

Die Stereoskopie im Dienste der isochromen und heterochromen Photometrie¹⁾.

Von C. Pulfrich, Jena.

(Schluß.)

24. Verlauf der Erscheinung beim Vergleich einer Farbe mit den übrigen Teilen des Spektrums einer Petroleumlampe.

Nach erfolgter Regulierung der Beleuchtung stellen wir den einen Spektralapparat, z. B. den linken, auf einen beliebig gewählten Spektralbezirk, beispielsweise auf die im Grün liegende Wellenlänge $540 \mu\mu$, ein und durchwandern jetzt mit dem rechten Apparat, im äußersten Blau beginnend, das ganze Spektrum. Wir machen auf diesem Wege an den einzelnen Stellen des Spektrums Halt und sehen zu, wie sich die kreisende Marke an dieser Stelle verhält.

Wir erhalten dann das in Fig. 29 veranschaulichte Resultat:

Im blauen Teile beobachten wir eine starke Linksdrehung der Marke. Sie wird mit der Annäherung des rechten Auges an unser obiges Grün, auf das das linke Auge dauernd eingestellt ist, immer geringer, an dieser Stelle geradlinig und geht gleich dahinter in eine Rechtsdrehung über, die am stärksten ist, wenn das rechte Auge gelb erhält. Von hier aus nimmt die Rechtsdrehung wieder ab, wird bei einer bestimmten Stelle im Rot — bei $650 \mu\mu$ — wieder geradlinig, um dann gleich hinterher in eine mit dem Vorwärtsrücken nach dem roten Ende des Spektrums immer stärker werdende Linksdrehung überzugehen.

Hat man den rechten Apparat auf den gleichen Spektralbezirk im Grün eingestellt, auf den vorher der linke Apparat eingestellt war, und durchwandert jetzt mit dem linken Apparat das Spektrum, so kehrt sich in Fig. 29 nur die Pfeilrichtung um. Die Stellen, wo Geradlinigkeit der Bewegung beobachtet wird, bleiben die gleichen wie vorher.

Es ist in hohem Maße bezeichnend für unser Verfahren, daß fast jeder Beobachter, dem man den Verlauf der Erscheinung zum erstenmal zeigt, auf den Wechsel und die Verschiedenheit der Farben links und rechts kaum achtet. Seine Aufmerksamkeit wird ausschließlich von der im Raum sich drehenden Marke in Anspruch genommen. Auch eine Beeinträchtigung der Einstellgenauigkeit durch die Verschiedenheit der Farben

habe ich bisher noch bei keinem Beobachter feststellen können. Ein Beobachter hat mir sogar in allem Ernst erklärt, er glaube besser einstellen zu können, wenn die Farben links und rechts verschieden sind, als bei gleichen Farben. Vielleicht ist das etwas zu viel gesagt. Aber die Bemerkung bezeichnet mehr als alles andere den großen Fortschritt, den die stereophotometrische Methode in der Überwindung der Schwierigkeiten aufzuweisen hat, die bisher allen in Vorschlag gebrachten Methoden der heterochromen Photometrie hindernd im Wege standen.

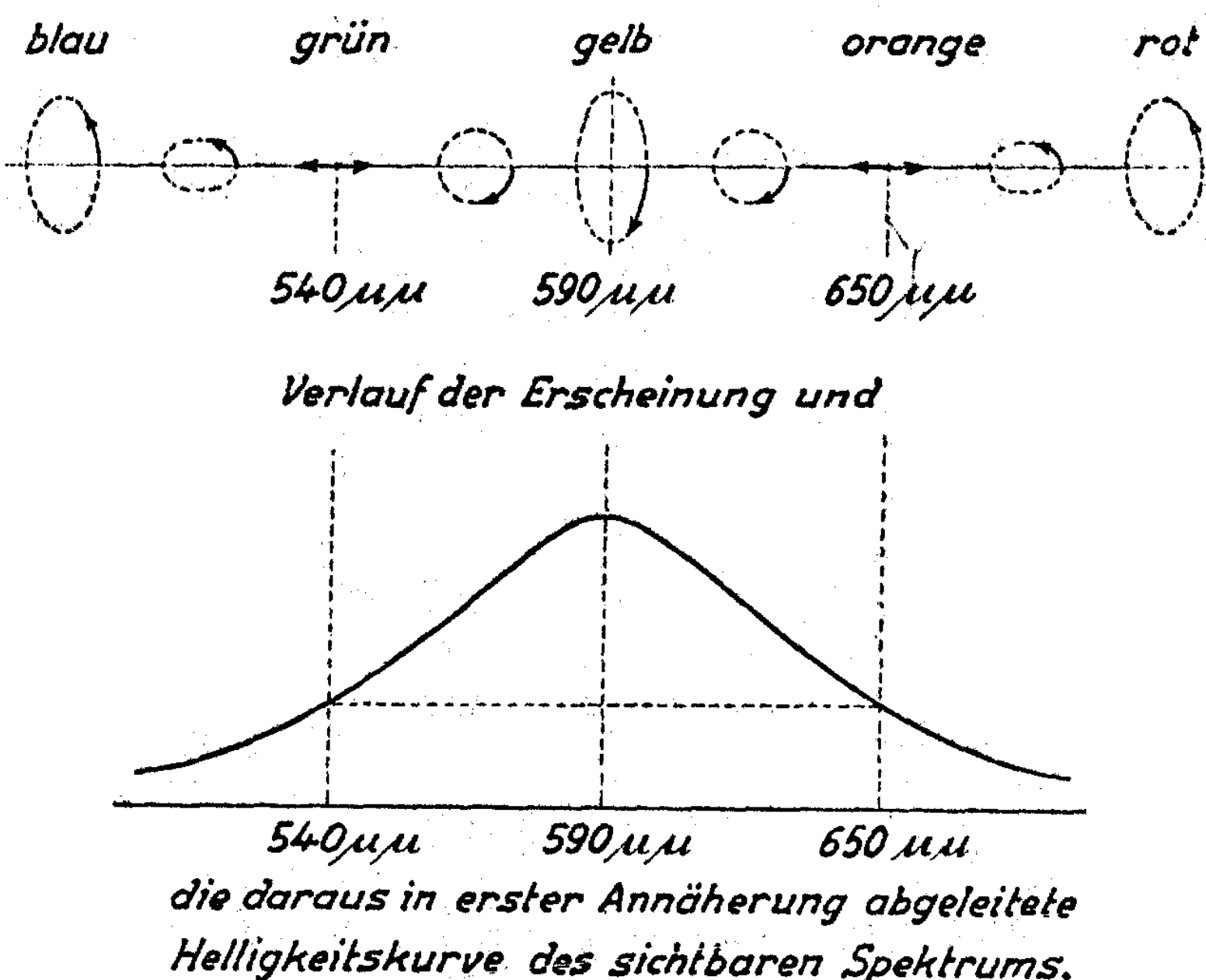


Fig. 29. Die im Spektrum der Petroleumlampe beobachtete Erscheinung der kreisenden Marke.

Nach dem beschriebenen Verlauf der Erscheinung können wir also jetzt allein auf Grund unserer Definition der Gleichheit heterochromer Helligkeiten (siehe Abschnitt 11), ohne vorher irgend etwas über die Helligkeitsverteilung im sichtbaren Spektrum zu wissen, darüber folgendes aussagen:

1. Die beiden Spektralbezirke im Rot und Grün, bei denen das Raumbild der Marke geradlinig hin und her geht, haben gleiche Helligkeit.
2. Von diesen Stellen aus nimmt die Helligkeit nach den Enden des Spektrums gleichmäßig ab und nach der Mitte des Spektrums zu.
3. Das Maximum der Helligkeit liegt im Gelb.

In erster Annäherung kann also der Helligkeitsverlauf im sichtbaren Spektrum der Petroleumlampe durch die in Fig. 29 gezeichnete Kurve wiedergegeben werden.

Wir können aber sofort noch einen Schritt weiter gehen, indem wir nämlich in unseren

¹⁾ Im Auszug vorgetragen auf dem Physikertag in Jena am 21. September 1921.

obigen Versuch den linken Apparat, statt auf 540 μ , auf 550 μ , 560 μ . . . einstellen, also auf Stellen des Spektrums, die dem Helligkeitsmaximum näher liegen und dann jedesmal in dem anderen Apparat auf der anderen Seite des Helligkeitsmaximums die gleichhellen Stellen aufsuchen und deren Wellenlänge an der μ -Skala ablesen. Wir werden finden, daß in demselben Maße, wie der auf der blauen Seite des Maximums gelegene Spektralbezirk dem Maximum näherrückt, dies auch der mit ihm gleichhelle Spektralbezirk auf der roten Seite des Maximums tut. So rücken die beiden gleichhellen Stellen des Spektrums einander immer näher, und man kann die Lage des Maximums ohne weiteres aus der graphischen Eintragung der gefundenen Werte entnehmen. Für unsere Petroleumlampe ergab sich auf diese Weise die Lage des Helligkeitsmaximums zu 590 μ . Für zerstreutes Tageslicht, an einem Wintertag gegen Norden beobachtet, wurde das Helligkeitsmaximum bei 570 μ gefunden. Die Zahlen bedürfen einer Reduktion auf das Normalspektrum. Hierüber siehe weiter unten. Daß man es wirklich mit dem Maximum zu tun hat, läßt sich in der Weise nachweisen, daß man beispielsweise den linken Apparat auf die für das Maximum gefundene Wellenlänge einstellt. Man wird dann in dem Spektrum des anderen Apparates nur eine Stelle finden, nämlich die des Maximums, wo das Raumbild der Marke sich geradlinig bewegt. Vor und hinter dieser Stelle dreht sich die Marke in gleichem Sinne, nämlich links herum und immer stärker, je weiter wir uns vom Maximum entfernen.

25. Was tritt ein, wenn man mit dem einen Auge die Grenzen des sichtbaren Spektrums überschreitet?

Unsere vorstehende Beschreibung des Verlaufs der kreisenden Marke innerhalb des sichtbaren Spektrums würde unvollständig bleiben, wenn wir die Vorgänge, die sich an den äußersten Enden des sichtbaren Spektrums und darüber hinaus abspielen, gänzlich unerörtert lassen wollten. Gewiß wird der Ausschlag der kreisenden Marke (siehe Fig. 29) mit der Annäherung an die Enden des Spektrums immer größer. Schließlich aber muß man an eine Stelle kommen, wo die von der Lichtquelle ausgesandten Strahlen aufhören, im Sinne einer Gesichtswahrnehmung wirksam zu sein. Alsdann sieht man die hin und her gehende Marke nur noch mit einem Auge, und von einem beidäugig wahrgenommenen Raumbild kann keine Rede mehr sein.

So verlockend es auch sein mag, in eine *Spezialuntersuchung* darüber einzutreten, *wo diese Stellen für Spektren verschiedener Art und für verschiedene Personen gelegen sind*, möchte ich mich hier auf einige Bemerkungen beschränken, die in *methodischer Hinsicht* für eine spätere

Untersuchung nach dieser Richtung mir der Beachtung wert erscheinen.

Gewiß muß in dem Augenblick, in dem das eine Auge aufhört, die bewegte Marke zu sehen, der eigentliche Stereoeffekt der kreisenden Marke verschwinden. Aber damit ist nicht gesagt, daß der Beobachter die geradlinige Bewegung der Marke auf Grund der nur einäugigen Beobachtung auch geradlinig beurteilt. Denn legen wir durch das Auge und den von der Markenspitze zurückgelegten geraden Weg eine Ebene, so hat die Phantasie des Beobachters freien Spielraum, die Markenspitze *in dieser Ebene* nach Belieben auf geraden oder krummen Wegen rechtsläufig oder linksläufig hin und her wandern zu lassen, ohne daß sich an dem direkten Anblick der bewegten Marke irgend etwas ändert. Eine bestimmte Vorstellung wird natürlich vorherrschend sein, und zwar diejenige, die durch die mehr oder weniger lebhaftere Erinnerung an einen wiederholt vorher beobachteten Bewegungsvorgang erzeugt wird. Eine so erzeugte Vorstellung kann natürlich auch wechseln. Das ist mit vielen Dingen so, wobei es gar keinen Unterschied macht, ob man einen Gegenstand mit einem Auge oder vollkommen identische Bilder desselben Gegenstandes mit beiden Augen betrachtet. Ich erinnere nur an die bekannten Bewegungstäuschungen, denen man beim Anblick der sich drehenden Flügel einer entfernten Windmühle in bezug auf den Sinn der Drehung ausgesetzt ist, je nachdem man die Vorstellung hat, daß man sich vor den Flügeln oder dahinter befindet. Ich erinnere ferner an die bei der Betrachtung von Bildern körperlicher Gegenstände durch Beleuchtung der Bilder in entgegengesetzter Richtung hervorgerufenen Gestaltstäuschungen, die z. B. die Krater auf Mondphotographien oder die Granatlöcher auf Fliegerbildern als Blasen erscheinen lassen. So ist mir auch wiederholt entgegengehalten worden, daß die in der Prüfungstafel (1908) für stereoskopisches Sehen befindlichen Marken, von denen der „Schlüssel“ angibt, daß sie in genau der gleichen Entfernung mit dem danebenstehenden Gegenstand gelegen sind, nicht immer in der gleichen Entfernung gesehen werden. In solchen Fällen konnte leicht nachgewiesen werden, daß der vom Beobachter angegebene Tiefenunterschied ein scheinbarer war, der nur in der Vorstellung des Beobachters besteht, aber nichts mit der durch Bilddifferenzen bedingten stereoskopischen Wahrnehmung zu tun hat. Hierbei sucht der Beobachter dann mehr oder weniger unbewußt nach anderen Anhaltspunkten für die Beurteilung der Entfernung und findet, wie im vorliegenden Falle der Prüfungstafel, einen solchen Anhalt auch in dem Umstand, daß die betreffende Marke und der neben ihr befindliche Teil des Bildes *ungleich groß* sind, wobei er die Gesetze der Perspektive, von denen der Maler bekanntlich einen ausgiebigen Gebrauch macht, mehr oder weniger unbewußt auch auf ungleichartige Gebilde ausdehnt.

Eine solche Beeinflussung unserer Vorstellung ist natürlich nur möglich, wenn die Bilder in beiden Augen *vollkommen identisch* sind. Sie tritt auch auf, wenn man im Stereokomparator der Marke im linken und rechten Okular *genau* die gleiche relative Lage zu den Bildern eines isoliert stehenden Objektes, z. B. einer Stange gibt, oder wenn man im Stereophotometer auf genaue Geradlinigkeit der Bewegung einstellt, denn dann liegen die Verhältnisse so wie in den oben angeführten Beispielen, und der Phantasie des Beobachters sind wieder Tür und Tor geöffnet.

Das ist ein Einwand, den man mit einiger Berechtigung gegen das stereoskopische Meßverfahren überhaupt erheben kann. Aber dieser Einwand trifft nur zu für den Fall, daß die Bilder links und rechts *vollkommen* gleich sind. Sobald parallaktische Bild-differenzen vorliegen, die die Grenze des Wahrnehmbaren auch nur etwas überschreiten, ist es mit solchen Gestalts- und Bewegungstäuschungen vorbei. Der Phantasie sind wieder straffe Zügel angelegt, und an die Stelle der durch sie vorher erzeugten Vorstellung tritt jetzt die allein von den wahrgenommenen Bild-differenzen beherrschte *eindeutige Vorstellung des Tiefenunterschiedes*, also in unserem Falle eine wirklich kreisende Bewegung des Raumbildes der Marke.

Daher erklärt es sich auch, weshalb Personen, die die letzten Feinheiten der Prüfungstafel für stereoskopisches Sehen nicht mehr zu erkennen vermögen, bei denen also die der Phantasie gezogenen Schranken weiter auseinander stehen, sehr viel leichter Täuschungen im Erfassen der richtigen Einstellung ausgesetzt sind als normal-sichtige Personen.

Für unsere vorliegende Aufgabe, die Stelle an den Enden des Spektrums zu bestimmen, wo die Lichtempfindung aufhört, machen wir aus den vorstehenden Erörterungen folgende *Nutzanwendung*. Wir vermeiden es, diese Stellen in der Richtung vom Innern des Spektrums aus nach außen aufzusuchen, da dann leicht der Fall eintritt, daß der Beobachter glaubt, die Marke noch kreisen zu sehen, wo das eine Auge schon ausgeschaltet ist. Um das zu vermeiden, stellt der Beobachter das eine Auge von vornherein auf eine *bestimmte außerhalb* des Spektrums gelegene Stelle ein und nähert sich dann langsam dem sichtbaren Teil des Spektrums. Dann wird jedenfalls der Moment, in dem das Kreisen der Marke als solches in die Erscheinung tritt, viel schärfer präzisiert sein als der Moment, in dem das Kreisen der Marke aufhört sichtbar zu sein. Das andere Auge stellt man hierbei zweckmäßig auf das Maximum der Helligkeit ein, damit das Kreisen der Marke an der gesuchten Stelle gleich in größter Stärke einsetzt. Es ist zu untersuchen, ob bei einem Wechsel des Spektralbezirkes im sichtbaren Spektrum die für das Maximum gefundenen Enden unverändert bestehen bleiben.

Ob für beide Augen des Beobachters die gleiche

Stelle gefunden wird, bedarf ebenfalls der näheren Untersuchung. Auch fragt es sich, ob die für ein Auge gefundene Stelle sich verschiebt und wie sie sich verschiebt, wenn man die Helligkeit des Spektrums einer Lichtquelle etwa durch Einengung der beiden Spalte T_1 immer mehr vermindert. Das sind alles Fragen, auf die zurzeit noch keine Antwort gegeben werden kann.

26. Messung der Helligkeit in den einzelnen Spektralbezirken als Bruchteil des Helligkeitsmaximums als Einheit.

Die Helligkeit im Gesichtsfeld jedes der beiden Fernrohre hängt ab von der Breite des Lichtspaltes T_1 und der Breite des Spektralbezirkes T_2 . Wird nur einer der beiden Spalte, T_1 oder T_2 , auf die Hälfte seiner ursprünglichen Breite eingestellt, so reduziert sich die Helligkeit auf die Hälfte, und auf ein Viertel, wenn auch der andere Spalt die halbe Breite erhält. Um den schädlichen Einfluß der beugenden Wirkung des Spaltes T_2 auf die Markenbilder m und n auf ein Minimum zu beschränken, läßt man T_2 auf 100 oder 200 Trommelteile stehen und macht die Messung allein mit dem Lichtspalt T_1 .

Die Messung selbst machen wir in folgender Weise. Nach erfolgter Nulleinstellung des Apparates, bei der insonderheit die Spalte T_1 unter sich und ebenso die Spalte T_2 unter sich die gleiche Breite haben, stellen wir einen der beiden Apparate — wir wählen hierfür den linken Apparat — auf die Wellenlänge des Helligkeitsmaximums, also für unsere Petroleumlampe auf 590μ ein. Wenn wir jetzt die Breite des Spaltes T_1 links verringern, indem wir z. B. von 100 auf 75 Trommelteile einstellen, so ist damit die Helligkeit im linken Fernrohr auf $\frac{3}{4}$ des Helligkeitsmaximums herabgedrückt, und wir haben nunmehr durch Drehen an der Mikrometerschraube M_1 rechts *diejenigen Spektralbezirke im rechten Fernrohr aufzusuchen und an M_2 abzulesen, für die die kreisende Bewegung des Raumbildes in eine geradlinige übergeht*. Wir werden finden, daß das für zwei Spektralbezirke zutrifft, von denen der eine rechts, der andere links vom Maximum gelegen ist (siehe Fig. 30 und Tabelle I). Von diesen beiden Spektralbezirken sagen wir dann, daß sie eine Helligkeit besitzen, *die gleich ist $\frac{3}{4}$ der maximalen Helligkeit*. Indem wir so zu immer kleineren Bruchteilen der maximalen Helligkeit übergehen, erhalten wir die *gesuchte Helligkeitskurve unseres prismatischen Spektrums*.

Für die Messung der mehr oder weniger weit ab vom Maximum gelegenen Spektralbezirke wählen wir, zum Teil als Kontrolle, zum Teil um die Ungenauigkeiten zu vermeiden, die mit der Anwendung enger Spalte verbunden sind, einen etwas anderen Weg. Sind wir z. B., ausgehend von der Spaltbreite T_1 links = T_1 rechts =

100 Trommelteile, bei der Spaltbreite T_1 links = 25 Tr. T., also bei der Helligkeit 0,25 angelangt, und wollen jetzt zur Helligkeit 0,20 übergehen, so lassen wir den Spalt T_1 links nicht mehr auf λ_0 stehen, sondern stellen ihn auf eine der beiden Wellenlängen ein, die wir für die Helligkeit 0,25

gefunden haben. Die Spaltbreite, die wir dann dem Spalt T_1 links geben müssen, um dem von ihm erzeugten Spektralbezirk die Helligkeit 0,20 zu erteilen, berechnet sich aus $x : 100 = 0,20 : 0,25$ zu $x = 80$ Trommelteile. Mit dieser Spaltbreite T_1 links suchen wir dann wieder wie

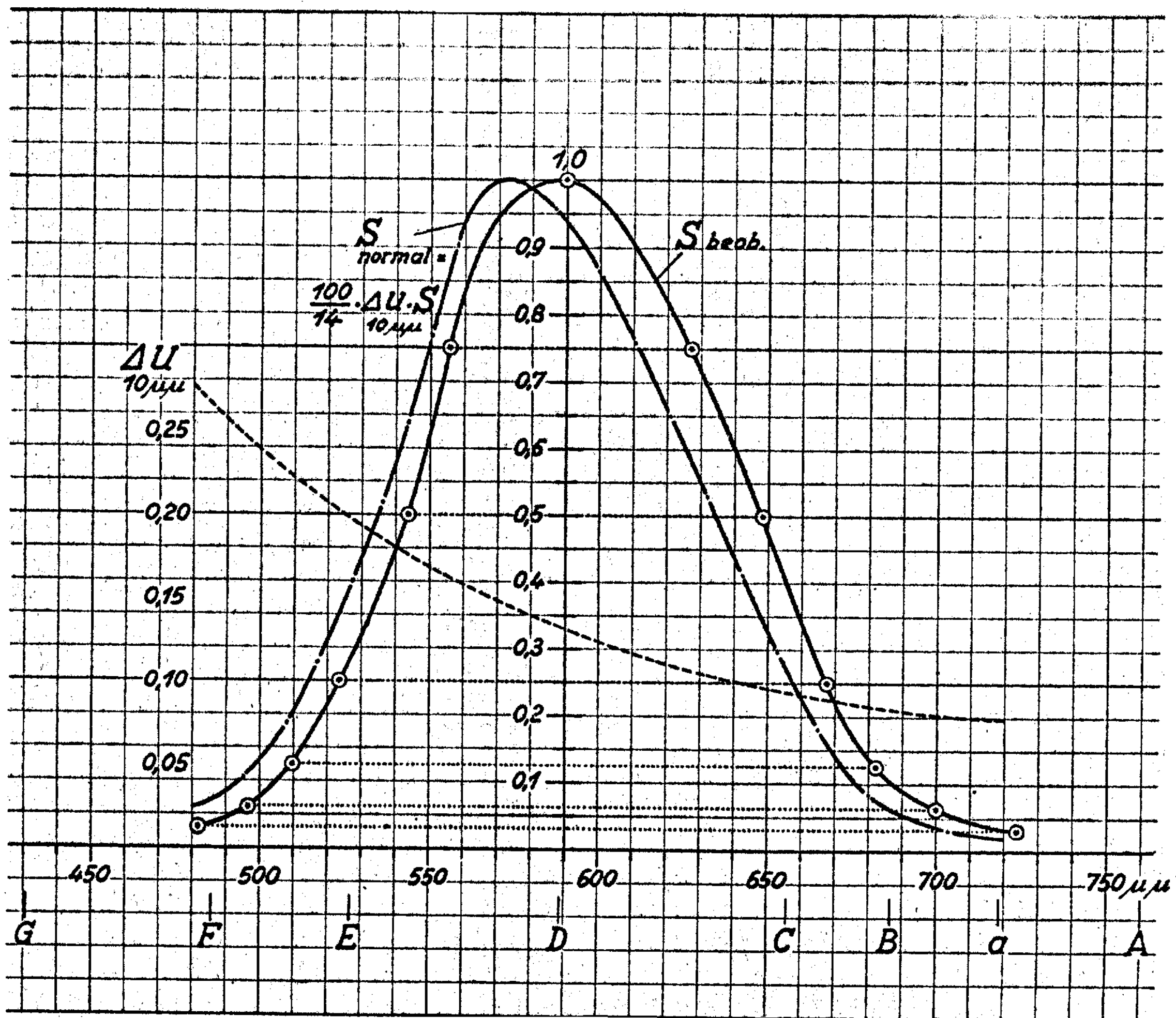


Fig. 30. Die im Spektrum einer Petroleumlampe beobachtete Sichtbarkeitskurve S_{beob} . S_{norm} bedeutet dieselbe Kurve nach erfolgter Reduktion auf das Normalspektrum.

Tabelle I.

Helligkeit S	Spektralbezirke (mittlere Wellenlänge)
1	590 $\mu\mu$
0,75	555,5 und 627,0
0,50	543,5 648,5
0,25	523,5 668,0
0,125	509,5 682,0
0,063	496,5 700,0
0,031	482,0 723,5

vorher die Spektralbezirke auf, denen die Helligkeit 0,20 zukommt, usf.

Die gefundenen Resultate können in mannigfacher Weise auf ihre Richtigkeit *geprüft* werden, einmal in der Weise, daß man den einen Apparat auf den einen und den anderen Apparat auf den anderen Spektralbezirk einstellt, beiden Spalten T_1 die gleiche Breite gibt und dann zusieht, wie die Marke läuft. Sie darf dann keinerlei Kreisen zu erkennen geben. Auch das für mittlere und kleinere Helligkeiten weiter oben angegebene Verfahren bietet diese Kontrollmöglichkeit. Aber wer will, kann hier noch ein übriges tun in der Weise, daß er den Spalt T_1 links einmal auf den Spektralbezirk links vom Maximum und dann auf den gleich hellen Spektralbezirk rechts vom Maximum einstellt. Man sieht, der Wege sind viele, die alle zum gleichen Ziele führen müssen und daher in ihren Angaben sich gegenseitig kontrollieren. Daher glaube ich auch, daß man wohl darauf verzichten kann, die Messungen noch einmal in der Weise auszuführen,

daß man alle Einstellungen, die man bisher mit dem linken Spalt T_1 gemacht hat, jetzt mit dem rechten Spalt T_2 macht und zur Messung der Wellenlänge die Mikrometerschraube M des linken Apparates benutzt. Aus dem Grunde ist auch bei dem vorliegenden Instrument ganz darauf verzichtet worden, die Mikrometerschraube M des linken Apparates in der gleichen bequemen Weise dem Beobachter zugänglich zu machen, wie das mit der Mikrometerschraube M des rechten Apparates geschehen ist.

Für das Verhalten des Beobachters während der Messung gelten im allgemeinen die gleichen Grundsätze wie sonst bei photometrischen Arbeiten: Tunlichste Schonung der Augen des Beobachters, daher Übertragung aller Operationen und Ablesungen, die er nicht unbedingt selbst machen muß, wie insonderheit die jedesmalige Einstellung des linken Spaltes T_1 und die Ablesung der Wellenlänge an einen Gehilfen; sodann mehrmalige Wiederholung der Einstellung, indem man immer abwechselnd einmal in der einen und dann in der anderen Richtung an die gesuchte Stellung herangeht. Daß die Betätigung der Marken zweckmäßig durch einen Heißluftmotor erfolgt, wurde bereits früher erwähnt. So hat der Beobachter nur auf die kreisende Marke zu achten und mit der auf dem Tisch ruhenden rechten Hand die Mikrometerschraube so lange zu verstellen, bis das Kreisen aufhört. Ich wiederhole, was ich schon einmal im 11. Abschnitte erwähnte, daß die Prüfung auf Geradlinigkeit der Bewegung der Marke immer nur in der Ruhelage der Prismen, also bei stillstehender Mikrometerschraube M_1 zu erfolgen hat.

Die Versuchsreihe, die in der obigen Tabelle niedergelegt ist, wurde im vorigen Jahre von einem Mechanikergehilfen der Meßabteilung ausgeführt, der ein vorzügliches stereoskopisches Sehvermögen besitzt und sich für die vorliegenden Messungen als besonders geeignet erwies. Dem Apparat fehlte damals noch mancherlei, was erst später hinzugekommen ist. So vor allem die beiden Wellenlängenskalen und die beiden Mattscheiben vor den Spalten T_1 . Es ist daher nicht ausgeschlossen, daß bei einer Wiederholung dieser Versuchsreihe mit dem jetzigen vervollkommenen Apparat die einzelnen Werte sich ein wenig verschieben werden. Da es mir nur darauf ankommt, die Methode zu erläutern, so möge die Versuchsreihe vorläufig genügen.

Von dem für geringe Helligkeiten angegebenen Verfahren wurde in ausgiebiger Weise Gebrauch gemacht. Es sind im ganzen nur 13 Punkte der Helligkeitskurve, die bestimmt wurden, und es wäre wohl am Platze gewesen, in der Nähe des Helligkeitsmaximums noch einige Punkte zu messen. Immerhin war es möglich, wie aus Fig. 30 ersichtlich ist, durch diese 13 Punkte eine Kurve zu ziehen, die einen durchaus regelmäßigen Verlauf nimmt.

27. Reduktion der gemessenen Helligkeitskurve auf das Normalspektrum.

Die im vorigen Abschnitt ermittelte Helligkeitskurve für das Licht der Petroleumlampe hat hinsichtlich ihrer Form und der Lage des Maximums nur Berechtigung für unseren mit den beiden Glasprismen ausgerüsteten Spektralapparat. Ein anderer Apparat mit anderen Prismen würde einen etwas anderen Verlauf der Kurve und eine etwas andere Lage des Maximums ergeben haben. Einen für alle Apparate übereinstimmenden Verlauf, der dann nur noch von der Strahlungsenergie der Lichtquelle und von der Empfindlichkeit des menschlichen Auges abhängig ist, erzielt man nur mit dem vom Gitterspektroskop gelieferten Normalspektrum.

Wir müssen also die von uns gefundene Kurve auf das Normalspektrum reduzieren. Um das zu tun, müssen wir wissen, wie groß in den einzelnen Spektralbezirken der einem bestimmten Wellenlängenintervall zugehörige Winkelwert der Mikrometerschraube ist. Diesen Winkelwert ΔU können wir weiter oben (Abschnitt 22) unserer ermittelten Wellenlängenskala entnehmen. Diese Kurve hatte als Abszisse die Wellenlängen der einzelnen Spektrallinien und als Ordinaten die diesen Wellenlängen zugehörigen Winkelwerte, diese gemessen durch die Angaben der mit einem Umdrehungszähler und einer hundertteiligen Trommel versehenen Mikrometerschraube M . Aus dieser in großem Maßstab angelegten Kurve entnehmen wir dann die einem bestimmten Wellenlängenintervall, z. B. $\Delta\lambda = 10 \mu\mu$ zugehörigen Winkeldifferenzen $\Delta(U_{10 \mu\mu})$. Wir tragen jetzt als Abszissen die Wellenlängen und als Ordinaten die Werte $\Delta(U_{10 \mu\mu})$ auf, gleichen die Kurve graphisch aus und sind in der Lage, aus ihr für jeden Wert von λ den zugehörigen Wert $\Delta(U_{10 \mu\mu})$ abzulesen. Wie leicht zu sehen, nehmen diese Werte nach dem blauen Ende infolge der starken Dehnung dieser Teile im prismatischen Spektrum immer mehr ab. Ich sehe ganz davon ab, Zahlenwerte anzugeben, ihr Verlauf ist aus der in Fig. 30 wiedergegebenen Kurve zu ersehen.

Da die in Trommelteilen der Mikrometerschraube gemessene Spaltbreite von T_2 für alle Teile des Spektrums gleich groß ist, so haben wir zum Zwecke der Reduktion die aus der Helligkeitskurve entnommenen Ordinaten einfach mit den der gleichen Wellenlänge zugehörigen Werten von $\Delta(U_{10 \mu\mu})$ zu multiplizieren. Wir versehen das Produkt dann noch mit einem Faktor, der von der Wahl des Wellenlängenintervalls $\Delta\lambda$ und von den besonderen Eigenschaften des zur Erzeugung des Normalspektrums dienenden Gitterspektroskops abhängt, im übrigen aber willkürlich gewählt werden kann, da von seiner Wahl die Lage des Helligkeitsmaximums im Normalspektrum nicht weiter berührt wird. Wir geben dieser Konstanten den Wert 7.1 und erzielen

damit für die neue Kurve die gleiche Höhe des Maximalwertes wie für die bisherige. Wie man sieht, sind durch diese Reduktion die Ordinaten im roten Teile des Spektrums kleiner, im blauen Teile des Spektrums größer geworden. Es hat eine Verschiebung des Helligkeitsmaximums nach dem blauen Ende des Spektrums stattgefunden, die ungefähr 20μ beträgt.

28. Ermittlung der Empfindlichkeitskurve des Auges.

Von der von der Flamme ausgesandten Energie — diese gemessen durch das Bolometer,

keit ist man allzuleicht geneigt, eine der Lichtquelle allein eigentümliche Eigenschaft zu erblicken, während es in Wirklichkeit das ausdrückt, was unter dem Zusammenwirken der Strahlungsenergie der Lichtquelle und der Empfindlichkeit des Auges für die verschiedenen Teile des Spektrums vom Auge gesehen wird. Da die Sichtbarkeit des Spektralbezirkes sowohl mit der Empfindlichkeit des Auges und mit der Strahlungsenergie für diesen Bezirk zunimmt, so können wir setzen:

$$\text{Sichtbarkeit} = \text{Energie} \times \text{Empfindlichkeit} \times \text{einer Konstanten,}$$

von der wir die zurzeit noch unbewiesene Voraus-

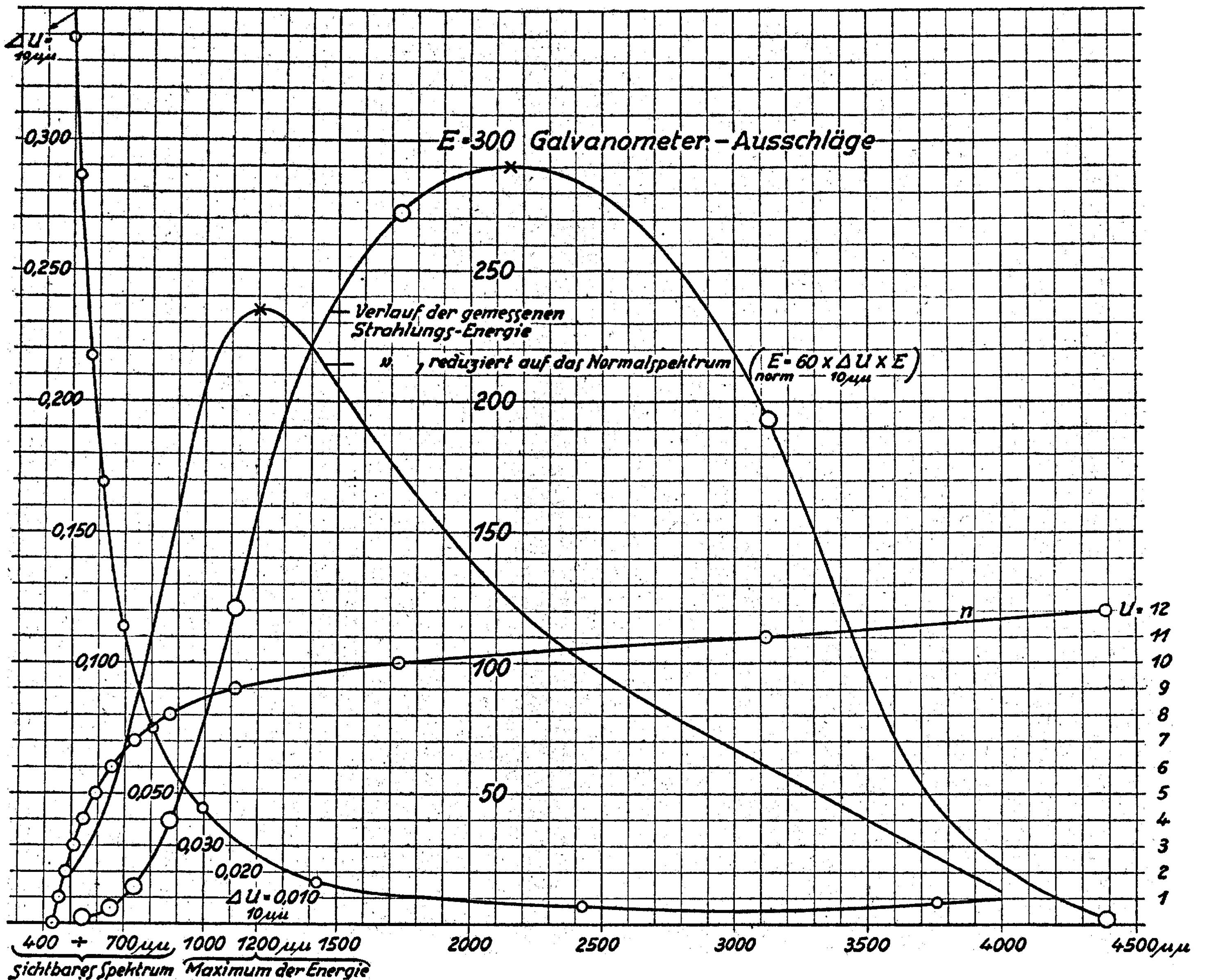


Fig. 31. Verlauf der Strahlungsenergie im Spektrum der Petroleumlampe.

wie bei allen Lichtquellen, die durch Erwärmen zum Leuchten gebracht werden — sieht das Auge nur diejenigen Spektralteile, für die das Auge die erforderliche Empfindlichkeit besitzt, geradeso wie die photographische Platte nur auf diejenigen Strahlen des Spektrums reagiert, für die sie besonders empfindlich oder empfindlich gemacht ist. Daher sollte man die von uns ermittelte Helligkeitskurve besser vielleicht als Sichtbarkeitskurve bezeichnen, denn in dem Worte Hellig-

setzung machen, daß sie für alle Spektralbezirke dieselbe ist, und wir sind in der Lage, aus der bolometrisch gemessenen Energiekurve und unserer photometrisch gemessenen Sichtbarkeitskurve die Empfindlichkeitskurve des bei der photometrischen Messung benutzten Auges abzuleiten.

Einer meiner jüngeren Kollegen im Zeißwerk, Herr Dr. *Sonnefeld*, hat sich auf meine Bitte in entgegenkommender Weise der Mühe unterzogen,

mit einem von ihm konstruierten neuen Strahlungsmesser, bei dem das Spektrum durch ein Steinsalzprisma erzeugt wird, die Strahlungsenergien unserer Petroleumlampe für eine Anzahl von Wellenlängen zu ermitteln. Die Resultate sind in der nachstehenden Tabelle II verzeichnet. Auf die Messung der Energiekurve außerhalb des sichtbaren Spektrums hatte ich kein Gewicht gelegt, deshalb sind über das Rot hinaus nur wenige Messungen gemacht worden. Sie genügen aber, um wenigstens im großen und ganzen den Verlauf der Energiekurve (siehe Fig. 31) auch in diesem Teile des Spektrums erkennen zu lassen. Spätere Messungen haben eine nur wenig abweichende Lage des Energiemaximums ergeben.

Die Tabelle enthält ferner in der vierten Kolumne das Wellenlängenintervall für jedesmal eine Umdrehung (U) der Meßschraube, in der fünften den hieraus berechneten Wert ΔU für

Tabelle II.

U	$\mu\mu$	Beobachtete Galvanometer-ausschläge E	$\Delta \mu\mu$ für 1 U	ΔU für 10 $\mu\mu$	$\mu\mu$
0	436	0,1*	20	0,500	446
1	456	0,2*	29,5	0,408	468,2
2	480,5	0,5	24,5	0,339	495,2
3	510	1,0	35	0,286	527,5
4	545	2,0	46	0,217	568
5	591	2,5*	59	0,169	620,5
6	650	5,5	88	0,114	694
7	738	14,0	133	0,075	804,5
8	871	39,5	246	0,044	994
9	1117	121,0	615	0,016	1424,5
10	1732	273,0	1394	0,007	2429
11	3126	193,0	1266	0,008	3759
12	4392	2,0			

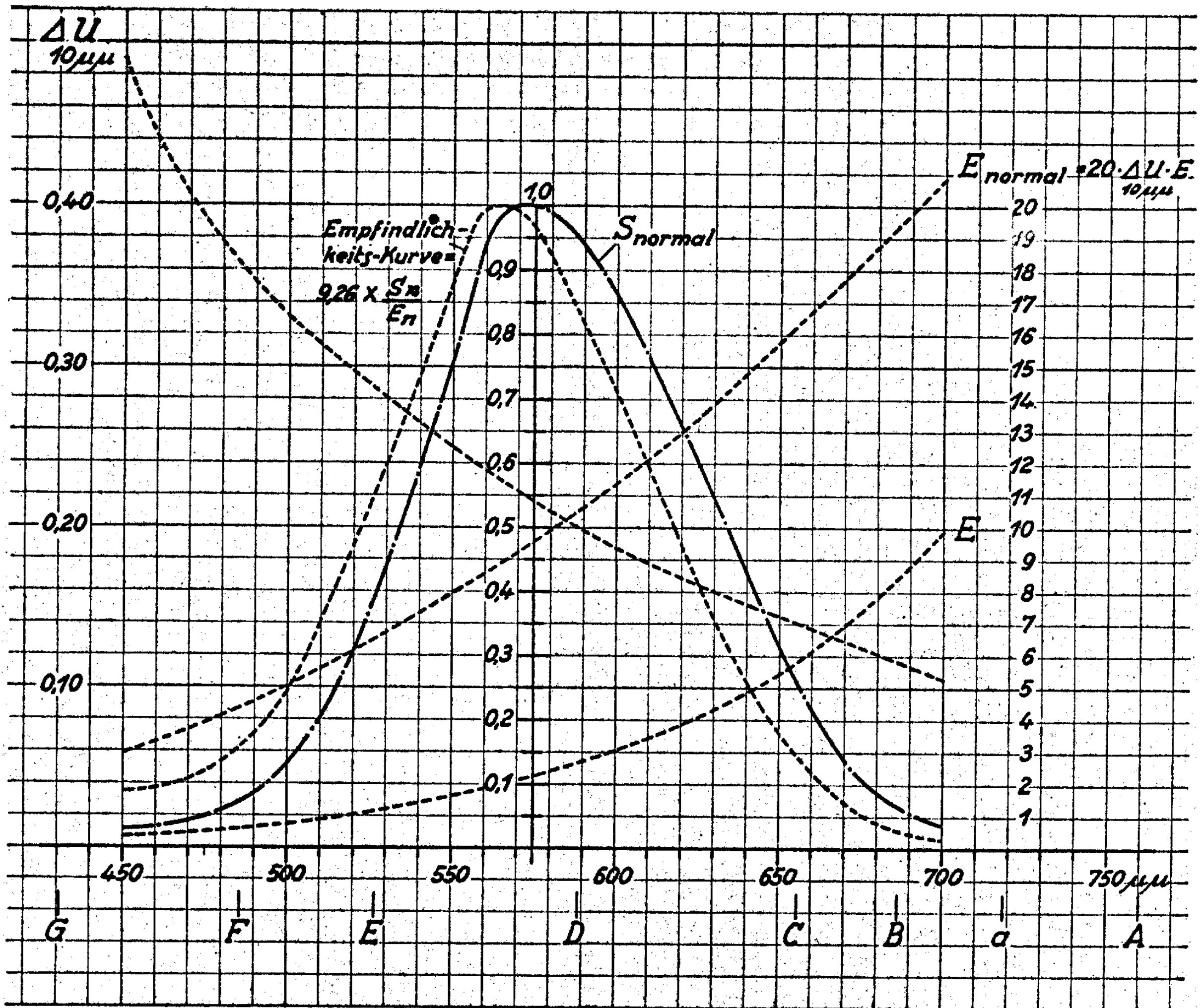


Fig. 32. Die aus der Sichtbarkeitskurve (normal) und der Energiekurve (normal) abgeleitete Empfindlichkeitskurve des Auges.

das Wellenlängenintervall von $10 \mu\mu$ und endlich in der letzten Kolumne die den Werten ΔU zukommenden mittleren Wellenlängen.

Aus den in großem Maßstab gezeichneten und ausgeglichenen Kurven für E und $\Delta U_{10 \mu\mu}$ (Fig. 31) wurden dann für eine Reihe von Wellenlängen

die zusammengehörigen Werte entnommen, miteinander multipliziert und das Produkt zur Herstellung der auf das Normalspektrum reduzierten Energiekurve unserer Petroleumflamme verwertet. Ich verzichte darauf, die Tabellen selbst hier mitzuteilen, das Ergebnis der Reduktion ist

zur Genüge aus Fig. 31 zu ersehen. Der den Produkten hinzugefügte Zahlenfaktor 60 ist beliebig gewählt worden.

In erheblich größerem Maßstabe wurden dann dieselben Zeichnungen noch einmal für das sichtbare Spektrum ausgeführt. Es wurden wiederum die Werte für E und $\Delta U_{10\mu}$, die gleichen Wellenlängen entsprechen, den Kurven entnommen und ihre Produkte zur Konstruktion auch dieses Teiles der normalen Energiekurve E_n benutzt. Das Ergebnis ist aus Fig. 32 zu ersehen. Der Zahlenfaktor 20 wurde beliebig gewählt.

So kennen wir also jetzt die *normale Energiekurve innerhalb des sichtbaren Spektrums und die normale Sichtbarkeitskurve*. Die Quotienten der den gleichen Wellenlängen entsprechenden Werte dieser beiden Kurven liefern uns dann die sogenannte *Empfindlichkeitskurve des Auges*. Um die Maximalwerte der beiden Kurven Sichtbarkeit und Empfindung auf die gleiche Höhe zu bringen, wurde der Quotient noch mit dem Zahlenfaktor 9,26 versehen. Ich unterlasse es auch hier, die Tabellen selbst wiederzugeben, die nach den Rechnungen gezeichnete Kurve in Fig. 32 möge genügen. Wir sehen, das Maximum der Empfindung liegt weiter nach dem blauen Ende des Spektrums zu bei ungefähr 560 bis 565 μ , ein Wert, der sehr nahe mit dem auf anderem Wege für das Empfindlichkeitsmaximum gefundenen Werte übereinstimmt.

29. Helligkeitsmessungen im diskontinuierlichen Spektrum.

Hier ist das von uns für Helligkeitsmessungen an einem kontinuierlichen Spektrum benutzte Verfahren selbstverständlich nicht zu gebrauchen. Wir müssen uns nach einem anderen Verfahren umsehen.

Dieses Verfahren besteht darin, daß wir den linken Apparat auf die hinsichtlich ihrer Helligkeit als Einheit zu wählende hellste Spektrallinie, z. B. auf die grüne Linie der Quecksilberbogenlampe, den rechten Apparat auf die mit ihr zu vergleichende schwächere Linie desselben Spektrums einstellen und dann den Spalt T_1 links soweit verschmälern, bis die anfangs kreisende Bewegung der Marke links herum in eine geradlinige übergeht. Der Messung muß natürlich auch hier die Nulleinstellung des Apparates vorangehen. Sie ist in der Weise vorzunehmen, daß bei Einstellung beider Apparate auf die gleiche Spektrallinie und bei Einstellung beider Spalte T_1 auf die gleiche Spaltbreite die Lage der beiden vor den Spalten T_1 befindlichen Mattscheiben so zueinander reguliert wird, daß die Bewegung der Marke als eine geradlinige erscheint.

Um sicher zu sein, daß die Spektrallinie auch voll von dem Durchlaßspalt T_2 aufgenommen wird, legt man das Doppelfernrohr durch Drehen um eine am unteren Ende des Trägers angebrachte Vertikalachse (siehe Fig. 28) zur Seite

und betrachtet das in T_2 erscheinende Spaltbild mit der hierfür vorgesehenen Vorschlaglupe.

Die Einstellung des Spaltes T_1 links auf Geradlinigkeit der Bewegung des Raumbildes muß vom Beobachter selbst vorgenommen werden. Die hierzu dienende Handhabe mit Schnurlaufübertragung — siehe Fig. 28 — ist so gelegt, daß sie bequem mit der auf dem Tisch ruhenden linken Hand des Beobachters erreicht werden kann. Die Ablesung der eingestellten Spaltbreite hat durch einen Gehilfen zu erfolgen. Selbstverständlich besteht auch hier der Wunsch, die mit dem Spalt T_1 vorgenommene Messung durch Vertauschen der beiden Spektrallinien und durch Verschmälern des Spaltes T_1 rechts zu wiederholen. Man kann das machen, wenn man die Mikrometerschraube des Spaltes T_1 rechts ebenfalls mit einer Handhabe und Schnurlaufübertragung versieht, wie sie für T_1 links vorgesehen ist. Ich habe aber bei dem vorliegenden Apparat darauf verzichtet das zu tun, da man sich auch in anderer Weise helfen kann, und zwar in der Weise, daß man den auf die hellere Spektrallinie eingestellten Spalt T_1 rechts so einengt, daß die Helligkeit rechts geringer ist als die links. Der Helligkeitsausgleich hat dann wiederum durch Einengung des linken Spaltes T_1 zu erfolgen. Das Verhältnis der beiden Spaltbreiten liefert dann das Verhältnis der beiden Helligkeiten.

Ist der Helligkeitsunterschied der einzelnen Spektrallinien sehr groß, wie z. B. bei den vier Spektrallinien der Quecksilberbogenlampe, so kann hier wie oben bei der Ausmessung des kontinuierlichen Spektrums die Messung sehr lichtschwacher Spektrallinien auch in der Weise erfolgen, daß man nicht die hellste, sondern eine schwächere bereits gemessene Linie zum Vergleich heranzieht.

Die auf diese Weise durch Herrn *Angelroth* gemessenen Helligkeitswerte der vier Spektrallinien des Quecksilberlichtes sind in der nachstehenden Tabelle III angegeben.

Tabelle III.

Sichtbarkeit der Linien des Quecksilber-Spektrums gemessen mit dem Stereo-Spektral-Photometer.			
436	491	546	577 579 μ
4	: 0,5	: 200	: 69
14	:		200
200	: 31		

Noch auf einen Punkt möchte ich hier aufmerksam machen. Beim kontinuierlichen Spektrum mußten wir, wie oben gezeigt wurde, die Reduktion der gemessenen Helligkeitskurve auf den Normalspektrum vornehmen. Das haben [??]

hier nicht nötig, denn die für unser diskontinuierliches Spektrum ermittelten Verhältniszahlen der Helligkeiten der einzelnen Spektrallinien sind von der Wahl der dispergierenden Prismen unabhängig. Sie würden, den Verlust durch Absorption und Reflexion in den verschiedenen Apparaten als gleich vorausgesetzt, auch die gleichen bleiben, wenn wir unseren Apparat unter Benutzung von zwei Gitterspektroskopen aufgebaut hätten.

Zum Schluß endlich teile ich nachstehend noch das Ergebnis einer Messungsreihe mit, die Herr stud. *Huß* vom Physikalischen Institut der Universität Jena gleich zu Beginn einer größeren mit dem Stereo-Spektral-Photometer in Angriff genommenen Untersuchung auf meine Bitte und nach erfolgter Anleitung ausgeführt hat. Sie betrifft den Helligkeitsvergleich der Flamme des beim Refraktometer vielfach benutzten Löweschens *Natriumbrenners* (Bimssteinplättchen, getränkt mit einer Schmelzung von salpetersaurem Natrium) mit dem Spektrallicht einer durch den Induktionsstrom zum Leuchten gebrachten *Heliumröhre*.

Unmittelbar vor dem Spalt T_1 rechts befindet sich die Natriumflamme, unmittelbar vor dem Spalt T_1 links die dem Spalt parallel gestellte Kapillare der Heliumröhre. Die vorherige Einstellung des Spaltes T_1 rechts geschieht immer so, daß nach erfolgter Einstellung auf Geradlinigkeit der Bewegung des Raumbildes mit Hilfe der Mikrometerschraube für den Spalt T_1 links dieser von der Breite der leuchtenden Kapillare voll ausgefüllt war. Es wurde erhalten:

Wellenlänge ($\mu\mu$) . . He 501 He 588 Na 589 He 668
Helligkeitsverhältnis 1 : 12 : 1 : 0.5

Allzu hoch darf die Genauigkeit dieser Verhältniszahlen nicht bewertet werden, da die Einstellung auf Geradlinigkeit der Bewegung des Raumbildes durch das beständige Flackern der Natriumflamme beeinträchtigt wird und auch von der Tiefe der strahlenden Flamme abhängt.

Auch noch eine andere Erscheinung macht sich hier bemerkbar. Denn infolge des intermittierenden Lichtes der Heliumröhre ist die Bahn der im Raume sich drehenden Marke keine geschlossene mehr. An ihre Stelle tritt eine Reihe von leuchtenden Einzelmarken, deren Abstand voneinander von der Geschwindigkeit der Markenbewegung und von der Zahl der Unterbrechungen des Induktionsstromes abhängt. Die Versuche haben allerdings ergeben, daß dieser Umstand das Erfassen der geradlinigen Anordnung der einzelnen Markenbilder kaum beeinträchtigt.

Die gefundenen Verhältniszahlen für die drei Linien des Heliumspektrums hätten natürlich auch in der Weise bestimmt werden können, daß man vor den Spalt T_1 rechts an Stelle der Natriumflamme eine zweite Heliumröhre setzt. Nur muß man dann, und das gilt in gleicher Weise auch für den Vergleich der Spektrallinien

verschiedenartiger Geißlerscher Röhren, darauf achten, daß nur ein Induktionsapparat benutzt wird und die Röhren hintereinander in die Leitung eingeschaltet werden, weil jede Zeitdifferenz der beiderseitigen Unterbrechungen das Raumbild der kreisenden Marke beeinflusst.

Schlußbemerkungen.

Mit den vorstehend beschriebenen Messungen ist nur erst der Anfang in der Verwertung der neuen Methode und der ihr dienenden Apparate gemacht worden. Es wird noch sehr viel zu tun geben, ehe das ganze Arbeitsgebiet erschlossen vor uns liegt. Ich muß leider auf eine Fortsetzung dieser Messungen verzichten, weil ich mich doch nur als einäugiger Zuschauer an diesen Messungen beteiligen kann, nachdem das Stereo-Spektral-Photometer soweit durchgearbeitet ist, daß die Messungen mit ihm auch ohne meine Mitarbeit weiter fortgesetzt werden können. Auch glaube ich, daß die Messungen selbst nur dadurch gewinnen werden, daß der Beobachter, der sie ausführt, selbst die Resultate seiner Messungen mitteilt und dafür auch die Verantwortung übernimmt. Daher ist das vorbeschriebene Versuchsinstrument des Stereo-Spektral-Photometers dem physikalischen Institut der Universität Jena überlassen worden, welches dann später über den Fortgang der Untersuchungen weiter berichten wird.

Auf eine bei der Neukonstruktion des Stereo-Spektral-Photometers zu berücksichtigende Neueinrichtung des Apparates möchte ich allerdings noch kurz hinweisen. Sie besteht darin, daß man die beiden dispergierenden Prismen des einen oder des anderen Apparates zum Auswechseln gegen *dispersionslose Reflexionsprismen* einrichtet. Diese Prismen lassen sich so gestalten, daß die Verluste, die die Lichtstrahlen durch Reflexion an den Außenflächen und durch Absorption im Glasinnern erleiden, für beide Arten von Prismen angenähert gleich groß sind. Mit einem solchen Apparat können wir dann nach Belieben einmal wie bisher arbeiten, dann aber auch so, daß wir dem einen Auge jeden beliebigen Spektralbezirk oder jede Spektrallinie einer Lichtquelle, dem anderen Auge aber das spektralunzerlegte Licht derselben oder einer anderen Lichtquelle zuführen, so daß damit die Aufgabe in Angriff genommen werden kann, *die Helligkeiten der einzelnen Teile des Spektrums als Bruchteile der gesamten Helligkeit dieser oder einer anderen Lichtquelle zu bestimmen*. Es ist sicher, daß eine derartige systematische Untersuchung sowohl in physikalischer als auch in physiologischer Hinsicht noch manche interessante Tatsache zutage fördern wird.

Auch wird man der Beantwortung der Frage näher treten können, wie sich die ihrigen oben erwähnten Methoden (Methode der Pupillenmethode, der Sehschärfenmethode und der Flimmermethode) in

ihren Resultaten verhalten, wenn man die Untersuchung nach diesen Methoden ausdehnt auf Spektralbezirke, die zu beiden Seiten des Helligkeitsmaximums liegen, aber nach unserem Verfahren als gleichhell anzusehen sind.

Ein Arbeitsgebiet, auf dem ebenfalls noch sehr viel zu tun sein wird und das für viele Fragen der physiologischen Optik von Bedeutung ist, betrifft die stereo-spektral-photometrische Untersuchung von Personen, die mit *partieller oder totaler Farbenblindheit* behaftet sind. Nach den Messungen, die auf meine Bitte zwei Grün-Rot-Verwechsler, die Herren Dr. *Sonnefeld* (Jena) und Dr. *v. Gruber* (München) gelegentlich mit dem Stereo-Spektral-Photometer unter Verwendung unserer Petroleumlampe als Lichtquelle gemacht haben, sind die Abweichungen von unserer obigen Sichtbarkeitskurve nicht von einer solchen ausschlaggebenden Bedeutung, als daß sich darüber jetzt schon etwas Bestimmtes sagen ließe. Soviel aber läßt sich sowohl auf Grund dieser und der obigen Versuche an farhentüchtigen Personen behaupten, daß die Farbenempfindung anscheinend mit der Helligkeitsempfindung nichts zu tun hat.

Das Hauptinteresse wird sich auf die Beantwortung der *Frage* richten, *wie sich die durch unsere Versuche festgestellte Unempfindlichkeit der „kreisenden Marke“ gegen Farbenunterschiede und gegen Unterschiede in der Farbenempfindung wohl erklären läßt.* Ich habe mir darüber folgende Gedanken gemacht. Wir wissen, daß mit der Abnahme der Helligkeit eines Spektrums die Unterschiede der Farben und die Farben selbst verschwinden, so daß an die Stelle des farbigen Spektrums ein farbloses weißliches Band tritt, das ungefähr im Gelbgrün das Maximum der Helligkeit besitzt. Auch weiß man, daß dieses sog. Dämmerungsspektrum nur im dunkel adaptierten Auge, wie man annimmt vermöge der alsdann in Aktion tretenden farbenuntüchtigen Stäbchen der Netzhaut zu sehen ist. Die naheliegende Erklärung, daß auch in unserem Falle die Stäbchen und nur die Stäbchen an der Erscheinung beteiligt sind, kann aber schon allein deshalb nicht als richtig angesehen werden, weil in der von den farhentüchtigen Zapfen ausgefüllten Fovea, in der die Spitzen der bewegten Marken in der Hauptsache zur Abbildung gelangen, die Stäbchen gänzlich fehlen. Demnach müßten wir annehmen, daß den Zapfen eine doppelte Funktion zukommt, derart, daß sie in der Weise reagieren, daß die erste über die Empfindungsschwelle tretende Helligkeitsempfindung keinerlei Farbenempfindung aufweist. An der scheinbaren Lage des Raumbildes, für die der zuerst sich geltend machende sinnliche Eindruck entscheidend ist, würde dann die später einsetzende Farbenempfindung ebensowenig wie das ebenfalls hinter der bewegten Marke herlaufende Nachbild etwas ändern können.

Ich erhebe keinen Anspruch darauf, mit diesem *Versuch einer Erklärung* das Richtige ge-

troffen zu haben. Bei dem komplizierten Charakter des Problems und bei der Aussichtslosigkeit, für die Empfindung der Farbe und die der Helligkeit ein einheitliches Maß zu gewinnen, ist diese Frage jedenfalls nicht leicht zu beantworten, um so mehr, weil alle diese Dinge letzten Endes doch auf Vorgänge hinauslaufen, die sich im Gehirn des Beobachters abwickeln.

Wir werden also zunächst abzuwarten haben, wie sich die Anhänger der *Heringschen* und die der *Helmholtzschen Farbentheorie* zu den in diesem Aufsatz beschriebenen Erscheinungen und Tatsachen stellen werden. Beide Theorien haben sowohl unter den Physiologen als auch unter den Physikern ihre Anhänger. Keine ist zur allgemeinen Anerkennung gelangt.

Mit Rücksicht auf diese Streitfrage ist es vielleicht von Interesse, noch auf folgendes hinzuweisen. Ich hatte bereits oben bei Gelegenheit der Besprechung der bisherigen Schwierigkeiten der heterochromen Photometrie auf den Gegensatz der Empfindung der Farben Rot und Gelb einerseits und der Empfindung der Farben Grün und Blau andererseits aufmerksam gemacht. Diesem Gegensatz in den Empfindungen trägt die allein auf der phänomenologischen Basis aufgebaute *Theorie der Gegenfarben von E. Hering* dadurch Rechnung, daß sie den genannten Farben eine „spezifisch aufhellende oder verdunkelnde“ Wirkung zuschreibt, während die *Young-Helmholtzsche Dreifarben- oder Dreifaser-Theorie* sich ausschließlich auf den Intensitätsbegriff gründet. Gegen die *Heringsche Theorie der Gegenfarben* hat in letzter Zeit der Wiener Physiker *Franz Exner* in einer Reihe von Aufsätzen („Einige Versuche und Bemerkungen zur Farbenlehre“, Wiener Ber. Bd. 127, S. 1829, 1918, „Zur Kenntnis des Purkinjeschen Phänomens“, ebenda Bd. 128, S. 71, 1918, und „Zur Frage nach der spezifischen Helligkeit der Farben“, Z. f. Sinnesphysiologie Bd. 52, S. 157, 1921) beachtenswerte Versuche und Gründe vorgebracht, aus denen er den Schluß zieht, daß für die *Heringsche Annahme* einer spezifisch aufhellenden oder verdunkelnden Wirkung der Farben „*derzeit kein objektiver Grund*“ vorliegt, eine Schlußfolgerung, die, wie mir scheint, durch unsere Versuche mit dem Stereo-Spektral-Photometer eine nicht unwesentliche Unterstützung erfährt. Ich denke hierbei in erster Linie an die Tatsache, daß das Helligkeitsverhältnis z. B. von Spektralrot und Spektralblau, also nach *Hering* einer spezifisch aufhellenden und einer verdunkelnden Farbe, je nach der Wahl oder der Temperatur der Lichtquelle *größer als eins, gleich eins und kleiner als eins sein kann*, wobei also nicht die Farbe (Wellenlänge), sondern einzig und allein der Helligkeitsunterschied der beiden Farben für das Kreisen der Marke verantwortlich gemacht werden muß.

Selbstverständlich ist damit der Streit um die Existenzberechtigung der einen oder der anderen

Theorie nicht entschieden, aber eine neue Grundlage für eine weitere Erörterung dieser Fragen ist gegeben und Tatsachen liegen vor, an denen eine Farbentheorie, wie sie auch sonst theoretisch begründet sein mag, nicht achtlos vorübergehen kann.
