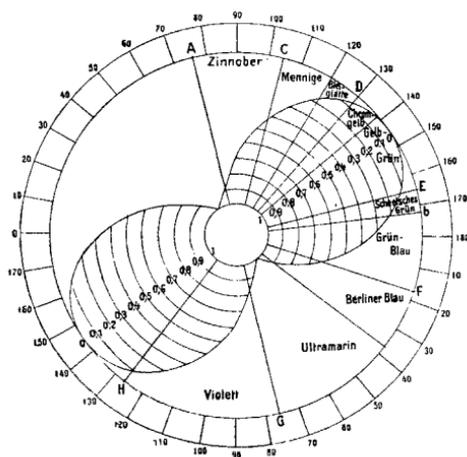


Fig. 3.

dicke 6 mm ersichtlich. Von 10 mm an greift das Violett, von 12 mm an auch das Blau über das Rot hinaus; nach Biots Vorgang habe ich die übergreifenden Teile in einem konzentrischen Ringe — äußerer Radius 7 cm — angedeutet. Biot hat seine Zeichnungen für Farbenberechnungen benutzt; ich habe ein anderes Verfahren eingeschlagen. Ich schnitt ein Stück Papier aus (Fig. 3), das den Kreis von 6 cm Radius so überdeckt, daß zwischen dessen Peripherie und dem Papierrand auf jedem Radius ein Stück von der Länge $5 \sin^2 \varphi$ frei

1) Diese Farbe ist im Handel nicht erhältlich; die Firma Günther Wagner-Hannover hat sie liebenswürdigerweise für mich hergestellt.

bleibt, wenn φ den Winkel des Radius mit einem festen Radius bedeutet. Die Gleichung der Begrenzungskurve ist $r = a - c \sin^2 \varphi$, worin im vorliegenden Fall $a = 6$, $c = 5$ cm ist. Legt man die derart geschnittene Schablone so auf den Kreis, daß ihr Mittelpunkt auf dessen Mittelpunkt, ihre Längsachse auf den festen Radius fällt, von dem aus die Drehungswinkel im Kreise abgetragen sind, so gibt der unbedeckt bleibende Teil der farbigen Sektoren ein Bild von der Intensitätsverteilung in der Mischfarbe der betreffenden Quarzplatte für gekreuzte Nicols. Dreht man die Schablone um den Winkel α in der Richtung von Rot nach Blau (im Sinne der Quarzdrehung), so entspricht das der gleichen Drehung des Analysators — in jeder Lage erhält man aus den freibleibenden Sektoren ein Bild der Intensitätsverteilung entsprechend der „Summe“

$$\sum_i \sin^2 \{ \varphi_i \delta - \alpha \}.$$

In Fig. 3 ist die Grenzcurve der Schablone in der Lage gezeichnet, die dem Winkel $\alpha = 144^\circ$ entspricht (Empfindliche Farbe für die Quarzdicke 6 mm, vgl. unten p. 825 f.). Der Winkel α läßt sich auf einer Kreisteilung (von 10 zu 10^o) ablesen; um auch für jede Farbe die Intensität in Teilen der Maximalintensität, die überall gleich Eins genommen ist, in Zahlen ablesen zu können, sind auf der Schablone die Kreisbögen mit den Radien 1,5, 2, 2,5 cm usw. um den Mittelpunkt gezeichnet. Für die Quarzplatten von 10—15 mm Dicke muß man sich freilich die im äußeren Ringe angedeuteten Farben im gezeichneten Umfange auf die entsprechenden Sektoren gelegt denken. Bis 9 mm Dicke wirkt das Bild unmittelbar. Auch diese Demonstrationsvorrichtung ist von der Firma Leppin & Masche für mich angefertigt worden; die Sektoren sind aus bestem Papier geschnitten und aufgeklebt, die farbigen Papiere sind leider nicht in der wünschenswerten Vollkommenheit erhältlich. Das Brettchen, auf das die buntbeklebten Kreisscheiben aufgelegt werden, trägt in der Mitte einen Stift, über den die in der Mitte durchbohrte, aus Karton geschnittene Schablone geschoben wird und um das sie drehbar ist.

Der Apparat (Chromoskop).

Der erste Apparat, dessen ich mich bediente, bestand aus einem starkwandigen Messingrohr von 2,5 cm lichter Weite und 11 cm Länge, in dessen unteres Ende ein engeres Schutzrohr zum Fernhalten fremden Lichtes eingeschraubt werden konnte. In dem Rohr war der Polarisator befestigt; seiner Schwingungsrichtung entsprach der feste Index am vorderen Ende; der mit Teilkreis versehene Analysator befindet sich in einem etwas engeren Rohr, mit dem er in das Hauptrohr gut drehbar eingeschoben wird. Die Teilung geht von 2 zu 2° zweimal von 0 bis 180°, und zwar in einem Sinne, der der Drehung der benutzten Quarzplatte entgegengesetzt ist. Steht ein Nullpunkt der Teilung dem Index gegenüber, so sind die Nicols gekreuzt; in jeder Stellung liest man am Index den Winkel α der Formel $\sum_k \sin^2(\varphi_k \delta - \alpha)$ ab. Die Quarzplatten werden in einem doppelwandigen Rohrstück übereinander geschichtet, das genau in das Hauptrohr hineinpaßt und bei einer Länge von 3 cm eine lichte Weite von 1,6 cm hat. Die kreisförmigen Quarzplatten haben den gleichen Durchmesser (1,6 cm); sie werden jede für sich durch ebene, 1 mm dicke Messingringe festgehalten, die, an einer Stelle aufgeschnitten, gut federnd in dem Rohr liegen. Ringe und Platten werden auf ebener Unterlage mittels eines passenden Rohrstückes bis an das Ende des kurzen Rohres hinabgedrückt; nach Einführung des kurzen Rohres in das Hauptrohr, wozu natürlich jedesmal das Analysatorstück entfernt werden muß, liegen die Platten senkrecht zur Rohrachse. Zur Regulierung des Strahlenganges und zur mäßigen Vergrößerung des Gesichtsfeldes haben Schmidt & Haensch auf Grund ihrer Erfahrungen vor dem Polarisator und hinter den Quarzplatten je eine kleine Glaslinse angebracht; die erstere wird durch das erwähnte Schutzrohr gegen eine Blende gedrückt, die andere mit den Quarzplatten in das kurze Rohr eingelegt und wie diese festgehalten. Das kurze Rohr mit den Quarzplatten, die in der Stärke von $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, 2, 4 und 8 mm beigegeben sind, ist der Hauptteil des Apparates. Er kann in jedem einfachen Polarimeter mit drehbarem Nicol benutzt werden, indem man ihn in die zur Aufnahme der Flüssigkeitsröhre bestimmte Rinne legt.

Man hat nur dafür zu sorgen, daß bei jedem Einlegen die Quarzplatten senkrecht zur Achse des Apparates stehen. Ob das der Fall, läßt sich durch eine Messung der Drehung von Na-Licht leicht feststellen. Ist durch geeignete Vorrichtungen dafür gesorgt, daß das Rohr stets die gleiche Lage annimmt, so ist das Chromoskop fertig.¹⁾ In meinem Apparat kann zum Studium der Komplementärfarben statt des Analysators ein Rochonsches Prisma eingeschoben werden. Durch eine auswechselbare Blende vor der Glaslinse am Polarisatorende kann bewirkt werden, daß die beiden Bilder getrennt erscheinen oder sich teilweise überdecken. Für die Farbenbestimmung ist unter Umständen das Weiß und die Komplementärfarbe förderlich.

Es ist wünschenswert und für die Benutzung des Apparates in der Praxis unbedingt notwendig, die Herstellung der gewünschten Quarzdicke einfacher zu gestalten. Zu diesem Zweck ist der Mittelteil des Hauptrohres, der im oben besprochenen Apparat das Rohr mit den Quarzplatten enthält, durch einen rechtwinkeligen Messingkasten ersetzt (4 cm lang, 5 cm breit, 2,3 cm hoch), in dessen durchbohrter Vorder- und Hinterfläche die zur Aufnahme von Analysator und Polarisator bestimmten Rohrenden stecken. Der Kasten, dessen Seitenwände fehlen, wird durch sechs gut abgeschliffene, aneinander verschiebbare Messingplatten von verschiedener Dicke ausgefüllt, die 7 cm breit und 2 cm hoch sind und durch Federn an der Hinterwand gegen die Vorderwand gedrückt werden.

Sämtliche Messingplatten sind an der gleichen Stelle in zwei Kreisen 1,0 cm und 1,2 cm Durchmesser ihrer Dicke nach durchbohrt. Durch Schnappfedern ist dafür gesorgt, daß in der einen Stellung die größeren, in der anderen die kleineren Bohrungen genau konzentrisch zur Achse des Apparates liegen. In die größeren Bohrungen sind die Quarzplatten eingelassen, deren richtige Lage ein für allemal durch Messung der Drehung im Na-Licht kontrolliert ist; die andere Bohrung bleibt frei, durch sie geht das Licht, wenn die Quarzplatte nicht ein-

1) Natürlich kann man eine solche Quarzplattenkombination auch für Demonstrationen auf der optischen Bank benutzen.

geschaltet ist. Die Dicke der einzelnen Messingplatten ist durch die Dicke der Quarzplatten bedingt; sie ist so gewählt, daß auch die dicksten Quarzplatten ein wenig hinter den Messingflächen liegen; bei den dünnsten Quarzplatten ist natürlich die Stärke der Messingplatten erheblich größer als die Dicke der Quarzplatten.

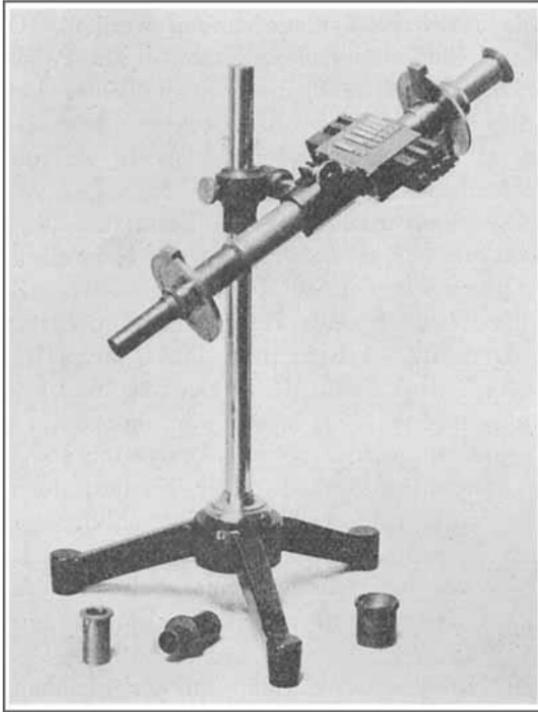


Fig. 4.

Statt des Analysators kann ein Rochonsches Prisma, wie bei dem zuerst beschriebenen Apparat, hier aber in den Teilkreis, eingeschoben werden.

Endlich soll auf das Analysatorende, dessen Lupe durch ein kleines Fernrohr ersetzt ist, ohne die Drehbarkeit des Analysators zu beeinträchtigen, der Zeichenapparat des Abbeschen Mikroskops¹⁾ fest aufgesetzt werden können. Hierdurch

1) C. Zeiss, Mikroskope usw. Katalog 1898, p. 77, Nr. 43.

soll es ermöglicht werden, das Bild eines Gegenstandes, dessen Farbe bestimmt werden soll, auf die Quarzfarbe zu werfen. Bei vorläufigen Versuchen war der farbige Gegenstand in einem Kasten mit regulierbarer Beleuchtung eingeschlossen.

Eine technisch genaue Beschreibung des Chromoskops wird in der Zeitschrift für Instrumentenkunde veröffentlicht. Fig. 4 gibt ein Photogramm des beschriebenen Apparates (vgl. unten p. 828).

Es liegt der Gedanke nahe, die verschiedenen Quarzdicken kontinuierlich durch aneinander verschiebbare Quarzkeile herzustellen. In der Tat bediente ich mich zu Vorversuchen einer solchen Kombination. Von der Firma Steeg & Reuter ließ ich zwei Quarzkeile mit einem Keilwinkel von 8° herstellen, deren eine Fläche senkrecht zur optischen Achse steht. Der eine Keil ist 50 cm lang und an den Enden 2 und 9 mm dick, der andere hat bei einer Länge von 10 mm an den Enden Dicken von 2 und 3,5 mm. Die Dicken der aus beiden Keilen herzustellenden Platten gehen, wenn das Ende des kleineren Keiles nicht über die Enden des größeren hervorragen soll, von 5,5 bis 11 mm. Die Dicken von 0 bis 5,5 mm erhält man durch Kombination mit einer Platte von 5,5 mm Dicke aus entgegengesetzt drehendem Quarz, während eine 5,5 mm dicke gleichsinnige Quarzplatte die Dicken von 11 bis 16,5 mm herzustellen erlaubt. Das trifft zu, wenn die beiden Quarzkeile unmittelbar aufeinander liegen, wie es bei meinen Vorversuchen der Fall war. Bei der z. B. im Soleilschen Saccharimeter verwendeten Parallelverschiebung der Keile aber treten die bekannten Mißstände ein. Liegen die Keile bei der Anfangsstellung dicht aneinander, so sind sie bei den anderen Stellungen doch durch eine Luftschicht getrennt, deren Dicke parallel zur Rohrachse gemessen im vorliegenden Fall bei der Endlage den Betrag von 5,5 mm erreichen würde. Durch die in der Luftschicht hervorgebrachte Ablenkung wird die im zweiten Keil durchlaufene Dicke verringert; und zwar in der Endlage für die Wellenlänge der H-Linie um 0,0622 mm, für die A-Linie um 0,0601 mm. Der absolute Betrag ist nicht prinzipiell störend, da die durchsetzte Dicke empirisch mit einfarbigem Licht ermittelt werden kann; der Unterschied für rotes und violettes Licht ist außerordentlich klein, könnte aber

namentlich in der Nähe der empfindlichen Farbe merkbar werden. Auch dieses Bedenken kann behoben werden, indem man die Verschiebung parallel der zur Apparatenachse nicht senkrechten Keilfläche erfolgen, d. h. in unserem Falle die Führungsschraube einen Winkel von $90 - 8 = 82^\circ$ mit der Apparatenachse bilden läßt. Trotzdem habe ich von der Verwertung von Keilen im Chromoskop abgesehen, weil einmal das Vorgehen von $\frac{1}{4}$ zu $\frac{1}{4}$ mm bei den Quarzdicken ausreichend erscheint, und weil andererseits die Herstellung sicher nicht billiger wäre. Dazu kommt, daß die Keilkombination eine empirisch geeichte Skala erhalten müßte, während mir gerade daran gelegen ist, die Ausdrückbarkeit aller im Chromoskop überhaupt erhältlichen Farbennuancen durch zwei einfache Zahlen — Dicke der durchstrahlten Quarzplatte und Winkel zwischen Analysator und Polarisator — möglichst hervortreten zu lassen.¹⁾

Die Farben im Chromoskop.

Die Farben im Chromoskop sind natürlich bedingt durch die Lichtquelle, die auch bei *vergleichenden* Beobachtungen angegeben werden muß. Um einen extremen Fall zu wählen: Bei Beleuchtung mit einer Quecksilberlampe können zwei Gegenstände der gleichen Einstellung im Chromoskop entsprechen, während der eine in seiner Mischfarbe noch erhebliche Mengen Rot enthalten könnte, die im Quecksilberlicht nicht zur Geltung kommen. Es läßt sich vorstellen, daß man eine bestimmte, leicht zu reproduzierende künstliche Lichtquelle zur Beleuchtung vorschreibt; im allgemeinen wird es genügen, mit nicht zu dunklem diffusen Tageslicht zu arbeiten. Ich habe mich bei meinen Versuchen des Lichtes bedient, das eine gut gereinigte mineralogische Strichplatte im diffusen Tageslicht ausgibt.

1) Den Quarzfarben analoge Mischfarben würde eine Glasplatte im magnetischen Felde zwischen zwei Nicols zeigen, da die Rotationsdispersion ungefähr die gleiche ist. An die Stelle der Dickenänderung beim Quarz tritt hier die Änderung der Feldstärke. Für „absolute“ Bestimmungen wäre eine solche Anordnung nicht geeignet, da es schwer ist, die erforderlichen starken Magnetfelder auf genügendem Raum homogen herzustellen.

Es ist natürlich unmöglich, eine Übersicht über das ganze Gebiet der unzähligen Farbennuancen zu geben, die man unter diesen Umständen im Chromoskop erhält. Nur einige Gesichtspunkte sollen hier erörtert werden; Weiteres hoffe ich in einer späteren Arbeit mitteilen zu können.

Bei der Durchmusterung der Farben empfiehlt es sich, für jede Quarzplattendicke von einem bestimmten charakteristischen Wert des Winkels α auszugehen. Auch bei völlig unbefangener Betrachtung ergibt sich für jede Quarzdicke bei einem bestimmten Wert des Winkels α eine ganz besonders auffällige Veränderung des Farbtones von einer bläulichen zu einer rötlichen Nuance. So finde ich in einer meiner ersten Beobachtungsreihen folgende Werte für α , die zu den in der ersten Spalte der Tabelle enthaltenen Quarzdicken gehören.

Tabelle 3.

d mm	α°	Bemerkungen über die Farbentöne	$\frac{\alpha}{d}$
0,25	6	dunkelblau-dunkelpurpur	24
0,50	12	blauviolett-rotviolett ¹⁾	24
1	25	rosaviolett	25
2	49	noch rosaviolett	24,5
3	72	violett sofort in rosaviolett	24
4	94	blau-violett	23,5
6	147	durch hell rötlichviolett nach rosa	24,5
8	16 (196)	hellviolett-rosa	24,5
11	84 (264)	hellviolettweiß-hellrosa	24
15	176 (356)	aus dem hellen Mattgrün in die Rosareihe	23,7

Mittel 24,17

Ich habe absichtlich diese Zahlen gewählt, weil ich bei ihrer gelegentlichen Notierung völlig absichtslos vorging: das zeigen auch die kurzen Notizen über die entsprechenden Farbentöne, die sich auf die Farbe an der Stelle selbst oder auf die beiden benachbarten beziehen. In späteren Reihen findet sich die Übergangsfarbe bei der einzelnen Dicke als dunkel grauviolett bis helllilaweiß bezeichnet. In der letzten

1) Die von mir als rotviolett und rosaviolett bezeichneten Töne werden gewöhnlich als purpur bezeichnet.

Spalte der Tabelle sind die Werte α/d aufgeführt; ihr Mittelwert ist 24,17. Bei genauerer Messung ergibt sich 24° , in Übereinstimmung mit den Erfahrungen an den Soleilschen Doppelplatten, für die bei 3,75 mm Dicke $\alpha = 90^\circ$, bei 7,5 mm Dicke $\alpha = 180^\circ$ ist. Nach der Boltzmannschen Formel entspricht die spezifische Drehung von 24° einer Wellenlänge von $0,561 \mu$. Das ihr entsprechende Licht muß in der Mischfarbe die Intensität Null haben.

Es gibt noch andere Übergänge, die sich schärfer bestimmen lassen, als es bei dem im allgemeinen sehr allmählichen Übergehen von einer Nuance zur andern möglich ist; so fand ich bei den Platten von 1—9 mm einen solchen bei Werten von $\alpha = 30,8 d$ aus rosa in gelbliche Töne. Bei größeren Dicken fehlt das Gelb. Die helle rosa Nuance geht in eine helle grünliche über, doch scheint der schwer zu bestimmende Grenzwert für α abnehmende Werte für α/d zu liefern. Für den vorliegenden Zweck genügt es festzuhalten, daß man beim Durchmustern der Farben für eine Quarzplatte am besten von der Dicke d mm von einem Werte $\alpha = 24 d^\circ$ ausgeht — findet sich α größer als 180° , so ist natürlich 180° abzuziehen.

In der folgenden sehr summarischen Übersicht bezeichnet a eine Drehung des Analysators von diesem Wert von α aus im Sinne der Quarzdrehung, b das gleiche im entgegengesetzten Sinn. Die gelegentlich angegebenen Werte von α (*Einstellung* des Analysators) dienen nur zur ungefähren Orientierung.

$d = \frac{1}{4}$ mm	6° Dunkelgrauviolett. a 8° rotbraun, 10° gelbbraun, heller werdend nach gelb, gelblichweiß, weiß. b dunkelblau, 0° graublau, heller werdend grau bis weiß 98° .
$d = \frac{1}{2}$ mm	12° Dunkelgrauviolett. a rotviolett, 15° gelblichrosa durch Gelbreihe, gelblichweiß, weiß 96° . b 10° violett, dunkelblau aufhellend nach graublau, hellere Grau bis weiß.
$d = 1$ mm	24° Dunkelgrauviolett. a 28° rosaviolett, 32° gelblichrosa nach orange, gelb bis weiß. b 20° dunkelblaugrau, blau aufhellend bis weiß.

$d = 2 \text{ mm}$	48° Dunkelgrauviolett. a 52° rosaviolett, 61° rosa nach orange durch gelb zu gelblichweiß 136°. b 44° blau aufhellend bis 156° fast weiß.
$d = 3 \text{ mm}$	72° Grauviolett. a 80° rosaviolett, 92° rosa nach orange — Gelbreihe — grünlichgelb — hell grünlichweiß. b 68° blau aufhellend bis helles bläulichgrün.
$d = 4 \text{ mm}$	96° Grauviolett. a 110° rosa, 120° rosa nach orange, schön orange, gelb, grünlichgelb. b 92° graublau, hellblau, grünblau, blaugrün, hellgrün.
$d = 6 \text{ mm}$	144° Hellgrauviolett. a 166° rosa, 8° gelblichrosa, orange grünlichgelb, gelbgrün. b 140° hellgraublau, grünblau, blaugrün, grün.
$d = 10 \text{ mm}$	60° Lilagrau. a durch lila nach rosa 132° sehr hell grünlichrosa. b durch blaugrün, grün in sehr helles Grün 144°.
$d = 15 \text{ mm}$	0° Leichtlilaweiß. a 44° leicht gelblichrosaweiß, 70° grünlichrosaweiß, 90° grünlichweiß. b 170° fast grauweiß, helles grünlichgrau, mattgrün.

Diese knappe Übersicht gibt in keiner Beziehung ein Bild von der Fülle der Farben, die man mit dem Chromoskop erhalten kann. Sie enthält nur die Haupttöne bei acht von den 63 Quarzdicken, die mit dem Apparat beobachtet werden können, und doch zeigt sie schon große Reihen von orange, gelben, grünen, blauen, rosa, violetten Farben mit ihren Zwischenstufen und den vielfältigsten fein abgestuften Tönen. Sie läßt aber auch einen Mangel scharf hervortreten: die eigentlichen roten Töne sind nicht vertreten. Das ist ein Mangel, der keineswegs den Quarzfarben allein eigentümlich ist. Die eigentlichen roten Töne fehlen auch in den Newtonschen Farben, mithin auch in den Farben dünner Kristallplättchen. Zwar findet man z. B. bei Quincke¹⁾ in der ersten Ordnung aufgeführt: „Warmes Rot“, „tieferes Rot“, „klares Rot“ — aber mit vollem Rechte sagt schon Herschel²⁾ von den

1) Vgl. F. Kohlrausch, Lehrb. usw. Tab. 26.

2) I. F. W. Herschel, Vom Licht. Deutsch von I. C. W. Schmidt, p. 336. Cotta, Stuttgart 1881.

Newtonschen Farben: „Das Rot der ersten Ordnung verdient kaum diesen Namen, es ist eine matte ziegelrote Farbe; das der zweiten sowie der dritten Ordnung ist voll, allein sie neigen sich alle zum Karminrot und es zeigt sich in der ganzen Reihe kein reines Scharlach oder prismatisches Rot“.

Man könnte daran denken, für die Zwecke der Praxis dem Apparat ein einziges gefärbtes Normalglas beizugeben, das etwa den mittleren grünen oder den äußeren blauen Teil des Spektrums vollständig absorbiert. Es liegt auf der Hand, daß bei der Einschaltung einer solchen Normalplatte aus dem übrig bleibenden Licht, in dem das rotgelbe Ende des Spektrums fast ungeschwächt bleibt, durch geeignete Quarzdicken und Analysatorstellungen rote Töne der mannigfaltigsten Art gewonnen werden könnten. Damit wäre aber das eigentliche Prinzip des Apparates verlassen, wonach die Farbennuancen durch Quarzdicken in Millimetern und Neigungswinkel der Schwingungsebenen in den Nicols „absolut“ bestimmt werden sollen. Unter Wahrung des Prinzipes kann man zu roten Tönen gelangen, indem man dem Apparat einen zweiten Polarisator hinzufügt und zwischen diesem und dem ersten Polarisator weitere Quarzplatten anbringt; damit wächst die Zahl der möglichen Nuancen ganz außerordentlich. Praktisch genügt es für unseren Zweck, zwischen den beiden Polarisatoren eine einzige Quarzplatte von 3,75 mm Dicke einzuschalten, doch ist an dem ausgeführten Apparat Vorsorge getroffen, daß diese Quarzplatte leicht und sicher gegen andere ausgewechselt werden kann.

Das System: Zweiter Polarisator und dazu gehörige Quarzplatte, das hinter dem Polarisator noch eine geeignete Linse trägt, läßt sich statt des Schutzrohres an den vorher beschriebenen Apparat ansetzen; mit dem Schutzrohr wird gleichzeitig die von ihm gehaltene Glaslinse entfernt. Der Nullpunkt der Kreisteilung des zweiten Polarisators liegt wieder so, daß bei der Einstellung auf ihn die beiden Polarisatoren gekreuzt sind. Der Ansatzteil ist auf Fig. 4 eingeschoben.

Die Farben im vervollständigten Apparat.

Dreht man den zweiten Polarisator des vervollständigten Chromoskops aus der Nullage im Sinne der Quarzdrehung

um den Winkel β , so tritt jetzt aus dem ersten Polarisator Licht von der Intensität $\sin^2(\varphi \delta' + \beta)$ und das durch den Analysator beobachtete Licht hat die Intensität

$$\sin^2(\varphi \delta' + \beta) \sin^2(\varphi \delta - \alpha),$$

wenn δ' die Dicke der Quarzplatte zwischen den Polarisatoren bedeutet und die übrigen Zeichen die gleiche Bedeutung wie oben haben. Der Ausdruck zeigt, daß man bei gegebenem δ' durch geeignete Wahl von β in einer der früher erhaltenen Mischfarben Licht von einer bestimmten Wellenlänge unterdrücken kann. Für die Quarzplatte ist die Dicke 3,75 mm gewählt, weil bei ihr einem Maximum des Rot bei der Linie a ein Minimum im Blau entspricht und zwar zwischen F und G . In der folgenden Tabelle sind in der ersten Spalte sämtliche Linien im sichtbaren Spektrum angeführt, für die die spezifische Drehung im Quarz gemessen ist¹⁾ — es sind zehn Fraunhofersche Linien und je eine charakteristische Linie der Elemente Li und Tl . Die zweite Spalte enthält die Wellenlängen in $\mu\mu$, die dritte die spezifische Drehung φ in Graden. In der vierten Spalte sind die Werte von $\sin^2(\varphi \delta' + \beta)$ verzeichnet für $\delta' = 3,75$ mm und $\beta = 36,4^\circ$, in der fünften die Werte von $\sin^2(\varphi \delta - \alpha)$ für $\delta = 7,5$ mm und $\alpha = 17^\circ$, in der sechsten endlich das Produkt $\sin^2(\varphi \delta' + \beta) \sin^2(\varphi \delta - \alpha)$; die letzten drei Spalten sind mit J_1 , J_2 und J überschrieben.

Tabelle 4.

Linie	$\lambda \mu\mu$	φ°	J_1	J_2	J	Bemerkungen
A	760	12,7	0,99	0,96	0,95	Der wagerechte Strich zwischen zwei Zahlen der J -Spalten bedeutet, daß zwischen ihnen ein Minimum (0) liegt, der Doppelstrich, daß an dieser Stelle ein Maximum vorhanden. Das Maximum in J_2 hat den Wert 1; die Maxima in J sind kleiner als 0,1.
a	718	14,3	1,00	1,00	1	
B	687	15,8	0,99	0,96	0,95	
Li	671	16,5	0,98	0,92	0,90	
C	656	17,3	0,96	0,85	0,82	
D	589	21,7	0,78	0,31	0,24	
Tl	535	26,6	0,48	0,00	0,00	
E	527	27,5	0,42	0,02	0,01	
F	486	32,8	0,12	0,57	0,07	
G	431	42,6	0,08	0,72	0,06	
h	410	47,5	0,32	0,13	0,04	
H	397	51,2	0,56	0,01	0,01	

1) Landolt, l. c. p. 128.

J_1 gibt die Intensitätsverteilung in der Mischfarbe, die bei Entfernung des Analysators gesehen wird; sie ist ein schönes helles Gelb; die roten Töne geben mit den violetten ein Purpur, das sich mit den grünen zu weiß ergänzt, über dem das Gelb liegt. Ebenso gibt J_2 die Intensitätsverteilung der Mischfarbe, die bei Entfernung des zweiten Polarisators erscheint; sie ist rosaviolett, d. h. ein helles Purpur, eine Mischung von Rot und Blau; die grünen Töne fehlen, Gelb ist erheblich geschwächt. J endlich gibt die Intensitätsverteilung der Mischfarbe im vervollständigten Apparat; das Licht für alle Wellenlängen außer Rot und Gelb ist unter ein Zehntel der ursprünglichen Intensität herabgedrückt; vom Gelb ist nur noch ein Viertel vorhanden, während die roten fast ungeschwächt hindurchgehen. Die Mischfarbe ist ein warmes Rot.

Man erhält bei einer ganzen Reihe von Werten für β schöne rote Töne — ganz abgesehen von den schon im einfachen Apparat vorhandenen Purpurfarben und dem sich daran anschließenden Rosa. Es ist das immer der Fall, wenn die Mischfarbe, die die Hilfsquarzplatte von 3,75 mm Dicke zwischen den beiden Polarisatoren für sich liefert, Rot in großer Intensität enthält; das trifft zwischen $\beta = 30^\circ$ und $\beta = 50^\circ$ zu; da der Wertebereich (für die Quarzdicke 3,75) (vgl. oben p. 814) etwa 144° beträgt, ist die Intensität aller übrigen Farben geringer. In der folgenden kleinen Tabelle sind für einige Werte von β die Intensitäten für die Wellenlängen 760, 719 und 687 (Fraunhofersche Linien A , α und B , im ausgesprochensten Rot liegend) angegeben, wenn die Intensität des einfallenden Lichtes gleich 100 gesetzt wird.

Tabelle 5.

$\beta =$	30	40	50
A (760)	95	100	98
α (719)	99	100	95
B (687)	100	98	89

In der *schließlichen* Mischfarbe tritt das Rot allein oder doch nur wenig verändert hervor, wenn man zwischen Analysator und erstem Polarisator Quarzdicken zwischen $\delta = 5$ und $\delta = 12$ mm einschiebt; der Bereich für die Werte von α , die

zu wählen sind, ist verschieden groß, je nach den Werten von δ und β .

Damit erhält man eine große Fülle von roten Tönen in fein abgestuften Nuancen.

Für die übrigen Farben bietet der Zusatzapparat wenig Neues; die orange, gelben, grünen, blauen, violetten Töne liegen naturgemäß häufig in größerer Ausdehnung nebeneinander als im einfachen Apparat; wesentlich neue Nuancen ergeben sich mindestens für mein wenig geübtes Auge kaum. Dagegen finden sich Reihen von braunen und olive farbener Tönen, die im einfachen Apparat nur vereinzelt vorkommen — „braun, rotbraun, olive usw. sind nur lichtschwache Modifikationen gelber, roter und grüner Farbtöne in verschiedenen Sättigungsstufen“¹⁾ — die Richtigkeit dieser von Brücke und von Helmholtz aufgestellten Behauptungen läßt sich hier leicht erkennen. Ganz außerordentlich zahlreich sind im zusammengesetzten Apparat auch die grauen Töne, die nur einen leichten Stich in irgend einer der anderen Farben zeigen, wie lavendelgrau, grünlichgrau, rotgrau usw.

Setzt man im zusammengesetzten Chromoskop statt des Analysatornicols das Rochonsche Prisma ein, so erhält man natürlich nicht mehr Komplementärfarben; die übereinander greifenden Segmente der beiden Bilder zeigen nicht Weiß, sondern die Mischfarbe der Hilfsquarzplatte — diese Farbe ist im Sinne Brückes (vgl. oben p. 799) in zwei Teile „gespaltet“. Gegenüber dem Brückeschen Schistoskop hat man hier die Möglichkeit, die zu spaltende Farbe durch den Apparat selbst zu erzeugen, während man mit dem einfachen Chromoskop wie mit dem Schistoskop die Farbe zerlegt, die man auf die anvisierte Platte aufgetragen hat. In beiden Fällen ergibt sich auch bei diesem Studium mit dem Chromoskop der Vorteil, daß jede Quarzdicke beim Drehen des Rochonschen Prismas eine ganze Folge von Farbenpaaren zeigt, während jedes Gipsplättchen im Schistoskop nur ein Paar liefert. Die Bedeutung solcher Versuche für das Kunstgewerbe, wenn es sich darum handelt, in einer farbigen Komposition „alle Farben unter die Herrschaft einer bestimmten Farbe zu stellen“ (Mero-

1) F. Auerbach, Kanon der Physik, p. 315. Leipzig 1899.

chromie), hat Brücke (l. c. p. 263) ausführlich dargelegt. Selbstverständlich sind durch Angabe der Quarzdicken δ und δ' und der Einstellungen α und β des Rochonschen Prismas und des zweiten Polarisators auch diese Farbenpaare „absolut“ festgelegt.

Schluß.

Ich war bisher nicht imstande, eine zweckmäßige Übersicht über die einzelnen Farben im Chromoskop zu geben; eine Schwierigkeit liegt darin, eine geeignete Tabellenform zu finden; eine bei weitem größere aber liegt für jeden, der nicht außerordentlich in den Farben bewandert ist, in der Auswahl der wichtigen und in ihrer Bezeichnung. Ich hoffe, daß Maler und namentlich Kunstgewerbetreibende und Theoretiker des Kunstgewerbes sich hier betätigen werden. Auf Betreiben des Hrn. Prof. Riemerschmied-München ist der „Deutsche Werkbund“ wieder einmal der Frage nach der Aufstellung einer allgemein gültigen Farbenskala näher getreten. Ich halte es nicht für ausgeschlossen, daß das hier beschriebene Chromoskop in sachverständigen Händen geeignet ist, zur Lösung der außerordentlich schwierigen Aufgabe beizutragen. Ganz besonders wichtig erscheint es mir hierfür, daß erstens die Mischfarben — und in der Praxis handelt es sich fast ausschließlich um solche — im Chromoskop ihrer Zusammensetzung nach theoretisch genau bekannt sind, und daß zweitens jede derselben in ihrer feinsten Nuance durch zwei Ziffern, beim zusammengesetzten Chromoskop durch vier Ziffern unzweideutig festgelegt ist. Die Ziffern sind die Quarzdicke δ mm und der Neigungswinkel α° , der die Neigung zwischen den Schwingungsrichtungen des Analysators und Polarisators bestimmt; begnügt man sich, was ich für zweckmäßig halte, beim zusammengesetzten Chromoskop mit der Hilfsquarzdicke 3,75 mm, so hat man für Farbtöne desselben nur noch eine Ziffer — den Winkel β° hinzuzufügen, der die Neigung zwischen den Schwingungsrichtungen der beiden Polarisatoren kennzeichnet.

(Eingegangen 3. August 1910.)