

Über die Empfindlichkeit des grünblinden und des normalen Auges gegen Farbenänderung im Spektrum.

Von

E. BRODHUN.

(Mit 3 Figuren.)

Für das normale Auge sind Bestimmungen der Empfindlichkeit für Farbenunterschiede im Spektrum bereits nach verschiedenen Methoden und mit verschiedenen Versuchsanordnungen angestellt worden. Die zuerst benutzte Anordnung, die von v. HELMHOLTZ angegeben und von MANDELSTAMM¹ und später zweimal von DOBROWOLSKY² in Anwendung gebracht wurde, besteht darin, daß in den Gang der das Spektrum erzeugenden Lichtstrahlen die Platten des Ophthalmometers so eingeschaltet werden, daß ihre Drehungsaxe dem Spalte parallel ist, und die Ebene, in der sie aneinander grenzen, das Spektrum in eine obere und eine untere Hälfte teilt. Durch Drehung der Platten wird dann der eine Teil gegen den anderen verschoben. Durch einen Okularspalt wird ein nahezu monochromatisches Stück des Spektrums ausgeschnitten und die Drehung der Platten bestimmt, die nötig ist, damit der obere Teil des Gesichtsfeldes von dem unteren eben merklich verschieden ist. MANDELSTAMM untersuchte die Empfindlichkeit bei den bekanntesten FRAUNHOFERSchen Linien (*B, C, D, E, F, G*) und jedesmal einer zwischen ihnen liegenden nicht näher definierten

¹ E. MANDELSTAMM: *Gräfes Archiv*, 1867. Bd. 13. 2. Abtl. S. 399.

² W. DOBROWOLSKY: *Gräfes Archiv*, 1872. Bd. 18. 1. Abtl. S. 66 und S. 98.

Stelle. Er fand ein Maximum der Empfindlichkeit bei *D* und ein zweites etwas geringeres bei *F*. Ein damit übereinstimmendes Resultat erhielt DOBROWOLSKY, der die Versuchsanordnung MANDELSTAMMS etwas veränderte. Er erhielt überall gröfsere Empfindlichkeit, als sein Vorgänger, ferner bei seinen ersten Versuchen bei *B*, wo MANDELSTAMM nicht untersucht hatte, ein weiteres Empfindlichkeitsmaximum, welches sich aber bei späteren Versuchen als durch den Helligkeitsabfall im Spektrum entstanden erwies. Er fand dies, indem er durch Einschaltung zweier NICOLScher Prismen mit einer dazwischen liegenden Quarzplatte dunkle Streifen im Spektrum erzeugte.

Nach derselben Methode des ebenmerklichen Unterschieds, aber mit einer ganz anderen Versuchsanordnung hat PEIRCE¹ dieselbe Untersuchung ausgeführt. Er bewirkt die Verschiebung zweier übereinander liegenden Spektren durch einen Spalt, der so eingerichtet ist, dafs seine obere Hälfte durch eine Mikrometerschraube nach rechts oder links bewegt werden kann. Es wird dann für jede untersuchte Stelle im Spektrum die Gröfse der Verschiebung der oberen Spalthälfte bestimmt, bei welcher der Beobachter zwar beide Teile des Gesichtsfeldes noch nicht vollkommen gleich sieht, aber auch nicht mehr angeben kann, ob zur Erlangung völliger Gleichheit der bewegliche Spalt nach rechts oder nach links verschoben werden mufs. Bei PEIRCE wurde das Spektrum durch ein RUTHERFORDSches Gitter erzeugt, bei MANDELSTAMM und DOBROWOLSKY durch Prismen.

Die von PEIRCE gegebene Kurve, welche aus den Mittelwerten der Beobachtungen von verschiedenen Personen erhalten ist, zeigt drei Maxima der Empfindlichkeit: eins (das gröfste) bei *D*, eins etwas rechts (nach dem blauen Spektrumende hin) von *F*, ein drittes links von *Li*.

Im Jahre 1884 haben A. KÖNIG und C. DIETERICI² Untersuchungen über denselben Gegenstand veröffentlicht. Den von ihnen verwandten Apparat beschreibe ich ausführlicher, weil er auch für meine unten beschriebenen Versuche benutzt wurde. Er bestand in einem Spektralapparat mit drei Kollimatoren

¹ B. O. PEIRCE: *Sill. Journal*, Vol. 26. S. 299. 1883.

² A. KÖNIG und C. DIETERICI: *Wied. Annalen* 22. S. 579. 1884 und *Gräfe's Archiv*. Bd. 30 (2). S. 171. 1884.

und einem gleichseitigen, allseitig polierten Flintglasprisma. Zwei der Kollimatoren, welche um die Axe des Apparats gedreht werden konnten, waren mit bilateral verschiebbaren Spalten versehen, die durch sehr lichtstarke Gaslampen erleuchtet wurden; der dritte, der am Tische des Apparats festgeschraubt war, trug in der Ebene des Brennpunktes seines Objektivs eine Scheidewand mit einer zur Beobachtung dienenden, sehr schmalen, rechteckigen Öffnung. Mitten vor dem Objektiv des letzteren Rohres stand die eine Kante des Prismas, so daß man durch das Diaphragma hindurchblickend zwei aneinander stoßende Prismenflächen sah, die bei geeigneter Stellung der Spaltrohre monochromatisch leuchteten. Die Stellung der Spaltrohre, von welcher die Farbe der Beobachtungsfelder abhängt, wurde nicht wie gewöhnlich mit Hilfe eines Teilkreises sondern durch Spiegelablesung bestimmt, zu welchem Zweck an jedem Spaltrohr ein Spiegelchen befestigt war. Aus demjenigen Teilstrich einer Millimeterskala, welcher mit dem Fadenkreuz eines auf den Spiegel am Spaltrohr gerichteten Fernrohrs zusammenfiel, wurde mit Hilfe einer besonders bestimmten Tabelle die entstehende Wellenlänge festgestellt. In Bezug auf Einzelheiten muß ich auf die citierte Abhandlung von KÖNIG und DIETERICI verweisen.

Die Beobachtungen geschahen nun so, daß zunächst beide Spaltrohre auf die zu untersuchende Wellenlänge mit Hilfe der Tabelle eingestellt wurden, so daß beide Prismenflächen in dieser Farbe leuchteten. Sodann wurde durch Änderung der Spaltbreiten beiden Beobachtungsfeldern die gleiche, im übrigen eine beliebige, dem Auge zusagende Helligkeit gegeben. Nachdem nun das eine Spaltrohr aus seiner Lage herausgedreht war, so daß jetzt die betreffende Prismenfläche eine andere Farbe zeigte, führte der Beobachter eine Einstellung in der Weise aus, daß er das letztgenannte Spaltrohr so lange verdrehte, bis beide Beobachtungsfelder vollkommen gleich erschienen. Mit Hilfe der Tabelle wurde sodann die Wellenlänge bestimmt, welche an Stelle der gesuchten einstand. Aus einer großen Anzahl solcher Einstellungen wurde der mittlere Fehler einer Beobachtung berechnet und dieser als Maass für die Empfindlichkeit des Auges gegen den Farbenwechsel benutzt.

Die Empfindlichkeitskurven, welche KÖNIG und DIETERICI erhalten haben, zeigen zunächst die bisher stets gefundenen

Minima bei *D* und bei *F*. Im Gegensatz zu den früheren Beobachtungen ergab sich aber die Empfindlichkeit bei *F* am grössten, bei *D* geringer. Außerdem tritt am violetten Ende (bei $\lambda = 440 \mu\mu$ oder $450 \mu\mu$) noch ein drittes Minimum auf. Beide Beobachter (in besonders hohem Maasse A. KÖNIG) erhielten am violetten Ende (von $520 \mu\mu$ etwa an) einen anderen Verlauf der Kurve für hohe als für niedrige Intensität des Spektrums. Da aber die erstere gerade in diesem Bereich durch Benutzung von Kalklicht an Stelle von Gaslicht erzielt wurde, so liegt mit Rücksicht auf die weiter unten beschriebenen Versuche die Vermuthung nahe, daß die Abweichungen vorwiegend von der verschiedenen Helligkeitsverteilung in den Spektren der beiden Lichtarten herrühren.

Die für KÖNIGS Auge bei niedriger Intensität gefundenen Resultate sind in der folgenden Tabelle enthalten und als Kurve *a* in Fig. 3 eingetragen.

Beobachter K. (norm. Trichromat). Intensität varriert.

λ	Mittlerer Fehler	λ	Mittlerer Fehler
640 $\mu\mu$	1,28 $\mu\mu$	530 $\mu\mu$	0,65 $\mu\mu$
630 „	1,05 „	520 „	0,59 „
620 „	0,68 „	510 „	0,40 „
610 „	0,56 „	500 „	0,23 „
600 „	0,36 „	490 „	0,16 „
590 „	0,26 „	480 „	0,28 „
580 „	0,27 „	470 „	0,46 „
570 „	0,29 „	460 „	0,54 „
560 „	0,40 „	450 „	0,44 „
550 „	0,65 „	440 „	0,68 „
540 „	0,68 „	430 „	1,06 „

Genau nach demselben Verfahren habe ich¹ auf Vorschlag von Herrn Professor A. KÖNIG im Jahre 1885 die Empfindlichkeit meines grünblindenden Auges gegen Farbenänderung im

¹ Eine vorläufige Mitteilung der im folgenden beschriebenen Versuche findet sich in den *Verhandl. d. Physiol. Gesellsch.* zu Berlin 1885–86. No. 17 und 18.

Spektrum bestimmt. Für jede untersuchte Stelle wurden mindestens 50 Einstellungen ausgeführt, aus denen dann der mittlere Fehler einer Beobachtung zunächst in Skalenteilen und daraus in Wellenlängen berechnet wurde. Es wurde stets bei einer mittleren Intensität beobachtet. Untersucht wurden 14 Stellen des Spektrums zwischen $570\ \mu\mu$ und $440\ \mu\mu$. Weiter wurde nach beiden Seiten nicht fortgefahren, da sich ergab, daß die Einstellungen in höherem Grade von der Veränderung der Intensität im Spektrum als von der des Farbentons abhängig wurden. Die Resultate giebt die folgende Tabelle und Kurve *a* in Fig. 1.

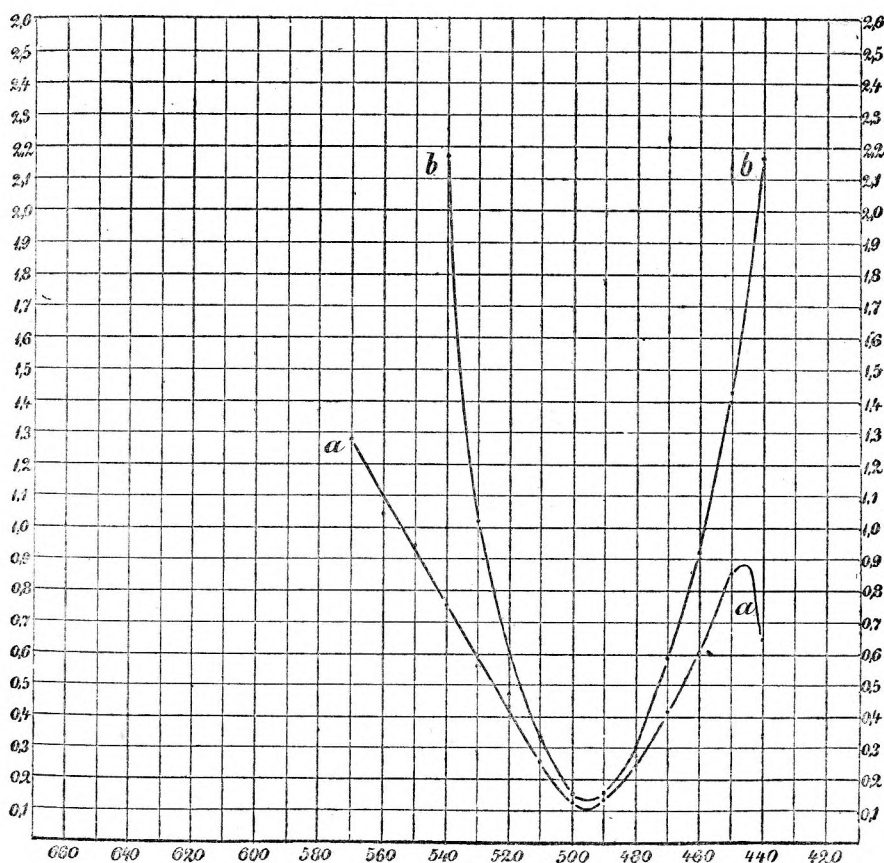


Fig. 1.

Die Kurve zeigt nur ein Minimum beim neutralen Punkt für Sonnenlicht, etwas links von dem bei *F* liegenden Minimum

des Trichromaten. Rechts davon, nach dem violetten Ende hin, ist die Empfindlichkeit ungetähr gleich der des normalen Auges, bei $440 \mu\mu$, wie es auch KÖNIG und DIETERICI fanden, gröfser als bei $450 \mu\mu$. Links von dem Minimum ist die Empfindlichkeit bis $530 \mu\mu$ etwas gröfser als beim Trichromaten, nimmt aber dann sehr schnell weiter ab, während sie beim normalen Auge noch ein zweites Minimum bei D hat.

Beobachter E. BR. (grünblind). Intensität konstant.

λ	Mittlerer Fehler	λ	Mittlerer Fehler
570 $\mu\mu$	1,28 $\mu\mu$	500 $\mu\mu$	0,12 $\mu\mu$
560 "	1,04 "	490 "	0,14 "
550 "	0,94 "	480 "	0,25 "
540 "	0,75 "	470 "	0,42 "
530 "	0,56 "	460 "	0,60 "
520 "	0,43 "	450 "	0,85 "
510 "	0,26 "	440 "	0,66 "

Der überwiegende Einfluss, welchen der Intensitätsabfall an den Enden des Spektrums zeigte, machte es notwendig, die Versuche mit einer Abänderung, welche jede Einwirkung der Empfindlichkeit des Auges gegen Helligkeitsunterschiede ausschlofs, von neuem auszuführen, und zwar mußten sie durch das ganze Spektrum, nicht allein an den Enden, wiederholt werden, da es möglich schien, dafs die Helligkeitsverteilung auch da, wo die Empfindlichkeit gegen Farbenänderung überwiegt, einen gewissen Einfluss ausübt. Ein solcher ist aber um so wesentlicher, als er die Ergebnisse von der Natur des zufällig benutzten Spektrums abhängig macht, so dafs dieselben sich nicht mit denen anderer Beobachter, welche zufällig ein Spektrum mit anderer Helligkeitsverteilung benutzt haben, vergleichen läfst.

Die gewählte Abänderung bestand darin, dafs man vor jeder Einstellung nicht allein die Stellung des betreffenden Spaltrohrs, also die Farbe des einen Beobachtungsfeldes, sondern auch die Breite des Spaltes an diesem Rohre und damit die Helligkeit des Feldes veränderte. Man hatte also jetzt die Einstellung nicht allein durch Drehen des Spaltrohrs um die Axe

des Apparats, sondern zugleich durch Verändern der Spaltbreite zu bewirken.

Die folgende Tabelle und die Kurve *b* in Fig. 1 geben die Resultate dieser Untersuchung, deren Grenzen die Wellenlängen 550 $\mu\mu$ und 440 $\mu\mu$ bilden, da zu beiden Seiten dieses Intervalls die Unsicherheit eine allzugrofse wurde.

Beobachter E. BR. (grünblind). Intensität variiert.

λ	Mittlerer Fehler	λ	Mittlerer Fehler
550 $\mu\mu$	3,56 $\mu\mu$	490 $\mu\mu$	0,15 $\mu\mu$
540 „	2,17 „	480 „	0,28 „
530 „	1,03 „	470 „	0,59 „
520 „	0,47 „	460 „	0,92 „
510 „	0,31 „	450 „	1,43 „
500 „	0,15 „	440 „	2,13 „

Es zeigt sich also, daß überall die Empfindlichkeit eine etwas geringere geworden ist; die nochmalige Zunahme hinter 450 $\mu\mu$ bei der ersten Beobachtungsreihe ergibt sich als nur durch die Intensitätsabnahme im Gaslicht-Spektrum bewirkt. Die Kurve hat die Gestalt einer Parabel, deren Scheitel bei 495 $\mu\mu$ liegt.

Da sich hier also ergeben hatte, daß überall, auch wo die Empfindlichkeit ihr Maximum hat, die Intensitätsverteilung einen Einfluss ausübt, so erschien es notwendig, daß auch für das normale Auge die Untersuchung mit der beschriebenen Abänderung wiederholt wurde. Herr Professor KÖNIG hatte die Güte, diese zeitraubenden Beobachtungen auszuführen. Ihre Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle und als Kurve *b* in Fig. 2 verzeichnet.

Die Empfindlichkeit wurde für 21 Stellen im Spektrum, zwischen 640 $\mu\mu$ und 440 $\mu\mu$, bestimmt.

Die Kurve zeigt nur zwei Minima, das eine bei 490 $\mu\mu$, das andere bei 580 $\mu\mu$. Alle bei früheren Beobachtungen gefundenen weiteren Minima an den Enden des Spektrums sind danach nur durch den Intensitätsabfall entstanden. Auch hier zeigt sich die Empfindlichkeit überall etwas geringer, als bei

den ohne Veränderung der Intensität angestellten Beobachtungen.

Zu bemerken ist, daß in Übereinstimmung mit den früheren Versuchen von A. KÖNIG und C. DIETERICH und abweichend von den Resultaten aller anderen Vorgänger die Empfindlichkeit links von *F* größer als die rechts von *D* gefunden wurde.

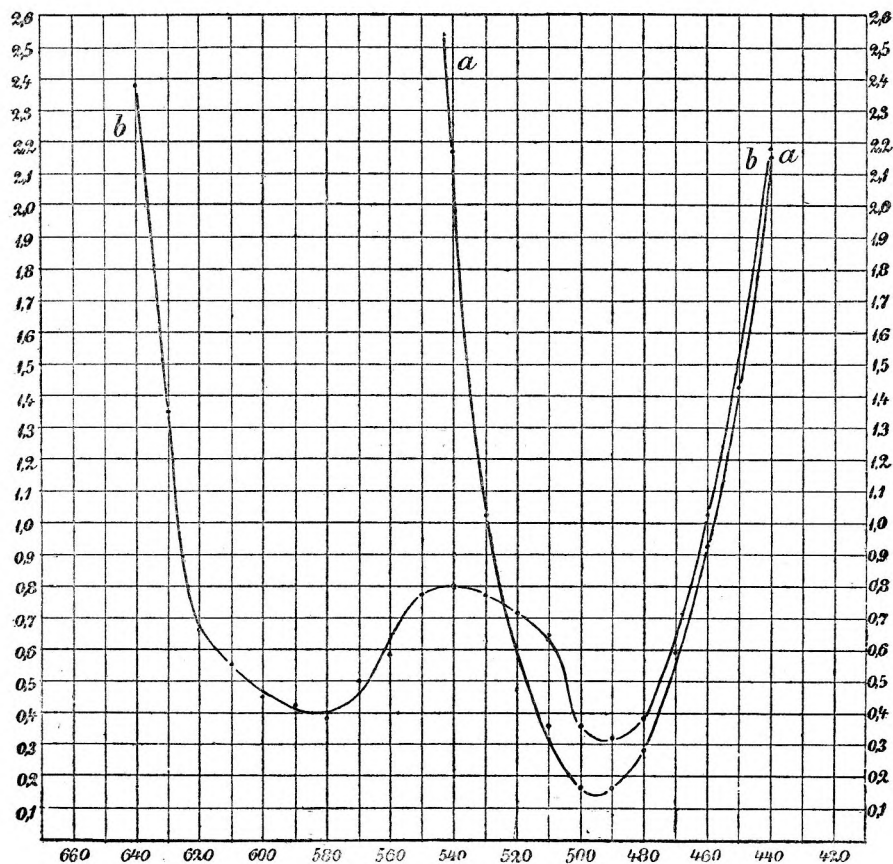


Fig. 2.

In Fig. 2 sind die Kurven für das normale (*b*) und das grünblinde (*a*) Auge zusammen gezeichnet. Der Vergleich lehrt, daß in der letzten Hälfte des Spektrums, rechts von *E*, der Grünblinde ebenso empfindlich oder noch empfindlicher als der Trichromat gegen Farbenänderung ist, während in der anderen Hälfte der letztere sich weitaus empfindlicher als der erstere erweist.

Beobachter A. K. (norm. Trichromat). Intensität variiert.

λ	Mittlerer Fehler	λ	Mittlerer Fehler
640 $\mu\mu$	2,37 $\mu\mu$	530 $\mu\mu$	0,77 $\mu\mu$
630 „	1,35 „	520 „	0,71 „
620 „	0,67 „	510 „	0,64 „
610 „	0,55 „	500 „	0,35 „
600 „	0,45 „	490 „	0,31 „
590 „	0,42 „	480 „	0,38 „
580 „	0,38 „	470 „	0,68 „
570 „	0,51 „	460 „	1,03 „
560 „	0,58 „	450 „	1,43 „
550 „	0,77 „	440 „	2,18 „
540 „	0,80 „		

Es sei noch hervorgehoben, daß die Maxima der Empfindlichkeit mit den Schnittpunkten der Farbenempfindungskurven¹ für Sonnenlicht zusammenfallen. Die ersten beiden Kurven der Trichromaten schneiden einander bei *D*, an der Stelle, wo das erste Minimum von Fig. 2*b* sich findet, und die dritte Kurve links von *F*, da, wo wir das andere Minimum der Empfindlichkeitskurve erblicken. Ebenso stimmt das einzige Minimum von Fig. 2*a* mit dem Schnittpunkt meiner Farbenkurven überein.

Im Jahre 1888, also nach meinen Versuchen, hat dann noch UTHOFF² die Empfindlichkeit seines normalen Auges gegen Farbenwechsel im Spektrum bestimmt. Er benutzte denselben Apparat, mit welchem die letztbeschriebenen Versuche angestellt wurden, und auch dieselbe Beobachtungsweise mit der Abweichung, daß er nicht auf Gleichheit, sondern auf ebenmerklichen Farbenunterschied einstellte, also nicht den mittleren Fehler, sondern den ebenmerklichen Unterschied als Maafs der Empfindlichkeit benutzte. Er erhielt die Werthe:

¹ A. KÖNIG und C. DIETERICI: *Sitzungsberichte der Berl. Akademie* vom 29. Juli 1886. S. 805.

² W. UTHOFF: *Gräfes Archiv*. 1888. Bd. 34. Abtl. 4. S. 1.

Beobachter: U. (norm. Trichromat). Intensität variiert.

λ	Ebenmerklicher Unterschied	λ	Ebenmerklicher Unterschied
650 $\mu\mu$	4,70 $\mu\mu$	570 $\mu\mu$	1,10 $\mu\mu$
640 "	2,97 "	550 "	1,66 "
630 "	1,68 "	590 "	1,88 "
620 "	1,24 "	510 "	1,29 "
610 "	1,08 "	490 "	0,72 "
600 "	1,02 "	480 "	0,95 "
590 "	0,91 "	470 "	1,57 "
580 "	0,88 "	460 "	1,95 "
		450 "	2,16 "

Seine Kurve (Fig. 3c) zeigt denselben Charakter, wie die für KÖNIGS Auge zuletzt gefundene in Fig. 3a. Die

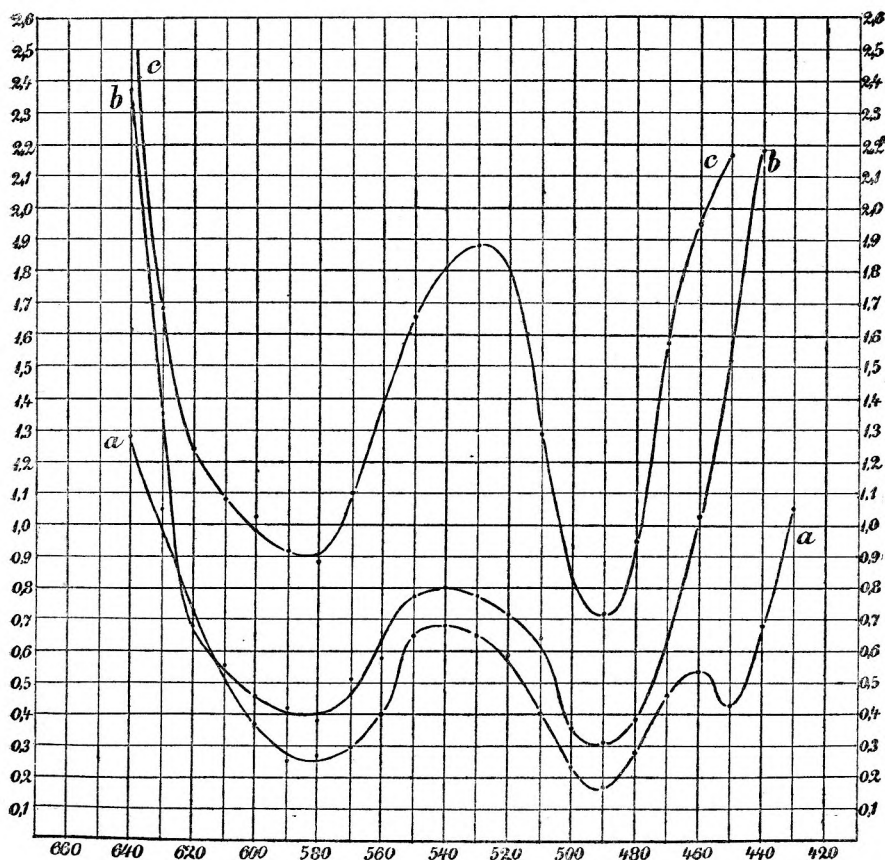


Fig. 3.

Ordinaten der ersteren sind natürlich erheblich gröfser, als die der letzteren, und zwar schwankt der Quotient ebenmerklicher Unterschied
mittlerer Fehler wenig um 2,2. Am roten Ende des Spektrums hat er freilich einen erheblich kleineren Wert, der aber möglicherweise auf individuelle Unterschiede zwischen den beiden Beobachtern zu schieben ist. Zur bequemen Vergleichung ist die von UHTHOFF (c) gefundene Kurve zugleich mit den beiden von KÖNIG (a und b) in Fig. 3 eingetragen.

Zum Schlusse habe ich Herrn Professor A. KÖNIG für die mir bei meinen Versuchen gewährte Anregung und Unterstützung meinen besten Dank auszusprechen.
