Beitrag zur Physiologie der Farben.

Von

Emanuel Mandelstamm,

Arzt aus Tschernigow.

Auf den Vorschlag des Herrn Prof. Helmholtz habe ich das Ophthalmometer benutzt, um den Grad der Empfindlichkeit der Netzhaut für verschiedene Farbentöne des Sonnenspectrums zu prüfen.

Wird nämlich vom Ophthalmometer das Fernrohr-ocular entfernt und an dessen Stelle vor dem Ophthalmometerrohr ein schmaler Spalt angebracht, so erscheint ein durch die Ophthalmometerplatten beobachtetes Sonnenspectrum einfach, so lange die Platten senkrecht zur Ophthalmometeraxe stehen, d. h. nicht gedreht werden; dreht man aber die Platten, so verdoppelt sich das Spectrum, und zwar verschiebt sich das eine Spectrum nach rechts, das andere nach links im Gesichtsfelde. Dadurch werden die beiden Platten, die bei geeigneter Vorrichtung vor der Drehung gleichmässig von einer Spectralfarbe gefärbt erscheinen, allmählich verschieden gefärbt: beispielsweise geht die obere, respective untere Platte von einem hellen Roth, welches der Fraunhofer'schen Linie C entspricht, in ein dunkleres Roth

über, während die untere, resp. obere Platte in Orange übergeht. Ist nun die Drehung so weit geschehen, dass wir den ersten Unterschied in der Färbung der Platten wahrzunehmen beginnen, so ist uns mit dieser Drehung die lineare Verschiebung des Spectrums im Gesichtsfeld gegeben, die erforderlich ist zur ersten Wahrnehmung eines Unterschiedes im Farbenton irgend einer Spectralfarbe. Aus dieser linearen Verschiebung nun und aus den bekannten Wellenlängen der einzelnen Spectralfarben, sowie aus dem Abstand der Frauenhofer'schen Linien von einander, lässt sich annähernd für jede Spectralfarbe der kleinste Bruchtheil der Wellenlänge bestimmen, der zum gegebenen Farbenton hinzukommen muss, damit von der Netzhaut ein Wechsel desselben wahrgenommen werden könne; es lässt sich dadurch mit anderen Worten die Grenze der Empfindlichkeit der Netzhaut für einen Wechsel im Farbenton je einer Spectralfarbe bestimmen.

Die Versuche wurden folgendermassen ausgeführt: In einem verdunkelten Zimmer befand sich im Fensterladen ein senkrechter Schlitz, durch welchen vermittelt eines Heliostats Sonnenlicht in das Zimmer hineingelenkt werden konnte. Der Schlitz konnte beliebig schmal gemacht werden. In einer 6—7 Fuss weiten Entfernung vom Fensterladen stand ein Tisch, der durch Schrauben bald höher, bald niedriger gestellt werden konnte. Es wurde ein Prisma, welches an einem Stativ um seine verticale Axe gedreht werden konnte, auf den Tisch gestellt und in das Minimum der Ablenkung gebracht. Hinter dem Prisma stand das Ophthalmometer; aus letzterem wurde das Fernrohrocular entfernt und blos das Objectiv blieb stehen. An Stelle des Ocular's brachte man an das dem Beobachter zugekehrte Ende des Ophthalmometers eine Pappröhre an, die dicht auf die Messingröhre des Ophthalmometers passte; vor der Pappröhre

wurde ein kleines Diaphragma befestigt, dessen kreisförmige Oeffnung 2—3 Mm. Durchmesser besass und durch zwei Papierschieberchen beliebig schmal gemacht werden konnte. Es wurde ausserdem in das Ophthalmometerrohr vor dem Objectivglas eine schwarze Blendung eingefügt, die einen viereckigen Ausschnitt besass und die Ränder der Ophthalmometerplatten zuzudecken bestimmt war.

Das Objectivglas des Ophthalmometerfernrohrs entwarf nun in seinem Focus ein umgekehrtes verkleinertes Bild des Sonnenspectrums, respective des Schlitzes; und da der Focus des Glases vorher bestimmt worden ist, so konnte der Pappröhre eine solche Länge gegeben werden, dass das an ihr befestigte Diaphragma gerade in den Brennpunkt dieses Objectivglases fiel. Alsdann konnte die Oeffnung des Diaphragma's so eng gemacht werden, dass sie bloß eine Spectralfarbe in sich fasste, oder eine Farbe, die dicht an eine Frauenhofer'sche Linie grenzte. War dies der Fall, so bot das Gesichtsfeld eine gleichmässig gefärbte Fläche dar, durch deren Mitte ein die Platte begrenzender Streifen ging; wenn nicht, so wurde die Röhre so lange verschoben, bis dies der Fall war.

Schematisch wäre die ganze Vorrichtung der Versuche folgendermassen angedeutet:

A bedeutet den Heliostaten, B den Schlitz im Fensterladen, C das Prisma, D die Ophthalmometerplatte, E die schwarze Blendung, F das Objectivglas, G Ort des umgekehrten Spectrumbildes, H Pappröhre mit Diaphragma.

Ich stellte nun die Platten auf den Nullpunkt ein, und wenn sie ganz gleichmässig gefärbt waren, begann ich dieselben zu drehen, bis ich einen Unterschied in der Färbung der oberen und unteren Platte wahrzunehmen anfang. Auf diese Weise untersuchte ich die Farben an den Frauenhofer'schen Linien C, D, E, b, F, G. Die äussersten Spectralfarben, sogar schon das Indigo bei G, sind so dunkel, dass die Angaben eines Farbenwechsels der Platten schwankend ausfallen. Ausser den Farben an den eben genannten Linien suchte ich noch zwischen denselben Stellen auf, die sich am empfindlichsten, und solche, die sich am unempfindlichsten für einen Farbentonwechsel zeigten. Für jede untersuchte Farbe machte ich 30—40 Ablesungen, an verschiedenen Versuchstagen, weil die Netzhaut gewöhnlich nach kurzer Zeit schon ermüdet. Ich nahm blos die Werthe in Betracht, die ich bei hellem, klarem Himmel erhalten hatte. Aus der Summe der Ablesungen bei Rechts- und Linksdrehungen der Platten nahm ich das Mittel.

Es ergaben sich folgende Mittelzahlen:

für C (hellroth) = 22° ,
 für D (goldgelb) = 6° (empfindlichste Stelle im Gelb),
 zwischen D und E,
 näher dem E = 22° (unempfindlichste Stelle im Grün)
 für E } (grün) = 16° ,
 für b }
 zwischen b u. F, näher d. F (blaugrün) = 10° , (empfindlichste Stelle im Blau),
 für F (cyanblau) = 11° ,
 für G (indigo) = 19° .

Diese Winkelwerthe entsprechen nach der bekannten Helmholtz'schen Formel $E = 2h \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}$ *), folgender Linearverschiebung im Spectrum:

*) Handbuch der Physiol. Optik, Leipzig 1867, St. 10.

für C	= 1,2116	Mm.
„ D	= 0,3212	„
zwischen D u. E	= 1,2116	„
für E {	= 0,8772	„
„ b }		
zwischen b u. F	= 0,53879	„
für F	= 0,5940	„
„ G	= 1,0537	„

Der Abstand der Frauenhofer'schen Linien von einander konnte am zweckmässigsten folgendermassen bestimmt werden: Da die dem Ophthalmometer zugewendete Seite des Prisma auch Licht reflectirt, wie ein ebener Spiegel, so wurde vor demselben ein Kerzenlicht hin- und hergeschoben, bis es in der Ophthalmometerröhre sichtbar wurde: dadurch war die Richtung gefunden, in welcher man an der angrenzenden Wand einen Millimeterstab befestigen musste, damit letzterer zugleich mit dem Spectrum im Ophthalmometer sichtbar werde. Der Millimeterstab wurde hell beleuchtet und durch Vor- und Rückwärtschieben gerade in eine Stellung gebracht, wo er zugleich mit den Frauenhofer'schen Linien scharf gesehen werden konnte. Die Pappröhre sammt Diaphragma wurden dabei entfernt und das Fernrohrocular wieder aufgeschraubt. Das Ocular vergrösserte nun das umgekehrte Bild des Spectrum's und des Millimeterstabes zugleich, und da sich beide zum Theil deckten und gleichzeitig scharf gesehen werden konnten, so war es auch leicht, die Abstände der Frauenhofer'schen Linien direct an der Theilung abzulesen. Es ergaben sich folgende Abstände:

von B—C	= 5,8	Mm.
„ C—D	= 14,6	„
„ D—E	= 19,1	„
„ E—b	= 3,8	„
„ b—F	= 13,7	„
„ F—G	= 34,5	„ .

Die Werthe für die Wellenlängen der Frauenhofer'schen Linien sind, in Hunderttausendtheilen eines Millimeters ausgedrückt, folgende*):

$$B = 6878$$

$$C = 6564$$

$$D = 5888$$

$$E = 5260$$

$$F = 4843$$

$$G = 4291.$$

Aus diesen Datis nun lässt sich der Bruchtheil der von der Netzhaut wahrgenommenen Wellenlänge, wenn wir uns die Logarithmen der Wellenlängen als Ordinaten, den Abstand der Frauenhofer'schen Linien von einander als Abscissen auf ein Coordinatensystem aufgetragen denken, annähernd bestimmen. Bezeichnen wir nämlich mit λ_0 und λ_1 die Wellenlängen zweier beliebigen Frauenhofer'schen Linien, mit $(y_0 - y_1)$ den Abstand zweier Fr. Linien von einander, mit Δ die lineare Verschiebung im Spectrum und mit λ_x die Wellenlänge an der Stelle, wo wir den ersten Farbentonwechsel wahrnehmen, so gilt die Formel:

$$\frac{\text{Log. } \lambda_0 - \text{Log. } \lambda_x}{\Delta} = \frac{\text{Log. } \lambda_0 - \lambda_1}{y_0 - y_1},$$

setzen wir nun

$$\text{Log. } \lambda_0 - \text{Log. } \lambda_x = \text{Log. } \frac{\lambda_0}{\lambda_x} = \text{Log. } (1 + \epsilon),$$

so kommt

$$\text{Log. } \frac{(1 + \epsilon)}{\Delta} = \frac{\text{Log. } \lambda_0 - \text{Log. } \lambda_1}{y_0 - y_1},$$

und die Grösse ϵ giebt das Verhältniss der Welle an, welche zur Wellenlänge der gegebenen Farbe selbst hinzukommen muss, damit ein Wechsel im Farbentone der betreffenden Farbe wahrgenommen werde.

*) Handbuch d. Physiol. Opt., St. 236.

Die Grösse $\frac{\text{Log. } \lambda_0 - \text{Log. } \lambda_1}{y_0 - y_1}$ wurde nach doppelter Richtung, nach rechts und links von je einer Frauenhofer'schen Linie, bestimmt, und aus beiden gefundenen Werthen das Mittel genommen. Für G konnte blos ein Werth bestimmt werden, weil wir den Abstand zwischen G und H nicht messen konnten; ebenso für die Stellen in der Mitte eines Zwischenraumes.

Für $\text{Log.}(1 + \epsilon) = x$ ergaben sich nun folgende Werthe:

bei C (hellroth) $x_1 = 0,02267$
 $x_{11} = 0,02203$ } Mittelwerth = 0,02235,

„ D (goldgelb) $x_1 = 0,001039$
 $x_{11} = 0,000823$ } Mittelwerth = 0,000931,

zwischen D und E (grün) $x = 0,002116$,

bei E (grün) $x_1 = 0,002249$
 $x_{11} = 0,001798$ } Mittelwerth = 0,002023,

zwischen b—F (blaugrün) $x = 0,001104$,

bei F (cyanblau) $x_1 = 0,001217$
 $x_{11} = 0,000904$ } Mittelwerth = 0,001060,

„ G (indigo) $x = 0,001605$.

Daraus der Werth ϵ berechnet:

$$\begin{aligned} \epsilon. \\ \text{für C} &= 0,0528 = \frac{1}{18,94}, \\ \text{„ D} &= 0,00215 = \frac{1}{465,1}, \\ \text{zwischen D und E} &= 0,00488 = \frac{1}{204,9}, \\ \text{für E} &= 0,00467 = \frac{1}{214,13}, \\ \text{zwischen b und F} &= 0,0025 = \frac{1}{400}, \\ \text{für F} &= 0,00244 = \frac{1}{409,84}, \\ \text{„ G} &= 0,0037 = \frac{1}{270,27}. \end{aligned}$$

Werfen wir also einen Blick auf diese Zahlen, so ergibt sich, dass meine Netzhaut sich zunächst am empfindlichsten zeigte für einen Farbentonwechsel im Gelb, dicht an der Linie D. Die zweitnächste empfindliche Spectralfarbe war das Cyanblau, an der Linie F und das Blaugrün zwischen b und F*). Die Empfindlichkeit für Farbentonwechsel nahm ab zunächst beim Indigblau, dann beim Grün, und am unempfindlichsten zeigte sich das Roth. Das Minimum der Empfindlichkeit im Grün zeigte sich zwischen D und E, nicht ganz in der Mitte, näher der Linie E. Das Maximum der Empfindlichkeit für Blau zeigte sich bei der Linie F. Die gefundenen Werthe für die Bruchtheile der wahrgenommenen Wellenlängen verhielten sich, mit Ausnahme der Stelle zwischen b und F, ziemlich porportional zu den Drehungen der Platten.

Aus diesen Untersuchungen scheint es demnach hervorzugehen, dass gerade diejenigen Gegenden die geringste Veränderlichkeit des Farbentones haben, welche je einer Grundfarbe am nächsten kommen.

Im April 1867.

*) Trotz der geringeren Linearverschiebung, die für blaugrün, zwischen b und F, erforderlich war, um einen Tonwechsel hervorzurufen, ergab die Rechnung für diese Stelle einen grösseren Bruchtheil der Wellenlänge, als für das Cyanblau dicht bei F. Da uns aber für blaugrün blos ein Werth, das ϵ zu Gebote stand, der zwar grösser als der kleinere, aber kleiner als der grössere Werth für F ist, so lasse ich vorläufig unentschieden, ob das Blau dicht bei F oder das Blaugrün zwischen b und F empfindlicher sei für Farbentonwechsel. Jedenfalls aber sind beide Stellen äusserst empfindlich.