

(Aus dem physiologischen Institut zu Freiburg i. B.)

Über den Einfluß von Lichtstärke und Adaptation auf das Sehen des Dichromaten (Grünblinden).

Von

J. v. KRIES und W. NAGEL.

(Mit 3 Figuren im Text.)

Seit langer Zeit ist bekannt, daß für die Dichromaten zu jedem homogenen Lichte eine gleich erscheinende Mischung zweier bestimmter Lichter, eines lang- und eines kurzwelligen gefunden werden kann. In systematischer Weise ist dies zuletzt in den Beobachtungen der Mitarbeiter KÖNIGS dargelegt worden, bei welchen derart ermittelt wurde, welche Mengen gelbroten Lichtes ($645 \mu\mu$) und blauen Lichtes (460 , resp. $435 \mu\mu$), zusammengefügt, dem Lichte beliebiger Spektralteile gleich erscheinen. Schon sehr bald nach der Gewinnung der ersten Resultate dieser Art wurde von KÖNIG auch mitgeteilt, daß die Gleichungen dieser Art von der absoluten Intensität der sämtlichen angewandten Lichter nicht unabhängig seien, daß also z. B. eine für hohe Lichtstärken gültig gefundene Gleichung bei gleichmäßiger Abschwächung sämtlicher Lichter unrichtig werde. Da das sog. NEWTONSche Farbenmischungsgesetz die Unabhängigkeit der Mischungsgleichungen von der absoluten Intensität implicite behauptet, so wurde die erwähnte Thatsache als „Abweichung vom NEWTONSchen Farbenmischungsgesetze“ bezeichnet. Eine Anzahl analoger Erscheinungen ist alsdann auch mit Bezug auf die Mischungsgleichungen des Trichromaten (Farbentüchtigen) beschrieben worden.

Das ganze Erscheinungsgebiet hat neuerdings ein besonders hohes theoretisches Interesse gewonnen wegen seiner Beziehungen zu der über die Funktion der Stäbchen aufgestellten Theorien,

wie dies der eine von uns im allgemeinen bereits dargelegt hat.¹ Die dort entwickelte Annahme bestand, um die Hauptsache hier sogleich kurz anzudeuten, darin, daß zwei (einfache oder zusammengesetzte) Lichter hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Zapfenapparat übereinstimmen können (worauf im wesentlichen ihr Gleicherscheinen bei hoher Intensität beruht), ohne daß darum ihre Wirkungen auf den Stäbchenapparat die gleichen zu sein brauchten, was sich dann bei der Abschwächung und bei Dunkeladaptierung des Auges bemerkbar macht.

Es konnte damals zum Teil auf die Ergebnisse der unter KÖNIGS Leitung entstandenen Arbeiten Bezug genommen, zum Teil auch hinzugefügt werden, daß qualitativ auch gewisse neuerdings von dem anderen von uns (N.) angestellte Versuche in vollkommener Übereinstimmung mit jenen sich befänden. Eine genauere und insbesondere auch quantitative Bearbeitung des ganzen Gebietes erschien aber doch sehr wünschenswert. Denn erstlich konnte bei einem noch wenig behandelten Gegenstande selbst die Gewinnung ganz übereinstimmender Ergebnisse von einem anderen Beobachter und unter vielfach anderen Bedingungen von Wert sein. Abgesehen hiervon erschienen aber die Beobachtungen von KÖNIG und seinen Mitarbeitern in der That mit gewissen Mängeln behaftet, welche zu vermeiden oder wenigstens zu berücksichtigen angezeigt und möglich war. Der erste betrifft den Punkt, welchen HERING mit Recht betont (allerdings in seiner Bedeutung wohl überschätzt) hat, daß bei KÖNIG zu große Gesichtsfelder angewandt wurden und infolgedessen die Lichtabsorption im Pigment der Macula lutea einen unkontrollierbaren Einfluß auf die Gleichungen gewinnen konnte.

Der andere war der, daß den Verhältnissen der Adaptation nicht genügend Rechnung getragen worden ist. Allerdings sind wohl zweifellos die Beobachtungen über die Helligkeitsverteilung bei geringsten Lichtstärken mit guter Dunkeladaptation ausgeführt worden, wie sich diese im Dunkelzimmer und bei Beobachtung nur sehr lichtschwacher Felder von selbst entwickelt. Dagegen kann man über den Adaptationszustand, mit dem die Beobachtungen bei größeren Lichtstärken ausgeführt wurden, einigermaßen im Zweifel sein.

Aus diesem Grunde unternahm der eine von uns (N.), der

¹ Diese Zeitschr. IX. S. 89 f.

Dichromat ist, und zwar der Gruppe der Grünblinden im HELMHOLTZschen Sinne angehört, unter Mitwirkung und Beratung des anderen, die betreffenden Beobachtungen in systematischer und messender Weise auszuführen. Über die Ergebnisse soll im folgenden berichtet werden. Vorausgeschickt sei noch, daß die Beobachtungen durchgängig mit einem von der Firma Schmidt & Hänsch gebauten Farbenmischungsapparate der von HELMHOLTZ zuerst angegebenen, seitdem von KÖNIG mehrfach modifizierten Art angestellt wurden. Bekanntlich gestattet der Apparat, jedes der beiden aneinanderstossenden Felder mit einem homogenen oder auch mit der Mischung zweier homogener Lichter zu erleuchten. Eine Reihe speziellerer Bemerkungen über den Apparat, seine Benutzung, die Berechnungen etc. sind in dem den Schluß dieser Abhandlung bildenden Abschnitt VI zusammengestellt.

Die verschiedenen spektralen Lichter sind im Folgenden entweder nach ihrer Wellenlänge, in $\mu\mu$, oder aber auch nach ihrem spektralen Ort, in Teilstrichen der Skala des Kollimators angegeben; die letzteren Zahlen sind von dem Ort des Lithiumlichtes ($670,8 \mu\mu$) als Nullpunkt aus gerechnet und in vier-eckige Klammern eingeschlossen. Die diesen spektralen Orten entsprechenden Wellenlängen sind aus der im Anhang gegebenen Tabelle ersichtlich; so ist also z. B. [6] ein Licht, dessen spektraler Ort um 6 Teilstriche von dem Orte des Lithiumlichtes entfernt ist; seine Wellenlänge = $591 \mu\mu$. Und zwar beziehen sich diese Angaben alle auf das Spektrum des Kollimators II, welches in seiner ganzen Ausdehnung durchuntersucht wurde, während der Kollimator I die feststehenden Vergleichslichter von konstanter Wellenlänge zu liefern hatte.

I.

Hellgleichungen.

Die Aufgabe einer systematischen Darstellung der für einen Dichromaten geltenden Mischungsgleichungen kann, wie angedeutet wurde, unter mancherlei verschiedenen Modalitäten gestellt werden, welche sich auf die Stärke der benutzten Lichter, auf den Adaptationszustand des Auges und auch auf die bei der Beobachtung funktionierende Netzhautpartie beziehen. Lassen wir uns bei der Wahl aus der großen Zahl sich so

ergebender Möglichkeiten von der theoretischen Erwägung leiten, so wird es sich empfehlen, zunächst einen Beobachtungsmodus einzuhalten, bei welchem möglichst rein und scharf die Lichtwirkungen auf den Zapfenapparat zum Ausdruck kommen. Man kann übrigens bemerken, daß es sich dabei um eine auch abgesehen von der Theorie wohl charakterisierte Art des Sehens handelt, nämlich um das Sehen bei bedeutenden Lichtstärken und mit helladaptiertem Auge, überdies mit wesentlicher Bevorzugung des Netzhautzentrums. Eine Gleichung, welche besagt, daß unter diesen Umständen zwei Lichter gleich aussehen, wollen wir eine Hellgleichung nennen, und die beiden Lichter, welche in dieser Beziehung stehen, etwa ein homogenes und eine Mischung aus Rot und Blau, mögen helläquivalent heißen.

Zur Gewinnung der Hellgleichungen waren einerseits möglichst hohe Lichtstärken anzuwenden, und wir wählten sie so hoch, als der Apparat sie mit den Triplexbrennern zu erzielen gestattete, ohne die namentlich bezüglich der Reinheit der Spektren gesetzten Grenzen zu überschreiten. Es liefs sich indessen vermuten, und die Erfahrung bestätigte es, daß hohe Lichtstärken, wenigstens innerhalb der uns erreichbaren Grenzen, doch nicht ausreichen, um die Stäbchenfunktion ganz zurücktreten zu lassen, und daß die andere Bedingung, die der Helladaptation, nicht außer acht zu lassen ist. Wir haben daher die Beobachtungen, von der seitherigen Übung abweichend, im nicht verdunkelten Zimmer angestellt, nicht ohne einige Sorge zunächst, daß das in den zwar leidlich, aber doch nicht absolut lichtdicht abgeschlossenen Apparat eindringende diffuse Licht erhebliche Versuchsfehler bedingen möchte. Indessen liefs sich bald erkennen, daß bei unserer Versuchsanordnung die hierdurch bedingten Ungenauigkeiten nicht merklich in Betracht kommen. In der That ist auch das diffuse Licht, da in einem Zimmer mit geschwärzten Wänden gearbeitet wurde, nicht sehr erheblich, wird also namentlich bei den ziemlich starken Erleuchtungen der Felder bei den Hellgleichungen nicht merklich stören können. Wir haben daher diese Verfahrungsweise für die Gewinnung von Hellgleichungen stets festgehalten.

Es erwies sich sogar die Erhaltung einer möglichst guten Helladaptation für die Gewinnung konstanter Resultate nicht

ganz unwichtig, und es war notwendig, diesem Punkte besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden, da das zu betrachtende Feld hier auf einem ausgedehnten schwarzen Grunde erscheint und somit schon bei längerer Beobachtung ein gewisser Grad von Dunkeladaptation einzutreten pflegt. Der Beobachter mußte daher darauf halten, nach Herstellung einer Gleichung immer einige Zeit zum Fenster hinauszuschauen und sodann die Gleichung nochmals auf ihre Gültigkeit zu prüfen. Da die Hellgleichungen für die Stelle des deutlichsten Sehens gültig hergestellt werden sollten, so wurde ein ziemlich kleines Feld, etwas kleiner als 2° Durchmesser, benutzt; die Gleichungen werden also, da das Feld auch möglichst direkt fixiert werden sollte, durch die Absorption der kurzwelligen Lichter im Maculapigment beeinflusst sein.¹

Was nun die speziellere Gestaltung der Hellgleichungen anlangt, so war der gegebene Modus der, für eine Anzahl homogener Lichter von einem bis zum anderen Ende des Spektrums helläquivalente Gemische aus einem lang- und einem kurzwelligen Lichte aufzusuchen. Wir wählten für das Gemisch als langwelligen Bestandteil ein Rot (Gelbrot) von der Wellenlänge $645 \mu\mu$, als kurzwelligen ein Blau $460,8 \mu\mu$. Es war demgemäß der eine, das homogene Licht liefernde, Kollimator (II) successive auf eine Reihe verschiedener Punkte des Spektrums einzustellen, während der andere, das Gemisch liefernde, feststand. Auf diese Weise wurden 22 Punkte des

¹ Man wird vielleicht einen Widerspruch darin finden, daß hier auf die Helladaptation Wert gelegt wird, während später an der Behauptung festgehalten wird, daß für kleine zentrale Bezirke die Gleichungen vom Adaptationszustand unabhängig seien. Dies ist jedoch keineswegs eine Inkonsequenz. Wenn bei mäßig dunkeladaptiertem Auge beobachtet wird, so gewinnen selbst bei Feldern von mäßiger Größe (weniger als 2°), wie sie hier benutzt wurden, die Nachbarteile des Zentrums einen bedeutenden Einfluss auf die Gleichungen, sofern man nicht ganz besonders Sorge trägt, dies durch strenge Fixation auszuschließen. Prinzipiell also wäre es freilich möglich, Zapfengleichungen auch mit dunkeladaptiertem Auge zu erhalten; aber die dazu erforderliche Vermeidung der Blickschwankungen würde den Versuch nicht nur erschweren, sondern auch die Genauigkeit vermindern. Bei gut helladaptiertem Auge dagegen unterscheiden sich die Gleichungen des Zentrums von denen der nächsten Nachbarteile nur wenig, und so kann eine Hellgleichung auch ohne Einhaltung ganz strenger Fixation gewonnen werden.

Spektrums bestimmt. Das Ergebnis einer derartigen Bestimmungsreihe präsentiert sich in der Form, daß für jedes homogene Licht die in dem äquivalenten Gemisch erforderlichen Rot- und Blaumengen anzugeben sind oder, wie man sagen kann, die Verteilung der Rot- und der Blauwerte über das Spektrum hin. Zur richtigen Beurteilung der Bedeutung einer solchen Darstellung sei hier nur noch hervorgehoben, daß die Einheiten des Rot- und Blauwertes hier als willkürlich gewählte zu betrachten sind.

Das System der erhaltenen Hellgleichungen ist nun in Tabelle I (S. 8) enthalten. Dabei ist im ersten Stabe der spektrale Ort und die Wellenlänge des betreffenden homogenen Lichtes angegeben, der zweite Stab enthält die Rot-, der dritte die Blauwerte.

Da aus den im Anhang dargelegten Gründen die Ergebnisse einer einzelnen, besonders gut übereinstimmenden Versuchsreihe in sich wohl für genauer zu halten sind, als die Ergebnisse zahlreicher, zum Teil weniger guter Reihen, so ist in Tabelle I das System der Hellgleichungen zunächst auf Grund einer derartigen Reihe angeben, wobei jede angeführte Zahl den Mittelwert aus nur drei Einstellungen, die unter einander durchgängig gut übereinstimmten, darstellt. Doch sind, teils der Vollständigkeit wegen, teils auch um eine Kontrolle zu ermöglichen, in Parenthese und kleinem Druck diejenigen Zahlen beigefügt, welche als das Gesamtmittel aller gemachten (8) Einstellungen sich berechnen.¹

In übersichtlicherer Weise bringt die graphische Darstellung die Ergebnisse zum Ausdruck. Der Figur 1 sind die Mittelwerte der einen, auch in der Tabelle bevorzugten Reihe zu Grunde gelegt.² Die Abscissen geben die Punkte des Dispersionsspektrums in Teilstrichen der Kollimatorskala an, während durch die liegenden Zahlen die Wellenlängen bemerkt sind; die

¹ Die Bedeutung der im vierten Stabe hinzugefügten Bemerkungen, die hier zunächst nicht erörtert werden kann, findet sich im Anhang dargelegt.

² Eine unter Umständen deutlich bemerkbare Fehlerquelle stellt, wie oben schon erwähnt, eine zu geringe Helladaptation des Auges dar. Sie wirkt besonders in der Weise, daß die grüngelben Lichter mit ihrer sehr hohen Stäbchenvalenz dadurch an Helligkeit gewinnen, wodurch einerseits eine Verstärkung des Rot erforderlich wird (also der Rotwert zu hoch erscheint), andererseits aber auch das gelbgrüne Licht an

Ordinaten der ausgezogenen Kurve geben die Werte des Rotanteils, die Ordinaten der gestrichelten Kurve die des Blauanteils. Eine Umrechnung der Kurven auf gleiche Areale, die für uns kein direktes Interesse hat, ist unterlassen worden, doch haben wir den demzufolge ganz beliebigen Maßstab der Kurven so gewählt, daß ein Vergleich mit den KÖNIGSchen Kurven durch den Augenschein möglich ist. Es ist gerade ein Vergleich mit diesen, der bereits eine kurze Erörterung dieser Hellkurven für sich allein interessant macht.

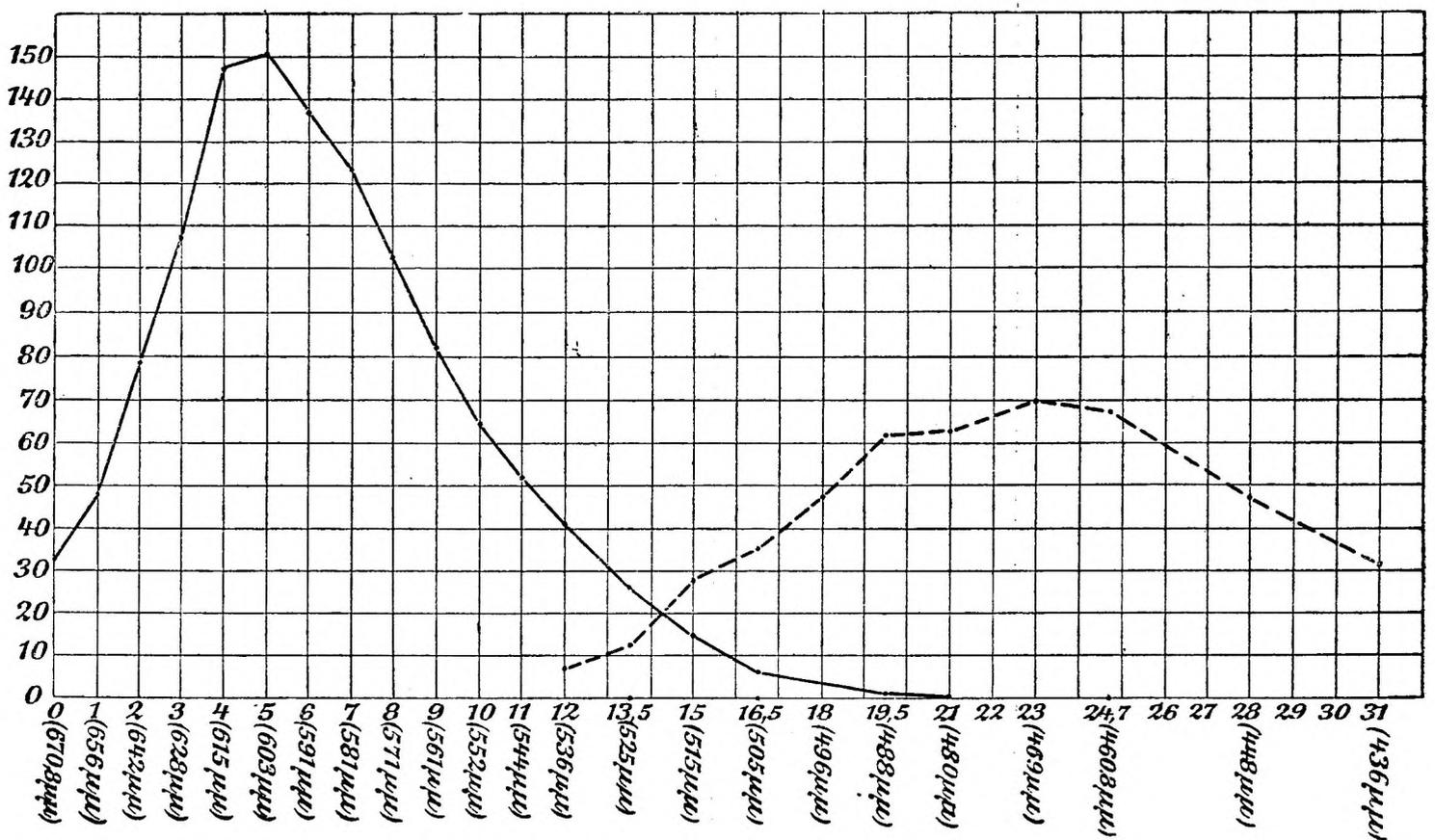


Fig. 1.

Verteilung der Rot- und der Blauwerte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes.

Man wird bemerken, daß gegenüber den KÖNIGSchen Kurven hauptsächlich ein Unterschied hervortritt. In unserer Kurve beginnt der Blauanteil überhaupt erst bei Teilstrich 12, entsprechend einer Wellenlänge 536, während er in den Kurven KÖNIGS sich viel weiter, bis 600 $\mu\mu$, und noch weiter mit merk-

Sättigung einbüßt, wodurch ein Blauzusatz im Gemisch erforderlich wird, der bei einer ganz korrekten Hellgleichung nicht verlangt wird. Hierin liegt der Grund, weshalb bei einigen Beobachtungen schon bei den Lichtern [10] und [11] kleine Blauzusätze in Gemische gegeben wurden, während bei guter Helladaptation zwischen diesem Licht und dem Rot (645) eine Gleichung ohne Sättigungsdifferenz sich herstellen liefs.

Tabelle I.
System der Hellgleichungen.

Spektraler Ort der homogenen Lichter ($Li_{\alpha} = 0$)	Rotwerte	Blauwerte	Angewandte Spaltweiten
0 (670,8 $\mu\mu$)	33 (33)	—	Sp. I = 80
1 (656)	48 (51)	—	"
2 (642)	79 (81)	—	"
3 (628)	107 (114)	—	"
4 (615)	147 (134)	—	"
5 (603)	151 (138)	—	"
6 (591)	137 (134)	—	"
7 (581)	124 (122)	—	"
8 (571)	103 (102)	—	"
9 (561)	82 (78)	—	"
10 (552)	64 (69)	0 (2,8)	"
11 (544)	52 (52)	0 (4,8)	"
12 (536)	41 (38,5)	6,3 (9,7)	Sp. II = 100
13,5 (525)	26 (24,5)	12 (15,1)	" " = 100
15 (515)	15 (14,0)	28 (28,9)	" " = 150
16,5 (505)	7,7 (7,4)	36 (37,0)	" " = 150
18 (496)	3,7 (3,5)	48 (46,3)	" " = 200
19,5 (488)	1,6 (1,7)	62 (59)	" " = 200
21 (480)	0,9 (0,9)	64 (64)	" " = 200
23 (469)	0,3 (0,3)	70 (68)	" " = 300
24,7 (460,8)	Sp.	67 (62)	" " = 300
28 (448)	Sp.	47	Sp. I = 300
31 (436)	—	31	" " = 300

lichen Beträgen erstreckt. Dieser Punkt ist von einigem Interesse; die Differenz beruht in sehr deutlich ersichtlicher Weise auf dem Unterschiede des Verfahrens. Auf kleinen Feldern und bei guter Helladaptation, darüber lassen die in diesem Punkt mit besonderer Sorgfalt vielfach wiederholten Versuche keinen Zweifel bestehen, läßt sich zwischen Licht $550 \mu\mu$ oder $544 \mu\mu$ und 645 eine vollkommen zutreffende Gleichung gewinnen; ja selbst bei 536 (Teilstrich 10) ist die Sättigungsdifferenz noch so gering, daß sie sich den Fehlergrenzen nähert. Zwischen einem rotgelben Lichte von $645 \mu\mu$ und einem gelbgrünen von $550 \mu\mu$ sind aber die Differenzen der Stäbchenvalenzen sehr beträchtlich. Sobald man also mit etwas größeren Feldern und gar noch mit mäßig dunkeladaptiertem Auge arbeitet, ist es unmöglich, Gleichungen zwischen $645 \mu\mu$ und $550 \mu\mu$ zu erhalten; das letztere Licht erscheint zu ungesättigt, und es muß, um Gleichheit zu erhalten, dem Rot eine Blauzumischung gegeben werden. Die Sache liegt also folgendermaßen. Die von KÖNIG gefundenen Kurvenreihen lassen erkennen, wie sich die Mischungsverhältnisse bei einer mehr oder weniger stark hervortretenden Funktion der Stäbchen gestalten; sein Verfahren reicht aber nicht aus, um eine Darstellung zu gewinnen, welche die Verhältnisse des Zapfenapparates ganz isoliert zum Ausdruck bringt. In dem Sinne unserer theoretischen Auffassung hat also KÖNIG dem thatsächlich zu erreichenden Extrem sich nur angenähert, ohne es ganz zu erreichen; auch seine der höchsten Lichtstärke entsprechenden Kurven sind schon gemischter Natur, bezeichnen einen Zustand, bei dem die Stäbchen bereits merklich in Funktion sind.

Mehrere Dinge klären sich hierdurch in befriedigender Weise auf. EBBINGHAUS¹ hat gegenüber theoretischen Betrachtungen KÖNIGS darauf hingewiesen, daß die Kurve der Blauwerte für den Trichromaten einer- und den Dichromaten andererseits nicht, wie nach KÖNIG zu erwarten sei, übereinstimmend, sondern in der Strecke von 536 bis $590 \mu\mu$ stark verschieden verlaufen. Der Grund hierfür liegt nun in der Hauptsache darin, daß ein Auftreten von Blauwerten beim Dichromaten überhaupt nur auf Einmischung der Stäbchenfunktion, also auf einem nach Adaptation, Feldgröße etc. ungemein variablen

¹ *Diese Zeitschr.* V. S. 160.

Momente beruht. Der wahre Wert der Blaukurve für helladaptiertes Auge und kleines Feld, d. h. für ausschließliche Zapfenfunktion, ist bis mindestens $550 \mu\mu$ noch nahezu Null, wie eben daraus hervorgeht, daß der Dichromat zwischen Lichtern von $670 \mu\mu$ einerseits und solchen bis etwa $549 \mu\mu$ Gleichungen ohne Sättigungsdifferenz herstellen kann. Und für den Trichromaten liegt die Sache ganz ebenso; denn er kann aus Lithiumrot und einem Grüngelb (bis $550 \mu\mu$) Mischungen herstellen, die homogenem Gelb oder Orange ohne merkbare Sättigungsdifferenz gleich aussehen, sofern mit helladaptiertem Auge und kleinen Feldern untersucht wird. Der wahre Wert der Blaukurve ist also in beiden Fällen beim Farbentüchtigen wie beim Farbenblinden, wenn nicht absolut gleich Null, jedenfalls von so minimalem Betrage, daß er sich einer messenden Feststellung entzieht.

Wenn man übrigens, wie KÖNIG hervorhebt und wir bestätigen müssen, die ersten kleinen Beträge der Blaukurven nur mit großer Unsicherheit bestimmen kann, so liegt dies nicht allein an dem eben erwähnten Umstande, sondern zum Teil auch an etwas anderem. Es wäre nämlich ein großer Irrtum, zu glauben, daß ein Rotwert und ein Blauwert, die in den hier gewählten Einheiten durch gleiche Zahlen bezeichnet sind, auch etwa gleiche Empfindungseffekte darstellen. Lassen sich auch diese (es handelt sich ja dabei um Helligkeitsvergleiche verschiedener Farben) stets nur unvollkommen vergleichen, so ist immerhin ein gewisser Vergleich doch möglich. Im Gasdispersionsspektrum ist nun für den Grünblinden, wie wir bei anderer Gelegenheit bestimmten, das Lithiumrot etwa so hell, wie die 8—12fache Menge blauen Lichtes von $480 \mu\mu$. Danach läßt sich überschlagen, daß in unseren Einheiten ein Teil Rot so hell erscheint, wie ca. 20 Teile Blau. Hiernach ist es ganz begreiflich, daß z. B. gegenüber 30—35 Teilen Rot 6 oder 10 Teile Blau noch eine äußerst geringfügige Rolle spielen, während von Rot noch einige Zehntel gegenüber 60 Blau sich bestimmen lassen.

II.

Dunkelgleichungen.

Als zweite Aufgabe präsentierte sich nicht minder naturgemäß diejenige, von der wir, theoretisch genommen, die Dar-

stellung der Wirkungen auf den Stäbchenapparat, der Stäbchenvalenzen erwarten können. Auch hier handelt es sich um die genauere Untersuchung einer bestimmten Art des Sehens, nämlich desjenigen bei geringer Lichtstärke und dunkeladaptiertem Auge, welches dadurch charakterisiert ist, daß keine Farben unterschieden werden. Da wir diese Art des Sehens auch kurz als Dunkel- oder Dämmerungssehen bezeichnen können, so wollen wir die hier zu erhaltenden Gleichungen Dunkel- (Dämmerungs-) Gleichungen nennen; zwei Lichter, welche unter diesen Umständen gleich erscheinen, mögen dunkel- (dämmerungs-) äquivalent heißen.

Auch für die systematische Darstellung der Dunkelgleichungen ist der genauere Modus unmittelbar gegeben. Da nämlich hier keine Farben unterschieden werden, somit zwischen je zwei beliebigen homogenen Lichtern eine Dunkelgleichung gewonnen werden kann, so ist nur erforderlich, für eine passend gewählte Reihe homogener Lichter, etwa die 22 auch vorher in den Helligleichungen benutzten, Dämmerungsgleichungen mit irgend einem dauernd festgehaltenen Vergleichslichte herzustellen. Das Ergebnis einer derartigen Beobachtungsreihe präsentiert sich dann in der Form, daß für jedes homogene Licht die der Einheit desselben äquivalente Menge des Vergleichslichtes angegeben wird. Was wir so erhalten, kann auch direkt als die Verteilung der Helligkeit im lichtschwachen (farblos gesehenen) Spektrum bezeichnet werden. Der Theorie nach hätten wir hierin eine Darstellung der „Stäbchenvalenzen“ der verschiedenen Lichter, der Abhängigkeit der Stäbchenvalenz von der Wellenlänge. Die hier gemachte Ermittlung ist aber, wie man bemerkt, genau die nämliche, wie sie HERING zur Bestimmung der „Weißvalenzen“ anwendet, und die erhaltenen Werte sollten nach seiner Anschauung die Stärke der Wirkung auf die schwarzweiße Sehsubstanz, den Weißwert der verschiedenen Lichter ausdrücken. Da es notwendig ist, für diese Dinge kurze, der Theorie nicht vorgreifende Ausdrücke zu haben, so wollen wir die betreffenden Werte als die Dämmerungswerte oder Dämmerungsvalezen der verschiedenen Lichter bezeichnen; der eventuell mißverständliche Ausdruck der Dunkelvalenz soll vermieden werden.

Zu bemerken wird noch sein, daß, da beim Dämmerungssehen das Sehen mit dem Netzhautzentrum jedenfalls stark zurücktritt (wenn nicht ganz ausfällt), die Dunkelgleichungen

naturgemäß auf eine weniger stark pigmentierte Netzhautstelle sich beziehen.

Hier geben wir wiederum in Tabelle II die Ergebnisse einer als vorzugsweise zuverlässig zu betrachtenden Bestimmungsreihe und in Figur 2 die graphische Darstellung, in welcher die Abscissen den Ort des betr. Lichtes im Dispersionsspektrum, die Ordinaten seinen Dämmerungswert bedeuten. Allerdings versteht sich von selbst, daß die Dunkelgleichungen nicht mit derselben Sicherheit und Genauigkeit eingestellt werden können,

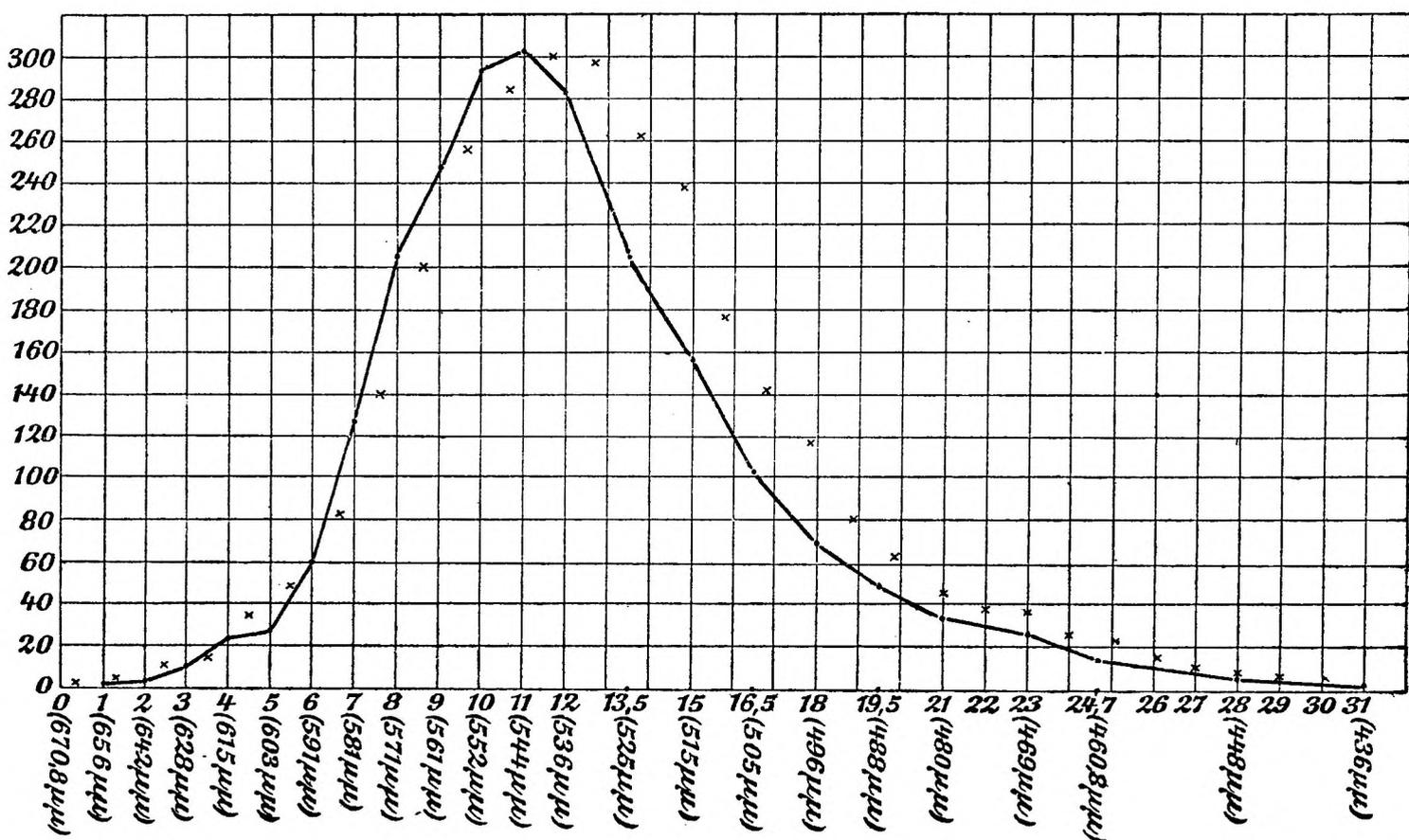


Fig. 2.

Verteilung der Dämmerungswerte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes.

wie die Hellgleichungen. Bei den geringen Lichtstärken, auf die man sich beschränken muß, ist der Vergleich stets ein relativ unsicherer. Es verdient bemerkt zu werden, daß diese Schwierigkeit für die verschiedenen Lichter in sehr ungleichem Maße besteht. Die Grenze nämlich, welche nicht überschritten werden darf, ist ja stets durch das Auftreten von Farbendifferenzen gegeben. Je höher nun, um es kurz auszudrücken, die Stäbchenvalenz im Vergleich zu der gesamten Zapfenvalenz ist, um so stärkere Stäbchenerregungen können noch in den Dunkelgleichungen verwendet werden, bei um so

größerer Helligkeit kann noch beobachtet werden. Am meisten ist dies in der brechbareren Hälfte des Spektrums der Fall. Bei den langwelligen Lichtern ist dagegen das Übergewicht der Stäbchen über die Zapfen ein so geringes, daß wir uns, um nicht chromatische Erregung zu erhalten, auf äußerst geringe Lichtstärken beschränken, die Vergleichen also bei sehr großer Dunkelheit ausführen müssen. Können daher auch die Dämmerungswerte nur auf eine geringere Genauigkeit als die Hellgleichungen Anspruch machen, so zeigt doch schon die Gewinnung einer leidlich glatten Kurve, daß die Fehler nicht von der Art sind, um die Möglichkeit der gewünschten Bestimmungen überhaupt in Frage zu stellen.

Tabelle II.

Dämmerungswerte der homogenen Lichter.

Spektraler Ort der homogenen Lichter $I_{\alpha} = 0$	Dämmerungs- wert
0 (670.8 $\mu\mu$)	?
1 (656)	19.3
2 (642)	36
3 (628)	110
4 (615)	254
5 (603)	276
6 (591)	599
7 (582)	1276
8 (571)	2061
9 (561)	2477
10 (552)	2930
11 (544)	3027
12 (536)	2820
13.5 (525)	2055
15 (515)	1576
16.5 (505)	1015
18 (496)	697
19.5 (488)	486
21 (480)	318
23 (469)	263
24.7 (460.8)	146
28 (448)	46
31 (436)	17

Noch deutlicher geht dies aus dem Vergleich mit anderen ähnlichen Beobachtungsserien hervor, welche, mit der hier vorgelegten zwar nahe übereinstimmend, doch mit Deutlichkeit gewisse (für unsere Fragen übrigens nicht erhebliche) Differenzen zu erkennen gestatten. Als Illustration mögen die der graphischen Darstellung hinzugefügten Kreuze dienen, welche die mittleren Ergebnisse zahlreicher älterer Versuche darstellen.

Trotz der allgemeinen Übereinstimmung ist sehr wohl zu konstatieren, daß hier die Kurve nach rechts hin etwas weniger stark abfällt, auch der Gipfel ein wenig weiter rechts liegt. Der Grund der Abweichung liegt vermutlich zum Teil darin, daß diese Beobachtungen sich auf das Spektrum des anderen Kollimators beziehen, zum Teil mag er auch in anderen, im Anhang noch zu erörternden Umständen beruhen. Jedenfalls ist ersichtlich, daß die Sicherheit der Beobachtung groß genug ist, um derartige, sei es in der Beschaffenheit des untersuchten Lichtes, sei es in den Methoden der Abschwächung und quantitativen Ermittlung beruhende Unterschiede deutlich bemerkbar zu machen.

Ferner ist noch hier auf die älteren Bestimmungen gleicher Art, insbesondere die KÖNIGSchen, hinzuweisen. Die sehr große Ähnlichkeit unserer Kurve z. B. mit der, ähnliche Beobachtungen darstellenden bei TONN, der punktierten Kurve auf Tafel I, *diese Zeitschrift*, Bd. VI, springt auf den ersten Blick in die Augen. Ein speziellerer Vergleich lehrt, daß das Maximum dort wohl ein wenig mehr gegen die kleinen Wellenlängen geschoben ist, als es in unserer Kurve liegt, und auch der Abfall gegen das brechbare Ende weniger steil ist. Worauf diese Differenz beruht, vermögen wir nicht mit Bestimmtheit zu sagen. Vielleicht beruht sie lediglich auf einer verschiedenen Beschaffenheit des hier und dort benutzten Leuchtgases. Vielleicht auch sind gerade hier die quantitativen Bestimmungen der sehr kleinen Lichtmengen, welche auf erhebliche Schwierigkeiten stoßen, die Quelle von Differenzen geworden.¹

Von HERING sind, wie ferner noch zu erwähnen ist, eine Anzahl ähnlicher Bestimmungen für Tageslicht ausgeführt worden.

¹ Vergl. über das von uns benutzte Verfahren den Anhang. Ob das von KÖNIG angewendete (*Helmholtz-Festschr.* S. 326) ganz einwurfsfrei ist, scheint uns auch nicht ganz sicher.

KÖNIG hat bereits gezeigt,¹ daß diese mit der von ihm und seinen Mitarbeitern gefundenen Verteilung der Dämmerungshelligkeit nahe übereinstimmen, wenn man die HERINGSchen Werte auf das Spektrum des Gaslichtes umrechnet.

Eine Bemerkung ist endlich noch über das äußerste Rot hinzuzufügen. Es ist bekannt, daß dieses stets, auch bei geringster Intensität und bester Dunkeladaptation, sogleich farbig gesehen wird. Die Bestimmung eines Dämmerungswertes erscheint daher hier zunächst unmöglich. Indessen konnte derselbe doch ermittelt werden, wenn die zentrale Fixation des Feldes vermieden und der Blick ein wenig abgewandt wurde. Alsdann konnte auch das Rot noch farblos gesehen und eine Dunkelgleichung mit ihm gewonnen werden. Die so herauskommenden Werte waren indessen so klein, daß sie auch aus methodischen Gründen nicht mehr als sicher betrachtet werden können (rechnungsmäßig = 3,9). Wir haben daher vorgezogen, in die betreffende Rubrik der Tabelle nur ein Fragezeichen zu setzen. Sicher ist, daß der Dämmerungswert bei 670,8 noch sehr viel kleiner ist, als bei 656; absolut gleich Null wird erschwerlich sein; aber er ist zu klein, um eine messende Bestimmung mit einiger Sicherheit zu gestatten.

III.

Wir wenden uns nunmehr sogleich zu dem theoretisch am meisten interessierenden Punkte einer Vergleichung der Hellgleichungen mit den Ergebnissen der Dunkelbeobachtung. Was hier wesentlich in Frage kommt, ist dieses, ob diejenige Valenz, welche durch die Dunkelbeobachtungen bestimmt wird, der Dämmerungswert, wie wir es nannten, in den beiden Seiten der Hellgleichung, nämlich dem homogenen Licht einer- und der Blau-Rot-Mischung andererseits, übereinstimmt oder nicht. Nach den HERINGSchen Vorstellungen müssen zwei helläquivalente Lichter gleiche Weißwerte haben; wenn also die Dämmerungsvenzen nichts anderes sind, als die Weißwerte, so müssen die helläquivalenten Lichterpaare bezüglich ihrer Dämmerungsvenzen übereinstimmen.

Wie die Dinge in Wirklichkeit liegen, läßt sich aus dem bereits angeführten Beobachtungsmaterial ohne weiteres ent-

¹ *Helmholtz-Festschr.* S. 359.

nehmen. Da nämlich für die einzelnen homogenen Lichter einerseits der Dämmerungswert, andererseits die Rot- und Blau-mengen bekannt sind, und wir auch wiederum die Dämmerungswerte dieses in der Hellgleichung figurierenden Blau und Rot kennen, so können wir leicht den Dämmerungswert eines homogenen Lichtes mit dem irgend eines helläquivalenten Gemisches vergleichen. Zu berücksichtigen ist hierbei nur, daß wir beide Bestimmungen mit Hilfe anderer Spektren, welche die Vergleichslichter lieferten, ausgeführt und somit zunächst (wie oben schon erwähnt) in einem willkürlich gewählten Maßstabe gewonnen haben. Hiervon macht uns eine einfache Rechnung unabhängig.

Bezeichnen wir nämlich die Rotwerte, Blauwerte und Dämmerungswerte mit r , b und d , wobei wir durch die zugefügten Indices die betr. Lichter bezeichnen, so daß b_λ den Blauwert eines Lichtes von der Wellenlänge λ , $r_{[2]}$ den Rotwert des Lichtes [2] bedeuten würde, so würde zu einem mit der Einheit des Lichtes λ helläquivalenten Gemisch aus [2] und [24,7] erfordert werden die Menge $\frac{r_\lambda}{r_{[2]}}$ des Lichtes [2] und $\frac{b_\lambda}{b_{[24,7]}}$ des Lichtes [24,7] und zwar aus demselben Spektrum. Die Dämmerungswerte dieser Beträge wären $\frac{r_\lambda}{r_{[2]}} \cdot d_{[2]}$ und $\frac{b_\lambda}{b_{[24,7]}} \cdot d_{[24,7]}$, und die Summe dieser Dämmerungswerte, der ganze Dämmerungswert des Gemisches, wäre zu vergleichen mit dem Dämmerungswert des homogenen Lichtes, mit d_λ .¹ Diese Rechnung haben wir durchgeführt für ein Gemisch, welches dem in den Hellbestimmungen benutzten fast genau gleich kommt, nämlich ein Gemisch aus [2] und [24,7]; das Rot ist ein wenig kurzwelliger (642 statt 645 $\mu\mu$), das Blau genau das nämliche (460,8 $\mu\mu$). Das Ergebnis dieser Rechnung führen wir in Tabelle III vor; dieselbe enthält in

¹ Wir haben vorgezogen, die Berechnung der Dämmerungswerte einer Hellgleichung hier sogleich allgemein anzugeben. Es führt natürlich zu demselben Ergebnis, wenn man sich die Aufgabe stellt, speziell die Dämmerungswerte der tatsächlich gefundenen helläquivalenten Gemische aus den dem anderen Kollimator angehörigen Lichtern 645 und 460,8 $\mu\mu$ unter Berücksichtigung der Helligkeitsverhältnisse der verschiedenen Spektren anzugeben. Die in unseren Tabellen aufgeführten Werte sind stets so berechnet, daß sie die für die Spaltbreite 100 des untersuchten Spektrums erforderlichen Quanten der Vergleichslichter angeben. Finden wir also z. B. für die Rotkurve bei 645 den Wert r_{645} ,

der ersten Rubrik den spektralen Ort der homogenen Lichter, in der zweiten deren Dämmerungswert, in der dritten den Dämmerungswert des helläquivalenten Rotanteiles, in der vierten den des helläquivalenten Blauanteiles, in der fünften die Summe dieser beiden oder den Dämmerungswert des dem homogenen Licht helläquivalenten Blau-Rot-Gemisches, in der sechsten endlich das Verhältnis des Dämmerungswertes im homogenen Licht zu demjenigen der (helläquivalenten) Blau-Rot-Mischung. Wären, wie es von HERING und HILLEBRAND angenommen wurde, die bei der Dunkelbeobachtung zu bemerkenden Helligkeitswerte die Weißvalenzen, so müßten (abgesehen von dem sogleich noch zu erwähnenden Einflusse der Maculaabsorption) die Werte dieser letzten Spalte alle gleich 1 sein; denn die bei hoher Intensität gleich erscheinenden Lichter, das homogene einer- und die Blau-Rot-Mischung andererseits, müssen gleiche Weißvalenzen haben. Unsere Zahlen belegen und illustrieren quantitativ, was (wie bei früherer Gelegenheit schon erwähnt wurde) qualitativ auch der direkte Versuch lehrt. Geht man von einer Helligleichung durch proportionale Abschwächung aller Lichter und Adaptierung des Auges zu einer Vergleichung der Dämmerungswerte über, so findet man diese in allgemeinen ungleich, und zwar, wenn man z. B. Blau-Rot-Gemische der angegebenen Beschaffenheit mit homogenen Lichtern von 540 bis 490 $\mu\mu$ vergleicht, in sehr erheblichem, zum Teil geradezu kolossalem Grade. In der That sieht man hier, daß der Dämmerungswert des homogenen Lichtes denjenigen des helläquivalenten Gemisches um das hundertfache und mehr übertreffen kann.

Um für diese Verhältnisse eine möglichst anschauliche Darstellung zu haben, ist in Figur 3 (ausgezogen) die Kurve der Dämmerungswerte aus Figur 2 wiederholt; außerdem ist im

wir können ihn = 72 interpolieren, so heißt dies, daß 72 Teile dieses von dem Kollimator I gelieferten Rots 100 Teilen des gleichen Lichtes aus dem untersuchten Spektrum (des Kollimators II) gleich sind. Das Helligkeitsverhältnis der beiden Rot ist also $\frac{100}{72}$. Demgemäß ist auch der Dämmerungswert dieses Rots, den wir für den Augenblick d_{645}^1 nennen wollen, nicht gleich d_{645} , sondern = $\frac{100}{72} \cdot d_{645}$. Weist nun die Helligleichung für ein beliebiges Licht λ den Rotwert r_λ auf, so besagt dies, daß für 100 Teile λ im Gemisch r_λ Teile des Lichtes 645 aus Kollimator I erfordert wurden. Der Dämmerungswert dieses Rotanteiles ergäbe sich also = $\frac{r_\lambda}{100} d_{645}^1 = \frac{r_\lambda}{72} d_{645}$ mit der obigen Formel übereinstimmend.

gleichen Maßstabe die Dämmerungswalenz des helläquivalenten Rot- und Blauanteiles eingezeichnet.¹ Um die Stäbchenvalenz eines homogenen Lichtes mit derjenigen der (bei Hellvergleich) äquivalenten Blau-Rot-Mischung zu vergleichen,

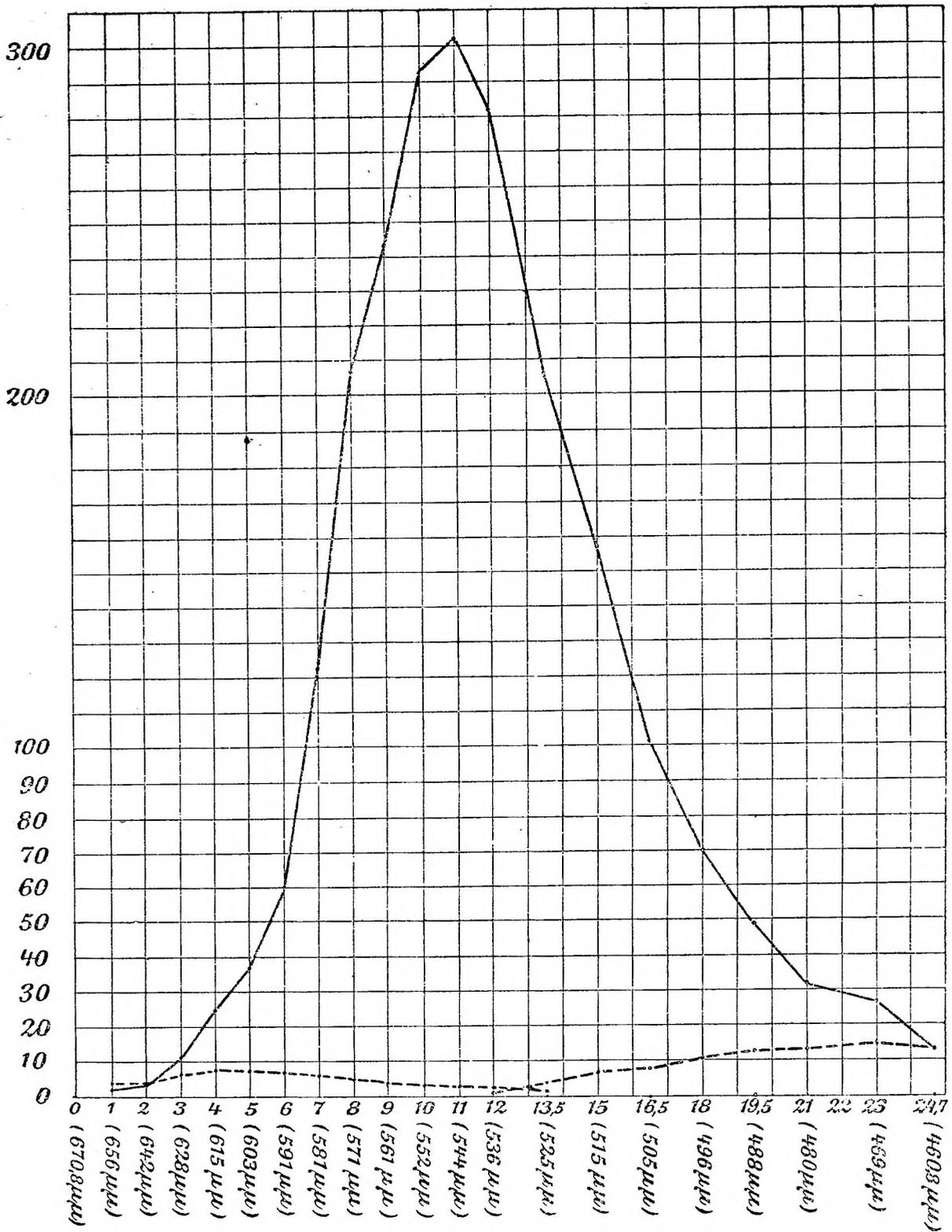


Fig. 3.

Dämmerungswerte der homogenen Lichter, — sowie der den homogenen Lichtern helläquivalenten Rot- und Blauanteilen, ----- im Dispersionspektrum des Gaslichtes.

¹ Die letzteren Kurven sind natürlich Wiederholungen der die Rot- und Blauanteile darstellenden Kurven in Figur 1, jedoch in einem veränderten, in Hinblick auf die hier zu machende Vergleichung bestimmt gewählten Maßstabe; sie müssen die Kurve der Dämmerungswerte bei $642 \mu\mu$ und bei $460,8 \mu\mu$ schneiden. Die Kurven können hier nicht mehr

hat man dann nur nötig, die Ordinate der (ausgezogenen) Kurve der Dämmerungswerte mit der Summe der Ordinaten der beiden anderen Kurven zu vergleichen. In wie gewaltigem Betrage diese beiden Werte, die Dämmerungswerte des homogenen Lichtes und die Summe der Dämmerungswerte der beiden

Tabelle III.

Vergleich der Dämmerungswerte der homogenen Lichter und der helläquivalenten Mischungen aus Rot (642) und Blau (460,8).

Spektraler Ort der homogenen Lichter. $Li_{\alpha} = 0.$	Dämmerungswert des homogenen Lichtes d_h	Dämmerungswert des Rotanteiles im Gemisch	Dämmerungswert des Blauanteiles	Ganzer Dämmerungswert des Gemisches d_g	Verhältnis des Dämmerungswertes des homogenen Lichtes zu dem des helläquivalenten Gemisches $\frac{d_h}{d_g}$
1 (656)	19,3	22,2	—	22,2	0,9*
2 (642)	36	36	—	36	1
3 (628)	110	53	—	53	2,1
4 (615)	254	63	—	63	4,0
5 (603)	276	70	—	70	3,9
6 (591)	599	64	—	64	9,2
7 (581)	1276	57	—	57	22
8 (571)	2061	47	—	47	44
9 (561)	2477	38	—	38	65
10 (552)	2930	30	—	30	98
11 (544)	3627	24	—	24	126
12 (536)	2820	19	14	33	85
13,5 (525)	2055	12	26	38	54
15 (515)	1576	7,1	61	68	23
16,5 (505)	1015	3,6	78	82	12
18 (496)	697	1,7	104	106	6,6
19,5 (488)	486	0,8	134	135	3,6
21 (480)	318	0,4	139	139	2,3
23 (469)	263	0,1	152	152	1,7
24,7 (460,8)	146	—	146	146	1,0
28 (448)	46	—	91	91	0,5
31 (436)	17	—	37	37	0,46

auf große Genauigkeit Anspruch machen, da sie sehr klein gezeichnet werden müssen, um diejenige Kurve, die die Dämmerungswerte der homogenen Lichter darstellt, nicht über alles zulässige Maß zu vergrößern; aus diesem Grunde hat auch die Rotkurve überhaupt nicht über den Punkt 13,5 hinaus fortgesetzt werden können. Doch ist das, worauf es ankommt, mit genügender Schärfe und anschaulich zu erkennen.

Mischungsanteile, auseinanderfallen, lehrt in der so entstandenen Figur 3 der Augenschein ebenso, wie die Zahlen der Tabelle.

In verschiedenen Richtungen wollen wir nun aber diese Verhältnisse noch des genaueren erläutern. Zunächst mag bemerkt werden, daß man jene Differenzen noch stärker machen kann, wenn man ein Rot von noch größerer Wellenlänge, z. B. Lithiumrot, als langwelligen Mischungsbestandteil wählt. Wir haben uns, wie bei der Herstellung der Mischungsgleichungen, so auch für die Berechnung, auf ein Licht beschränkt, dessen Stäbchenvalenz noch mit leidlicher Genauigkeit festzustellen ist, während die des Lithiumrots bereits so gering ist, daß ihre Bestimmung auf Schwierigkeiten stößt. Wir können uns aber leicht eine Vorstellung davon bilden, wie sich die Dinge ändern würden, wenn wir als langwelligen Gemischanteil Lithiumrot statt des Lichtes $642 \mu\mu$ wählten. In den Hellgleichungen wird ein Teil dieses letzteren Lichtes durch $\frac{79}{33}$ Teile Lithiumrot ver-

treten. Der Dämmerungswert des Lithiumrots ist aber wohl sicher kleiner als 0,2 von dem des Lichtes [2]. Ersetzten wir also in dem Gemische das Licht 642 durch Lithiumrot, so würde dadurch der Dämmerungswert des Rotanteils noch weiter, mindestens auf die Hälfte des jetzt in Rechnung gebrachten vermindert werden. Ähnlich wird die Differenz auch noch größer, wenn wir in den Hellgleichungen als Blaubestandteil statt des Lichtes 460,8 ein noch brechbareres (etwa ein Licht $435 \mu\mu$) benutzten; denn der Blauwert dieses letzteren beträgt mehr als ein Drittel von jenem, der Dämmerungswert dagegen kaum ein Achtel. Verwendeten wir also in der Hellgleichung dieses letztere Licht, so würde der Dämmerungswert des Blauanteiles im Gemisch auf weniger als die Hälfte reduziert werden.¹

Die Hauptthatsache, auf die wir Gewicht legen, ist die, daß in den Hellgleichungen die beiden gleich erscheinenden

¹ Eine nicht uninteressante Kontrolle zu den eben erörterten Versuchen bilden übrigens ältere, die nach etwas abweichendem Verfahren ausgeführt wurden. Als Ausgang diente eine Hellgleichung zwischen homogenem Licht $492 \mu\mu$ und einer Rot-Blaumischung (645 und $435 \mu\mu$). Nach Einstellung einer solchen wurde durch Verkleinerung des Okularspaltes abgeschwächt, das Auge dunkeladaptiert, wobei nun das homogene Licht sehr stark überwog, und schließlich ermittelt, wie stark

Lichter auch nicht entfernt gleichen Dämmerungswert besitzen. Da bekanntlich von HERING noch unlängst der Versuch gemacht worden ist, alle Angaben dieser Art (wenigstens bezüglich des Trichromaten) auf Täuschungen zurückzuführen, die durch mangelnde Berücksichtigung der Maculapigmentierung herbeigeführt seien, so müssen wir zunächst darauf hinweisen, daß gegenüber den obigen Gleichungen eine solche Einrede nicht möglich ist. Die Hellgleichungen sind auf kleinem Felde und mit möglichst direkter Fixierung hergestellt worden, die Dunkelgleichungen auf größerem Felde mit beliebig wanderndem Blick; ohne Zweifel also entsprechen die letzteren den, wie auch oben schon angeführt wurde, weniger stark pigmentierten Netzhautstellen. Ob nun beim Übergange von der stärker zu der schwächer pigmentierten Stelle das homogene Licht oder die Mischung mehr an Dämmerungswert gewinnt, ist leicht zu beurteilen. Da nämlich, wie aus den Untersuchungen von SACHS bekannt ist und sich auch leicht bestätigen läßt, die Absorption gegen das brechbare Ende des Spektrums immer stärker wird, so muß der Blauanteil der Mischung bei Übergang auf den schwächer pigmentierten Teil mehr gewinnen, als das homogene Licht, während der Rotanteil unverändert bleibt. Daraus ist ersichtlich, daß überall da, wo in der Mischung der Dämmerungswert überwiegend auf Rechnung des Blauanteils kommt, durch Übergang auf die schwächer pigmentierte Stelle die Mischung ins Übergewicht über das homogene Licht kommen könnte, ganz wie dies von HERING auch ausgeführt worden ist. Mindestens von dem Lichte [15] in unserer obigen Bezeichnung an (Wellenlänge $< 515 \mu\mu$) ist nun dies sicher der Fall. Gleichwohl ist es das homogene Licht, welches beim Übergang auf den schwächer pigmentierten Teil an Helligkeit gewinnt, und zwar äußerst beträchtlich.

Bei den homogenen Lichtern von $550 \mu\mu$ bis $530 \mu\mu$ (etwa bei [11] bis [12]) könnte, rein qualitativ genommen, die Differenz

das homogene Licht reduziert werden mußte, damit wieder Gleichheit der Felder (also eine Dunkelgleichung) bestand. Es fand sich dazu erforderlich eine Abschwächung auf 0,14, 0,095, 0,13, 0,16, 0,14, 0,115, 0,12 — im Mittel 0,13 seines ursprünglichen Wertes. Hieraus ergibt sich die Dämmerungswalenz des homogenen Lichtes 7,7fach größer als die des helläquivalenten Gemisches. Nach den Zahlen obiger Tabelle wäre der 6,8fache Wert zu erwarten.

in dem Sinne der HERINGSchen Erklärung aufgefaßt werden. Obwohl man dabei freilich der Pigmentabsorption Werte zuschreiben müßte, die sie sicher nicht besitzt, wollen wir diese Zahlen hier unerörtert lassen. Wenden wir uns dagegen noch einen Augenblick den Lichtern des weniger brechbaren Spektralteiles zu. Schon von der Wellenlänge $550 \mu\mu$ an ist der Blauanteil merklich = Null. Für helladaptiertes Auge und kleines Feld läßt sich also eine völlig zutreffende Gleichung z. B. zwischen Licht $550 \mu\mu$ und solchem von 645 oder auch $670 \mu\mu$ herstellen. Nun betrachte man die Dämmerungswerte dieser gleich erscheinenden Lichter; man findet dann, daß diejenige des Lichtes 550 etwa 100fach größer als die des helläquivalenten Quantums eines Lichtes von $642 \mu\mu$ ist. Hier nun ist zwar zuzugeben, daß die Beseitigung der Maculaabsorption dem Lichte $550 \mu\mu$ zu gute kommen könnte; denn diese fängt nach HERING ja in der That im Grüngelb bereits an merklich zu werden. Allein die Annahme so kolossaler Absorptionen bei jener Wellenlänge wird kaum noch einen Vertreter finden; zu welchen Vorstellungen würden wir auch über die Absorption des Blaus geführt werden, wenn man die, qualitativ doch festgestellte Natur der Pigmentierung berücksichtigen und für das grünliche Gelb solche Absorptionen annehmen wollte.

Instruktiv ist es ferner, die Lage der Maxima einerseits in der Kurve der Stäbchenvalenzen, andererseits in der der Rotwerte zu betrachten. Es ist kein Zweifel, daß dieselben deutlich auseinanderfallen; das eine Maximum finden wir etwa bei $[5]$ oder $603 \mu\mu$, das andere bei $[10]$ bis $[12]$ oder 552 bis $536 \mu\mu$. Wenn nun die Stäbchenvalenz ihren höchsten Wert an dieser letzteren Stelle hat, wie sollen wir uns (unter HERINGS Annahme) erklären, daß in den Hellgleichungen das Maximum bei ca. 600 gefunden wird? Ohne Spur einer Sättigungsdifferenz stellt der Grünblinde die Hellgleichungen zwischen den Lichtern 600 bis $580 \mu\mu$ her; dabei zeigt sich aufs deutlichste, daß die Helligkeit schon von $603 \mu\mu$ an nicht mehr zunimmt und bei $590 \mu\mu$ sogar schon wieder deutlich vermindert, der Gipfel der Kurve überschritten ist. Wie soll man dies aus Absorptionsverhältnissen erklären, da doch diese zum mindesten bis zum reinen Gelb sicher keine Rolle spielen? Selbst wenn man also von allen erhaltenen Zahlenwerten überhaupt absehen wollte, so würde hier doch schon die unbezweifelbare Differenz in dem all-

gemeinen Gange der einen und der anderen Kurve uns lehren, daß die Dämmerungsäquivalenz der Lichter unter anderen Bedingungen steht, als die Helläquivalenz. Und das gleiche gilt auch für die brechbarere Spektralhälfte; denn hier sehen wir von 510 $\mu\mu$ ab (wo die Dämmerungswerte des Rotanteils schon gar nicht mehr in Betracht kommen) die in den Hellgleichungen figurierenden Blauwerte noch ständig (bis [23]) zunehmen, während die Kurve der Dämmerungswerte hier stark absinkt.

Wir können hiernach nur zu dem Ergebnis gelangen, daß die Ungleichheit der Dämmerungswerte in den Hellgleichungen der Grünblinden eine unbezweifelbare Thatsache ist, eine Thatsache, die so gut konstatiert ist, wie nur irgend eine auf diesem Gebiete der physiologischen Optik. Auch werden die obigen Beobachtungen genügen, um dieses Verhalten zu illustrieren und von seinem Betrage eine wenigstens angenäherte quantitative Vorstellung zu geben. Es wird angemessen sein, an dieser Stelle darauf hinzuweisen, wie sich dies Ergebnis zu den Beobachtungen anderer Autoren stellt.¹ In dieser Hinsicht sei zunächst bemerkt, daß unser Befund denjenigen KÖNIGS vollkommen bestätigt. In der That ist der Satz, den wir aufstellen, ja auch von KÖNIG aus seinen Beobachtungen abgeleitet und nur in einer abweichenden Weise, im Hinblick auf theoretische Vorstellungen, formuliert worden. Die Thatsachen aber, auf die wir uns stützen, sind genau die nämlichen, die auch von KÖNIG beobachtet sind. Es wurde ja auch schon oben erwähnt, daß sowohl die Hell- als die Dunkelgleichungen unserer Beobachtungen sehr nahe mit den seinigen übereinstimmen. Unterwirft man diese letzteren der gleichen Berechnung von den unsrigen, so ist das Resultat natürlich auch das gleiche.

Was HERING anlangt, so wird man es vielleicht auffallend finden, daß der Gegensatz der Hell- und Dunkelgleichungen von ihm nicht bemerkt worden ist, da er doch die letzteren zuerst einigermaßen systematisch untersucht hat. Soweit ich

¹ Es mag an dieser Stelle auch angeführt werden, daß systematische Beobachtungen ganz der gleichen Art, die seither von einem anderen Grünblinden, Dr. STARK, ausgeführt wurden, sowohl in Bezug auf die Hell- als die Dunkelgleichungen, als auf die Beziehungen dieser beiden untereinander mit den hier mitgeteilten aufs beste übereinstimmen.

sehe, dürfte das nur daran liegen, daß HERING die Hellgleichungen der Dichromaten niemals direkt auf ihre „Weißwerte“ geprüft, auch niemals systematisch in einer Weise dargestellt hat, welche etwa die rechnerische Ermittlung ihrer Weißwerte gestattet hätte. Wie aber dem auch sein mag, jedenfalls finden sich in HERINGS Publikationen keine den unsrigen entgegenstehende Hellgleichungen; sind wir also auch nicht in der Lage, uns auf übereinstimmende Beobachtungen zu stützen, so haben wir doch auch nicht etwa nötig, uns mit entgegenstehenden auseinanderzusetzen. Wir legen Wert darauf, dies zu konstatieren; denn die betreffenden Thatsachen sind, das wünschen wir zu betonen, keineswegs sozusagen Finessen einer delikatesten Beobachtung, sondern sie gehören zum Palpabelsten, was es im Gebiete der Gesichtsempfindungen geben kann. Sie lassen sich daher auch mit den farbigen Scheiben des ROTHESchen Kreisels, wenn auch nicht so vollkommen wie am Spektralapparat, doch sehr deutlich demonstrieren. Man lasse von einem Grünblinden eine Hellgleichung zwischen einem passend mit Schwarz abgeschwächten Bläulichgrün und einer Mischung von Rot und Blau herstellen und betrachte diese bei stark herabgesetzter Beleuchtung und dunkeladaptiertem Auge — man wird den beträchtlichen Unterschied der Dämmerungswerte leicht konstatieren, um so besser, je reiner das angewandte Rot und Blau ist.¹

IV.

Die theoretische Erwägung wird gegenüber der Thatsache, daß die Dämmerungswerte der helläquivalenten Lichter sehr ungleich sein können, zwischen zwei Deutungen die Wahl haben. Die erste ist die von KÖNIG zuerst angenommene, daß die Erregbarkeitskurven von der Intensität des einwirkenden Lichtes und (wie hinzuzufügen wäre) dem Adaptationszustande des Auges abhängen; die zweite ist die von uns bevorzugte, daß es sich um das wechselnde Hervortreten zweier verschiedener Apparate handelt, und daß die Reizwerte zweier Lichter für den einen gleich, dabei aber für den anderen un-

¹ Bei Benutzung der neuerdings gelieferten ROTHESchen Scheiben ist eine solche Gleichung z. B. 290° Rot (1) + 70° Blau (8) = 143° Blaugrün (6) + 217° Tuschwarz. Die Scheiben sind hier nach den Nummern der in der ROTHESchen Preisliste von 1893 enthaltenen Muster bezeichnet.

gleich sein können. Es scheint uns nicht erforderlich, die Gründe, welche zu Gunsten der letzteren Auffassung sprechen, hier wiederum vollständig aufzuführen, um so weniger, da die Betrachtung der Foveafunktionen die Frage unseres Erachtens mit Sicherheit entscheidet. Schon in einer früheren Abhandlung¹ wurde mitgeteilt, dass auf kleinen, direkt fixierten Bezirken die Hellgleichungen auch bei starker Abschwächung aller Lichter und bei Dunkeladaptation des Auges gültig bleiben.

Weitere Untersuchungen, von denen sogleich noch zu reden sein wird, haben dies für den einen von uns, sowie für einen anderen Grünblinden bestätigt. Keineswegs aber erwies sich die Fovea als monochromatisch (total farbenblind). Überhaupt bestand zwischen Fovea und Nachbarteilen für die Hellgleichungen nur ein geringfügiger Unterschied. Erscheint es hiernach gesichert, dass die Bestandteile des dichromatischen Apparates der Fovea wie deren Nachbarschaft zukommen, so wird man um so weniger geneigt sein, die abweichenden Verhältnisse des Dämmerungssehens, welche der Fovea abgehen, auf Besonderheiten dieser Apparate zurückzuführen, sondern man wird, wie uns scheint, ganz naturgemäfs, lediglich durch die Betrachtung der physiologischen Funktion dazu geführt, diese besondere, zentral fehlende Funktionsweise dem zentral fehlenden Apparate zuzuschreiben.

Erwünscht war bei dieser Sachlage die Möglichkeit, die Gröfse des zentralen Feldes, für welches die Hellgleichungen auch bei Abschwächung und Dunkeladaptation gültig bleiben, messend zu bestimmen. Der eine von uns, sowie ein anderer Grünblinder, Dr. STARK, haben die nicht ganz leichten Versuche hierüber ausgeführt. Es wurde zu diesem Zwecke vor den Okularspalt des Farbenmischapparates ein Deckgläschen aufgekittet, welches das Spiegelbild eines äufserst kleinen Lichtpünktchens in die Mitte des kreisförmigen Feldes entwarf. Eine passend abgeschwächte Hellgleichung wurde dann nach längerer Dunkeladaptation beobachtet und die Feldgröfse mit Hülfe der Irisblende variiert. Bei geringer Feldgröfse verschwand die bei abgewichenem Blick sehr deutliche Differenz der Hälften in dem Augenblick, wo der Blick auf die Fixiermarke gerichtet wurde, bei gröfserer Ausdehnung blieb der

¹ *Diese Zeitschr.* IX. S. 97.

Unterschied am Rande sichtbar. Es wurde diejenige Größe gesucht, bei welcher die Felder, zentral fixiert, noch in ihrer ganzen Ausdehnung gleich wurden. Verglichen wurde ein homogenes Licht $510 \mu\mu$ (in einigen Fällen 495 oder $500 \mu\mu$) mit einer Mischung aus 645 und $435 \mu\mu$. Der Unterschied ist in diesem Falle auf peripheren Teilen sehr beträchtlich; da überdies das homogene Licht heller und blasser, das Gemisch dunkler und gelber wird, so ist der Unterschied (was wichtig ist) entgegengesetzt demjenigen, der etwa durch die periphere Abnahme der Maculapigmentierung bewirkt sein könnte. Da im HELMHOLTZschen Apparate die Trennungslinie der Felder vertikal liegt, so kann auf diese Weise der Vertikaldurchmesser des ex hypothesi als stäbchenfrei zu betrachtenden Bezirks bestimmt werden. Die hier gemachten Einstellungen waren die folgenden, wobei wir die Zahlen so umgerechnet geben, wie die betreffenden Werte auf eine Entfernung von 1 m projiziert erscheinen würden. Dr. NAGEL stellte ein (in einer ersten Versuchsreihe)¹ $31,8^*$; $31,3^*$; $35,0^*$; $36,7^*$; $29,2^\dagger$; $27,4^\dagger$; $29,8^\dagger$; $32,1^\dagger$; $34,0^*$; $29,8$; $28,7$; $31,3$; im Mittel $31,4 \text{ mm}$; an einem späteren Tage $41,4$; $42,0$; $38,0$; $36,7$; $38,0$; $36,6$; im Mittel $38,8 \text{ mm}$.

Herr Dr. STARK stellte ein an einem ersten Tage $38,0$; $51,9$; $40,7$; $39,3$; $43,4$; im Mittel $42,6 \text{ mm}$; an einem folgenden Tage $52,1$; $35,4$; $35,9$; $37,0$; $22,0$; $27,4$; $27,1$; $30,7$; $32,3$; $38,0$; im Mittel $33,8 \text{ mm}$.

Wer die Schwierigkeit einer derartigen Beobachtung richtig würdigt, wird die Schwankungen, die dabei vorkommen, nicht überraschend finden. Vielleicht wird es gelingen, durch Abänderungen des Verfahrens zu schärferen Ergebnissen zu gelangen. Bei dem hohen Interesse des Gegenstandes schien es uns aber geboten, auch diese Resultate mitzuteilen. Denn man wird aus ihnen jedenfalls das mit Sicherheit entnehmen, daß die Dämmerungswerte der verschiedenen Lichte in einem kleinen zentralen Bezirke nicht zur Geltung kommen, und man wird auch die Größe dieses Bezirkes im vertikalen Durchmesser so veranschlagen können, daß sie auf Entfernung von 1 m projiziert etwa 30 bis 40 mm ausmacht.

¹ Bei den mit einem * bezeichneten Beobachtungen war das homogene Licht 495 , bei den mit einem † bezeichneten $500 \mu\mu$, bei den übrigen $510 \mu\mu$ benutzt.

Nach den neuesten Messungen von KOSTER¹ wäre anzunehmen, daß der horizontale und vertikale Durchmesser des ganz stäbchenfreien Bezirkes auf 1 m projiziert etwa 33 mm beträgt, während erst außerhalb eines größeren, etwa 53 mm messenden, die Zahl der Stäbchen erheblich ist. Man kann hiernach im Augenblick wohl nur sagen, daß die Übereinstimmung der anatomischen und der physiologischen Messung eine zufriedenstellende ist. Man könnte vielleicht sogar geneigt sein, eine eklatante Bestätigung der Theorie hierin zu finden; doch wäre dies wohl insofern verfrüht, als doch die Ergebnisse beider Messungen noch, etwas unsicher und schwankend sind. Es ist wohl nicht unmöglich, daß in fortgesetzten Untersuchungen sich beide noch etwas modifizieren. Immerhin wird man die wenigstens ungefähre Übereinstimmung zur Zeit als beachtenswert konstatieren dürfen.²

Wie in einer früheren Abhandlung angedeutet wurde, ist es zunächst zweifelhaft, ob die Empfindung, welche durch eine Erregung der Stäbchen hervorgerufen wird, genau mit derjenigen übereinstimmt, welche das gemischte weiße Tageslicht, auf den trichromatischen Apparat wirkend, hervorruft. Nannten wir sie gleichwohl schlechtweg eine farblose, so war dabei im Auge zu behalten, daß auch der Begriff des Farblosen kein absolut feststehender ist. Es war ferner gezeigt worden, daß, wenn man eine Hellgleichung, z. B. zwischen einem homogenen Licht und einer Blau-Rot-Mischung, abschwächt und diese wegen der überwiegenden Stäbchenvalenz des homogenen Lichtes unrichtig wird, im allgemeinen dann zur Aufrechterhaltung der Gleichheit nicht bloß eine stärkere Verminderung, sondern auch eine qualitative Änderung des homogenen Lichtes erforderlich ist, eben weil die Stäbchenenerregung eine von dem betreffenden Empfindungseffekt abweichende Empfindung liefert, ihre Zumischung also in dem Sinne wie eine qualitative Änderung des Lichtes wirkt. Es ergab sich daraus die Möglichkeit, dasjenige Licht aufzusuchen, für welches bei einem derartigen Versuch nur eine quantitative, nicht aber eine qualitative Veränderung

¹ *Arch. f. Ophthalm.* XLI. 4. S. 10.

² Vergl. die über die Größe des stäbchenfreien Bezirks gemachten Auseinandersetzungen in der gleichzeitig im *Arch. f. Ophthalm.* XLII 3. erscheinenden Arbeit v. KRIES, Über die funktionellen Differenzen des Netzhautzentrums und der Nachbarteile.

erforderlich ist; von diesem würde sich sagen lassen, daß es, auf den dichromatischen Apparat wirkend, die gleiche Empfindung auslöst, wie sie durch eine beliebige Erregung der Stäbchen erzielt wird.

Wir wollen ein solches homogenes Licht wegen seiner eben berührten Eigenschaft ein *invariables*, den betreffenden Punkt im Spektrum den *invariablen Punkt* nennen. Es war zu ermitteln, ob dieser mit dem neutralen Punkt im gewöhnlichen Sinne zusammenfällt.

Als Ausgangspunkt für die Versuche diene dasjenige homogene Licht, welches dem diffusen Tageslicht (dem gespiegelten Lichte eines dicht und gleichmäßig bewölkten Himmels) unter den für die Hellgleichungen aufgestellten Bedingungen gleich erschien. Dies fand sich für zentrale Beobachtung bei 497, für etwas exzentrische Beobachtung bei $495 \mu\mu$ ein Unterschied, der den deutlichen, aber nicht sehr erheblichen Einfluß der Maculaabsorption zum Ausdruck bringt. Nur wenig verschieden hiervon war das homogene Licht, welches, ohne Vergleichslicht, für sich allein als farblos eingestellt wurde.

Diese Ergebnisse stimmen, wie man sieht, mit den sonst über die Lage des neutralen Punktes im Spektrum gemachten Angaben gut überein. Mit großer Deutlichkeit zeigt sich nun, daß ein homogenes Licht $495 \mu\mu$ und ein ihm bei hoher Intensität gleich erscheinendes Blau-Rot-Gemisch bei proportionaler Abschwächung noch qualitativ ungleich werden; das homogene Licht wird (nicht nur zu hell, sondern auch) zu blau, oder mit anderen Worten: die Stäbchenempfindung (*venia verbo*) ist im Vergleich zu der hier zum Ausgangspunkt genommenen, durch Licht $495 \mu\mu$ hervorgerufenen, noch merklich bläulich. Dieses Verhältnis liefs sich sogar noch über die Wellenlänge 490 hinaus, bis nahezu $485 \mu\mu$ beobachten. Dagegen konnte die Lage des invariablen Punktes nach der anderen Seite nicht mit gleicher Sicherheit begrenzt werden. Das hat seinen einfachen Grund. Das ganze Verfahren beruht ja auf dem beträchtlichen Unterschiede der Stäbchenvalenz, welchen das homogene Licht einer- und das Blau-Rot-Gemisch andererseits besitzt. Dieser Unterschied wird nun aber, je kurzwelliger wir das homogene Licht nehmen, immer geringer. So fand sich denn die zu erwartende entgegengesetzte Abweichung, nämlich ein Zublau-werden des Gemisches, bei Anwendung von einem

Blau 460 $\mu\mu$ überhaupt nur schwer zu konstatieren. Wurde statt dessen ein Blau von 435 $\mu\mu$ gewählt, so trat die Änderung in diesem Sinne etwa von 480 $\mu\mu$ ab deutlich hervor. Wir können danach etwa sagen, daß der invariable Punkt des Spektrums sich zwischen die Grenzen 485 und 480 $\mu\mu$ einschließen läßt; aber es würde mit Rücksicht auf die erwähnten Umstände falsch sein, ihn etwa in der Mitte dieses Spatiums zu suchen; vielmehr läßt sich sagen, daß er vermutlich der oberen Grenze, 485 $\mu\mu$, ziemlich nahe liegt. Jedenfalls aber — und das ist vielleicht hauptsächlich von Interesse — liegt der betreffende Punkt deutlich blauwärts von derjenigen Stelle des Spektrums, welche dem gemischten Tageslichte, sei es dem unveränderten, sei es dem durch die Maculaabsorption veränderten, gleich erscheint, und ebenso auch merklich blauwärts von demjenigen, der in rein subjektiver Weise als farblos ermittelt wird.

Damit hängt es denn wohl auch zusammen, daß die durch schwache Lichter hervorgerufene Empfindung von manchen Personen direkt als leicht bläulich bezeichnet wird.

VI. Anhang.

Der in den obigen Untersuchungen benutzte Apparat war ein HELMHOLTZscher Farbmischapparat neuerer Konstruktion; seine Einrichtung stimmte in der Hauptsache mit derjenigen überein, welche von KÖNIG und DIETERICI,¹ dann von TONN² beschrieben ist; mancherlei Abweichungen waren auf Veranlassung von Herrn Prof. A. KÖNIG angebracht worden, der sich der Herstellung des Apparates bei der Firma Schmidt & Hänsch mit großer Liebenswürdigkeit angenommen hat, wofür auch an dieser Stelle herzlichst gedankt sei.³

Wiewohl die Einrichtung des Apparates in der Hauptsache als bekannt gelten darf, wird doch die Erwähnung einiger Punkte unerläßlich sein. Er ist, soweit wir urteilen

¹ *Diese Zeitschr.* IV. S. 243.

² *Diese Zeitschr.* VII. S. 280.

³ Der Apparat ist eine durch Fortlassung einzelner Teile entstandene Vereinfachung desjenigen, den der Verein deutscher Mechaniker und Optiker nach Angabe des Herrn KÖNIG bei Schmidt und Hänsch bauen liefs und HELMHOLTZ zu seinem 70. Geburtstage schenkte. (Beschrieben in *Zeitschr. f. Instrumentenkde.* XIII. S. 200.)

können, in der That der beste, der bis jetzt für derartige Untersuchungen konstruiert worden ist. Abgesehen von der grossen Mannigfaltigkeit der Lichtmischungen und Abstufungen, die er gestattet, ist besonders die grosse Leichtigkeit der Handhabung hervorzuheben, welche die Herstellung von Gleichungen (auf die es ja fast immer ankommt) auch den weniger Geübten ermöglicht. Wenn wir im Folgenden einige dem Apparate anhaftende Übelstände anführen, so geschieht dies nicht, um blofs zu tadeln, auch nicht eigentlich, um Fingerzeige für Verbesserungen zu geben, sondern vor allem, um die besondere Art unseres Vorgehens zu motivieren. Da sowohl bei den Hell- wie bei den Dunkelgleichungen immer das eine Feld mit einem homogenen Lichte zu erleuchten war, so konnte aus dem einen Kollimator der nur für die Mischungen zu verwendende Doppelspat entfernt werden. Die Aufsuchung der gewünschten Wellenlängen bot dann keine weitere Schwierigkeit, nachdem die Lage der *Li*-, *Na*-, *Tl*-, *Sr*- und *K*-Linie einmal bestimmt war, und daraus nach dem Vorgange von KÖNIG und DIETERICI eine Tabelle für die den Teilstrichen der Kollimatorskala entsprechenden Wellenlängen ausgerechnet war. Zu beachten war nur, dafs, wie wiederholte Kontrollversuche ergeben, auch bei der neuerlich dem Apparat gegebenen Einrichtung, bei welcher die Stellung des Kollimators direkt an einer am Apparat festen, sehr grossen Skala abgelesen wird, kleine Änderungen in der Lage der Linien vorkommen, so zwar, dafs durchgängig für eine bestimmte Wellenlänge heute eine um ein oder zwei Zehntel-Teilstriche andere Kollimatoreinstellung erforderlich sein kann, als vor vierzehn Tagen. Wir haben daher vor jeder Versuchsreihe an beiden Kollimatoren Kontrollbestimmungen der Natrium- oder Lithiumlinie gemacht. Übrigens haben wir es richtig gefunden, da doch alle Beobachtungen sich zunächst auf das Dispersionsspektrum beziehen, zur Bezeichnung der Lichte, auch in den obigen tabellarischen und graphischen Darstellungen, die Angabe der spektralen Orte, in Teilstrichen der Kollimatorskala, zu bemerken.

Wie schon oben erwähnt, war das untersuchte Spektrum in allen Fällen dasjenige des Kollimators II; für dieses ist nachstehend die den verschiedenen spektralen Orten entsprechende Wellenlänge zusammengestellt.

0	670,8	12	536
1	656	13,5	525
2	642	15	515
3	628	16,5	505
4	615	18	496
5	603	19,5	488
6	591	21	480
7	581	23	469
8	571	24,7	460,8
9	561	28	448
10	552	31	436
11	544		

Das zweite Feld war bei den Hellgleichungen mit einer Mischung zweier Lichter zu erleuchten. Es wäre in mancher Hinsicht erwünscht gewesen, als roten und blauen Bestandteil der Mischung ein möglichst lang- und möglichst kurzwelliges Licht zu wählen, etwa 670,8 (*Li*) und 436 $\mu\mu$. Wir wählten jedoch als langwelligen Bestandteil 645 $\mu\mu$, weil, wie oben schon erwähnt, der Dämmerungswert dieses Lichtes noch ziemlich sicher bestimmt werden kann, was bei 670 kaum mehr möglich ist; im übrigen ist die Wahl des einen oder anderen von geringem Belang, da die beiden Lichter in einem bestimmten und leicht zu ermittelnden Verhältnis helläquivalent sind, somit die für das eine geltenden Hellgleichungen aus dem für das andere ermittelten ohne weiteres, lediglich durch Multiplikation mit einem Faktor, berechnet werden können. — Als kurzwelliges Licht 436 zu wählen, ging nicht an, weil dasselbe im Dispersionspektrum des Gaslichtes bereits zu lichtschwach ist. Wir beschränkten uns daher auf Licht von der Wellenlänge des *Sr*-Lichtes (460,8 $\mu\mu$). Mit Benutzung dieses Blaus kann nun die Untersuchung der homogenen Lichter auch nur bis 460,8 geführt werden, da ein kürzerwelliges, etwa 450 oder 435, gesättigter blau erscheint, es also unmöglich ist, zwischen 435 und 460, noch mehr natürlich zwischen 435 und einer Mischung von 460 mit Rot eine Gleichung zu erhalten. Um also die homogenen Lichter bis 436 zu untersuchen, war es erforderlich, auch mit dem Blaubestandteile der Mischung bis 436 hinauszurücken. Dies haben wir, da diese Ausdehnung der Untersuchung aus manchen Gründen wünschbar war, auch gethan und für die Endstrecke den Doppelspat so weit verschoben,

dafs der Blauanteil der Mischung die Wellenlänge $435 \mu\mu$ hatte. In dieser Weise wurde dann das Licht [24,7], [28] und [31] bestimmt. Da das Licht 460,8 solchergestalt doppelt bestimmt wurde, nämlich einmal gegen einen Blaubestandteil von ebenderselben Wellenlänge, sodann gegen einen solchen von 435, so war dadurch die Möglichkeit gegeben, auch die Blauwerte der homogenen Lichter in derselben Einheit durch das ganze Spektrum anzugeben. Berücksichtigt man, dafs 100 Teile 460,8, etwa 216 Teilen 436 + einer sehr kleinen Quantität Rot helläquivalent waren, so wäre, streng genommen, die Umrechnung auf dieses kurzwellige Blau so vorzunehmen gewesen, dafs die mit 460,8 ermittelten Blauwerte mit 2,16 multipliziert und den Rotwerten ein gewisser kleiner Betrag hinzugefügt würde. Die letztere Korrektion haben wir aber unterlassen, da sie viel kleiner ausfiel, als alles, was an den Rotwerten sich noch mit Sicherheit bestimmen läfst (es wird auf die Gründe hierfür gleich noch zurückzukommen sein) und uns entsprechend darauf beschränkt, die Rotwerte von [24,7] ab nur mit der Bezeichnung *Sp* (Spur) einzutragen, da sie sich eben nicht mehr sicher bestimmen lassen.

In Bezug auf die Mischungen wäre sodann noch zu erwähnen, dafs, wie es KÖNIG und DIETERICI angeben, so auch bei unserem Apparat die bei Benutzung des Doppelspats entstehenden zwei Spektren nicht genau in derselben Ebene liegen. Die Einstellung konnte daher nur für den Rotanteil genau gemacht werden; das den Blauanteil liefernde Spektrum lag dagegen nicht genau in der Ebene des Okularspaltes; daher ist die Bestimmung dieses Blauanteils hinsichtlich seiner Wellenlänge etwas unscharf. Praktisch ist dies indessen um so weniger von Bedeutung, als es überhaupt nicht von grossem Belang ist, ob wir den Blaubestandteil etwas länger- oder kürzerwellig nehmen; die Blauwerte der homogenen Lichter würden dadurch alle nur mit einem konstanten Faktor multipliziert erscheinen.

Etwas genauer mufs auf die Quantitätsbestimmung der Lichter eingegangen werden. Dieselbe beruht bei unserem Apparat, wie bekannt, auf zwei Prinzipien; sie wird nämlich einmal durch Variierung der Spaltweite, sodann durch die Drehung des NICOLSchen Prismas bei Anwendung zweier senkrecht zu einander polarisierten Spektren bewirkt. Bei den

Hellgleichungen kann man nicht wohl vermeiden, beide Hilfsmittel zu benutzen, und es ist wohl auch hinlänglich bekannt, wie hierbei zu verfahren ist. Wenn der Kollimator II das homogene Licht von der Wellenlänge λ liefert, der Kollimator I die Mischung, und wir eine Gleichung erhalten, indem der Kollimator II die Spaltweite S_2 , der Kollimator I die Spaltweite S_1 hat und das NICOLSche Prisma auf α^0 steht, so wäre die Quantität des Lichtes λ proportional S_2 , die des Rotanteils $= S_1 \sin^2\alpha$, die des Blauanteils $= S_1 \cos^2\alpha$, und wir erhielten für den Rot- und Blauwert des Lichtes λ die Werte $\frac{S_1}{S_2} \sin^2\alpha$

und $\frac{S_1}{S_2} \cos^2\alpha$. Die obigen Tabellen enthalten direkt diese Werte (mit 100 multipliziert).

Immerhin sind aber bei derartigen Berechnungen gewisse Voraussetzungen gemacht, die nicht ganz genau zutreffen. Zunächst ist es bekannt, dass die Variierung der Spaltweite kein ideales Verfahren ist, weil man zugleich stets die Reinheit der Spektren verändert. Um diesen Fehler wenigstens in bestimmter Weise übersehbar zu machen, haben wir auf eine Variierung des Okularspaltes bei den Hellgleichungen ganz verzichtet und für die Untersuchungen ganz bestimmte Werte für den einen Spalt, teils für den das homogene Licht liefernden Spalte II, teils für den das Vergleichslicht resp. die Mischung liefernden Spalte I, festgesetzt. Die betreffenden fixierten Werte sind in der letzten Rubrik der die Hellgleichungen auf führenden Tabelle angegeben. Wer sich dafür interessiert, kann daraus, nach Maßgabe der obigen Gleichung, auch die anderen Spaltweiten berechnen. Um die Beschaffenheit jedes der benutzten Lichter wirklich genau zu kennen, ist alsdann noch erforderlich, zu wissen, 1. eine wie große Verschiebung des Kollimators erforderlich ist, um bei 100 Teilstrichen Spaltweite ein Licht bestimmter Wellenlänge einmal von dem einen und dann von dem anderen Spaltrande auf die nämliche Stelle des Okulars zu erhalten. Die Bestimmung ergab, dass der Spaltwert 100 einer Kollimatorverschiebung von zwei Teilstrichen entsprach. 2. ist zu fragen, eine wie große Verschiebung des Kollimators erforderlich ist, um ein und dasselbe Licht von dem linken bis zum rechten Rande des Okularspaltes zu verschieben. Diese Verschiebung fand sich $= 0,8$

Teilstrichen. Die Beschaffenheit der benutzten Lichter ist hier nach genau angebbar, was vielleicht für spätere Vergleichen angenehm sein kann. Streng genommen würde man sogar durch eine Reihe von Approximationsberechnungen dahin gelangen können, die Ordinaten für wirklich reine Lichter auszurechnen; doch dürfte vorderhand die Genauigkeit der Beobachtungen kaum groß genug sein, um die umständlichen Rechnungen zu indizieren.

Abgesehen hiervon, ist zu bemerken, daß der Benutzung sehr kleiner Spaltweiten für Quantitätsvergleichen schon deswegen zu widerraten ist, weil da die Unsicherheit der Nullpunktsbestimmung und der tote Gang der Schraubenverschiebung bereits als merkliche Fehler in Betracht kommen. Beide Momente sind trotz der vorzüglichen Arbeit der Kollimatorspalten und ihrer bilateral-symmetrischen Bewegung nicht ganz außer acht zu lassen und involvieren selbst bei sorgfältigster Bestimmung und häufiger Kontrolle des Nullpunktes eine Unsicherheit von 1—2 Teilstrichen, welche also bei Spaltweiten von mehr als 50 wohl außer Betracht bleiben können, bei Werten bis gegen 20 herunter auch noch erträglich sind, die Benutzung von Spaltweiten unter 10 aber doch unthunlich, wenigstens nicht mehr quantitativ verwertbar macht.

Die Abstufung der Lichter mittelst polarisatorischer Vorrichtungen gilt für einwurfsfrei und ist es ohne Zweifel im allgemeinen auch. Ihre Verwendung bei den Hellgleichungen bedarf auch keiner weiteren Bemerkung. Es lag aber nahe, sie auch zu der umfangreicheren Variierung eines Lichtes zu verwenden, wie sie die Dunkelgleichungen erfordern. Dies gelingt ganz gut, wenn man bei der sonst für die Mischungen benutzten Einrichtung so verfährt, daß der eine Mischungsbestandteil in Fortfall kommt. Dies Verfahren ist bei der oben mitgeteilten Bestimmung der Dämmerungswerte z. B. so verwendet worden, daß das zu untersuchende Licht durch einen sehr engen Kollimatorspalt kam, der nicht variiert werden durfte. Als Vergleichslicht diente ein Licht 490, welches durch Nicoldrehung abgestuft werden konnte; es war nämlich zu diesem Zwecke Kollimator und Doppelspat so gestellt, daß jenes Licht den langwelligen Bestandteil einer Mischung darstellte, der kurzwellige aber bereits ins Ultraviolett fiel und also ganz unsichtbar, jedenfalls von zu vernachlässigender Stärke war. Das Ver-

fahren, innerhalb gewisser Grenzen sehr gut und unbedingt zuverlässig, hat indessen doch auch eine gewisse Grenze der Anwendung; die Auslöschung ist nämlich da, wo sie theoretisch vollständig sein sollte, doch nie eine ganz absolute, schon wegen der Zerstreuung einer gewissen Menge von Licht an den Grenzflächen; bei weiteren Kollimatorspalten wird also auch bei vollständiger Kreuzung der Polarisationssebenen das Feld nicht absolut dunkel. Aus diesem Grunde fällt bei NICOL-stellungen, die sich der vollen Auslöschung zu sehr annähern, mehr Licht durch, als der Rechnung entspricht, man wird die betreffenden Helligkeiten zu niedrig bestimmen. Hieraus ergab sich für die Dunkelgleichungen folgendes Verfahren als bestes. Das Licht des zu bestimmenden Spektrums (Koll. II) wurde mit einer sehr geringen und während des ganzen Versuches nicht zu verändernden Spaltweite angewandt. Das Vergleichslicht des Kollimators I (von konstanter Wellenlänge) wurde für die höheren Werte der Dämmerungswalzen mit einer Spaltweite 100 benutzt und in der oben erwähnten Weise mittelst NICOLDrehung abgeschwächt. Dies Verfahren wurde eingehalten, bis diese Abschwächung sehr bedeutend wurde, d. h. etwa, bis der Winkel der beiden Polarisationssebenen auf 83° stieg; an dieser Stelle wurde dann der Spalt des Vergleichslichtes auf 20° verringert und mit diesem kleineren Werte die geringen Walzen von $615 \mu\mu$ auf- und von $469 \mu\mu$ abwärts bestimmt.

Der unglatte Verlauf der Kurve 2 bei [5] verrät übrigens, dass auch der Punkt [5] wohl schon etwas zu niedrig bestimmt ist, während der für [4] mit Spaltweite 20 und geringerer Abschwächung durch Polarisation wieder richtig ist.

Die der Kurve 2 hinzugefügten Kontrollpunkte beziehen sich auf ältere Versuche des gleichen Beobachters (NAGEL), bei welchen die Quantitätsbestimmungen ausschließlich durch Variierung der Spaltweiten erfolgten; sie sind das Mittelergebnis einer größeren Zahl von Bestimmungen. Die Übereinstimmung ist, wie man sieht, in der weniger brechbaren Spektralhälfte recht gut; nur bei [4] liegen die durch Polarisation bestimmten Werte etwas zu tief, was auf den oben beregten Umstand zurückzuführen ist. In der brechbareren Spektralhälfte liegen die älteren Werte durchweg etwas höher, auch das Maximum ist etwas weiter rechts. Der Grund hierfür dürfte aber, da die Erscheinung sich in der linken Spektralhälfte nicht in gleicher Weise zeigt,

wohl kaum in einer konstanten Differenz zwischen Varrüierung durch Polarisation einer- und durch Spaltweiten andererseits zu suchen sein. Wir möchten ihn eher darin vermuten, daß die älteren Beobachtungen sich auf das Spektrum des Kollimators I, die neueren auf Kollimator II bezogen, und tatsächlich wohl die Helligkeitsverteilung in beiden etwas verschieden sein kann. Natürlich ist für die graphische Darstellung hier die Länge jenes Spektrums auf die des anderen reduziert; sie sind übrigens so nahe übereinstimmend, daß eine Differenz in der Dispersion sicher nicht in Betracht kommen kann. Übrigens können wir die Möglichkeit nicht in Abrede stellen, daß jene älteren Versuche durch kleine Fehler in der Bestimmung der Wellenlänge beeinflusst sind, da wir damals noch nicht eine jedesmalige Kontrolle der *Na*- oder *Li*-Linie eingeführt hatten. Ist also diesen Versuchsergebnissen auch keine definitive Bedeutung zuzumessen, so genügen sie doch, in Verbindung mit den anderen, um die Ausführbarkeit der Bestimmungen zu dokumentieren und eine gewisse Kontrolle für die Korrektheit der beiden benutzten Abschwächungsverfahren zu geben.

Wir erwähnen an letzter Stelle hier den Punkt, der uns am meisten Schwierigkeit bereitet hat und auch als der erheblichste Übelstand des Apparates zu betrachten ist. Für die Bestimmungen ist gleiche Helligkeit des von dem einen und von dem anderen Kollimator gelieferten Spektrums selbstverständlich nicht erforderlich; indem wir die verschiedenen homogenen Lichter eines Spektrums mit den nämlichen Bestandteilen des anderen vergleichen, finden wir, was wir brauchen, die Verteilung der Rotwerte, Blauwerte etc. innerhalb des ersten Spektrums; die Lichter des zweiten Spektrums spielen dabei nur die Rolle eines willkürlich gewählten Maßstabes. Erforderlich ist aber natürlich, daß beide Spektren während des ganzen Versuches dauernd gleiche Helligkeit behalten, oder daß doch beide in gleichem Verhältnis variieren. Dieser Anforderung nun genügen die Triplexbrenner jedenfalls nicht mit derjenigen Sicherheit und Leichtigkeit, die man wünschen könnte. Läßt man die eine Flamme nur um ein wenig höher oder weniger hoch brennen, so kann man die Helligkeit des betreffenden Feldes sich beträchtlich ändern sehen. Um die Flammenhöhe konstant zu erhalten, fanden wir auch die Anwendung der

ELSTERSchen Gasregulatoren nicht genügend; vermutlich hängt die Art des Brennens in gewissem Mafse auch von dem Zuge ab, der wieder durch die Erhitzung der Teile mit bedingt wird, kurzum von einigermaßen variablen Momenten. Wir haben schliesslich am sichersten gefunden, den Brenner auf eine bestimmte Flammenhöhe einzustellen, nämlich so, dass die Flamme eben nicht mehr zum Schornstein herausschlug, und diese Einstellung während der Versuche oftmals zu kontrollieren. Trotz aller diesem Punkte zugewendeten Sorgfalt haben wir aber doch nicht selten in einzelnen Versuchsreihen Abweichungen zu konstatieren gehabt, die wohl nur auf Schwankungen im Intensitätsverhältnis der beiden Lichter zurückgeführt werden können; über die Unsicherheit der einzelnen Einstellung gingen sie erheblich hinaus, betrafen auch eine ganze Reihe von Einstellungen gleichmäfsig; für ihre Zurückführung auf Differenzen im psychologischen Zustande des beobachtenden Auges bot sich keinerlei Anhalt. Aus diesem Grunde war es wünschenswert, die Serie der Bestimmungen, wenn sie in einem Sinne, etwa mit abnehmenden Wellenlängen, ausgeführt war, in der umgekehrten Folge zu wiederholen. Eine Reihe, die solchergestalt bei Hin- und Rückweg durchweg gut stimmende Resultate ergibt, erscheint natürlich vorzugsweise zuverlässig. Die in Tabelle I gegebenen Werte beruhen auf einer solchen Reihe, bei welcher im Hinweg zwei, im Rückweg nur eine Einstellung gemacht wurde, die durchweg gut übereinstimmten. Wiewohl daher jeder Zahl nur drei Einstellungen zu Grunde liegen, dürfte die Bestimmung genauer sein, als das Gesamtmittel sämtlicher Bestimmungen, wobei die einzelnen Reihen beträchtlichere Abweichungen zeigen. Da wir jedoch auch nicht einen Teil der Beobachtungen nach einem immerhin subjektiven Ermessen unterdrücken mochten, so haben wir die Gesamtmittel in kleinem Druck und eingeklammert hinzugefügt. Im ganzen läfst sich wohl sagen, dass die Gewinnung der Gleichungen noch nicht diejenige Sicherheit erreicht, die sie bei einer absoluten quantitativen und qualitativen Konstanz der Lichtquellen haben könnte; die dadurch bewirkten Unsicherheiten sind nicht von der Art, dass sie im Hinblick auf die hier erörterten, theoretisch interessierenden Verhältnisse in Betracht kämen; sie sind aber der Hauptgrund, aus dem wir davon abgesehen haben, durch eine grofse Häufung des Beobachtungsmaterials, d. h.

durch zahlreiche Wiederholung derselben Beobachtungen nach einer größeren Genauigkeit der Ergebnisse zu streben. In der That ist es fraglich, ob man dabei nicht durch Kombinierung von Beobachtungen, die unter verschiedenen Bedingungen stehen und zum Teil weniger zuverlässig sind, eher an Genauigkeit einbüßen würde.
