

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

## Über Farbensysteme.

Von

J. v. KRIES.

Mit 6 Figuren im Text.

### I.

Wenn ich im Folgenden nach einer längeren Reihe von Jahren auf gewisse früher behandelte Fragen wieder zurückkomme, so wird eine Vorbemerkung darüber am Platze sein, weshalb und von welchem Standpunkte aus dies geschieht. Hinsichtlich der sogenannten dichromatischen Farbensysteme oder partiellen Farbenblindheiten, und besonders auch hinsichtlich ihrer Beziehung zu dem normalen trichromatischen Farbensystem stehen sich, wie bekannt, die von der YOUNG-HELMHOLTZschen und die von der HERINGSchen Theorie ausgehende Auffassung gegenüber. Dieser Gegensatz bleibt in vollem Maße selbst dann von Bedeutung, wenn man der einen oder anderen dieser Theorien auch nur in beschränkterem Sinne Gültigkeit zuzugestehen geneigt ist, ja selbst unter Absehung von theoretischen Vorstellungen überhaupt; denn er bezeichnet sehr erhebliche Meinungsverschiedenheiten bezüglich der tatsächlichen Verhältnisse, wie das sehr klar schon in der Annahme resp. Verneinung eines typischen Unterschiedes zwischen Rot- und Grünblinden zum Ausdruck kommt. Während vor mehr als 20 Jahren die Mehrzahl der Untersucher sich der HELMHOLTZschen Auffassung zugeneigt haben dürfte, auch ich selbst mich in diesem Sinne damals ausgesprochen habe,<sup>1</sup> ist dann in

---

<sup>1</sup> v. KRIES und KÜSTER, Über angeborene Farbenblindheit. *Arch. f. Physiol.* 1879. S. 513.

Ferner v. KRIES, *Die Gesichtsempfindungen und ihre Analyse*. Leipzig 1881. S. 145.

neuerer Zeit unter dem Einfluß der HERINGSchen Publikationen in weiten Kreisen die andere Anschauung bevorzugt worden. Nun bin ich niemals der Ansicht gewesen, daß in den neueren Beobachtungen über das Sehen der Dichromaten vollgültige Beweise für diese letztere Auffassung zu erblicken wären. Wenn ich gleichwohl längere Zeit hindurch mich über den Gegenstand nicht geäußert habe, so hatte dies seinen besonderen Grund. Er lag darin, daß durch die Beobachtungen von HERING und HILLEBRAND<sup>1</sup> eine neue, auch für die Auffassung der Farbenblindheiten sehr belangreiche Thatsache aufgedeckt worden war. Der Farbentüchtige, so fanden sie, bei sehr geringem Licht und mit gut adaptiertem Auge sehend, sieht ganz ebenso wie der total Farbenblinde, nämlich Alles farblos, und dabei in einer von der gewöhnlichen stark abweichenden Helligkeitsverteilung. Ohne Zweifel wurde hierdurch wahrscheinlich gemacht, daß unter diesen Umständen nur ein bestimmter Teil des Sehorgans funktionierte, nämlich eben derjenige, den der total Farbenblinde noch allein besitzt; und es lag nahe, hierin die schwarzweiße Sehsubstanz HERINGS in typischer und deutlicher Isolierung zu erblicken, um so mehr, da sich einsehen ließ, daß die Dunkeladaptation im wesentlichen die Lichtwirkungen auf diese begünstigen müsse. Lag aber hier die Isolierung eines nur der farblosen Helligkeitsempfindung dienenden Organteils scheinbar ganz deutlich vor, so war dann die Annahme weiterer Komponenten, die den farbigen Bestimmungen zu dienen hätten und im wesentlichen mit den von HERING angenommenen übereinstimmen mußten, kaum mehr zu umgehen, trotz der Schwierigkeiten, welche sich bei der Durchführung dieser Anschauung aus der spezielleren Natur der den Farbenblinden eigentümlichen Verwechselungsgleichungen ergaben. Allmählich indessen hat sich durch die Arbeiten von KÖNIG, PARINAUD und mir selbst<sup>2</sup> mit großer Wahr-

---

<sup>1</sup> HILLEBRAND, Über die spezifische Helligkeit der Farben (mit Vorbemerkungen von E. HERING). *Sitzungsber. d. Wien. Akad., Math.-naturw. Kl.* XCVIII. S. 70. 1889.

<sup>2</sup> A. KÖNIG, Über den menschlichen Sehpurpur und seine Bedeutung für das Sehen. *Sitzungsber. d. Berl. Akad.* 1894. S. 577.

v. KRIES, Über den Einfluß der Adaptation auf Licht- und Farbenempfindung und über die Funktion der Stäbchen. Freiburg 1894. Ferner: Über die Funktion der Netzhautstäbchen. *Diese Zeitschr.* IX. S. 81.



scheinlichkeit herausgestellt, daß die Dinge doch nicht so einfach liegen, und daß die erwähnten Beobachtungen von HERING und HILLEBRAND ganz anders zu deuten sind. Nach der von mir vertretenen Anschauung — eine ausführliche Auseinandersetzung wird an dieser Stelle nicht erforderlich sein — hätten wir uns neben dem trichromatischen Apparat und von ihm in der Hauptsache unabhängig einen monochromatischen d. h. total farbenblinden im Auge angeordnet zu denken, und dieser, vorzugsweise adaptionsfähig, würde beim sogenannten Dämmerungssehen, d. h. dem Sehen des dunkel-adaptierten Auges bei schwachem Licht, ausschließlich funktionieren. Haben wir in dem Sehen des total Farbenblinden, ebenso in unserem eigenen Sehen bei dunkel-adaptiertem Auge und herabgesetzter Beleuchtung die ausschließliche Thätigkeit dieses Dunkel-Apparates vor uns, so werden damit die Aufschlüsse hinfällig, welche uns diese Verhältnisse in Bezug auf die Gliederung des trichromatischen farbentüchtigen Apparates zu geben schienen.

Im ganzen kann man daher sagen, daß nach der Klarstellung dieser, durch HERINGS Beobachtungen in den Mittelpunkt des Interesses gerückten Erscheinungen (Dämmerungssehen, PURKINJESches Phänomen, totale Farbenblindheit) die Lehre von den dichromatischen Farbensystemen sich wieder auf dem nämlichen Standpunkt befand wie vorher, und daß der Versuch, über die Gliederung des trichromatischen Apparates durch ein genaueres Studium jener Erscheinungen etwas zu erfahren, nach genau denselben Prinzipien unternommen resp. fortgesetzt werden konnte, welche schon früher für die Untersuchungen von HELMHOLTZ, MAXWELL, DONDERS, für diejenigen von mir und KÜSTER, neuerdings die von KÖNIG, und für zahlreiche andere maßgebend gewesen waren. Eine kurze Erörterung dieser Prinzipien wird sogleich noch zu geben sein; vorher ist nur noch ein Punkt zu berühren, in dem die Entwicklung der Stäbchentheorie allerdings eine Modifikation der hier einzuhaltenden Verfahrungsweisen forderte. Können wir es als sicher annehmen, daß die Farbentüchtigen und die Farbenblinden sich hinsichtlich ihres Hellapparates unterscheiden, daß aber die Dunkelapparate in

---

PARINAUD, La sensibilité de l'oeil aux couleurs spectrales; fonctions des éléments rétinien et du pourpre visuel. *Ann. d'ocul.* CXII. S. 228. 1894.

allen Fällen mit grofser Annäherung übereinstimmend sich verhalten, so ist klar, dafs alles darauf ankommen wird, die optischen Funktionen unter Umständen zu prüfen, welche eine möglichst ausschliesliche Funktion des Hellapparates garantieren. Dagegen werden Beobachtungen, bei denen eine kombinierte Funktion beider Apparate anzunehmen ist, naturgemäfs weniger leicht deutbar und zur theoretischen Analyse weniger geeignet sein, schon aus dem Grunde, weil uns gegebenen Falls doch jeder Anhalt dafür fehlt, um zu beurteilen, in welchem Verhältnis beide Apparate beteiligt sind, ja sogar die Möglichkeit, dieses Verhältnis in successiven Versuchen oder bei verschiedenen Personen ähnlich herzustellen. Aus diesem Grunde ist jedenfalls vorläufig die Untersuchung der extremen Fälle, in denen wir möglichst reine Thätigkeit des Hell- resp. des Dunkelapparates annehmen können, am meisten zu empfehlen. Demgemäfs sind denn die Beobachtungen, über die nachstehend berichtet wird, alle mit hell-adaptiertem Auge und auf kleinem Felde (etwa  $1\frac{3}{4}^{\circ}$  Durchmesser) gemacht. Sie sind Hellgleichungen in demselben Sinne, wie die entsprechenden, über die ich früher mit NAGEL (*diese Zeitschrift* XII. S. 1 f.) berichtet habe.

Was nun den Grundgedanken der Untersuchung angeht, so ist derselbe durch die hauptsächlich in Betracht kommenden theoretischen Auffassungen des trichromatischen Apparates insoweit gegeben, dafs gewisse Fragen als vorzugsweise interessierende sogleich festgestellt und die Hauptaufgaben danach angegeben werden können. Da trotz öfter verschiedener Darstellung hierüber auch im wesentlichen Einstimmung herrscht, so wird es genügen, diese Grundgedanken hier ganz kurz zu erläutern. Geht man nämlich von dem allen Komponententheorien gemeinsamen Grundgedanken aus, dafs der Sehapparat sich aus einer beschränkten Zahl von Bestandteilen zusammensetzt, durch deren verschiedene Bethätigung die Verschiedenheiten unserer Gesichtsempfindungen in Bezug auf Helligkeit und Farbe bestimmt werden, so wird offenbar die nächstliegende Frage in Bezug auf die beschränkteren Farbensysteme die sein, ob man dieselben sich aus dem normalen durch das einfache Fehlen eines gewissen Bestandteils entstanden denken kann. Dies ist ohne Zweifel die einfachste Beziehung, die z. B. zwischen dem dichromatischen und dem trichromatischen System stattfinden kann. Es ist, wie bekannt, auch diejenige, welche



sowohl von HELMHOLTZ im Sinne seiner Theorie wie von HERING im Sinne der seinigen angenommen resp. behauptet worden ist. Die theoretische Bedeutung eines solchen Verhältnisses liegt alsdann darin (wie ebenfalls von diesen beiden Autoren ganz übereinstimmend angenommen worden ist), daß, falls in der That die partielle Farbenblindheit gegenüber dem normalen Farbensinn eine reine Ausfallerscheinung darstellt, aus den Beziehungen beider Systeme sich sogleich eine gewisse Charakterisierung des fehlenden Bestandtheiles ableiten läßt. Im übrigen ist bekannt, in welcher Weise sich die Gültigkeit der in Rede stehenden Beziehung in den Beobachtungen darstellen muß. Dem Dichromaten werden, wenn er sich vom Farbentüchtigen nur durch den Mangel eines Bestandtheiles unterscheidet, diejenigen Lichtgemische, die dem Farbentüchtigen gleich erscheinen, durchweg auch gleich erscheinen müssen. Daneben aber müssen ihm auch alle diejenigen Lichter gleich erscheinen, welche für den Farbentüchtigen sich nur bezüglich ihrer Wirkung auf jenen dem Dichromaten fehlenden Organteil unterscheiden. Zur Feststellung des in Rede stehenden Verhältnisses wäre also im Grunde nur erforderlich zu ermitteln: erstens, ob in der That das System ein dichromatisches ist (der Eindruck jedes beliebigen Lichtes durch die Mischung von zwei passend gewählten Lichtern hervorgerufen werden kann), und zweitens, ob in Strenge der Satz gilt, daß Farben, die dem Farbentüchtigen gleich erscheinen, auch von dem Dichromaten für gleich gehalten werden. Ganz das Entsprechende würde, *mutatis mutandis*, auch für den total Farbenblinden gelten. Es handelt sich also, um für das Auseinandergesetzte einen kurzen Ausdruck festzuhalten, darum, ob wir uns die Farbenblindheiten gegenüber dem normalen Farbensinn als reine Ausfallerscheinung, ob wir uns die verschiedenen Farbensysteme aus dem normalen durch Reduktion entstanden denken dürfen.

Die eben gegebene Darlegung trifft sachlich genau zusammen mit der von KÖNIG seinen Untersuchungen zu Grunde gelegten, auf deren mathematische Formulierung daher hier nur kurz hingewiesen zu werden braucht. Bekanntlich kann die Gesamtheit der für den Farbentüchtigen geltenden Mischungsgleichungen durch die Angabe dreier Funktionen der Wellenlänge dargestellt werden, welche angeben, welche Mengen



der drei für die Mischungen gewählten Lichter der Mengeneinheit der betreffenden Wellenlänge gleich erscheinen. Die betreffenden Funktionen sind deswegen von der Wahl der in den Mischungen benutzten Lichter abhängig, und können bei Wahl anderer Lichter durch drei andere ersetzt werden. Dabei muß jedoch, sofern das NEWTONSche Farbenmischungsgesetz gültig ist, jede neue Funktion eine homogene lineare Funktion der drei der anderen Darstellung angehörigen sein. Das Gleiche gilt wiederum für das dichromatische System. Ist nun letzteres aus dem trichromatischen durch Reduktion entstanden, so muß dies darin ersichtlich werden, daß die dem normalen System angehörigen Kurven eine Darstellung gestatten, bei welcher ihrer zwei mit denjenigen des dichromatischen Systems zusammenfallen, mit anderen Worten, daß sich die Funktionen des dichromatischen Systems mit zwei linearen Funktionen von denjenigen des trichromatischen decken. Dies ist, wie man sieht, der mathematische Ausdruck für die generelle Gültigkeit des Satzes, daß die den Trichromaten gleich erscheinenden Lichter auch für die Dichromaten gleich sind.

Die obige Darstellung weicht, wie weiter hervorzuheben ist, auch von einer ähnlichen HERINGS<sup>1</sup> nur scheinbar ab. Immerhin muß ich auf diese letztere hier kurz eingehen. Wenn wir zunächst in Frage bringen, ob die dichromatischen und das monochromatische System einfache Reduktionen des normalen sind, so ist damit auf die theoretisch wenigstens gegebene Möglichkeit hingewiesen, daß sich dies etwa anders verhalte. Eben diese Möglichkeit führt auch HERINGS eben erwähnte Darlegung aus, in welcher qualitative und quantitative Modifikationen der optischen Reizwerte unterschieden werden.

„Allen rein quantitativen Anomalien,“ sagt HERING (a. a. O. S. 309 f.), ist gemeinsam, daß ein homogenes Licht von nur quantitativ anomalem Reizwerte dieselbe Empfindung erweckt, die es auch dem normalen Auge, für welches es normalen Reizwert hat, dann erwecken würde, wenn seine Energie schon vor dem Eintritt ins Auge entsprechend vermindert oder vermehrt wäre.“

---

<sup>1</sup> HERING, Über einen Fall von Gelb-Blau-Blindheit. *Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol.* LVII. S. 308.

„Von den quantitativen Anomalien unterscheiden sich die qualitativen dadurch, daß sie durch Änderungen der Lichtenergie nicht korrigiert werden können. Das anomale Auge erhält daher von den homogenen Lichtern im allgemeinen Empfindungen, welche dem normalen Auge nur durch Licht anderer Wellenlänge oder durch bestimmte zusammengesetzte Lichter erzeugt werden, letzteres z. B. dann, wenn jedes homogene Licht dem anomalen Auge eine farblose Empfindung erweckt (totale Farbenblindheit,) ersteres dann, wenn homogenes violettes Licht dem anomalen Auge blau erscheint (Rot-Grünblindheit). . . . .

Qualitative Anomalien des Farbensinnes sind hiernach darin begründet, daß eine oder beide farbig wirkenden Urvalenzen relativ zu den anderen herabgesetzt sind, und zwar für alle homogenen Lichter in demselben Verhältnis; gänzlicher Ausfall einer farbig wirkenden Urvalenz bedingt partielle, gänzlicher Ausfall beider farbig wirkenden totale Farbenblindheit.“

Übertragen wir dies in eine veränderte Terminologie, und zwar der Art, daß, was mir doch klarer und bedeutungsvoller erscheint, nicht von den Modifikationen der optischen Reizwerte der Lichter sondern von den Modifikationen der Sehsubstanzen ausgegangen wird, so bemerken wir, daß die von H. sogen. qualitativen Anomalien alle diejenigen Fälle umfassen, in denen eine Sehsubstanz fehlt, und auch wohl diejenigen, in denen eine Sehsubstanz (ohne qualitative Veränderung) nach Maß und Wirksamkeit reduziert ist, alle diejenigen Fälle also, die wir auf rein quantitative Modifikationen der Sehsubstanzen zurückführen können, und welche theoretisch als vollkommen verständlich gelten dürfen. Die von HERING sogenannten quantitativen Anomalien sind dagegen von anderer Art. Wenn z. B., wie in dem dort erörterten Falle angenommen wird, die Reizwerte der kurzwelligen Lichter relativ zu den Reizwerten der langwelligen kleiner sind als für das normale Auge, (was HERING eine quantitative Anomalie nennt), so liegt darin offenbar eine, ihren Gründen nach zunächst nicht aufklärbare qualitative Modifikation der Sehsubstanzen, durch welche eben das Verhältnis ihrer Erregbarkeiten gegenüber verschiedenen Lichtern modifiziert ist. Ich würde hiernach vorziehen, wo HERING von einer quali-

tativen Anomalie der optischen Reizwerte<sup>1</sup> spricht, von einer quantitativen Anomalie des Sehorgans resp. seiner Bestandteile zu reden, und umgekehrt. Dies hervorzuheben schien mir deshalb wichtig, weil in der HERINGSchen Darstellung nicht bemerklich wird, einen wie großen Unterschied es für die Theorie macht, ob wir zur Erklärung der Farbenblindheit (in HERINGS Bezeichnung) qualitative oder quantitative Modifikationen anzunehmen haben. Wir müssen aber betonen, daß eigentlich nur, wenn sich die Farbenblindheit als Ausfallserscheinung darstellt, von einer so einfachen und befriedigenden Erklärung aus der Theorie gesprochen werden darf, daß die betreffenden Erscheinungen selbst wieder der Theorie zur Stütze dienen können. Müssen wir daneben noch Modifikationen der optischen Substanzen annehmen, von denen sich keinerlei Rechenschaft ablegen läßt, so kann man im Grunde doch nur sagen, daß die Theorie den betreffenden Erscheinungen gegenüber versagt, wenn sie sich auch vielleicht nicht gerade in Widerspruch mit ihnen setzt.

Einiges wenige ist, ehe ich an die Mitteilung der Beobachtungen gehe, noch kurz zu erledigen. Zunächst ein Punkt: die Nomenclatur. Die Untersuchungen haben, wie hier im Voraus angeführt sei, ergeben, daß die alte Unterscheidung der Rot- und Grünblinden eine unentbehrliche, und daß auch die theoretische Auffassung berechtigt ist, nach der wir uns aus dem normalen Sehorgan durch Fehlen eines Bestandteiles die eine, durch Fehlen eines andern die andere Form der Farbenblindheit entstehen denken. Gleichwohl ist die Bezeichnung Rotblindheit und Grünblindheit keine glücklich gewählte und sie ist die Quelle endloser Mißverständnisse gewesen. Ich möchte daher vorschlagen, sie durch Benennungen zu ersetzen, welche das Wesentliche kenntlich machen, ohne falsche Auffassungen nahe zu legen. Dieser Anforderung dürfte am besten ein fremdsprachiger Ausdruck genügen, der das Fehlen eines ersten resp. zweiten Bestandteiles bedeutet, und ich will daher die Rotblinden „Protanopen“ die Grünblinden „Deuteranopen“ nennen.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> HERING spricht übrigens gelegentlich auch von einer quantitativen Anomalie des Farbensinnes (z. B. a. O. S. 312 unten), was dann wohl noch leichter mißverstanden werden kann.

<sup>2</sup> Die Gründe für die Einführung der neuen Bezeichnungen wird man in den nachstehend mitgeteilten Thatsachen und besonders in den



Sodann ist hier ein Punkt zu berühren, der sowohl bei der Ausführung als bei der Beurteilung der Versuche besondere Beachtung erheischte, nämlich die „individuellen Verschiedenheiten“ des Farbensinnes. Es kann wohl gegenwärtig als sicher gelten, daß individuelle Verschiedenheiten zum Teil, wie wir kurz sagen dürfen, in rein physikalischer Weise, nämlich durch die ungleiche Lichtabsorption in gefärbten Medien des Auges, besonders dem Pigment des gelben Flecks, bedingt werden. Derartige Differenzen sind natürlich in Hinblick auf die eigentlichen optischen Substanzen als etwas Accidentelles und Nebensächliches zu betrachten; sie könnten aber, sobald sie beträchtliche Grade erreichen, für die Untersuchung außerordentlich erschwerend werden, ja die strikte Beantwortung der gestellten Fragen event. ganz unmöglich machen. Ist nun auch dies, wie die Erfahrung lehrt, thatsächlich nicht der Fall, so ist doch jedesmal die Erörterung geboten, ob sich irgendwelche Unterschiede etwa auf die Verhältnisse der absorbierenden Medien zurückführen lassen. Abgesehen hiervon wird auch die Möglichkeit im Auge zu behalten sein, daß etwa die Sehorgane verschiedener farbentüchtiger Personen auch in anderen wirklich physiologischen Beziehungen sich voneinander unterscheiden, was ja, unbeschadet des Umstandes, daß alle trichromatisch wären, recht wohl der Fall sein könnte. Die obige Betrachtung ging von dem normalen trichromatischen System wie von einem festen Ausgangspunkt aus. Der sichere Boden, auf den diese Untersuchung gestellt schien, könnte auch dadurch ins Wanken kommen, daß es verschiedene Formen trichromatischer Systeme giebt. Bekanntlich ist KÖNIG geneigt, gewisse zuerst von Lord RAYLEIGH, dann von DONDERS, dann von ihm selbst beobachtete Fälle in diesem Sinne zu nehmen; er hat sie als anormale trichromatische Systeme bezeichnet.<sup>1</sup> Da die Beobachtungen

---

Erörterungen in Abschnitt VI finden. Ich hätte im Grunde Worte vorgezogen, welche lediglich das Fehlen eines ersten oder zweiten Bestandteils bedeuteten, während die Endung... anopen, indem sie das „Nichtsehen“ anzeigt, meinem Wunsche schon nicht ganz entspricht. Indessen hat es weder mir noch einem mich freundlichst beratenden philologischen Kollegen gelingen wollen, brauchbare Wortbildungen dieses Sinnes zu stande zu bringen.

<sup>1</sup> KÖNIG und DIETERICI, Über die Grundempfindungen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum. *Diese Zeitschr.* IV. S. 280 f.

RAYLEIGH, *Nature*. XXV. p. 64. 1882.

DONDERS, Farbengleichungen. *Arch. f. Physiol.* 1884. S. 518.

über diesen Punkt noch wenig zahlreich sind, überdies, wie es scheint, HERING geneigt ist, auch diese Differenzen auf das Makula-Pigment zurückzuführen. so war es geboten, auch diesem Gegenstande die Aufmerksamkeit zuzuwenden.

Für den allgemeinen Gang der Versuche wäre nun im Grunde der einfachste Modus der gewesen, daß durch systematische Darstellung der Mischungsgleichungen die Farbensysteme der Farbentüchtigen, der Dichromaten etc. festgelegt worden wären, und es könnte daran die auf rein rechnerischem Wege zu beantwortende Frage geknüpft werden, ob sich die betreffenden Funktionen der dichromatischen Systeme als lineare Funktionen von denjenigen des trichromatischen Systems darstellen lassen. Ich habe jedoch diesen Weg, wiewohl seine mathematische Eleganz auf den ersten Blick einladend erscheint, doch nur zum Teil verfolgt. Für die Dichromaten nämlich konnte ohne Schwierigkeit so verfahren werden, wie dies von KÖNIG und seinen Mitarbeitern und wie es auch von NAGEL geschehen ist, so nämlich, daß zu einer passenden Reihe homogener spektraler Lichter die gleich erscheinende Mischung eines lang- und eines kurzwelligen Lichtes aufgesucht wurden. Dagegen stößt für die Farbentüchtigen die Durchführung eines analogen Verfahrens wenigstens mit den zur Zeit verfügbaren Hilfsmitteln auf große Schwierigkeiten. Da nun ein Teil der vom Farbentüchtigen zu gewinnenden Gleichungen wegen des relativ bedeutenden Einflusses, den hier die individuellen Verschiedenheiten der Makula-Tingierung gewinnen, ohnehin von geringerer Bedeutung ist und das Hauptinteresse sich auf einen gewissen relativ einfacher zu behandelndem Teil konzentriert, ist es mir zulässig erschienen die Beobachtung der Farbentüchtigen nur mit einiger Einschränkung durchzuführen; außerdem habe ich aber in vielen Fällen die Beziehungen zu den Dichromaten durch einen direkten Vergleich, nämlich durch gleichzeitig resp. alternierend ausgeführte Beobachtungen klar zu legen versucht. Wie zu diesem Zwecke verfahren wurde, wird im Gange der Darstellung mitzuteilen sein.

Ich erfülle endlich noch eine angenehme Pflicht, indem ich den zahlreichen Herren, Farbentüchtigen wie Farbenblinden, welche mich durch die Ausführung von Beobachtungen unterstützten, besonders den vier Herren Dichromaten, denen ich die systematischen Beobachtungen des folgenden Abschnitts ver-

danke, für ihre ausdauernde und vielfach mühevollen Mitwirkung meinen aufrichtigen Dank sage.

## II.

### Dichromatische Farbensysteme. Helligleichungen.

Systematische Beobachtungen der Mischungsgleichungen habe ich außer von Herrn Dr. NAGEL noch von drei anderen Dichromaten erhalten, von denen einer, Dr. STARK, ebenso wie NAGEL dem grünblinden (deuteranopischen) Typus, die Herren Stabsarzt SEHRWALD und stud. med. MARX, dem rotblinden (protanopischen) Typus angehören. Der Gang der Versuche war hier in jeder Beziehung derselbe, wie er in der Arbeit von NAGEL und mir für die Helligleichungen angegeben worden ist.<sup>1</sup> Es sei nur kurz daran erinnert, daß für jedes homogene Licht die Gemische eines langwelligen Lichtes (bei den Protanopen 589,2 bei den Deuteranopen 645  $\mu\mu$ ) und eines kurzwelligen (in allen Fällen 460,8  $\mu\mu$ ) eingestellt wurden, welche dem homogenen Lichte genau gleich erschienen.<sup>2</sup> Die im Gemisch erforderlichen Mengen des lang- und des kurzwelligen Lichtes können wir als die Rot- resp. Blauwerte ( $W$ - und  $K$ -Werte nach der Benennung von DONDERS) eines Lichtes bezeichnen, deren Größen also unsere Beobachtungen als Funktionen der Wellenlängen und zwar für das Dispersionsspektrum des Gaslichtes darstellen würden.

Die folgende Tabelle I stellt die Resultate dieser Beobachtungen zusammen. Sie enthält im ersten Stabe die spektralen Orte und Wellenlängen der homogenen Lichter, im zweiten, dritten, vierten und fünften die Ergebnisse der von den Herren NAGEL, STARK, SEHRWALD und MARX gemachten Einstellungen, und zwar so, daß die Rotwerte in der linken Hälfte des Stabes mit stehenden Zahlen, die Blauwerte in der rechten Hälfte mit liegenden (kursiv) eingetragen sind.

<sup>1</sup> Über den Einfluß von Lichtstärke und Adaptation auf das Sehen des Dichromaten (Grünblinden). *Diese Zeitschr.* X. S. 1.

<sup>2</sup> Niemals, wie hier zur Vermeidung von Irrtümern nochmals besonders betont sei, handelte es sich um die Herstellung gleicher Helligkeit bei ungleicher Farbe oder ungleicher Sättigung. Die Bestimmungen waren also von jedem unsicheren subjektiven Element so sehr als nur denkbar befreit.



Tabelle I.

Spektraler Ort und Wellenlänge des homogenen Lichtes	Beobachter Dr. NAGEL		Beobachter Dr. STARK		Beobachter Dr. SEHRWALD		Beobachter stud. MARX	
	Rot- werte	Blau- werte	Rot- werte	Blau- werte	Rot- werte	Blau- werte	Rot- werte	Blau- werte
0 (670,8 $\mu\mu$ )	33		33,4		5,3		4,9	
1 (656 $\mu\mu$ )	48		56,4		9,1		8,4	
2 (642 $\mu\mu$ )	79		95,0		19		18	
3 (628 $\mu\mu$ )	107		126		38		38,5	
4 (615 $\mu\mu$ )	147		138		63		63	
5 (603 $\mu\mu$ )	151		155		90		84	
6 (591 $\mu\mu$ )	137		144		109		105	
7 (581 $\mu\mu$ )	124		129		111		113	
8 (571 $\mu\mu$ )	103		108		120		126	
9 (561 $\mu\mu$ )	82		89		108		106	
10 (552 $\mu\mu$ )	64		65		92		101	
11 (544 $\mu\mu$ )	52		56		78		85	
12 (536 $\mu\mu$ )	41	6,3	37,4	6,0	65		67,5	
13,5 (525 $\mu\mu$ )	26	12	21	10,3	38,3	11,0	46,8	
15 (515 $\mu\mu$ )	15	28	13,7	21,6	20,6	34	32,8	13
16,5 (505 $\mu\mu$ )	7,7	36	7,5	32,2	9,8	35	17,2	29
18 (496 $\mu\mu$ )	3,7	48	4,1	46,3	4,8	47	8,4	33
19,5 (488 $\mu\mu$ )	1,6	62	1,9	58	2,2	57	5,3	49
21 (480 $\mu\mu$ )	0,9	64	0,9	67,0	0,9	66	2,9	71
23 (469 $\mu\mu$ )	0,3	70	0,3	65,6	0,3	67	1,0	69
24,7 (460,8 $\mu\mu$ )	—	67	—	68,6	—	54	—	66

Um das, worauf es ankommt, sogleich möglichst anschaulich hervortreten zu lassen, gebe ich in Figur 1 die vier Kurven, welche für alle vier Beobachter die Rotwerte, in Figur 2 die vier Kurven, welche die Blauwerte als Funktion der Wellenlänge darstellen. Für die Beurteilung der Zahlen wie der

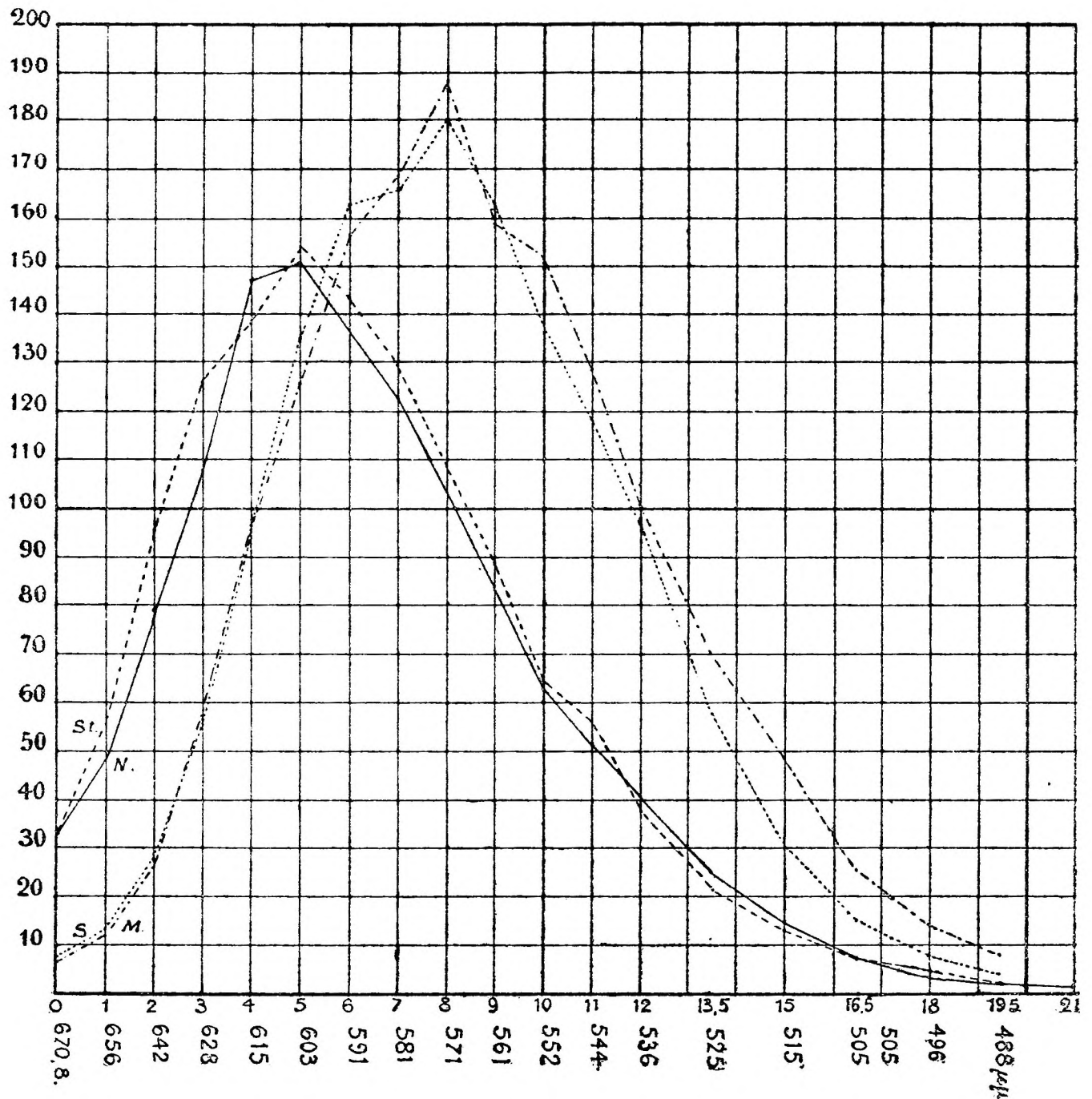


Fig. 1.

Verteilung der Rot-(W-) Werte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes für 2 Protanopen (Rotblinde) S. .... und M. —.—.—. und für 2 Deuteranopen N. ——— und St. ————

Kurven wäre nur noch darauf hinzuweisen, daß Rot- und Blauwerte zunächst in willkürlich gewählten Einheiten ausgedrückt sind. Auch die Maßstäbe, in denen wir die Kurven zeichnen, sind demgemäß willkürlich, und sie sind hier lediglich in dem Interesse gewählt, die Gestalt der verschiedenen Kurven (auf

die es allein ankommt) möglichst anschaulich hervortreten zu lassen. Richten wir unsere Aufmerksamkeit zunächst auf Fig. 1, so erkennen wir, daß je zwei der Kurven mit großer Annäherung zusammenfallen. Auf die geringen Unterschiede, welche zwischen den beiden nahe übereinstimmenden bleiben, (insbesondere zwischen M. und S.) soll später eingegangen werden. Vorderhand fassen wir die zwischen N. und St. einer-

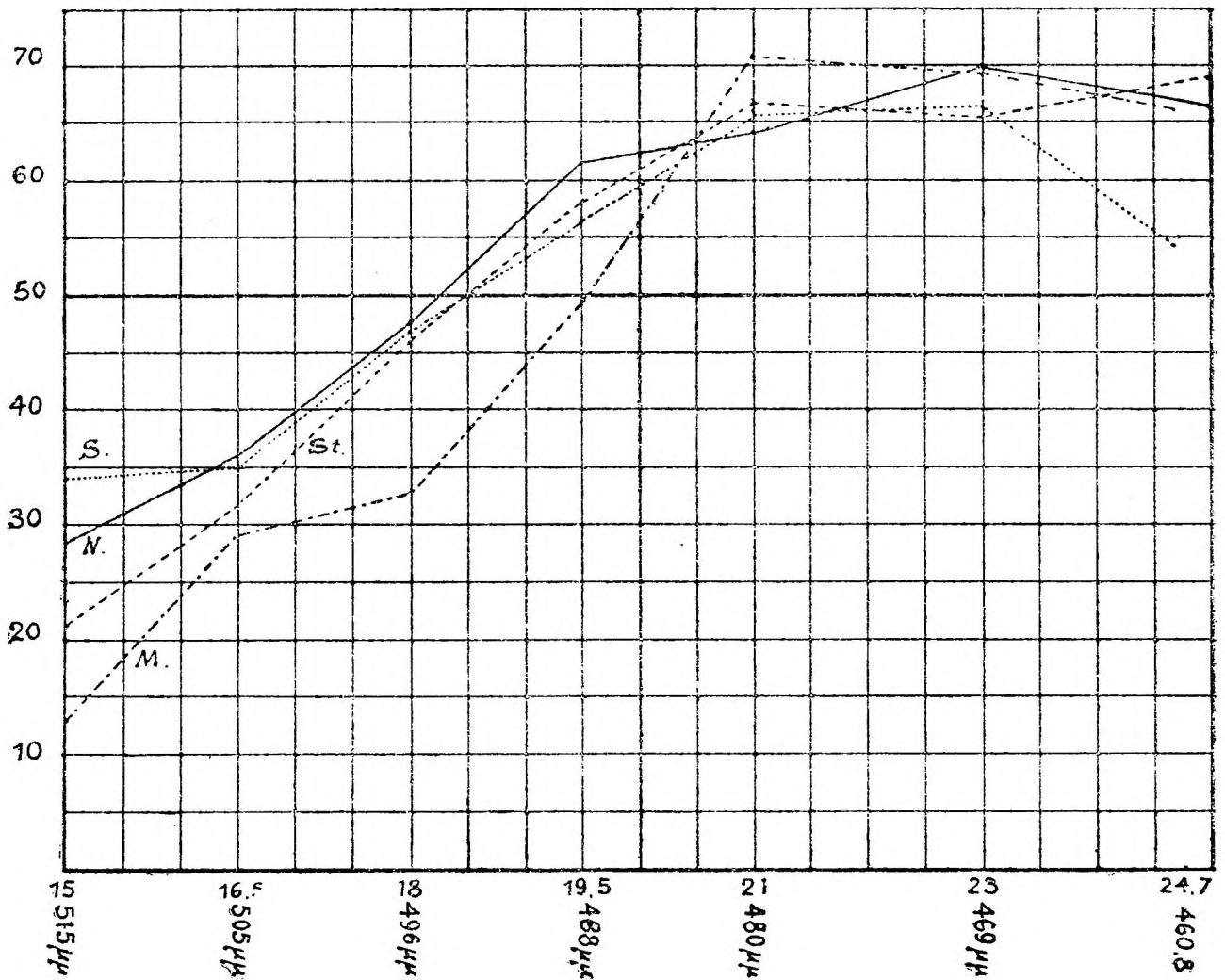


Fig. 2.

Verteilung der Blauwerte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes für  
S. .... M. - . - . - . N. ——— und St. — — — —

seits, S. und M. andererseits bestehende Differenz genauer ins Auge.

Schon der erste Blick lehrt, daß diese Differenz wohl kaum von der Art ist, daß sie aus der bei den einen etwa stärkeren und bei den anderen schwächeren Makula-Pigmentierung erklärt werden könnte. Da nämlich, wie wir aus den Untersuchungen von HERING und SACHS wissen, die Beschaffenheit des Makula-Pigments trotz geringer individueller Verschiedenheiten doch durchgängig von der Art ist, daß die Absorption im Grün-



gelb merklich zu werden anfängt, um mit abnehmender Wellenlänge stärker zu werden, so würden wir ein im Grüngelb beginnendes und gegen das brechbare Spektralende zunehmendes Auseinanderweichen der Kurven wol verstehen können, wenn die eine einem stark, die andere einem schwach pigmentierten Auge angehörte. Statt dessen sehen wir den grundverschiedenen Verlauf der Kurven schon im langwelligsten Teil des Spektrums vollkommen deutlich, ja sogar hier vorzugsweise deutlich ausgeprägt. Die einen haben ihr Maximum etwa bei 603, die anderen bei 571  $\mu\mu$ ; in dem Spatium von 603 bis 571  $\mu\mu$  steigen die einen stark an, während die anderen absinken. Es ist vielleicht nicht überflüssig, auf die unmittelbare Bedeutung dieser in den Kurven ausgedrückten Thatsache hinzuweisen; sie ist die genauere und vollständigere Darstellung der allbekannten Differenz, welche als Verkürzung des roten Spektralendes für die eine Gruppe der Dichromaten beschrieben zu werden pflegt. In der That zeigt ja die sehr niedrige Lage der Rot-Kurve am langwelligen Ende des Spektrums schon bei Wellenlängen über 620  $\mu\mu$  den dort sehr geringen und mit zunehmender Wellenlänge sich noch rapide vermindernden Reizwert dieser Lichter an. Auch der Dichromat dieses Typus kann eine Gleichung zwischen rotem Licht (z. B. von 670,8  $\mu\mu$ ) und gelbem (etwa *Na* Licht), ganz wohl herstellen. Aber er muß zu dem Ende dem Rot eine Intensität geben, bei der es für die anderen Dichromaten (wie auch für den Farbentüchtigen) ungemein viel heller als das Gelb erscheint.

Daß der Unterschied der beiden Gruppen nicht auf eine Differenz des Makula-Pigments zurückgeführt werden kann, darf wol schon hiernach als ziemlich sicher gelten. An die sonstigen im Auge bekannten leicht gelblichen Pigmentierungen in Linse und Glaskörper wird man ebensowenig denken dürfen, da auch diese nur am brechbaren Ende stärkere Absorptionen ergeben. Es ist aber nicht ohne Interesse, zu fragen, ob der Unterschied überhaupt von der Art ist, daß er auf irgend welche Verhältnisse der Lichtabsorption in den Augenmedien zurückgeführt werden kann, und wie diese event. beschaffen sein müssen. Für diese Frage gewinnen wir eine feste Unterlage durch die folgende einfache Überlegung.

Es sei die für den einen Dichromaten geltende Mischungsgleichung

$$x L_{\lambda} = a R + b Bl,$$

in Worten: die Menge  $x$  des Lichtes von der Wellenlänge  $\lambda$  erscheine gleich dem Gemisch von der Menge  $a$  roten Lichtes und der Menge  $b$  blauen Lichtes. Im Auge eines anderen Individuums mögen nun die Intensitätsverhältnisse der verschiedenen Lichter durch absorbierende Medien derart verändert sein, daß das Licht  $\lambda$  relativ zum Rot auf den Bruchteil  $\alpha_{\lambda}$ , Blau auf den Bruchteil  $\alpha_b$  reduciert ist. Dann wird die Gleichung für diese Person lauten:

$$x L_{\lambda} = a' R + b' B, \text{ worin}$$

$$a' = \alpha_{\lambda} a \text{ und}$$

$$b' = \frac{\alpha_{\lambda}}{\alpha_b} \cdot b \text{ ist.}$$

Sind also  $a'$  und  $a$  die Ordinaten der Rot-Kurve,  $b'$  und  $b$  die der Blau-Kurve für zwei Personen, so erhalten wir durch den Quotienten  $\frac{a'}{a}$  die relative Schwächung des Lichtes  $\lambda$  im Ver-

gleich zu dem des roten Lichtes, durch den Wert  $\frac{b}{b'} \cdot \frac{a'}{a}$  die relative Schwächung des Blau. Hieraus ist zunächst zu entnehmen, daß die Modifikation jeder derartigen Mischungsgleichung die relative Schwächung sowohl des homogenen Lichtes  $\lambda$  wie des in der Mischung verwendeten Blau zu berechnen gestattet.

Da nun solche Mischungsgleichungen für eine beträchtliche Zahl homogener Lichter vorliegen, so hat man in einer Bestimmung der aus jeder einzelnen sich ergebenden Schwächung des Blau zunächst die Möglichkeit einer Prüfung, ob die betreffenden Modifikationen überhaupt auf Absorption beruhen.

In allen Mischungsgleichungen müßten die Quotienten  $\frac{\text{Rot}}{\text{Blau}}$  der einen Person gegenüber denjenigen der anderen in demselben Verhältnis geändert sein. Leider ist die praktische Durchführung dieser Prüfung nicht wohl möglich. Da nämlich die Blauwerte bis zur Wellenlänge 535 noch nahezu gleich Null sind und erst von 515 an ihre Bestimmung auf eine er-

hebliche Genauigkeit Anspruch machen kann, und da andererseits von 486 ab die Rotwerte bereits so gering sind, daß ihre quantitative Verwertung auf Bedenken stösst, so ist das eine Vergleichung gestattende Gebiet sehr klein. Überdies, wie wir später noch sehen werden, sinken hier die beiden *W*-Kurven (des Rot- und des Grünblinden) nahezu proportional ab.

Demnach sinken auch die Quotienten  $\frac{\text{Rot}}{\text{Blau}}$  innerhalb dieses Gebietes in allen vier Fällen zwar mit mancherlei Verschiedenheiten, aber doch ohne eine sichere Unterscheidung der beiden Typen zu gestatten. Sehen wir also hiervon ab und betrachten zunächst die allgemeine Möglichkeit als gegeben, daß die Modifikation der Mischungsgleichungen auf physikalischer Ursache beruhe, so wird es um so wichtiger sein, zu prüfen, welcher Art das hypothetische absorbierende Medium sein müßte.

Der Gang der demselben zuzuschreibenden Lichtschwächungen würde für die weniger brechbare Hälfte aus dem Verlauf je zweier Rot-Kurven, für die brechbarere aus dem Verlauf je zweier Blau-Kurven mit großer Sicherheit entnommen werden können. Natürlich bleibt es zunächst willkürlich, ob wir das hypothetische Pigment in das Auge des Grünblinden oder des Rotblinden verlegen wollen. Thun wir das erstere und berechnen danach die relative Schwächung der verschiedenen Lichter im Vergleich zu *Li*-Rot, die wir im Auge von Herrn NAGEL gegenüber demjenigen von Herrn SEHRWALD annehmen müßten, so erhalten wir die folgende Zusammenstellung, in welcher die Zahlen angeben, auf welchen Bruchteil seines Wertes wir uns das betreffende Licht durch Absorption reduciert denken müßten:

Wellenlänge	656	642	628	615	603	591	581	571	561	552	544	536
Berechnete Schwächung	0,85	0,68	0,45	0,37	0,26	0,2	0,18	0,14	0,12	0,11	0,11	0,10

Andererseits lehrt ein Blick auf die Blau-Kurven, daß diese in der ganzen brechbaren Spektralhälfte für NAGEL und SEHRWALD nahe übereinstimmend verlaufen, wonach also die bei N. angenommene Schwächung des Lichtes hier annähernd konstant bleiben müßte.<sup>1</sup> Wir werden also dazu geführt, im Auge des Deuteranopen ein Pigment anzunehmen, dessen Absorp-

<sup>1</sup> Genau betrachtet lehren sogar die Blau-Kurven, daß mit weiter abnehmender Wellenlänge die Absorption bei NAGEL gegenüber SEHRWALD eher wieder etwas geringer wird.



tion, bereits im Rot beginnend, *Na* Licht bereits auf  $\frac{1}{5}$ , *Tl* Licht auf  $\frac{1}{10}$  seines Betrages schwächen würde, um von da ab gegen das blaue Ende nicht mehr merklich zuzunehmen.

Verlegte man andererseits das hypothetische Pigment in die Augen der Herrn M. und S., so müßte seine Absorption mit zunehmender Wellenlänge etwa im Grüngelb beginnen und rapide zunehmen, so daß *Li* Rot im Vergleich z. B. zu Licht 535 auf  $\frac{1}{10}$  seines Wertes geschwächt würde. In beiden Fällen müßte es sich um ein Pigment handeln, welches von den bekannten gelben und gelblichen Pigmenten des Auges, insbesondere dem des gelben Flecks, *toto coelo* verschieden wäre. Pigmente dieser Art (ein rotes in dem einen, ein blau-grünes in dem anderen Falle) hätten nun bei der Häufigkeit beider Formen der Farbenblindheit wohl kaum der Beobachtung entgehen können. Da aber bisher nie etwas derartiges entdeckt worden ist, so wird man wohl sagen dürfen, daß, nachdem die Erklärung der in Rede stehenden Differenz aus den Unterschieden des Makula-Pigments definitiv gescheitert ist, eine Erklärung aus irgend welchen anderen Verhältnissen der Lichtabsorption in gefärbten Medien kaum ernstlich in Frage kommt.

Hierzu kommt nun noch ein zweites, für die theoretische Deutung sehr beachtenswertes Moment. Die mehrerwähnte, durch die Kurven der Figur 1 zur Anschauung gebrachte Differenz zwischen Protanopen und Deuteranopen ist nicht von der Art, daß sich in ihr die individuellen Schwankungen einer hier stärkeren und dort geringeren Pigmentierung verrieten; sie ist keine fluktuierende, sondern eine typische. Man wird zur Erhärtung dieser Anschauung das hier vorgelegte Material von vier Fällen mit Recht zu klein finden. Indessen ist die Gesamtheit des z. Zeit bekannten Beobachtungsmaterials doch ausreichend, um dies ganz außer Zweifel zu stellen. Zunächst enthalten die Beobachtungen von KÖNIG und seinen Mitarbeitern die Farbensysteme von vier Dichromaten, deren Rot-Kurven genau in derselben Weise wie die unserigen in zwei Typen auseinanderfallen. Die Gründe, weshalb zwischen den KÖNIGSchen Kurven und den unserigen eine ganz vollkommene Übereinstimmung nicht zu erwarten ist, sind bekannt; sie liegen, abgesehen von Unterschieden in Bezug auf das benutzte Licht, die Reinheit der Spektren u. a., vornehmlich darin, daß bei KÖNIG mit größeren Feldern und nicht mit hell-adaptiertem

Auge gearbeitet wurde. Immerhin ist die Übereinstimmung doch eine frappante, wie namentlich an der Lage der beiden Kurvengipfel wahrzunehmen ist, von denen bei uns wie bei KÖNIG der eine etwa bei 603, der andere etwa bei 570  $\mu\mu$  gefunden wird. Da ja auch die Zahl von 8 noch eine geringe ist und der Wert der Übereinstimmung auch noch durch die erwähnten Ungleichheiten der Methode etwas gemindert wird, so habe ich nach einer weiteren Vermehrung des Materials gestrebt. Nun ist die Zahl derjenigen farbenblinden Personen, von denen man die für eine Darstellung der obigen Art erforderlichen sorgfältigen und ausgedehnten Beobachtungen erhalten kann, immer eine sehr beschränkte; es erschien mir daher zweckmäßig, da die Ausdehnung dieser Untersuchungen auf sehr viele Personen ganz unausführbar ist, von einer möglichst großen Zahl von Dichromaten nur eine als Specimen geeignete Bestimmung ausführen zu lassen. Als solche habe ich die Verwechslungsgleichungen zwischen *Li* Rot und *Na* Gelb gewählt und dabei die folgenden, schon an anderer Stelle<sup>1</sup> mitgeteilten Resultate erhalten. Zehn Teile *Na* Gelb erschienen den im ersten Stabe der Tabelle 2 aufgeführten Beobachtern gleich mit den im zweiten Stabe eingetragenen Mengen *Li* Rot. Es sei hier des weiteren über diese Versuche nur bemerkt, daß jede Zahl den Mittelwert aus einer mäßigen Zahl (fast immer 10) Einstellungen angiebt. No. 1 und 7, 10 und 12 sind dieselben Personen, denen die oben behandelten ausführlichen Bestimmungen angehören.

Tabelle II.

1. W. NAGEL	36.5	9. F.	40.0
„	36.3	10. S.	214
„	36.3	11. V.	213
„	36.5	12. M. M.	211
„	38.4	13. E. J.	205
2. L. V.	37.3	14. H.	196
3. A. V.	37.0	15. E. I.	198
4. SCHN.	37.0	16. E. II.	210
5. O. N.	37.8	17. K.	200
6. K. ST.	37.0	18. W.	210
7. H. ST.	36.9	19. B.	203
8. O. ST.	38.0	20. TH.	225

<sup>1</sup> Centralblatt für Physiologie. 1896. S. 148.

Der vollkommen scharfe und typische Charakter des zwischen den beiden Dichromatengruppen stattfindenden Unterschiedes darf hiernach wohl, im Hinblick auf die hier behandelten 20 Fälle schon als ziemlich sicher gestellt gelten.

Wir können aber hier noch auf ein älteres Beobachtungsmaterial hinweisen, welches zwar etwas weniger scharf, aber doch deutlich genug die gleiche Thatsache zur Anschauung bringt. Es sind nämlich schon im Jahre 1884 von DONDERS Verwechslungsgleichungen zwischen *Li* Rot und *Na* Gelb an Dichromaten gewonnen und mitgeteilt worden.<sup>1</sup>

Tabelle III (nach DONDERS).

10 Teile Natrium-Licht erscheinen gleich Lithium-Licht:

Rotblinde:		Grünblinde:	
I	360	I	65,2
II	232	II	68,2
III	327	III	66,9
IV	283	IV	62,5
V	277	V	66,7
VI	295	VI	65
VII	240	VII	68,5
VIII	296	VIII	59,5
IX	217	IX	31,4
X	240	X	84,2
Mittel	276.	Mittel	63,84.

Ich reproduziere hier die Tabelle von DONDERS, wobei wiederum im ersten Stabe die Bezeichnung des betreffender farbenblinden Beobachters, im zweiten Stabe die Menge des *Li*-Rots angegeben ist, welche 10 Teilen *Na*-Licht gleich erschienen. Daß die Zahlen hier absolut merklich andere sind, als die unsrigen, darf nicht befremden; denn die Werte, die man erhält, hängen in beträchtlichem Maße von der Reinheit der Spektren und der Art der benutzten Lichtquelle ab. Ebenso wenig ist es überraschend, daß die DONDERSschen Zahlen innerhalb jeder Gruppe stärkere Schwankungen aufweisen, als die unsrigen; wir wissen, daß annähernd konstante Zahlen nur bei kleinem Beobachtungsfelde und helladaptiertem Auge zu erhalten sind, Bedingungen, deren Bedeutung damals noch nicht

<sup>1</sup> DONDERS, Farbengleichungen. *Arch. f. Physiol.* 1884. S. 528.



bekannt war, und die daher auch nicht eingehalten wurden. Trotzdem zeigen doch auch die DONDERSSchen Zahlen durchaus überzeugend, daß dasselbe gelbe Licht von der einen Gruppe einer etwa 4—5fach größeren Intensität des *Li*-Rots gleich gehalten wird, als von der anderen.

Man kann daher wohl sagen, daß der typische Unterschied der beiden Dichromaten-Gruppen z. Z. an nicht weniger als 40 Fällen in übereinstimmender Weise festgestellt worden ist, und man wird verständiger Weise kaum zweifeln dürfen, daß auch für diese Fälle bei vollständigerer Untersuchung sich die gleiche Art des Sehens herausgestellt haben würde, wie sie bei den Repräsentanten der einen und anderen Gruppe gefunden worden ist, die einer genaueren Untersuchung unterzogen werden konnten.

Sollten im Hinblick auf manche älteren Untersuchungen noch Zweifel über den scharfen und typischen Unterschied der beiden Gruppen bestehen, so wird noch darauf hinzuweisen sein, daß uns gegenwärtig die Gründe bekannt sind, aus denen bei gewissen Untersuchungsweisen der Unterschied der beiden Gruppen sich mehr oder weniger verwischt. So ist z. B., wenn man ein homogenes Blaugrün mit einer Mischung aus Rot und Blau vergleichen läßt (wie es vor Jahren KÜSTER und ich gethan) die Stäbchenvalenz der beiden Felder außerordentlich ungleich; läßt man also, wie auch wir damals thaten, mit mäfsig adaptiertem Auge beobachten, so ist es begreiflich, daß die Ergebnisse sehr schwankend werden und der Unterschied nicht so scharf hervortritt, wie man es auch hier erwarten könnte, sofern reine Hellgleichungen hergestellt würden. Außerdem gewinnen, wovon später noch eingehender zu reden sein wird, in der That die Differenzen der Makula-Pigmentierung auf gewisse Gleichungen einen nicht unerheblichen Einfluß; wir werden sehen, daß hierdurch z. B. der zu erwartende Unterschied in der Lage des Neutralpunktes zwar nicht aufgehoben, wohl aber verwischt und unscharf gemacht wird. Auch diese Thatsachen sind also ganz verständlich und beeinträchtigen nicht die Anschauung von einem völlig präzise fixierten Unterschied der beiden Gruppen der Dichromaten, der klar zur Erscheinung kommt, wenn man Hellgleichungen herstellen läßt, und wenn man, durch Beschränkung auf die weniger brechbaren Teile des Spektrums, sich von den individuell schwankenden

Verhältnissen der Makula-Pigmentierung unabhängig hält. Mir scheint, daß auch schon dieser typische Charakter der erwähnten Differenz sehr gegen die Zurückführung derselben auf ein absorbierendes Pigment spricht. Wollte man wirklich daran denken (was ja vielleicht noch am ehesten ansprechend erscheinen könnte), die Unterempfindlichkeit der Rotblinden gegen die langwelligen Lichter auf ein Rot-absorbierendes Pigment zurückzuführen, so würde sich doch durchaus nicht verstehen lassen, weshalb jene Unterempfindlichkeit immer eine ganz bestimmte, durch den gleichen Zahlenwert gemessene sein sollte, da doch ein derartiges Pigment gewiß ebenso wie das Makula-Pigment in sehr wechselnder Stärke zu erwarten und somit auf das Auftreten aller Übergänge von den geringsten bis zu den stärksten Werten zu rechnen sein sollte.

Die Vergleichung der beiden Gruppen der Dichromaten führt somit zu dem Ergebnis, daß zwischen ihnen ein scharfer und typischer Unterschied besteht, welcher auf eine Differenz der uns bekannten gelblichen Pigmente der Augenmedien jedenfalls nicht zurückgeführt werden kann, und der, wie sich mit größter Wahrscheinlichkeit sagen läßt, überhaupt eine Erklärung aus irgend welchen hypothetisch anzunehmenden Pigmentierungen nicht gestattet. Im Anschluß an diese Konstatierung wird nur die Bemerkung noch am Platze sein, daß selbstverständlich auch die dieser Aufstellung hauptsächlich zu Grunde liegende Zahl von 40—50 Fällen zu klein ist, um etwa die Behauptung zu gestatten, daß Fälle anderer Art niemals vorkämen. Ich habe bis jetzt keinen Fall zur Beobachtung bekommen, der sich als typischer Dichromat qualifiziert hätte, und der sich nicht bei der Prüfung an der *Li-Na*-Gleichung sofort als der einen oder der anderen Gruppe streng angehörig erwiesen hätte; die obige Zusammenstellung umfaßt in der That alle mir zur Beobachtung gekommenen und in dieser Richtung geprüften Fälle von vollständiger partieller Farbenblindheit. Selbstverständlich aber kann und will ich nicht behaupten, daß nicht daneben (wenn auch gewiß wohl nur recht selten) andere Formen vorkommen. Auch hierdurch würde natürlich die für die überwiegende Mehrzahl geltende Thatsache einer scharfen Sonderung in zwei Gruppen nicht in Frage gestellt werden.

Da bekanntlich, wie schon erwähnt, HERING den Versuch



gemacht hat, den Unterschied der beiden Dichromatengruppen auf die Differenzen des Makula-Pigmentes zurückzuführen, so erschien es, auch nachdem die Unmöglichkeit dieser Auffassung nachgewiesen war, von Interesse, zu sehen, welche Rolle denn diese ja zweifellos vorhandenen Differenzen in dem Sehen der Dichromaten spielen. Ich habe daher an den mir zur Verfügung stehenden Beobachtern (Farbenblinden) hierüber in verschiedener Richtung Versuche gemacht, die um so mehr Interesse boten, als man hier weit eher als beim Trichromaten hoffen durfte, zahlenmäßige Aufschlüsse über den Wert der betreffenden Absorptionen zu erhalten.

Ich erwähne hier zunächst eine Anzahl von Bestimmungen, welche geeignet sind, auch von dieser Seite her den Satz zu illustrieren, daß diese Absorptionsverhältnisse mit dem Typenunterschiede der beiden Dichromatengruppen nichts zu thun haben. Bekanntlich kann man die Differenzen der Pigmentierung am einfachsten so zur Darstellung bringen, daß man eine Gleichung zwischen einem homogenen Licht, z. B. (beim Trichromaten) Gelb und der Mischung aus einem länger- und einem kürzerwelligen Licht (Rot und Grün) herstellen läßt. Das homogene Licht kann durch das absorbierende Medium nur in seiner Intensität verändert werden; wenn daher die eigentlichen optischen Substanzen durchweg dieselben sind, so wird, um Gleichheit mit dem Gelb zu erhalten, im Gemisch relativ um so mehr Grün erforderlich sein, je stärker dieses durch das vorhandene Pigment absorbiert wird. Die Anwendung dieses Verfahrens auf den Dichromaten erfordert insofern besondere Überlegung, als zunächst die Rot-Grünmischungen nicht angewandt werden können, da die Dichromaten hier bei jedem beliebigen Verhältnis von spektralem Rot und gelblichem Grün Gleichungen mit Gelb gewinnen können. Will man ferner die Vergleiche nicht bloß innerhalb jeder Gruppe ausführen, sondern ein Urteil gerade darüber gewinnen, wie sich die Pigmentierungen der sämtlichen Fälle gegeneinander verhalten, so sind naturgemäß von den dem obigen Prinzipie folgenden Vergleichen auch diejenigen ausgeschlossen, bei welchen die Typusdifferenz sich einmischen kann. Es wäre also z. B. unzulässig, eine Vorstellung über die Pigmentierung daraus herzuleiten, wieviel Blau einem Rot zuzumischen ist, um eine Gleichung zwischen diesem Gemisch und einem homogenen



Blaugrün zu erhalten, da in dieser Hinsicht Typusdifferenzen möglicherweise bestehen können und, wie die Erfahrung lehrt, thatsächlich bestehen. Will man hiervon unabhängig sein, so kann nur eine Gleichung benutzt werden, welche (von Pigmentierungs-differenzen abgesehen) für Rot- und Grünblinde übereinstimmend gilt, und dies ist (wie später noch zu zeigen ist) eine, die auch für den Trichromaten Gültigkeit besitzt. Den hierdurch fixierten Anforderungen genügt annähernd eine Gleichung zwischen einem homogenen Blaugrün etwa von der Wellenlänge  $490 \mu\mu$  und einer Mischung aus Grün und Blau, wobei das Blau etwa von  $460 \mu\mu$ , das Grün zwischen  $517$  und  $510$  gewählt werden kann. Da die Absorption des Makula-Pigments für das blaue Licht erheblich stärker ist, als für das grüne, so beobachtet man leicht, daß die auf kleinem Felde und für direkte Fixation hergestellte Gleichung auf größerem Felde und bei exzentrischer Betrachtung unzutreffend wird: das Gemisch erscheint merklich zu blau. Ebenso fallen denn auch, wenn man von vielen Personen derartige Einstellungen machen läßt (und zwar immer bei direkt fixiertem kleinem Felde), die Einstellungen ziemlich verschieden aus, und wir werden im allgemeinen diejenigen, die im Gemisch mehr Blau nötig haben, für die mit stärker pigmentierter Makula Behafteten halten dürfen. Eben diese Bestimmungen habe ich nun von den meisten der oben erwähnten Dichromaten ausführen lassen. Da infolge zufälliger Umstände hierbei nicht allemal das gleiche Grün gewählt worden war, so sind diese Zahlen am besten so untereinander vergleichbar, daß ich den im Gemisch erfordernten Quotienten  $\frac{\text{Blau}}{\text{Grün}}$  im Verhältnis zu demjenigen angebe, welchen in unmittelbar gleichzeitig angestellten Versuchen Herr Dr. W. NAGEL einstellte. Diese Zahlen betragen:

- I. für Dichromaten der protanopischen (rotblinden) Gruppe  
0,6; 0,84; 1,01; 1,06; 1,14; 1,5;
- II. für Dichromaten der deuteranopischen (grünblinden) 0,71;  
0,74; 0,81; 0,87; 0,97; 1,2.

Die Zahlen besagen, was eben auch der bei den Beobachtungen ausgeführte direkte Vergleich unmittelbar lehrte, daß in beiden Gruppen sowohl solche Personen vorkommen, die mehr, als auch solche, die weniger Blau einstellen, als NAGEL. Es läßt sich also nach diesem Kriterium eine Pigmen-

tierungsdifferenz zwischen den beiden Gruppen nicht konstatieren; jede umfaßt stärker und schwächer pigmentierte Individuen; die schwächste (0,6; Stud. M.) und die stärkste (1,5; Stabsarzt S.) gehören derselben Gruppe an.

Interessanter als diese, im Hinblick auf früher Erörtertes kaum mehr erforderliche Feststellung ist es, diejenigen Differenzen genauer zu verfolgen, welche wirklich auf der Makula-Pigmentierung beruhen. Die einfachere Natur des Farbensystems bringt es mit sich, daß dies an zwei Dichromaten des gleichen Typus leichter und vollständiger geschehen kann, als an zwei Trichromaten. Ein besonders günstiger Zufall war es dabei, daß die beiden systematisch und vollständig untersuchten Protanopen (Stabsarzt S. und Stud. M.), wie schon aus den oben angeführten Zahlen entnommen werden konnte, zwei ziemlich extreme Fälle stärkster und schwächster Makula-Pigmentierung darstellten. Die Bedeutung dieses Umstandes kann nun in der That sehr klar und instruktiv an den Mischungsergebnissen verfolgt werden. Um dies zur Anschauung zu bringen, betrachte man in Fig. 1 die beiden die Rotwerte darstellenden Kurven, in Fig. 2 die den Blauwert darstellenden der Herren S. und M. Man erkennt mit großer Deutlichkeit, daß beide M-Kurven sich von den S-Kurven in einem bestimmten Sinne unterscheiden. Bei den Rotkurven zeigt sich etwa von  $552 \mu$  an ein Unterschied in dem Sinne, daß die Kurve des stark pigmentierten Herrn S. kleinere Ordinaten aufweist, als diejenige des schwach pigmentierten Herrn M., woraus die allmählich bei einer unter  $552 \mu\mu$  sinkenden Wellenlänge mehr und mehr zur Geltung kommende Absorption ersichtlich wird. Die Blaukurven zeigen das Gleiche, nur mit der Modifikation, die dadurch bedingt ist, daß auch das im Gemisch figurierende Blau der starken Absorption bei Herrn S. unterliegt. Aus diesem Grunde müssen die Kurven bei 460, obwohl hier die Absorption am stärksten ist, für beide Beobachter zusammenfallen; um aber Gleichheit mit einem Licht, z. B. von 490, zu erzielen, braucht M. weniger Blau als S., hier muß also die M-Kurve unter der S-Kurve liegen und dieser Unterschied mit zunehmender Wellenlänge immer stärker hervortreten. In beiden Fällen muß mit abnehmender Wellenlänge die S-Kurve weniger ansteigen oder steiler absinken, als die M-Kurve, das Verhältnis der S-Werte zu den M-Werten

immer kleiner werden. Dies bestätigen denn auch die Zahlen, wie die nachstehende Zusammenstellung zeigt, in welcher das Verhältniß der *W*-Ordinate des Herrn S. zu der des Herrn M. als Funktion der Wellenlänge dargestellt ist:

Wellenlänge	670,8	656	692	628	615	603	591	581	571	$\mu\mu$		
Ordinaten-Verhältnis	1,1	1,1	1,05	1,00	1,00	1,07	1,07	0,98	0,96			
	561	552	544	536	525	515	505	496	488	480	469	$\mu\mu$
	1,02	0,91	0,91	0,97	0,91	0,63	0,63	0,57	0,42	0,41	0,3	

Wenn wir daher hier aus den Mischungsbeobachtungen einen Schluß auf die Natur des der Differenz zu Grunde liegenden absorbierenden Pigmentes machen, so werden wir demselben eine solche Beschaffenheit zuzuschreiben haben, daß die Absorption im Grünlichgelb anfängt merklich zu werden, und mit abnehmender Wellenlänge jedenfalls bis 469  $\mu\mu$  stetig zunimmt, besonders stark etwa in dem Spatium von 520—490  $\mu\mu$ . Es braucht kaum noch darauf hingewiesen zu werden, in wie guter Übereinstimmung sich dies mit den SACHSSchen Untersuchungen des Makula-Pigments befindet, übrigens auch mit dem, was uns jederzeit die Vergleichen zentraler und exzentrischer Mischungsgleichungen lehren kann. Hier also, in den Differenzen zweier dem gleichen Typus angehörenden Dichromaten, kommt in Wirklichkeit der Einfluß des absorbierenden Pigmentes mit voller Deutlichkeit zur Erscheinung.

Es erschien bei dieser Sachlage besonders interessant, für die auf solchen Individualitäten beruhenden Unterschiede eine zahlenmäßige Fixierung zu finden. Eine solche zu geben, sind bereits die obigen Quotienten geeignet. Nehmen wir an, daß das Pigment das langwellige Licht nicht beeinflusst, so würden wir, ihnen zufolge, annehmen dürfen, daß das blaue Licht bei Herrn S. etwa auf 0,3 desjenigen Wertes geschwächt ist, mit dem es bei Herrn M. zur Wirkung kommt.

Sicherer als diese rechnende Verwertung eines ausgedehnten und schließlich doch niemals in allen seinen Teilen unter ganz genau identischen Bedingungen stehenden Beobachtungsmaterials erschien die direkte Ermittlung durch gleichzeitig ausgeführte Parallelbeobachtungen, wie sie durch die Gefälligkeit der beiden Herren in dankenswerter Weise ermöglicht wurden. Es wurde zu diesem Zwecke so zu Werke gegangen,



daß beide Beobachter in unmittelbarem Anschluß aneinander Gleichungen zwischen einem homogenen Blaugrün von  $491 \mu\mu$ , ihnen annähernd farblos, und einem Gemisch aus Gelb (589) und Blau (460,8) herzustellen hatten. Hier konnte die relative Schwächung des Blau direkt, ohne Zwischenrechnung, ausgewertet werden, und es zeigte sich denn auch mit großer Deutlichkeit der beträchtliche Unterschied in dem erwarteten Sinne. Das von Herrn M. als dem homogenen Lichte gleich eingestellte Gemisch erschien Herrn S. stark gelb, das von Herrn S. eingestellte war für Herrn M. gegenüber dem homogenen deutlich zu blau. Da Herr M. den Nicol im Durchschnitt auf  $71,25^\circ$ , Herr S. auf  $78,15^\circ$  einstellte, so berechnet sich für die Absorption des blauen Lichtes im Auge des Herrn S. hiernach eine Schwächung auf den Wert  $\frac{\operatorname{tg}^2 71,25}{\operatorname{tg}^2 78,15} = 0,38$ . Natürlich kann nicht in Abrede gestellt werden, daß noch stärkere Pigmentierungen als diejenige des Herrn S. und noch schwächere als die des Herrn M. vorkommen, und somit auch der Unterschied zwischen zwei Beobachtern einmal noch beträchtlicher als hier ausfallen kann. Immerhin dürfte, da es sich um den stärksten und den schwächsten pigmentierten aus einer größeren Zahl von Personen handelte, die hier erhaltene Differenz schon eine verhältnismäßig hohe sein. Wir werden auf diese Werte später bei den Farbentüchtigen, wo ihre Ermittlung schwieriger ist, wieder zurückzukommen haben.

Wie vorhin schon erwähnt, macht sich die Stärke der Makula-Pigmentierung sehr deutlich auch in der Lage des neutralen Punktes im Spektrum geltend, wenn man hierunter (wie üblich) dasjenige homogene Licht versteht, welches einem gewissen unzerlegten Weiß für gleich gehalten wird. In der That unterliegt ja auch hier wieder das gemischte Weiß, nicht aber das homogene Licht, einer qualitativen Veränderung durch das absorbierende Medium; in dem stark pigmentierten Auge ist der ganze brechbare Teil des Spektrums merklich geschwächt, und es wird daher das gleich erscheinende homogene Licht zu einem erheblich gelblicheren Gemisch gesucht, als dies bei dem schwächer pigmentierten Auge der Fall ist. Es erschien wichtig, eine bestimmte Vorstellung darüber zu gewinnen, in welcher Breite etwa zufolge dieses Umstandes die Lage des Neutralpunktes im Spektrum schwanken könne. Auch

dies wurde durch gleichzeitig resp. alternierend ausgeführte Parallelbeobachtungen der Herren M. und S. ermittelt. Diese lehrten sofort, daß Herr M. ein merklich kürzerwelliges Licht dem unzerlegten Weißs gleich hielt als S.; beiden erschien das durch Spiegelung in den Apparat gebrachte unzerlegte weißse Licht als farblos; das von Herrn M. als gleich eingestellte homogene war für S. blau, das von S. eingestellte für M. gelb. Die Einstellungen unterschieden sich um etwa 8  $\mu\mu$ .

Sehr interessant waren nun die, ebenfalls gleichzeitig gemachten Einstellungen des Herrn Dr. NAGEL, dessen Makula-Pigmentierung, wie oben erwähnt, als eine mittlere, stärker als bei M., schwächer als bei S., betrachtet werden darf. Das von ihm eingestellte homogene Licht lag nämlich stets noch etwas rotwärts von demjenigen des Herrn S. Die folgende kleine Tabelle mag die Ergebnisse übersichtlicher machen.

Tabelle IV.

Art des gemischten Lichts	Wellenlänge des als gleich eingestellten homogenen Lichts		
	NAGEL	SEHRWALD	MARX
Magnesium Oxyd-Fläche in Tageslicht	499	498	490
Gespiegeltes Wolkenlicht durch Mattglas abgeschwächt	499	497	489
Gespiegeltes Wolkenlicht durch Rauchglas abgeschwächt	495	494	486

Wir sind hiernach, wie ich glaube, in der Lage, die Verhältnisse bezüglich des Neutralpunkts vollkommen zu verstehen, und insbesondere auch gewisse früher bestandene theoretische Schwierigkeiten aus dem Wege zu räumen. Der Theorie nach (mögen wir von den ursprünglichen HELMHOLTZschen Darstellungen ausgehen oder auch an die von KÖNIG und von uns gewonnenen Kurven uns halten) ist immer zu erwarten, daß der Neutralpunkt<sup>1</sup> für den Grünblinden an einer weniger brech-

<sup>1</sup>-Ich verstehe hierunter immer dasjenige homogene Licht, welches einem unzerlegten Weißs gleich erscheint.

baren Stelle des Spektrums gefunden werde, als für den Rotblinden. Warum hat sich dies trotz der zahlreichen über die Lage des neutralen Punktes angestellten Untersuchungen nicht mit Sicherheit herausgestellt? Der Grund liegt zunächst darin, daß bei der faktischen Gestaltung der beiden Kurven der Unterschied in der Lage des neutralen Punktes kein so sehr größer ist. Die Erregbarkeitskurven der Rot- und der Grün-Komponente fallen zwar vollkommen scharf und deutlich auseinander, aber doch nicht so stark, wie dies von HELMHOLTZ in den zunächst fingierten Kurven (z. B. erste Auflage der *Physiol. Optik*, S. 291) angenommen worden ist. Aus diesem Grunde ist also (*ceteris paribus*) der Neutralpunkt für den Grünblinden zwar deutlich, aber doch nicht sehr viel rotwärts von dem des Rotblinden gelegen. Wir können die Differenz etwa auf 4—6  $\mu\mu$  veranschlagen. Diese Differenz kommt aber nur dann rein zur Geltung, wenn wir zwei Personen mit etwa gleicher Makula-Pigmentierung vergleichen. Beobachten wir aber eine größere Zahl von Personen ohne Rücksicht hierauf, so sind die in dieser Beziehung bestehenden individuellen Differenzen beträchtlich genug, um die Grenze zu verwischen; der Neutralpunkt des schwach pigmentierten Grünblinden kann sich dem des stark pigmentierten Rotblinden annähern, ja gelegentlich wohl auch über ihn hinausgehen und (im scheinbaren Gegensatze zur Theorie) sich blauwärts von diesem finden. Dies ist nach Allem, was wir gegenwärtig wissen, durchaus zu verstehen. Zu erwägen ist dann ferner, daß die Aufsuchung des Neutralpunktes auch aus anderen Gründen noch auf manche Schwierigkeiten stößt, welche Schwankungen in die Ergebnisse bringen können. Hierzu gehört zunächst, daß das zum Vergleich dienende unzerlegte Weiß nicht mit Sicherheit durchweg von der absolut gleichen Beschaffenheit zu erhalten ist, sodann aber auch das sogenannte „Wandern“, welches bei abnehmender Lichtstärke und Dunkeladaptation sich bemerkbar macht und, wie früher auseinander gesetzt wurde,<sup>1</sup> auf der Einmischung der Stäbchenfunktion beruht. Es wird daher nicht überraschen können, daß die älteren Beobachtungen lediglich die Existenz eines gewissen Spatiums für die Lage des neutralen Punktes ergeben haben, ohne einen

---

<sup>1</sup> Diese Zeitschr. IX. S. 99 f.



sicheren Unterschied des einen und des anderen Typus erkennen zu lassen. Selbst gegenwärtig würde ich mich nicht anheischig machen mögen, allein aus der Bestimmung des Neutralpunktes den Rotblinden vom Grünblinden zu unterscheiden.

Es erübrigt, die individuellen, von der Makula-Pigmentierung abhängenden Differenzen noch in einigen weiteren Beziehungen zu verfolgen. Was zunächst die beiden der anderen Gruppe angehörigen Dichromaten, NAGEL und STARK, anlangt, so besteht zwischen ihnen eine nur geringe und mehr qualitative als quantitative Differenz. Bei der Vergleichung des homogenen Blaugrün mit Mischungen aus Grün und Blau erforderte N. etwas mehr Blau als St. Die Zunahme der Absorption vom Grün zum Blau ist also für N. beträchtlicher als für St. Man hätte hiernach im ganzen eine etwas stärkere Pigmentierung bei N. diagnostizieren können. Als wir aber durch Vergleichung eines homogenen Blaugrün mit Mischungen aus Rot und Blau die ganze Absorption des Blau ermittelten, zeigte sich zwischen beiden Beobachtern kein sicherer Unterschied, der betreffende Wert also nahezu übereinstimmend. Hieraus wird zu folgern sein, daß bei Herrn St. die Absorption im Grün etwas stärker ist als bei N., dann aber gegen das Blau nicht ganz so stark zunimmt, so daß hier wieder etwa gleiche Werte erreicht werden. Das Makula-Pigment des Herrn St. ist, wie man kurz sagen kann, ein wenig rötlicher als das des Herrn N.

Diese Differenz läßt sich naturgemäfs am sichersten in den eben erwähnten Parallelversuchen zur Anschauung bringen, und sie tritt hier trotz ihres geringen Betrages mit Deutlichkeit hervor. Um in den Ergebnissen der systematischen Mischungsversuche sich herauszustellen, dazu ist sie nicht beträchtlich genug; immerhin ist zu bemerken, daß im Grün (etwa von 536 bis 515  $\mu\mu$ ) die Ordinaten der *W*-Kurve von Herrn St. merklich und, prozentisch betrachtet, nicht ganz wenig unter denjenigen des Herrn N. liegen. Doch mag dabei der Zufall auch seine Rolle spielen.

Ich wende mich nun zu dem letzten der hier zu erörternden Punkte, nämlich der Gestaltung der Blaukurven. Wie später noch darzulegen sein wird, sollten nach theoretischer Erwartung die Blaukurven in allen Fällen nahezu übereinstimmen. Berücksichtigt man indessen, daß der Verlauf der Blaukurven, der überhaupt von 517 bis 460  $\mu\mu$  bestimmt wurde, durch die Ver-

hältnisse der Makula-Pigmentierung sehr erheblich beeinflusst werden muß, so ist klar, daß wir nicht hoffen dürfen, für diese Erwartung eine sehr scharfe Bestätigung zu erhalten. Zeichnen wir die vier Kurven der Blauwerte zusammen (Fig. 2), so wird deutlich, daß sie keine irgendwie typische Differenz erkennen lassen, und man wird jedenfalls sagen dürfen, daß Unterschiede, wie sie hier vorliegen, aus der uns bekannten

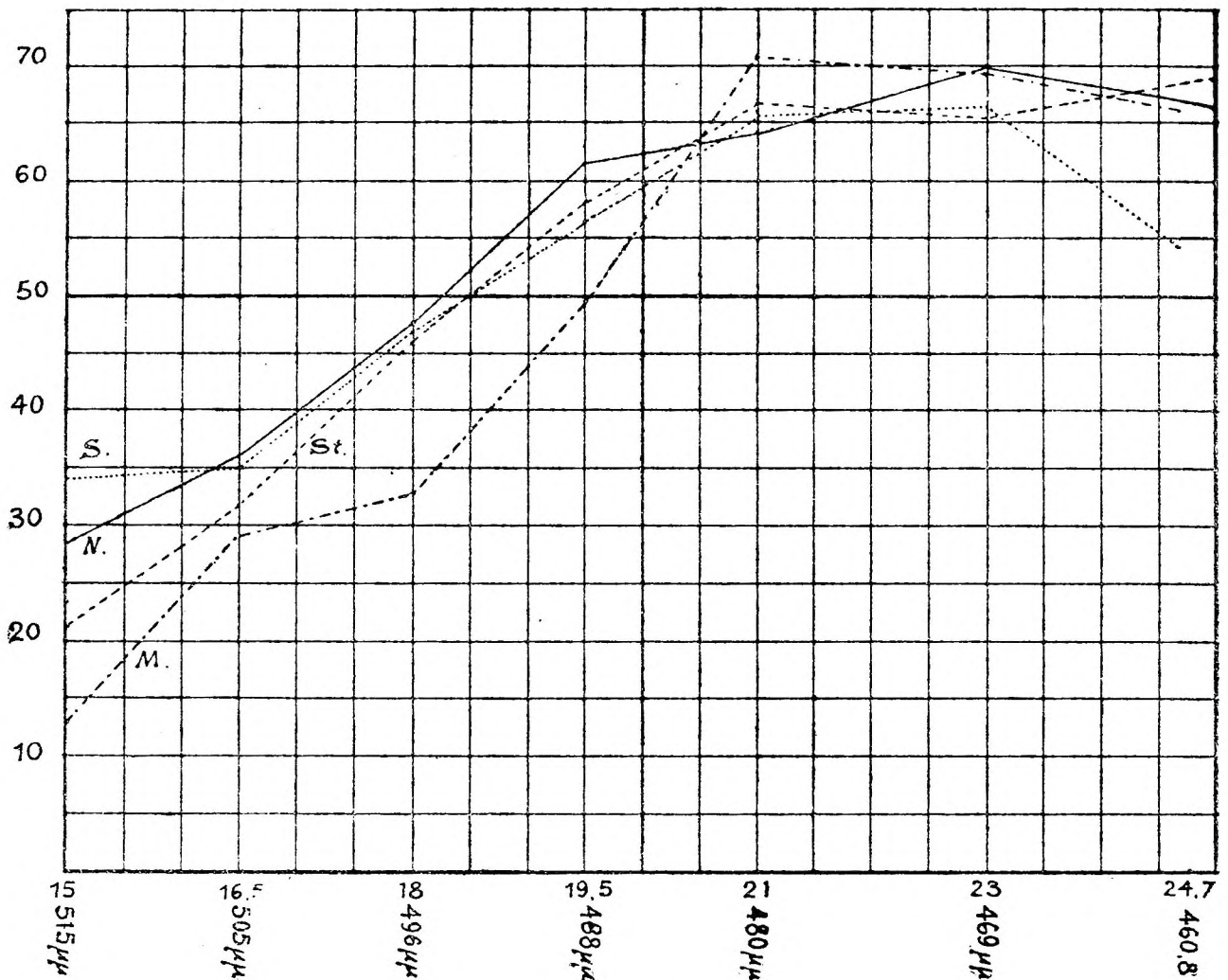


Fig. 2.

Verteilung der Blauwerte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes für  
S. .... M. - . - . N. ——— und St. — — — —

Beschaffenheit der Makula-Pigmentierung sich sehr wohl erklären lassen.

Um in dieser Hinsicht womöglich noch etwas größere Sicherheit zu erreichen, habe ich gelegentlich die Versuche in etwas modifizierter Weise noch etwas weiter hinaus, bis  $436\ \mu\mu$ , erstreckt und von dreien der Dichromaten in gleichzeitigen Parallelbeobachtungen die Mischungsgleichungen herstellen lassen. Um mit homogenen Lichtern Gleichungen gewinnen zu können und keine Nicolstellungen zu erhalten, die sich  $90^\circ$

zu sehr annäherten, wurde hier als weniger brechbares Licht *Na*-Licht gewählt, dieses aber durch Einschaltung eines blauen Glases erheblich abgeschwächt. Die so erhaltenen Blauwerte der 3 Beobachter zeigt die nachstehende kleine Tabelle.

Tabelle V.

Spektraler Ort und Wellenlänge	Beobachter S.	Beobachter N.	Beobachter M.
[23] 469 $\mu\mu$	241	174	207
[24,7] 460,8 $\mu\mu$	210	156	192
[28] 448 $\mu\mu$	141	136	168
[31] 436 $\mu\mu$	83	69	81

Die Tabelle wie auch die graphische Darstellung in Figur 3 zeigt, daß sich ein deutlicher Unterschied der Kurven nicht herausstellt; nur das dürfte wohl zu entnehmen sein, daß die Kurve des Herrn S. bereits in diesem Teile beim Fortschreiten gegen die größeren Wellenlängen etwas schneller ansteigt, als die der anderen Herren. Doch fällt selbst dies Ergebnis noch kaum außerhalb der Breite der Beobachtungsfehler, die wegen der relativ geringen Lichtstärken in diesen Teilen des Spektrums verhältnismäßig beträchtliche sind.

Auch in demjenigen Punkte, der vielleicht am ehesten auffällig erscheinen wird, glaube ich einen realen Unterschied der Blaukurven nicht finden zu dürfen, daß nämlich dieselben, indem wir vom Rot gegen das Grün vorgehen, bei den verschiedenen Beobachtern an ziemlich verschiedenen Stellen mit merklichen Werten aufzutreten beginnen. Es handelt sich hier hauptsächlich um die Schwierigkeiten, welche NAGEL und ich (a. a. O. S. 9f.) bereits erörtert haben, und welche eine sehr genaue Feststellung dieser geringen Blauwerte ausschließen. In der That handelt es sich ja darum, ob zwischen dem langwelligen Lichte und dem untersuchten (z. B. 535  $\mu\mu$ ) eine Sättigungsdifferenz bemerkt wird, die dann einen Blauzusatz im



Gemisch erfordert, oder nicht. Bei dem sehr großen Unterschiede der Stäbchenvalenzen hängt dies in hohem Maße von der Adaptation, aber wohl auch davon ab, wie weit der einzelne Beobachter auf das exzentrische Erscheinen der Felder achtet, was zwar nicht geschehen sollte, aber wohl kaum ganz vermieden wird. Daß die beiden Rotblinden erst bei kleinerer Wellenlänge Blauzusätze brauchen, hängt demgemäß wahrscheinlich zum Teil auch davon ab, daß hier als langwelliges Licht nicht Licht von  $645 \mu\mu$  sondern *Na*-Gelb gebraucht wurde.

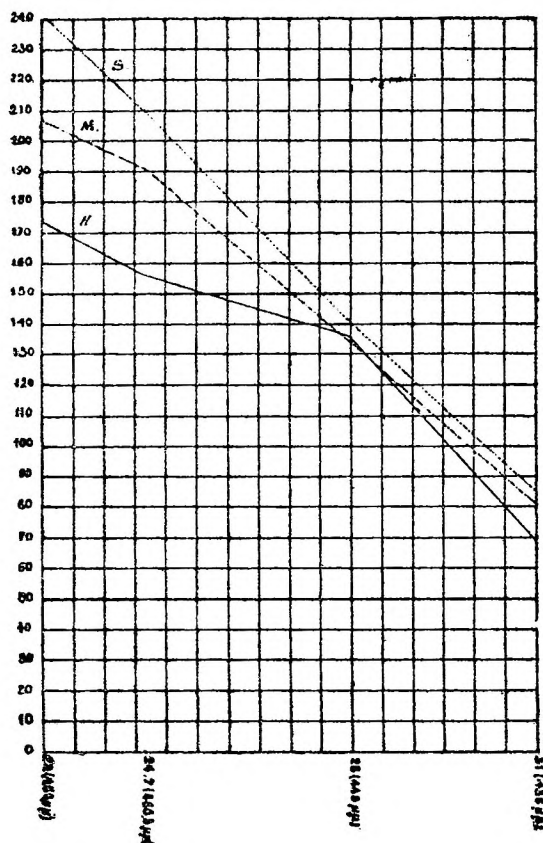


Fig. 3.

Verteilung der Blauwerte am brechbaren Ende des Spektrums für N. (Deuteranope), sowie S. und M. (Protanope).

Stellt zwar der Rotblinde bei guter Helladaptation zwischen diesen Lichtern eine genaue Gleichung her, und ist also das eine durch das andere für rein foveale Gleichungen genau vertretbar, so ist und bleibt eben doch der Unterschied der sehr ungleichen Stäbchenvalenz bestehen. Außerdem liegen bei 525 bis 536  $\mu\mu$  die *W*-Werte für den Rotblinden erheblich höher, als für den Grünblinden; auch dies mag dazu beitragen, daß die geringen Blauwerte dem ersteren noch leichter als dem letzteren unter der Grenze sicherer Bemerkbarkeit bleiben. Schließlich muß erwähnt werden, daß besonders für einen nicht sehr geübten

Beobachter, wie Herrn M., bei der Schwierigkeit, eine die Gleichungen deutlich und sicher verbessernde Nicolstellung zu finden, es einigermaßen nahe liegt, auf die Benutzung des Nicol ganz zu verzichten und ihn auf der Nullstellung stehen zu lassen. Ich glaube daher, daß man nicht wagen kann, aus den erwähnten Ungleichheiten etwas anderes zu folgern, als daß die Blauwerte der Rotblinden bei Wellenlängen  $> 515 \mu\mu$ , der Grünblinden bei solchen  $> 525 \mu\mu$  mit Vorsicht aufzunehmen sind und eine genaue Feststellung des Endverlaufs der Blaukurve nicht gelingt.

Trotz der gewissen Unsicherheit, die hier bestehen bleibt, dürfte es also wohl gerechtfertigt sein, das oben (S. 262) bereits formulierte theoretische Ergebnis noch in einer Richtung zu ergänzen, indem wir feststellen, daß, abgesehen von den Modifikationen durch rein physikalische Verhältnisse, die Verteilung der Blauwerte im Spektrum für alle Dichromaten die nämliche ist; sie unterscheiden sich nur durch die Verteilung der Rotwerte. Die Untersuchungen lehren also, daß neben der typischen Differenz doch auch eine ganz bestimmte Übereinstimmung zwischen den beiden Gruppen der Dichromaten besteht.

### III.

Wie oben bereits angeführt wurde, habe ich von der systematischen Durchuntersuchung eines trichromatischen Farbensystems Abstand genommen, und zwar deshalb, weil einerseits eine solche ganz vollständige Untersuchung auf sehr große Schwierigkeiten stößt, andererseits aber auch das Hauptinteresse sich auf wenige, relativ leichter und somit auch sicherer direkt angreifbare Punkte konzentriert. Im wesentlichen waren es zwei Fragen, über die die Untersuchungen Aufschluß zu geben hatten; erstlich, ob die dichromatischen Systeme sich in dem oben (S. 245) auseinandergesetzten Sinne als Reduktionsbildungen aus dem trichromatischen ableiten lassen; sodann, welche Rolle innerhalb der trichromatischen Systeme die individuellen Verschiedenheiten spielen, und ob auch diese, wie die analogen der dichromatischen Systeme, sich auf Ungleichheiten der Makulafärbung zurückführen lassen. Beide Fragen gehören übrigens einigermaßen zusammen; denn eben wegen der individuellen Verschiedenheiten innerhalb jeder

Gruppe der Dichromaten kann, wie man sogleich sieht, ein absolut scharfer Nachweis der in Frage stehenden Beziehungen nicht oder doch nur für einen Teil des Spektrums erbracht werden. Immerhin lassen sich die Dinge relativ einfach gestalten, wenn man gewisse Beschränkungen in die Untersuchung einführt.

Die Frage nämlich, ob Rotblindheit und Grünblindheit zwei verschiedene Reduktionsformen des normalen trichromatischen Farbensystems sind, hat offenbar ihre Hauptbedeutung für denjenigen Teil des Spektrums, in dem eben jene Farbensysteme sich am schärfsten und beträchtlichsten unterscheiden, d. h. für den weniger brechbaren Teil, und glücklicher Weise machen sich ja gerade in diesem Teile die „individuellen Verschiedenheiten“ noch relativ wenig geltend. Man kann jedenfalls bis zur Wellenlänge 550 herabgehen, ohne (vielleicht von seltenen Ausnahmefällen abgesehen) eine erhebliche Unsicherheit von dieser Seite zu fürchten, und man kann dabei doch auf eine sehr scharfe Prüfung des in Frage stehenden Verhältnisses rechnen, weil eben in diesem Teile die Kurven des Protanopen und des Deutanopen am meisten charakteristisch auseinander fallen. Ich habe nun die Frage hier zunächst in einer einfachen und ganz direkten Weise in Angriff genommen, über welche an anderer Stelle<sup>1</sup> bereits kurz berichtet wurde, nämlich vermittelt eines von einem Trichromaten und je einem Dichromaten des einen und des anderen Typus zusammen auszuführenden Parallelversuches. Zweck desselben war, zu prüfen, ob für die Vergleichung homogener Lichter mit Mischungen aus Rot (670,8) und Gelbgrün (550  $\mu\mu$ ) der Satz Gültigkeit hat, daß eine für den Trichromaten zutreffende Mischungsgleichung von beiden Dichromaten als richtig anerkannt wird, und umgekehrt, ob, mit anderen Worten, zwei Lichter für das trichromatische Sehorgan den gleichen Reiz dann darstellen, wenn sie sowohl für das Sehorgan des Protanopen als für das des Deutanopen von gleichem Reizwert sind. Die Gültigkeit dieses Satzes läßt sich bei dem damals eingeschlagenen Wege in der That mit sehr frappierender Anschaulichkeit demonstrieren. Das Verfahren geht davon aus, daß die Dichromaten Gleichungen zwischen dem homo-

---

<sup>1</sup> *Centralbl. f. Physiol.* 1896. S. 148.



genen Licht 670,8 und 550  $\mu\mu$  herstellen können, demgemäß auch zwischen einem homogenen Licht irgend einer dazwischen gelegenen Wellenlänge und einem jener Lichter, oder auch endlich zwischen homogenem Licht einer zwischengelegenen Wellenlänge und irgend einer beliebigen Mischung aus 670,8 und 550. Der verschiedene Verlauf der beiden *W*-Kurven macht sich jedoch dabei darin geltend, daß die Intensitätsverhältnisse der beiden homogenen Lichter oder des homogenen und des Gemisches für den einen und den anderen Dichromaten verschieden sein müssen. Bei Vergleichen eines homogenen Lichtes  $\lambda$  mit einem kürzerwelligen,  $\lambda - \delta$ , wird das Verhältnis ihrer Reizungswerte für den Rot- und Grünblinden sich in dem Sinne unterscheiden, daß für den Rotblinden ein relatives Übergewicht des kurzwelligen, für den Grünblinden ein relatives Übergewicht des langwelligen Lichtes stattfindet. Wenn demnach z. B. der Grünblinde eine Gleichung zwischen Gelb (589) und Gelbgrün herstellt und der Rotblinde diese kontrolliert, so wird er das Gelb zu dunkel finden. Stellt dagegen der Grünblinde eine Gleichung zwischen demselben Gelb und einem längerwelligen Licht her, so wird diese Gleichung, vom Rotblinden kontrolliert, das Gelb zu hell erscheinen lassen. Hieraus folgt nun sogleich, daß, wenn wir das homogene Licht mit einer Mischung aus Rot und Gelbgrün vergleichen lassen, die Abweichungen je nach dem Verhältnis, in dem die beiden Bestandteile gemischt sind, in dem einen oder dem anderen Sinne liegen können, und daß nur ein bestimmtes Verhältnis der Anforderung genügt, daß die vom Deuteranopen eingestellte Gleichung auch vom Protanopen als zutreffend anerkannt wird. Der Farbentüchtige andererseits kann gleichermaßen zwischen homogenem Licht einer zwischen 670 und 550 gelegenen Wellenlänge und einer Mischung aus diesen beiden Lichtern nur bei einem ganz bestimmten Mischungsverhältnis Gleichungen gewinnen, bei welchen homogenes Licht und Mischung gleichfarbig erscheinen. Es war zu prüfen, ob dieses für den Trichromaten eine Gleichheit ergebende Verhältnis das nämliche ist, wie dasjenige, durch welches die Bedingung erfüllt wird, daß die Gleichung des einen Dichromaten auch für den anderen zutrifft. Da es wünschenswert war, sich von der Genauigkeit der etwa zu erhaltenden Verifizierung ein gewisses Bild zu verschaffen, so wurde in folgender Weise zu Werke gegangen. Zunächst stellte der Farbentüchtige

(ich selbst) zwischen dem homogenen Licht und der Mischung eine Gleichung her, und zwar durch Variierung des Gemisches; an diesem wurde in bekannter Weise durch Drehung des NICOLSchen Prismas das Verhältniß der beiden Bestandteile, durch Regulierung der Spaltweite die Gesamthelligkeit verändert. Nach dem diese Gleichung mit größter Sorgfalt hergestellt war, wurde die Nicolstellung abgelesen und alsdann begannen die Einstellungen und Beobachtungen der Farbenblinden; hier hatte jedesmal der Grünblinde bei einer willkürlich gewählten Nicolstellung, die entweder mit der ebengefundenen zusammentraf oder um passende Werte in dem einen oder anderen Sinne abwich, die Felder durch Regulierung des die Mischung liefernden Spalts auf Gleichheit zu bringen, und diese Einstellung wurde alsdann vom Rotblinden betrachtet und beurteilt. Die Versuche wurden bei einem bestimmten homogenen Licht stets mit einigen verschiedenen Nicolstellungen ausgeführt, bis sich beurteilen liefs, wo die Abweichungen in dem einen und in dem anderen Sinne merkbar wurden. In der Regel wurde dann nochmals von mir die zur Erzielung von Farbgleichheit erforderliche Nicolstellung bestimmt. Die Bestimmungen wurden solcher Art für die homogenen Lichter 659, 625, 613, 589 und 569  $\mu\mu$  ausgeführt; den ganzen Versuch habe ich zweimal, einmal mit den Herren N. und S., sodann mit den Herren St. und M. gemacht. Die Ergebnisse sind in den nachstehenden Tabellen zusammengefaßt.

## VI.

Wellenlänge des homogenen Lichtes	Verhältnisse der Mischung, bei denen das Gemisch aus 670,8 und 550 $\mu\mu$		
	wenn dem Grünblinden gleich, für den Rotblinden		für den Trichromaten dem homogenen Licht gleichfarbig ist
	zu hell	zu dunkel	
	erscheint		
639 $\mu\mu$	0,012	0,026	0,016
625 „	0,038	0,062	0,044
613 „	0,07	0,12	0,09
589 „	0,22	0,49	0,33
569 „	1,0	3,00	1,34

VII.

Wellenlänge des homogenen Lichtes	Verhältnisse der Mischung, bei denen das Gemisch aus 670,8 und 550 $\mu\mu$		
	wenn dem Grünblinden gleich, für den Rotblinden		für den Trichromaten dem homogenen Licht gleichfarbig ist
	zu hell	zu dunkel	
	erscheint		
639 $\mu\mu$	0,013	0,022	0,017
625 "	0,034	0,049	0,046
613 "	0,056	0,15	0,10
589 "	0,22	0,61	0,35
569 "	0,50	4,6	1,38

Als Ergänzung ist zu diesem noch hinzuzufügen, daß durchgängig, wenn der Versuch mit der von mir zur Farbengleichheit erfordernten Nicolstellung ausgeführt wurde, die vom Grünblinden eingestellte Gleichung dem Rotblinden sowie auch mir als genau zutreffend erschien; wenigstens fand sich niemals eine sichere Differenz, und ein gelegentlich geäußelter Zweifel, ob vielleicht das eine Feld um eine geringste Spur heller oder dunkler sei als das andere, hielt sich innerhalb dessen, was oft auch derselbe Beobachter bei Nachprüfung einer vor einigen Minuten von ihm selbst eingestellten Gleichung angiebt. Im übrigen ersieht man, daß stets, wenn das Mischungsverhältnis sich von dem für den Farbentüchtigen erforderlichen in dem einen Sinne entfernt, die vom Grünblinden gemachten Einstellungen für den Rotblinden in einem Sinne, bei entgegengesetzter Abweichung in dem entgegengesetzten unrichtig werden. Die Genauigkeit des Verfahrens ist naturgemäfs schon aus dem Grunde eine etwas geringere, da wir uns des Vorteils einer gröfseren Häufung von Einstellungen begeben, vielmehr nur die Einstellung eines Beobachters von dem anderen kontrollieren und beurteilen lassen; überdies ist die Genauigkeit selbstverständlich da eine geringe, wo das homogene Licht sich dem kürzerwelligen Bestandteile der Mischung sehr annähert. Immerhin sieht man doch, namentlich bei den homogenen Lichtern von mehr als 600  $\mu\mu$ , mit recht grofser Schärfe, daß



das vom Trichromaten eingestellte Verhältnis der Mischungsbestandteile das nämliche ist, bei welchem die Gleichung des Rotblinden auch für den Grünblinden gilt. Der Versuch hat überhaupt wegen seiner Unabhängigkeit von allen Berechnungen sowie von allen etwaigen Unzuverlässigkeiten des Apparats etwas vorzugsweise Überzeugendes, und wer ihn in ähnlicher Weise und mit dem gleichen Erfolge anstellt, wird sich kaum, selbst ohne jede eingehendere theoretische Überlegung, der Ansicht verschließen, daß das Sehen des Trichromaten mit demjenigen beider Dichromaten in einer ganz festen, scharf angebbaren Beziehung steht, daß (wie ich es früher ausgedrückt habe) die beiden Gleichheitsbedingungen, die in den Sehorganen des einen und des anderen Dichromaten enthalten sind, im normalen (farbentüchtigen) Sehorgan sich vereinigt finden.

Obwohl die gestellte Frage im Grunde wohl hierdurch schon als beantwortet gelten konnte und, wie hinzuzufügen ist, auch zahlreiche einzelne nicht systematisch angestellte Beobachtungen immer wieder lehrten, daß die Mischungsgleichungen eines Farbentüchtigen innerhalb der weniger brechbaren Spektralhälfte für beide Dichromaten gültig sind, so wollte ich doch nicht unterlassen, den Gegenstand auch in anderer Weise, nämlich durch die Berechnung von zahlreichen und systematisch angestellten Mischungsversuchen, zu prüfen, was innerhalb des gleichen Gebiets, nämlich von  $670-552 \mu\mu$ , ebenfalls leicht ausführbar war. Hier nämlich gewinnt der Farbentüchtige (bei hell-adaptiertem Auge) noch ohne merkliche Sättigungsdifferenz eine Gleichung zwischen dem homogenen Licht einer mittleren Wellenlänge und einem Gemisch aus Rot (670,8) und Gelbgrün. Sind aber derartige Bestimmungen für eine Reihe homogener Lichter gewonnen, so gestatten sie ganz direkt eine Vergleichung mit den Beobachtungsergebnissen der Dichromaten. Am einfachsten gestaltet sich die Vergleichung in der folgenden Weise. Es sei gefunden (vom Farbentüchtigen), daß die Menge  $Q$  des Lichtes  $\lambda$  gleich erscheint mit der Menge  $Q_1$  roten Lichtes (670,8) und  $Q_2$  gelbgrünen Lichtes ( $552 \mu\mu$ ), also

$$Q(\lambda) = Q_1(670,8) + Q_2(552).$$

Bei dieser Gleichung ist dann zunächst noch zu berücksichtigen, daß sich alle drei Quantitätsangaben, so wie wir sie direkt erhalten, auf verschiedene Spektren beziehen. Indessen

können wir vermittelst derjenigen Gleichung, bei welcher wir  $\lambda = 670,8$  wählen und  $Q_2$  verschwindet, den Reduktionsfaktor erhalten, mit dem wir  $Q_1$  multiplizieren müssen, um das benutzte *Li* Rot in Einheiten desselben Spektrums auszudrücken, dem das Licht  $\lambda$  angehört; ebenso erhalten wir den analogen Reduktionsfaktor für das Licht 552, indem wir  $\lambda = 552$  machen. Wir erhalten so durch eine einfache Umrechnung eine Reihe von Gleichungen der Form

$$Q(\lambda) = Q_1'(670,8) + Q_2'(552),$$

worin sich alle Quantitäten auf dasselbe Spektrum beziehen.

Mit Hülfe der von einem Dichromaten erhaltenen systematischen Beobachtungen, wie sie Tabelle I enthält, können wir nun direkt beurteilen, ob diese vom Farbentüchtigen eingestellten Gleichungen auch für ihn (den Dichromaten) gültige Gleichungen darstellen.

Wir hätten nämlich nur die drei Lichter mit ihren aus den Beobachtungen des Dichromaten ermittelten Reizwerten einzusetzen, also z. B. das Licht 670,8 mit 33, 552 mit 64, ebenso das homogene Licht  $\lambda$  mit dem seinigen, und auszurechnen, ob alsdann die beiden Seiten der Gleichung wirklich gleich werden. Ein wenig anschaulicher wird der Vergleich, wenn wir aus der Gleichung des Trichromaten denjenigen Reizwert des Lichtes  $\lambda$  berechnen, der demselben zur Erzielung dieser Gleichheit

beigelegt werden muß, (er wäre durch den Bruch  $\frac{34 Q_1' + 64 Q_2'}{Q}$

gegeben) und ihn mit dem von den Dichromaten wirklich ermittelten vergleichen. Wir erhalten so eine aus den Beobachtungen des Farbentüchtigen nach Maßgabe unserer theoretischen Auffassung berechnete Verteilung der Reizwerte für den einen und anderen Dichromaten (berechnete Kurve der Rotwerte), die sich mit den experimentell gefundenen zusammenstellen lassen. Das Ergebnis einer derartigen Berechnung zeigt die Tabelle VIII.

In graphischer Darstellung zeigt Figur 4 den Verlauf der Rot-Werte, wie er sich aus den Beobachtungen des Farbentüchtigen durch die obige Berechnung, und wie er sich direkt aus den Beobachtungen des Grünblinden ergibt; Figur 5 enthält die analoge Darstellung für dieselben Trichromaten-Beobachtungen im Vergleich mit denen des einen Rotblinden.

Tabelle VIII.

Wellenlänge des homogenen Lichtes	Menge der Lichter 670,8 und 552 $\mu\mu$ im Gemisch		Reizwert für das Sehorgan des Grünblinden		Reizwert für das Sehorgan des Rotblinden	
	670.8	552	berechnet	beobachtet	berechnet	beobachtet
0 (670.8)	88,5	—	33	33	4,9	4,9
3 (628 $\mu\mu$ )	251	10,0	106	107	28,8	38,5
4 (615 $\mu\mu$ )	276	27	126	147	54,2	63
5 (603 $\mu\mu$ )	270	49	145	151	86	84
6 (591 $\mu\mu$ )	202	67	135	137	108	105
7 (581 $\mu\mu$ )	123	76	114	124	117	113
8 (571 $\mu\mu$ )	73	91	110	103	137	126
9 (561 $\mu\mu$ )	21	80	76	82	111	106
10 (552 $\mu\mu$ )	—	71	64	64	101	101

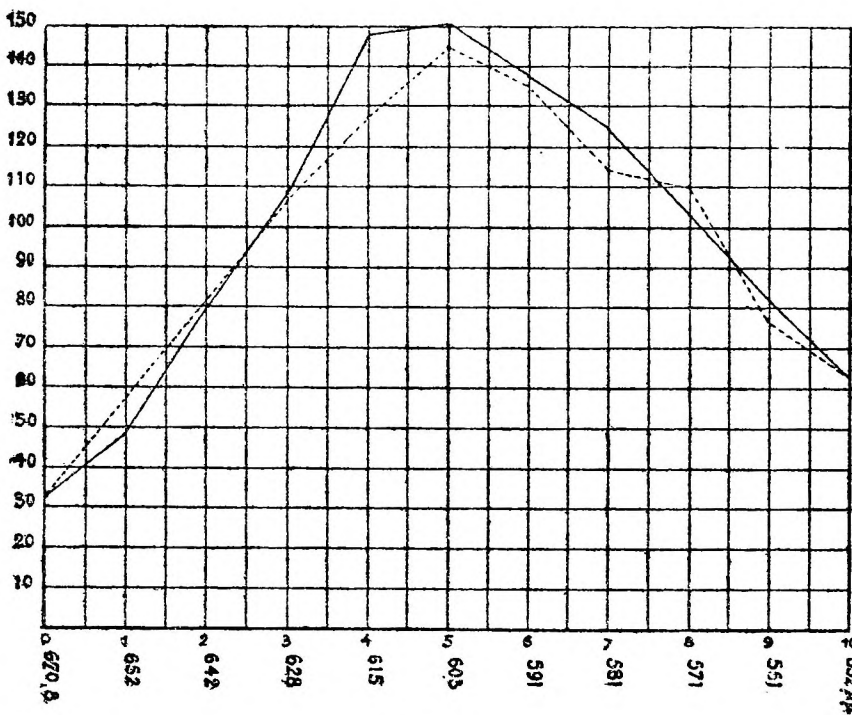


Fig. 4.

Rotwerte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes für den Deuteranopen (Grünblinden); — nach den Beobachtungen von NAGEL, - - - - - aus den Beobachtungen des Farbentüchtigen berechnet.



Berücksichtigt man, daß selbst ein geringer Fehler in der Bestimmung eines der für die Umrechnung benutzten Werte erhebliche Störungen in der Gestalt der Kurven bringen muß, so wird man die Übereinstimmung sehr befriedigend finden dürfen; in der That sind die Abweichungen nicht größer, als sie auch zwischen zwei Dichromaten des gleichen Typus, ja auch bei Wiederholungen der Versuche desselben Beobachters vorkommen. Die Gründe, welche der Genauigkeit der Beobachtung vorläufig eine Schranke setzen, sind bekannt<sup>1</sup>, daß aber hier

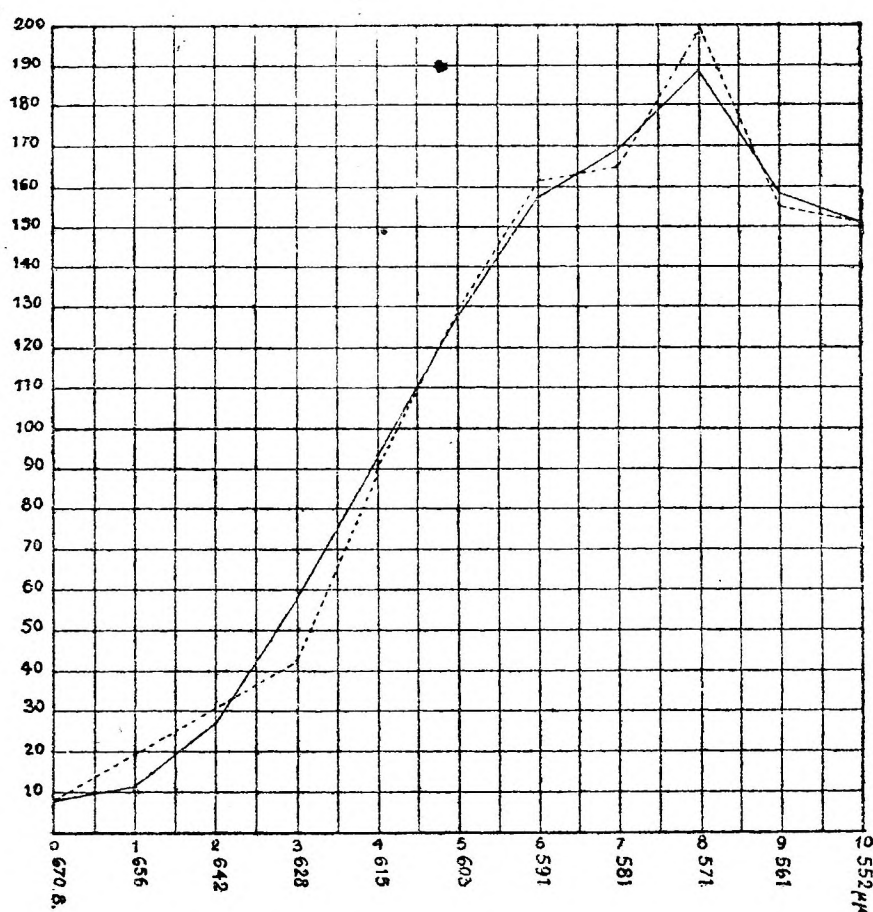


Fig. 5.

Rot- (W-) Werte im Dispersionsspektrum des Gaslichtes für den Protanopen; — nach den Beobachtungen von MARX, - - - - - aus den Beobachtungen des Farbentüchtigen berechnet.

Übereinstimmungen vorliegen, die eine reale Grundlage haben, nicht aber durch irgend einen Zufall vorgetäuscht werden, wird man schon nach dem Anblick jener Kurven wohl nicht ernstlich bezweifeln.

Es bestätigt sich also innerhalb des hier betrachteten Gebiets mit grosser Genauigkeit, daß die Lichterpaare (je ein homogenes Licht und ein Gemisch aus Rot und Gelbgrün),

<sup>1</sup> Vgl. besonders die Auseinandersetzung *diese Zeitschr.* XII. S. 36.

welche dem Trichromaten an Helligkeit und Farbe gleich sind, stets für beide dichromatische Sehorgane (das des Protanopen und das des Deuteranopen) gleichen Reizwert besitzen.

Wenn man durch die beigebrachten Thatsachen den Beweis für die mehrerwähnte Bezeichnung zwischen den normalen und den beiden dichromatischen Systemen als erbracht ansehen will, so wird nun freilich zu beachten sein, daß er sich zunächst nur auf einen gewissen Teil des Spektrums erstreckt. Wie liegen die Dinge bezüglich der übrigen Teile, insbesondere der ganzen brechbareren Hälfte? Darauf läßt sich z. Zeit nur antworten, daß eine genaue Prüfung irgend einer derartigen Beziehung durch die hier sehr merkbar hervortretenden individuellen Verschiedenheiten wegen der Absorption im makularen Pigment unmöglich gemacht wird, unter Berücksichtigung aber der hierdurch gegebenen Unbestimmtheit die Beobachtungen der theoretischen Erwartung durchaus entsprechen. Es ist mir allerdings bei dieser Sachlage ausreichend erschienen, das Verhältnis bei einer Kategorie von Mischungsgleichungen genauer zu verfolgen. Sowohl der Trichromat wie beide Arten der Dichromaten können aus Grün (510) und Blau (460) eine Mischung herstellen, welche homogenem Blaugrün gleich erscheint, dem Farbentüchtigen allerdings nicht ganz genau, sondern nur mit Ignorierung einer geringen Sättigungsdifferenz. Jeder stellt jedoch dabei ein ganz bestimmtes Verhältnis der beiden Mischungsbestandteile ein. Da nun nach der Erwartung der Theorie die für den Trichromaten geltenden Gleichungen auch für beide Dichromaten zutreffen sollten, so ist zu vermuten, daß diese Mischungsgleichungen in allen drei Fällen ganz übereinstimmend ausfallen würden. Dies ist in der That der Fall, freilich mit der Modifikation, die sich eben aus dem hier erheblichen Einflusse der Makula-Pigmentierungen ergibt: die Gleichungen dieser Art schwanken für den Farbentüchtigen und für beide Gruppen der Dichromaten in ganz ähnlichen Grenzen.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Wenn die Gleichungen der hier behandelten Art (von Pigmentierungsdifferenzen abgesehen) für die Rotblinden und Grünblinden genau die nämlichen wären, so würde dies besagen, daß innerhalb dieses Gebiets die beiden Blaukurven zusammenfielen, die beiden *W*-Kurven aber einander proportional verliefen. Alsdann müßte die betreffende Gleichung

Wir sind bei dieser Sachlage, wie ich glaube, zu der Folgerung berechtigt, daß in der That, von physikalischen Verschiedenheiten abgesehen, das Farbensystem des Rotblinden und das des Grünblinden zwei verschiedene Reduktionsformen des normalen trichromatischen darstellen. Denn wir dürfen sagen, daß sich dies innerhalb eines gewissen Gebietes mit voller Schärfe bewahrheiten läßt; wenn andererseits innerhalb eines anderen Gebietes die individuellen Verschiedenheiten ohne typische Bedeutung einer sehr genauen Prüfung der Theorie hindernd im Wege stehen, so ist dies um so weniger von Belang, als wir ja den Grund dieser individuellen Schwankungen gut kennen und sie auf gewisse, durch direkte Beobachtung festgestellte Umstände zurückführen können. Auch dürfen wir wohl hervorheben, daß, gerade wie das Typische in dem Unterschiede der beiden Arten der Farbenblindheit gegen eine Erklärung aus dem wechselnden Pigmentierungsverhältnisse sprach, so hier die Atypie, das Schwankende der Differenzen für eine solche rein physikalische Erklärung geltend zu machen ist. Von einer weiteren Verfolgung dieser Erscheinungskategorie durfte aber hiernach in der That Abstand genommen werden, da man mit Sicherheit rechnen konnte, nichts sehr Belehrendes weiter zu finden.

Dagegen war es von Interesse, die individuellen Verhältnisse, wie sie sich im Sehen der Farbentüchtigen geltend machen, noch etwas genauer zu verfolgen. Ich wünschte dabei erstlich, darüber einen Aufschluß zu bekommen, welche numerischen Werte etwa diese Schwankungen erreichen, insbesondere aber auch darüber, ob, wie es von KÖNIG angenommen worden ist, neben den auf der Makulafärbung beruhenden Unterschieden auch solche von anderer Art und Bedeutung (sog. anomale trichromatische Farbensysteme) vorkommen. Ich ließ zuvörderst, ganz nach dem Vorgange von Lord RAYLEIGH, DONDER und KÖNIG, Mischungen aus Rot (670,8) und gelblichem Grün

---

für den Trichromaten genau zutreffen; die geringe thatsächlich für diesen bleibende Sättigungsdifferenz beweist andererseits, daß dies nicht ganz streng der Fall ist. Es ist danach auch für diese Gleichungen eine Typus-Differenz zu erwarten, in dem Sinne, daß der Rotblinde etwas weniger Blau erfordert, aber sie ist von sehr geringem Betrage und demgemäß durch die Vergleichung der verschiedenen Dichromaten wegen der starken individuellen Schwankung nicht mit Sicherheit festzustellen.



(535  $\mu\mu$ ) mit homogenem Na-Gelb vergleichen und derartige Einstellungen von einer größeren Zahl von Personen (Studenten) ausführen. Ich kann nun auch auf Grund meiner Erfahrungen bestätigen, daß bei einer derartigen Untersuchung einzelne Personen gefunden werden, welche zur Erzielung der Gleichheit das Gemisch weit grüner färben müssen, als alle übrigen. Ich muß aber gegenüber den Deutungen, welche die Beobachtungen von RAYLEIGH und DONDERS später erfahren haben,<sup>1</sup> betonen, daß auch nach meiner (wie nach KÖNIGS) Auffassung diese Fälle keineswegs auf eine besonders hochgradige Makulafärbung zurückzuführen sind, sondern daß es sich um eine abweichende Beschaffenheit der Sehsubstanzen handelt, für welche die von KÖNIG gewählte Bezeichnung „anomale trichromatische Systeme“ durchaus passend erscheint.

Indem ich von den beiden mir zur Beobachtung gekommenen Personen, die dieser Kategorie angehören, und auf die alsbald zurückzukommen sein wird, vorderhand absehe, will ich sogleich die Zahlen anführen, die meines Erachtens geeignet sind, uns ein wenigstens annäherndes Maß für die Einflüsse der individuell schwankenden Makula-Tingierung zu geben. In einer ersten Reihe bewegte sich der Quotient  $\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}$  in solchen Grenzen, daß, der niedrigste = 1 gesetzt, der höchste 1,3 betrug. Wir dürften hiernach die relative Schwächung des Grün bei der gelbsichtigsten gegenüber der blausichtigsten Person auf 0,7–0,8 veranschlagen.<sup>2</sup> Etwas genauer seien die Ergebnisse einer zweiten (22 Studenten umfassenden) Reihe mitgeteilt. Die folgende Tabelle enthält im 1. Stabe die Nummer des Beobachters, im 2. den Quotienten  $\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}$  in dem von dem Betreffenden angestellten, mit homogenem Gelb 589  $\mu\mu$  gleich erscheinenden Gemisch, wobei der niedrigst vorkommende = 1 gesetzt ist, im 3. in ähnlicher Weise den Quotienten  $\frac{\text{Blau}}{\text{Grün}}$  in dem mit homogenem Blaugrün gleich erscheinenden Gemisch. Bei den Versuchen der Spalte 1 war

<sup>1</sup> HERING, Über die individuellen Verschiedenheiten des Farbensinnes. *Lotos*. VI. S. 41.

<sup>2</sup> Die hier benutzten Wellenlängen sind nicht genau festgestellt; annähernd war es Li-Rot und gelblichgrünes Licht von 525  $\mu\mu$ .

Rot 670 und Gelbgrün 535  $\mu\mu$  gemischt, bei denjenigen der Spalte 2 Grün 510 und Blau 460,8  $\mu\mu$ .

Nummer des Beobachters	Verhältnis $\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}$	Verhältnis $\frac{\text{Blau}}{\text{Grün}}$
	in dem dem homogenen Gelb gleich erscheinenden Gemisch	in dem dem homogenen Blaugrün gleich erscheinenden Gemisch
I	1,0	1,05
II	1,03	1,16
III	1,05	1,42
IV	1,10	1,35
V	1,10	1,03
VI	1,14	1,62
VII	1,16	1,40
VIII	1,19	1,54
IX	1,21	1,52
X	1,23	1,18
XI	1,27	2,15
XII	1,40	1,73
XIII	1,45	1,06
XIV	1,45	1,91
XV	1,46	—
XVI	1,46	1,21
XVII	1,46	1,47
XVIII	1,49	1,00
XIX	1,51	1,73
XX	1,52	1,21
XXI	1,56	1,53
XXII	1,9	1,65

Man bemerkt, daß sowohl in dem einen wie in dem anderen Falle die Quotienten innerhalb eines gewissen Spielraums schwanken, und daß, wie zu erwarten, die mittleren Werte die häufigsten sind. Nicht durchgängig entspricht die Anordnung der Werte in der zweiten Kolumne derjenigen in der ersten. Zwar kommt es nicht vor, daß Jemand, der in der ersten mit einem ganz hohen Werte figuriert, in der zweiten mit einem der niedrigsten aufträte; wohl aber sehr häufig, daß von zwei Personen die eine in der ersten, die andere aber in der zweiten den höheren Wert darbietet. Hierin machen sich die qualitativen Verschiedenheiten des Pigments geltend; ist die Tin-

gierung bei *A* ein wenig rötlicher als bei *B*, so wird *A* den Quotienten  $\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}$  höher, dagegen den Quotienten  $\frac{\text{Blau}}{\text{Grün}}$  vielleicht niedriger einstellen. Wenn wir die relative Schwächung des Grün bei dem gelbsichtigsten Individuum im Vergleich zum blausichtigsten auf  $\frac{1}{1,9} = 0,53$  veranschlagen dürfen und ebenso die relative Schwächung des Blau gegenüber dem Grün auf 0,6, so könnte man daraus auch sogleich die ganze relative Schwächung des Blau im Vergleich zum Rot abzuleiten versucht sein. Dieselbe würde sich nämlich durch das Produkt  $0,53 \cdot 0,6 = 0,32$  ergeben. Diese Berechnung wäre jedoch nur dann zulässig, wenn in beiden Fällen dasselbe Grün in den Mischungen verwendet worden wäre. Dies war nicht geschehen, um für die Untersuchung einer größeren Personenzahl die Einstellungen etwas leichter zu machen. Nachdem aber durch diese Voruntersuchung zwei Personen gefunden waren, die als extreme Fälle von Gelb- und Blausichtigkeit betrachtet werden konnten, ließ ich von beiden, nämlich No. 1 und 22, dieselben Einstellungen nochmals wiederholen, und zwar so, daß erstlich Gelb mit einer Mischung aus Rot (670,8) und Grün (517  $\mu\mu$ ), sodann Blaugrün mit einer Mischung aus Grün (517) und Blau (460,8  $\mu\mu$ ) verglichen wurde. Hier konnte dann auch durch zahlreicher wiederholte Einstellungen eine größere Sicherheit gewonnen werden. Das Ergebnis war nun, daß die relative Schwächung des Grün bei XXII gegenüber I sich auf 0,51, die des Blau im Vergleich zum Grün auf 0,61 und die ganze Schwächung des Blau auf 0,31 bezifferte.

Wenden wir, bevor wir dies Ergebnis fixieren, nunmehr unsere Aufmerksamkeit den, wie vorhin schon erwähnt, hier ausgeschiedenen Fällen zu. Der Grund, der mich veranlaßt, die Abweichung derselben von allen übrigen nicht auf die Makula-Tingierung zu beziehen, ist zunächst der, daß die von ihnen eingestellten Quotienten  $\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}$  gegenüber dem Spielraum, innerhalb dessen die übrigen schwanken, in entschiedenster Weise aus der Reihe fallen.

Bei der ersten Beobachtungsreihe verhielt sich bei einigen 20 Personen der niedrigste Wert des Quotienten  $\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}$  in der



Mischung zum höchsten wie 1:1,3, zwischen welchen Extremen sich die Zahlen in unregelmäßiger Verteilung bewegten, und von diesen erschien ganz isoliert einmal der Wert 3,8.

Bei der späteren, methodisch etwas anders geführten Reihe fand ich unter den untersuchten 22 Studenten keinen derartigen Fall, konnte aber eine Vergleichseinstellung von dem bereits von KÖNIG untersuchten Herrn Professor ZEHNDER erhalten. Hier füllten die Zahlen der übrigen Beobachter in unregelmäßiger Weise das Gebiet von 1 bis 1,9, während die Zahl des Herrn Z., 5,8, wiederum aus jenen vollkommen herausfiel. Die Beobachtungen von Lord RAYLEIGH, DONDER und KÖNIG haben ganz das Gleiche ergeben. Auch diese sagen, daß die Einstellungen einer überwiegenden Mehrzahl von Personen mit Annäherung untereinander übereinstimmen, eine geringe Zahl aber sehr deutlich abweicht. Läßt man, wie ich gethan habe, auf ziemlich kleinen Feldern (etwas weniger als  $2^0$ ) beobachten, so tritt der Einfluß der Makulafärbung in den Differenzen, die sich innerhalb jener Hauptgruppe bemerklich machen, deutlicher als bei jenen Untersuchern zu Tage. Daß aber auch die Abweichung jener ganz isolierten Fälle auf eine besonders hochgradige Pigmentierung zu beziehen sei, das dürfte wohl schon in Anbetracht eben dieser Isolierung, dieses Ausder-Reihe-Fallens eine recht gewagte Hypothese sein. Es sprechen aber noch mehrere Thatsachen in sehr entscheidender Weise gegen dieselbe. So fand sich zunächst, daß bei den Vergleichen von homogenem Blaugrün mit Mischungen aus Grün und Blau die Einstellungen der beiden Herren sich von den gewöhnlichen gar nicht unterschieden. Hätte wirklich eine so exzessiv starke Makulafärbung vorgelegen, so hätte man erwarten dürfen, diese auch hier in der Einstellung eines viel blauerem Gemischs zum Ausdruck kommen zu sehen. Dies war aber keineswegs der Fall. Man könnte nun etwa meinen, daß vielleicht in den anomalen trichromatischen Systemen sich einqualitativ von dem gewöhnlichen verschiedenes Makulapigment bemerklich mache, nämlich ein im Grün schon sehr stark absorbierendes, d. h. also mehr ins Rote ziehendes Pigment. Ich bin vorderhand nicht im stande, diese Annahme auszuschließen; zunächst aber scheint sie mir nur wenig Wahrscheinlichkeit zu besitzen; denn man müßte danach erwarten, daß bei diesen Personen die zentral eingestellten Gleichungen zwischen homogenen

Gelb und Rot-Grünmischungen bei exzentrischer Betrachtung sehr auffällig unrichtig werden würden. Herr Prof. Z., der auf meine Bitte diesen Versuch anstellte, konnte davon überhaupt nichts bemerken. Nach alledem möchte ich, ohne weiteren Untersuchungen vorgreifen zu wollen, es vorläufig für wahrscheinlich halten, daß die „anormalen Systeme“ sich von den normalen überhaupt nicht durch einen absorbierenden Farbstoff, sondern durch eine abweichende Beschaffenheit der optischen Substanzen selbst unterscheiden.

Es dürften hiernach in der That wohl Gründe genug vorhanden sein, um die beiden erwähnten Fälle ebenso wie die ähnlichen von Lord RAYLEIGH, DONDERS und KÖNIG gesehenen auszuscheiden und den Unterschied, der sie von den gewöhnlichen Trichromaten trennt, nicht in der Makula- oder Linseningierung zu suchen. Werfen wir unter Zugrundelegung dieser Annahme nochmals einen Blick auf das, was uns die Vergleichung der übrigen Personen in quantitativer Beziehung lehren kann, so sehen wir, daß, wenn wir unter einer größeren Zahl von Personen den Gelb- und den Blausichtigsten aussuchen, die relative Blauschwächung bei dem letzteren etwa als eine Verminderung im Verhältnis 1 : 0,3 veranschlagt werden kann. Dies befindet sich, wie man sieht, in recht guter Übereinstimmung mit dem, was die analogen Vergleichen an Dichromaten ergeben hatten.

Natürlich soll nicht in Abrede gestellt werden, daß gelegentlich einmal eine noch stärkere Tingierung zur Beobachtung kommt. Ja ich will es auch nicht einmal für ausgeschlossen erklären, daß einmal ein Fall vorkommen kann, der den Beobachter zunächst im Zweifel läßt, ob er es mit einem anomalen Trichromaten oder mit einem normalen von exzessiv starker Tingierung zu thun hat. Das aber scheint mir sicher, daß die Untersuchung einer mäßigen Zahl von Personen stets genügen wird, um eine solche Ausnahme als Ausnahme zu erkennen und die von uns geschilderten Gesetzmäßigkeiten deutlich hervortreten zu lassen.

Die Ergebnisse unserer Vergleichen lassen sich kurz folgendermaßen zusammenfassen. Das Farbensystem des „Rotblinden“ und dasjenige des „Grünblinden,“ stellen zwei untereinander typisch verschiedene Reduktionsformen des normalen trichromatischen dar. Innerhalb jeder dieser drei Gruppen lassen

sich die Einflüsse der lichtabsorbierenden Augenmedien (vor allem Makula-Pigmentierung) nachweisen und verfolgen; was wir hier finden, entspricht qualitativ der durch direkte Untersuchungen festgestellten Beschaffenheit des Makula-Pigments (im Gelbgrün beginnende und gegen das blaue Ende hin kontinuierlich zunehmende Absorption) und bewegt sich quantitativ innerhalb derselben Grenzen. Approximativ läßt sich hierfür angeben, daß bei stark gelbsichtigen Personen das Blau ( $460,8 \mu\mu$ ) gegenüber langwelligem Licht auf etwa  $\frac{1}{3}$  desjenigen Wertes geschwächt ist, den es für stark Blausichtige besitzt. Das Vorkommen noch erheblicherer Differenzen kann nicht bestritten werden, dürfte aber gewiß schon ziemlich selten sein. In den meisten Fällen sind die Differenzen weit geringer, so daß das oben erwähnte Verhältnis des protanopischen und deuteranopischen Farbensystems zu dem normalen dadurch nur wenig an Deutlichkeit verliert.

Die soeben dargelegte Beziehung der dichromatischen Systeme zu dem normalen trichromatischen ist nun offenbar von größter Bedeutung auch für die Beurteilung ihres gegenseitigen Verhältnisses. Konnte bei ihrer Vergleichung untereinander noch irgend ein Zweifel darüber bestehen bleiben, ob der Unterschied zwischen ihnen nicht vielleicht doch physikalisch (d. h. durch ein lichtabsorbierendes Pigment) zu erklären sei, so wird dieser Zweifel nunmehr vollends schwinden müssen. In der That, wenn ein dichromatisches System zu dem trichromatischen in der einfachen und scharfen Beziehung einer Ausfallserscheinung steht, kann es unmöglich ihm gegenüber durch die Vorschaltung eines starken absorbierenden Mediums beeinflusst sein; da dies für beide dichromatische Systeme gilt, so können sie auch untereinander sich nicht in dieser Weise unterscheiden. Wir können schlechterdings beide nur als verschiedene Reduktionsformen des normalen, mithin ihren Unterschied auch als einen physiologischen auffassen. Wenn vollends, (wie dies von anderer Seite angenommen worden ist), die Unterschiede der beiden Dichromaten nichts Anderes darstellten, als eine, in gleicher Weise auch innerhalb der normalen Systeme vorkommende individuelle Differenz, so könnte man nur erwarten, daß die Mischungsgleichungen gewisser farbentüchtiger Personen von den einen, gewisser von anderen Dichromaten anerkannt würden; ein Verhalten aber, wie wir es in dem weniger



brechbaren Teile des Spektrums finden, wäre danach nicht nur der merkwürdigste Zufall, sondern überhaupt ganz undenkbar. Aber auch die zwischen den beiden dichromatischen Systemen angenommene Übereinstimmung (die Gleichheit der Blau-Kurven) gewinnt unverkennbar an Sicherheit, wenn, was sich hier zeigt, auch die normalen farbentüchtigen Personen sich hier mit Annäherung gleich verhalten, resp. ähnliche Schwankungen bemerkbar werden. Wenn, woran kaum Jemand zweifeln dürfte, diese bei den farbentüchtigen Personen vorkommenden individuellen Differenzen in der mehrerwähnten Weise rein physikalisch sich erklären, so werden wir um so mehr berechtigt sein, die gleiche Deutung auch auf die analogen Schwankungen in den dichromatischen Systemen anzuwenden.

Im Interesse möglicher Vollständigkeit sei endlich noch ein Bedenken berührt, das sich etwa aufdrängen könnte. Könnte nicht doch vielleicht der Unterschied der beiden Dichromaten-Gruppen identisch sein mit dem Unterschied des normalen und des „anormalen Trichromaten“? Haben wir nicht, indem wir diese letzteren von der Betrachtung ausschlossen, durch eine doch nicht ganz sichere Auffassung gerade diejenigen Thatsachen bei Seite geschoben, welche zu einer ganz andersartigen Anschauung auch von den dichromatischen Systemen hätten führen können? Der Einwurf läßt sich leicht abweisen. Im Grunde ist er eigentlich schon durch die soeben gemachten Bemerkungen erledigt; wenn für beide Dichromatengruppen die Gleichungen des normalen Trichromaten zutreffen, so werden wir doch kaum daran denken können, der einen derselben eine Beschaffenheit des anormalen Trichromaten zuzuschreiben, für welchen dies nicht der Fall ist. Aber auch abgesehen hiervon scheitert der Versuch, den Unterschied der beiden Dichromatenarten mit demjenigen des normalen und des anormalen Trichromaten zu identifizieren, hoffnungslos bei jeder genaueren Prüfung. Das allerdings versteht sich ja von selbst, daß, rein qualitativ genommen und an einer einzigen Gleichung geprüft, die Unterschiede sich gleichartig darstellen: der eine z. B. braucht relativ mehr, der andere relativ weniger Grün. In dieser Weise muß sich natürlich jede Differenz in der Bildung der Sehorgane geltend machen, von welcher Art sie auch sei. Aber die Übereinstimmung beruht hier nur auf der Beschränktheit des Vergleichs, die etwas Anderes, als

dieses Mehr oder Weniger an Grün gar nicht ins Auge faßt. Sie hört hier z. B. schon auf, wenn wir zu quantitativer Betrachtung übergehen. Wir müßten z. B., wie oben gezeigt, um die Gleichungen eines Rot- und eines Grünblinden zur Übereinstimmung zu bringen, annehmen, daß das Grün ( $517 \mu\mu$ ) relativ zum *Li*-Rot im Auge des letzteren auf 0,1 seines Wertes geschwächt wurde. Im Auge des anomalen Trichromaten ist aber, selbst gegenüber dem schwächst pigmentierten normalen, um ein bestimmtes Gelb zu erhalten, nicht die 10fache, sondern nur die 3,5—5,6fache Menge von Grün erforderlich. Schon der erste Versuch einer quantitativen Parallelisierung scheitert also. Eine weitere Durchführung zeigt die Unmöglichkeit dieser Auffassung noch deutlicher, wie den Ergebnissen KÖNIGS zu entnehmen ist. Ich verzichte auf ihre Darlegung, da ich selbst über systematisch ausgedehnte Beobachtungen eines anomalen Trichromaten noch nicht verfüge. Es darf wohl auch hiervon abgesehen werden, weil ohnehin, wie ich glaube, die scharfe Beziehung, in welcher die Dichromaten zum normalen trichromatischen Farbensystem stehen, eine Heranziehung des anomalen zu ihrer Erklärung ausschließt.

#### IV.

Verhältnismäßig kurz kann ich mich über das sog. monochromatische System, d. h. über das Sehen des mit angeborener totaler Farbenblindheit Behafteten, fassen. Ich habe unlängst Gelegenheit gehabt, an einem solchen Falle Beobachtungen anzustellen. Es handelte sich um ein junges Mädchen aus Urach in Württemberg, welches vor längerer Zeit schon in der Tübinger Augenklinik wiederholt untersucht, Herrn Dr. NAGEL erinnernlich war. Durch die sehr gütigen Bemühungen des Herrn Oberamtsarztes KAMMERER gelang es, die Patientin zu einer Reise hierher und einem achttägigen Aufenthalt in der hiesigen Augenklinik zu bestimmen, wodurch zugleich die Möglichkeit wiederholter Untersuchungen im physiologischen Institut gegeben war. Die Patientin war recht intelligent und beobachtete sorgfältig. Es zeigte sich alsbald, daß sie zwischen je zwei beliebigen homogenen Lichtern durch bloße Variierung der Lichtstärke eine genaue Gleichung erhalten konnte, daß sie in der That total farbenblind war. Es handelte sich unter diesen

Umständen vor allem darum, die Verteilung der Helligkeit im Spektrum zu verfolgen. Dies geschah, indem zwischen einem konstant gehaltenen Vergleichslicht und einer passend gewählten Reihe homogener Lichter Gleichungen hergestellt wurden. Zu möglicher Vermeidung von Fehlerquellen wurde auch hier die Reihe der homogenen Lichter erst in der Richtung vom Rot zum Blau und dann wieder zurück durchgegangen.

Die Versuche bestätigen, daß die Helligkeitsverteilung

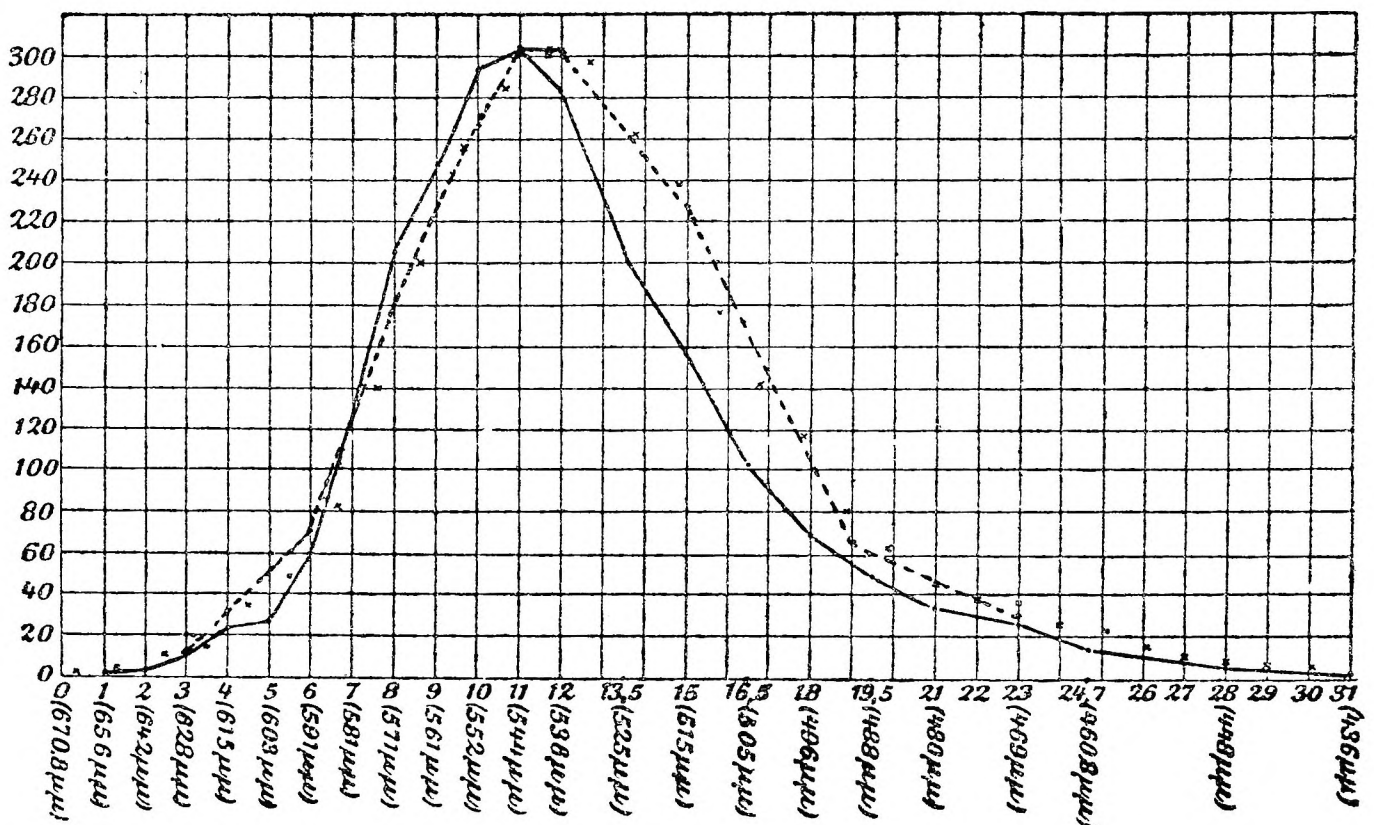


Fig. 6.

Helligkeiten für den total Farbenblinden - - - - - und Dämmerungswerte (nach Dr. NAGEL) — im Dispersionsspektrum des Gaslichtes.

×××× ältere Beobachtungen von Dr. NAGEL.

im Spektrum für den total Farbenblinden mit großer Annäherung übereinstimmt mit derjenigen, die der Dichromat (oder Trichromat) beim Dämmerungssehen besitzt. Ich habe, um dies ersichtlich zu machen, in Fig. 6 die von M. BINDER bestimmten Helligkeitswerte mit den von Dr. NAGEL ermittelten Dämmerungswerten zusammengezeichnet. Die erstere Kurve (die punktierte) fällt, wie man sieht, mit der letzteren genügend nahe zusammen, um ihre Übereinstimmung zu erschließen, und noch etwas besser stimmt sie mit den durch die Kreuze dar-



gestellten früheren Beobachtungen Dr. NAGELS.<sup>1</sup> Die Zahlenwerte sind in Tabelle IX zusammengestellt.

Tabelle IX.

Spektraler Ort der homogenen Lichter	Helligkeit für M. BINDER	Dämmerungs- werte für Dr. NAGEL
3 (628 $\mu\mu$ )	124	110
6 (591 $\mu\mu$ )	720	600
8 (571 $\mu\mu$ )	1810	2060
10 (552 $\mu\mu$ )	2650	2930
11 (544 $\mu\mu$ )	3020	3030
12 (536 $\mu\mu$ )	3050	2820
15 (515 $\mu\mu$ )	2280	1580
19 (491 $\mu\mu$ )	850	556
23 (469 $\mu\mu$ )	325	260

Obgleich dieses Resultat mit dem übereinstimmt, was früher schon von HERING und von KÖNIG gefunden worden ist, so lehren doch unsere Beobachtungen im Vergleich mit jenen etwas Neues. Aus verschiedenen Gründen nämlich war es wichtig, festzustellen, ob für das Sehorgan des total Farbenblinden ein merkbarer Unterschied zwischen Hell- und Dunkelgleichungen stattfände. Man konnte hierüber, in Ermangelung direkter Bestimmungen, einigermaßen im Zweifel sein; da aber die von HERING und von KÖNIG an ihren total Farbenblinden gewonnenen Gleichungen weder strenge Hell- noch Dunkelgleichungen waren, so erschien auch die Bedeutung der gefundenen Übereinstimmung mit dem Dämmerungssehen des Di(oder Tri)chromaten nicht ganz klar. Die obigen von M. BINDER erhaltenen Gleichungen waren nun Hellgleichungen; sie wurden

<sup>1</sup> Vergl. *diese Zeitschr.* XII. S. 12f.

im nicht verdunkelten Zimmer eingestellt, natürlich unter Vermeidung starker Blendung, welche die total Farbenblinden ja nicht vertragen, jedenfalls aber bei ziemlich starker Helladaptierung. Eine ähnliche Reihe von Dunkelgleichungen von unserer Beobachterin zu erhalten, erschien unmöglich, da diese Einstellungen zu schwierig sind und eine große Übung und Sicherheit in der Benutzung des Apparates erfordern. Wir haben jedoch wenigstens in Einzelfällen hierauf zielende Vergleichen angestellt, vornehmlich so, daß nach mehr als halbstündiger Dunkeladaptation bei geringen Lichtstärken eine Dunkelgleichung hergestellt wurde und wir diese dann bei proportional sehr vermehrter Lichtstärke und mit helladaptiertem Auge prüfen ließen. Wir haben hierbei niemals ein Resultat erhalten, was auch nur mit einiger Wahrscheinlichkeit auf eine Differenz hätte schließen lassen. Man kann daher wohl folgern, daß die Gleichungen des total Farbenblinden, wenn überhaupt, jedenfalls nicht in erheblichem Maße vom Adaptationszustand des Auges abhängig sind.

Besser als am Spektralapparat ließen sich von unserer Beobachterin Dunkelgleichungen mit rotierenden Scheiben gewinnen, und es war dabei zugleich für Dr. NAGEL wie für mich möglich, diese Gleichungen unsererseits zu kontrollieren. Da wir sie stets mit größter Annäherung gültig fanden, so wird man schließen dürfen, daß das Dämmerungssehen des total Farbenblinden mit dem des Di(und Tri)chromaten übereinstimmt. Da aber andererseits auch, wie die ersterwähnten Versuche lehren, die Hellgleichungen des total Farbenblinden mit den Dämmerungsgleichungen des Dichromaten stimmen, so bestätigt sich auch hierin, daß zwischen Hell- und Dunkelsehen des total Farbenblinden hinsichtlich der Helligkeitsverhältnisse verschiedener Lichter keine, jedenfalls keine sehr erhebliche Differenz besteht.

Wenn es hiernach zulässig erscheint, von dem Farbensystem eines Monochromaten schlechtweg und ohne erläuternden Zusatz zu sprechen, so können wir uns bezüglich der theoretischen Folgerungen sehr kurz fassen. In einer früheren Arbeit wurde auseinandergesetzt, daß zwei für den Grünblinden helläquivalente Lichter sich bezüglich ihrer Dämmerungswerte sehr beträchtlich unterscheiden können; wir können hinzufügen, daß sie dem Monochromaten äußerst ungleich erscheinen

können, und wir folgern, daß das monochromatische System keine Reduktionsform des grünblinden (d. h. des durch die Helligkeiten des Grünblinden gegebenen) ist. Ganz das Gleiche gilt aber auch, kaum minder deutlich, für das rotblinde Farbensystem. Stellen wir in ähnlicher Weise, wie wir es dort für das grünblinde gethan haben, so auch für das rotblinde System für eine Reihe helläquivalenter Lichterpaare das Verhältnis ihrer Dämmerungswerte (oder der Helligkeiten, mit denen sie von dem total Farbenblinden gesehen werden) zusammen, so erhalten wir Folgendes:

Spektraler Ort und Wellenlänge	Dämmerungs- wert des homogenen Lichts $dh$	Dämmerungs- wert des Rotanteils	Dämmerungs- wert des Blauanteils	Ganzer Dämmerungs- wert des Gemischs $dg$	Verhältnis des Dämmerungs- werts des homogenen Lichts zu dem des hell- äquivalenten Gemischs $\frac{dh}{dg}$
		im Gemisch			
2 (642)	36	36		36	1,0
3 (628)	110	77		77	1,9
4 (615)	254	126		126	2,0
5 (603)	276	168		168	1,6
6 (591)	599	210		210	2,8
7 (581)	1276	226		226	5,7
8 (571)	2061	252		252	8,2
9 (561)	2477	212		212	11,7
10 (552)	2930	202		202	14,5
11 (544)	3027	170		170	17,6
12 (536)	2820	135		135	20,9
13,5 (525)	2055	94		94	21,8
15 (515)	1576	66	23,5	89,5	17,7
16,5 (505)	1015	34	64	98	10,4
18 (496)	697	17	73	90	8,7
19,5 (488)	486	10,6	108	119	4,1
21 (480)	318	5,8	157	163	1,9
23 (469)	263	2,0	153	155	1,7
24,7 (460,8)	146	—	146	146	1,0

Wie man sieht, besitzen auch die für den Rotblinden helläquivalenten Lichterpaare vielfach stark ungleiche Dämmerungswerte und sind also auch für den Monochromaten sehr ungleichwertig. Das monochromatische Farbensystem ist also, wie hieraus hervorgeht, ebensowenig eine Reduktionsform des rot-



blinden wie des grünblinden. Findet sich also, wie man sagen dürfte, die Gleichheitsbedingung des monochromatischen Systems weder im rotblinden, noch im grünblinden System wieder, und sind andererseits im normalen trichromatischen System die Gleichheitsbedingungen der beiden dichromatischen vereinigt, so folgt unmittelbar, daß das monochromatische auch keine Reduktionsform von jenem (dem normalen trichromatischen) sein kann.

Etwas greifbarer können wir im Sinne irgend einer Komponenten-Theorie sagen, daß von den drei Bestandteilen des farbentüchtigen Hellapparates je zwei in demjenigen der Dichromaten sich finden; da der einheitliche Apparat, der das Sehorgan des total Farbenblinden ausmacht, weder mit einem des grünblinden noch mit einem des rotblinden übereinstimmt, so kann er auch mit keinem von den dreien des farbentüchtigen Hellapparates identisch sein.

Die Sätze, zu denen wir hier gelangen, sind vor längerer Zeit schon von KÖNIG aufgestellt worden, der durch ganz direkte Vergleichung fand, daß der total Farbenblinde weder die Gleichungen der Trichromaten noch diejenigen der Dichromaten, sofern diese bei hoher Lichtstärke eingestellt sind, als für ihn zutreffend anerkennt. Es liegt in der Natur der Sache, daß diese Differenzen bei den Gleichungen des Farbentüchtigen nicht auf so hohen Grad gesteigert werden können, wie dies für die Hellgleichungen des Dichromaten möglich ist. Ob Hellgleichungen des Farbentüchtigen dämmerungsungleich sein können, ist demgemäß noch unlängst bezweifelt worden. Ich glaube zwar, daß man diese Zweifel schon im Hinblick auf die früher von mir erwähnten Versuche, noch mehr wohl angesichts der neuerdings von KÖNIG<sup>1</sup> mitgeteilten Beobachtungen als erledigt gelten lassen darf; immerhin wird, wenn sich die Gleichungen des Farbentüchtigen für den total Farbenblinden unrichtig erweisen, zunächst die Einrede möglich sein, daß hier nur geringfügige und vielleicht auf Pigmentierungs-Verhältnissen beruhende Unterschiede vorliegen. Ich habe aus diesem Grunde von der Anstellung derartiger direkter Vergleichen zwischen Farbentüchtigen und total Farbenblinden

---

<sup>1</sup> KÖNIG, Quantitative Bestimmungen an komplementären Spektralfarben. *Sitzungsber. der Berl. Acad.* 1896. S. 945.

abgesehen. Die Feststellung, auf die es uns ankommt, gewinnt durch den indirekten Weg unter Bezugnahme auf den Dichromaten ganz ausserordentlich an Sicherheit. Darüber kann nicht der mindeste Zweifel bestehen, daß die Gleichheitsbedingungen des monochromatischen Systems weder im rotblinden noch im grünblinden Hellapparat sich wieder finden; auch daran, daß das trichromatische die Gleichheitsbedingungen des rot- und des grünblinden vereinigt, kann, wie ich glaube, ein ernsthafter Zweifel nicht mehr bestehen. Hiernach ist denn auch die Beziehungslosigkeit des total farbenblinden Systems zu dem normalen farbentüchtigen Hellapparat von dieser Seite noch sicherer gestützt, als es durch den direkten Vergleich geschehen kann.

Obgleich es nicht meine Absicht ist, an dieser Stelle alle vorkommenden Anomalien des Farbensinnes zu behandeln, insbesondere z. B. die Farbenblindheit der Netzhautperipherie, auf die ich in kurzem zu kommen hoffe, hier ganz außer Betracht bleiben soll, so werden doch einige Bemerkungen bezüglich der Formen am Platze sein, für die eine analoge Auffassung am nächsten liegt und auch vielfach versucht worden ist, nämlich die Blau- resp. Gelb-Blau-Blindheiten. Bei der Seltenheit der Fälle und mangels eigener Beobachtungen muß ich mich hier freilich sehr kurz fassen. Derjenige Fall dieser Art, welcher am ehesten eine Beurteilung gestattet, ist der neuerdings von VINTSCHGAU und von HERING beschriebene. H. gelangt, indem er den Fall vom Standpunkt seiner Theorie aus analysiert, zu der Annahme, daß es sich um eine Gelb-Blau-Blindheit mit Schwäche des Rot-Grün-Sinnes handelt, zu welchen qualitativen Anomalien aber noch eine quantitative von der Art kommt, daß die Reizwerte der kurzwelligen Lichter relativ zu den Reizwerten der langwelligen kleiner sind, als für das normale Auge.

Es wurde schon Eingangs betont, daß man bei einer derartigen Sachlage nicht mehr von einer Bestätigung der Theorie reden darf; der Fall ist lediglich durch einige nicht sehr befriedigende Hilfsannahmen mit der Theorie in Einklang gebracht. Man wird zu wissen wünschen, ob er sich als eine Blaublindheit im HELMHOLTZschen Sinne auffassen läßt. In dieser Hinsicht können wir Folgendes sagen. Den nach dieser Annahme zu bildenden Erwartungen entspricht es, daß ein gewisser

Punkt im Gelb die gleiche Empfindung wie das gemischte weisse Licht (vermutlich wohl eine farblose) hervorruft. Dafs das Gleiche auch vom spektralen Blau gilt, wird auf den ersten Blick nicht ganz im Einklang mit der Theorie erscheinen, denn aller Wahrscheinlichkeit nach liegt hier die Erregbarkeitskurve der Grünkomponente merklich höher, als die der Rotkomponente, man könnte also erwarten, dafs das spektrale Blau durchweg grünlich gesehen würde. Indessen löst sich diese Schwierigkeit vielleicht zusammen mit einer anderen weit beachtenswerteren. H. fand, dafs der Farbenblinde Gleichungen zwischen spektralem Gelb und Blau herstellen konnte; das Helligkeitsverhältnis, welches hier den beiden Lichtern gegeben werden mußte, war nicht das, welches H. erwartete, bei welchem die beiden Lichter gleiche „Weifswalenz“, d. h. in unserem Sinne gleichen Dämmerungswert, gehabt hätten, vielmehr mußte das Blau doppelt so stark genommen werden.

Obwohl nun dies dem Sinne nach den nach der HELMHOLTZschen Theorie zu bildenden Erwartungen entspricht, so sieht man doch sogleich, dafs, wenn es sich um eine Gleichung für einen blaublinden Zapfenapparat gehandelt hätte, die Differenz noch viel beträchtlicher hätte sein müssen. Berechnen wir die Gelbmengen, die einem bestimmten Quantum Blau einerseits an Wirkung auf die Stäbchen, andererseits an Wirkung auf die Rot- und Grün-Komponenten gleichkommen, so müßte die letztere zwar je nach der Wellenlänge des benutzten Blau verschieden, jedenfalls aber das 10—15fache von der ersteren sein. Hiernach scheint es, dafs der Fall sich auch im Sinne der HELMHOLTZschen Komponenten nicht glatt, d. h. nicht als reine Ausfallserscheinung deuten läßt. Indessen hängt dieser Widerspruch doch an einer Voraussetzung, nämlich der, dafs die betr. Gleichungen wirklich Helliggleichungen, oder, wie wir besser sagen dürfen, Zapfengleichungen waren. Eben dies ist wohl in hohem Grade fraglich. Die sonstigen Verhältnisse des Falles, die zu wiederholen hier überflüssig ist, nötigten HERING zu der Annahme, dafs auch die „rotgrüne Sehsubstanz“ gegenüber normalen Verhältnissen sehr reduziert sei. Der hiermit gegebenen Annahme, dafs der Fall sich einigermaßen der totalen Farbenblindheit annähere, können wir wohl in unserem Sinne auch zustimmen; der Zapfenapparat, des Blaubestandteils ganz entbehrend, könnte überhaupt stark Not ge-



litten haben, so daß seine Effekte gegenüber denen der Stäbchen ziemlich zurücktreten. Alsdann wäre zu verstehen, daß wir unter Umständen, die sonst zur Gewinnung von Hellgleichungen schon annähernd genügen, hier Gelb-Blauverwechslungen erhalten, welche sich von den für die Stäbchen gültigen zwar merklich, aber doch nicht so erheblich entfernen, wie wenn es sich um Zapfengleichungen handelte. Hierin könnte dann auch zugleich die Erklärung dafür gefunden werden, daß kurzwelliges Blau nicht, wie erwartet, grün, sondern farblos gesehen würde.<sup>1</sup>

Ob diese Auffassung sich gegenüber weiteren Untersuchungen des Falles bewähren wird, steht natürlich dahin. Selbstverständlich bezwecke ich mit seiner Erörterung nichts weiter als den Nachweis, daß seine Eigentümlichkeiten auch auf dem Boden unserer theoretischen Anschauungen einigermaßen verständlich gemacht werden können. Ob aber diese seltenen und verwickelten Fälle gerade sehr geeignet sind, uns theoretisch wichtige Aufschlüsse zu geben, das ist freilich eine ganz andere Frage.

## V.

Die Beziehungen des normalen trichromatischen Systems zu den dichromatischen stellen sich den obigen Untersuchungen zufolge, wenn wir von den abweichenden Verhältnissen des Dämmerungssehens abstrahieren, ganz ebenso dar, wie sie von HELMHOLTZ in der ersten Auflage der *Physiol. Optik* aufgefaßt worden sind. Wir können im Grunde nur behaupten, für diese Anschauungen neuerlich vollständigere und systematische Beweise beigebracht zu haben, und wir sind andererseits in der Lage, die Rolle, welche hier die individuellen Verhältnisse der Makula-Färbung spielen, mit großer Genauigkeit zu verfolgen, was damals noch nicht möglich war. Wie aber schon erwähnt, ist nun in der Zwischenzeit eine ganz andere Auffassung jener Beziehungen von HERING entwickelt und vertreten worden, welche, kurz gesagt, darin gipfelt, daß es nur eine Rot-Grün-

---

<sup>1</sup> Es wäre von besonderem Interesse, zu erfahren, ob der Farbenblinde auch unter den Bedingungen des Dämmerungssehens ein von dem normalen abweichendes Helligkeitsverhältnis zwischen Gelb und Blau zeigte.

blindheit gebe, und daß der vielbesprochene Unterschied der beiden Typen nichts Anderes sei, als die in ganz gleicher Weise an den Farbentüchtigen zu beobachtenden Unterschiede einer relativen Gelb- oder Blausichtigkeit, welche hauptsächlich auf stärkerer oder schwächerer Makula-Färbung beruhen. Es ist gewiß, daß sich HERINGS Darstellung alsbald sehr viele Freunde erworben hat; eine kritische Erörterung der zu ihrer Stütze vorgebrachten Argumente scheint mir daher hier unerläßlich; denn selbst der Leser, der unserer obigen Darstellung zustimmend gefolgt ist und sie für beweiskräftig gelten läßt, wird ein berechtigtes Interesse haben, zu erfahren, wie es eigentlich kommen konnte, daß ein in der Hauptsache von Anfang an (nämlich schon von SEEBECK) ganz richtig erfasster Sachverhalt für eine gewisse Zeit bestritten und verkannt werden konnte. Wir werden uns, um hierüber Aufschluß zu erhalten, mit den beiden Arbeiten HERINGS „Zur Erklärung der Farbenblindheit aus der Theorie der Gegenfarben“ (*Lotos*, I. S. 76, 1880) und besonders mit der späteren „Über individuelle Differenzen des Farbensinns“ (*Lotos*, VI. S. 142, 1885) zu beschäftigen haben.

Was zunächst die individuellen Differenzen anlangt, wie sie innerhalb der trichromatischen Farbensysteme sich bemerkbar machen und aus der Ungleichheit der Makula-Färbung sich erklären lassen, so war auf dieselben schon mehrfach hingewiesen worden. Von FREY und mir<sup>1</sup> war der Einfluß derselben auf die Mischungsgleichungen in systematischer Weise dargestellt und gezeigt worden, daß die Verschiedenheiten zwischen uns beiden von der Art waren, wie sie aus solchen Absorptionsverhältnissen sich erklären ließen. Eine wertvolle Vervollständigung unserer Kenntnisse in dieser Beziehung boten die auf HERINGS Veranlassung unternommenen Beobachtungen von SACHS,<sup>2</sup> welcher durch spektroskopische Untersuchung herausgeschnittener menschlicher Netzhäute die optische Beschaffenheit des Pigments im gelben Fleck feststellte. Es ergab sich, daß die Absorption bereits im Grüngelb bemerklich wird, um gegen das brechbare Ende hin immer stärker zu werden, wobei

---

<sup>1</sup> v. FREY und v. KRIES, Über Mischung von Spektralfarben, *Arch. f. Physiol.* 1881. S. 336.

<sup>2</sup> SACHS, *Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol.* L. S. 574.

die Hauptzunahme in der Regel in der Gegend der Wellenlänge 500 (jedoch individuell ziemlich wechselnd) erfolgt. Über die Absorptionsverhältnisse normaler Maculae konnten die SACHSschen Untersuchungen, wie HERING selbst später noch besonders betont hat, nur in qualitativer, aber nicht in quantitativer Beziehung Aufschluß geben. Um zu prüfen, ob den Makulafärbungen ein Anteil an der immer konstatierten Differenz der beiden Arten der Farbenblindheit zuzuschreiben sei, war es aber erforderlich, auch irgend eine quantitative Vorstellung von der Bedeutung dieser individuellen Differenzen sich zu bilden. Dies ist auf S. 23 (im S.-A.) der oben erwähnten Arbeit versucht worden; mir scheint, daß die hier niedergelegten Untersuchungen und Überlegungen H. zu einer beträchtlichen Überschätzung dieser Einflüsse geführt haben. HERING ist bei diesen Versuchen so zu Werke gegangen, daß verschiedenen Beobachtern die Aufgabe gestellt wurde, eine Mischung aus Rot ( $660 \mu\mu$ ) und Rotblau ( $447 \mu\mu$ ) so einzustellen, daß das Gemisch „rein rot“, d. h. weder gelblich noch bläulich erschien. Die hierbei gefundenen Quotienten  $\frac{R}{B}$  bewegten sich hier für 5 Beobachter zwischen 1,15 und 7,0. Gegen die hieraus abzuleitende Bewertung der Makula-Absorption wird nun Jedermann das Bedenken geltend machen, daß es doch keineswegs feststeht, ob wirklich das reine Rot eine so ausgezeichnete und wohl charakterisierte Empfindung ist, daß es mit hinreichender Sicherheit und von allen Personen übereinstimmend eingestellt werden kann. Dieses Bedenken ist auch durch die vorausgeschickten Kontrollversuche, bei denen die rein grün, blau und gelb erscheinenden homogenen Lichter aufzusuchen waren, keineswegs entkräftet; denn es ergab sich z. B. (a. a. O. S. 22 des S.-A.), „daß zwar das Gebiet der Einstellung, innerhalb dessen reines Grün gesehen wurde, für beide Beobachter verschieden groß, und überdies, daß das des einen Beobachters gegen das des anderen verschoben war, daß sich aber die beiden Gebiete teilweise deckten, so daß ein engeres Einstellungsgebiet gegeben war, innerhalb dessen beide Beobachter dasselbe homogene Licht bei wiederholter Einstellung als rein grün bezeichneten“. Es erscheint nicht berechtigt, wenn HERING danach fortfährt: „Es war somit nochmals und ganz genau festgestellt, daß S. und B. ein Licht von bestimmter Wellenlänge beide als rein grün beziehungsweise



gelb oder blau bezeichneten, und daß daher die Verschiedenheit ihrer Bezeichnungen für die oben erwähnten grünen Pigmentfarben nicht darauf beruhen konnte, daß Jedem von Beiden sozusagen ein anderes Ideal des reinen Grün vorschwebte. Denn diesenfalls hätten nicht Beide ein und dasselbe Spektralgrün gleich, d. h. als reines Grün bezeichnen können.“ Nicht darauf kam es an, ob ein Grün zu finden war, welches beide Beobachter noch für rein gelten ließen, sondern, ob bei der Aufgabe, reines Grün einzustellen, stets oder wenigstens durchschnittlich dasselbe Licht gefunden wurde. Waren, wie angegeben, die beiden Einstellungsgebiete gegeneinander verschoben, so war im Gegenteil daraus mit Wahrscheinlichkeit zu folgern, daß Jedem von Beiden ein etwas anderes Ideal des reinen Grün vorschwebte, und in der Beurteilung unreiner Pigmente konnte dies Moment neben anderen zur Geltung kommen. Auch bei den Spektralfarben kam es doch vor, (das besagt ja die Verschiebung der Gebiete) daß eine bestimmte Farbe der eine noch für rein grün gelten ließ, der andere aber nicht mehr. Wie groß diese Unterschiede gewesen sein mögen, erfahren wir nicht; es ist auch ohne großen Belang. Denn wir würden daraus auf die analogen etwa beim Rot zu erwartenden Werte doch keinen Schluß ziehen können. Jedenfalls bestätigen aber die Kontrollversuche mit homogenen Lichtern, daß es ungewein gewagt und mißlich ist, aus jenen Einstellungen eines reinen Rot auf die Größe der Makula-Färbungen zu schließen. Nach meinen oben mitgeteilten Erfahrungen muß man schon lange suchen, bis man zwei Personen findet, von denen die eine die dreifache Blaumenge erfordert wie die andere. Daß der hohe Verhältniswert 1:6 in HERINGS Beobachtungen ganz auf Rechnung der Makula-Färbungen kommen sollte, ist mir hier nach sehr zweifelhaft, wenn ich es auch natürlich nicht mit Entschiedenheit bestreiten kann.

Unberechtigt erscheint es endlich auch, wenn H. zur Illustration der gleichen Verhältnisse die oben erwähnten Beobachtungen von RAYLEIGH und DONDERs mit einem einfachen „Es gehört endlich hierher“ etc. (S. 41) anführt. Denn diese Autoren (es war oben schon davon die Rede), haben die Eigentümlichkeit einzelner Personen, in den Rot-Grünmischungen (zur Erzielung einer Gleichung mit homogenem Gelb) sehr viel Grün zu brauchen, keineswegs auf Verhältnisse der Makula-

Färbung bezogen; und es lagen auch in den Beobachtungen sehr gewichtige Gründe vor, welche gegen diese Auffassung sprachen. HERING zieht daher hier zur Bewertung der Makula-Absorptionen Fälle heran, von denen zum mindesten nicht feststand, ob sie resp. die Eigentümlichkeiten ihres Sehens mit diesen Verhältnissen irgend etwas zu thun haben, und von denen daher sehr bezweifelt werden konnte, ob sie „hierher gehören.“

Der wesentliche Grund indessen für HERINGS unzutreffende Auffassung der Farbenblindheit lag wohl nicht in dieser Überschätzung der innerhalb der Farbentüchtigen vorkommenden Unterschiede; wir müssen ihn vielmehr, soweit wir wenigstens aus den von HERING mitgeteilten Beobachtungen schließen dürfen, vor allem in seiner sehr unvollständigen Untersuchung der Farbenblinden selbst finden. Betrachten wir nämlich die Gründe, die H. für seine Anschauung von dem Verhältnis der beiden Farbenblindheiten geltend macht (a. a. O. S. 24 f. des S.-A.), so findet man, daß dieselben sich fast ausschließlich um die Tatsache drehen, daß, um aus Rot und Blau ein farblos erscheinendes Gemisch herzustellen, der „Rotblinde“ weniger Blau erfordert als der Grünblinde. Diese Tatsache war lange bekannt. Der Hinweis darauf, daß sie vielleicht aus den auch innerhalb der Farbentüchtigen zu konstatierenden Differenzen sich erklären lasse, war sicher berechtigt; indessen blieb doch eine solche Erklärung, da es unmöglich war, auf andere Weise die Verschiedenheiten der Tingierung festzustellen, rein hypothetisch. Der faktische Nachweis, daß der Rotblinde hier durch Vorsetzung einer oder einiger Makulae in einen Grünblinden verwandelt werden konnte, lehrte natürlich auch nichts Neues; denn das ist ja ganz selbstverständlich, daß, wenn der eine einer geringeren Blaumenge bedarf, die Mischung des anderen durch irgend ein blauabsorbierendes Medium für ihn richtig gemacht werden kann. Unter diesen Umständen wäre nun doch wohl vor allem geboten gewesen, an einer möglichst vollständigen Reihe von Verwechslungsgleichungen zu prüfen, ob die Unterschiede der beiden Farbenblinden sich durchweg auf die ungleichen Makulafärbungen zurückführen lassen. Wie zu diesem Zwecke verfahren werden konnte, und wie die betr. Versuche zu beurteilen sind, ist oben auseinandergesetzt. Hätte HERING die Verhältnisse in ähnlich systematischer Weise durchuntersucht, wie es z. B. KÖNIG später

gethan hat, so wäre er wohl ohne Zweifel zu dem gleichen Ergebnis gekommen, wie damals KÖNIG und jetzt ich, nämlich einer typischen und durch Unterschiede der Makulafärbung nicht zu erklärenden Differenz der beiden Dichromaten-Arten. Hätte er auch nur eine einzige Verwechslungsgleichung zwischen homogenem Rot und Gelb vom Rot- und Grünblinden vergleichend prüfen lassen, so hätte ihm nicht entgehen können, daß hier seine Annahmen den Thatsachen in keiner Weise gerecht werden. Über wirkliche Verwechslungsgleichungen findet sich aber bei H. nur die Angabe, daß bei der Gleichung zwischen einem farblos erscheinenden homogenen Licht und einer Blau-Rot-Mischung, die ein durch eine stark tingierte Makula hindurchblickender Rotblinder herstellte, das Resultat „ungefähr dasselbe war, welches H. erfahrungsgemäß von einem Grünblinden erhalten hätte, wenn er für ihn eine Gleichung zwischen demselben spektralen Grün und einer Mischung von spektralem Rot und Violett hergestellt hätte“. Selbst in Bezug auf diese eine Art von Verwechslungsgleichungen fehlt es also an einem einigermaßen ausgedehnten zahlenmäßigen Material, welches zu einem Urteil darüber berechtigt hätte, ob quantitativ die beim Farbentüchtigen zu findenden Differenzen dem Unterschiede der beiden Arten der Farbenblindheit gleichkommen.<sup>1</sup> Verwechslungsgleichungen zwischen langwelligeren Lichtern (Grün, Gelbgrün, Gelb, Orange) und Mischungen aus Rot und Blau resp. reinem Rot, sind überhaupt nicht behandelt.

Man wird hiernach zugeben müssen, daß es eine, gelinde gesagt, überaus gewagte Verallgemeinerung war, wenn H. gleich danach fortfährt: „So läßt sich denn, soweit es sich nur um

---

<sup>1</sup> Gegenwärtig kann man sagen, daß bei den Gleichungen dieser Art der Unterschied zweier Farbenblinden gelegentlich so groß wird, daß schon aus diesem Grunde die HERINGSche Erklärung unangänglich wird. Er wird natürlich am größten, wenn zu der Typus-Differenz noch ein Unterschied der Makula-Tingierung im gleichen Sinne wirksam hinzutritt. Vergleichen wir z. B. die Mischungen aus Rot (670,8) und Blau, die Herr NAGEL und Herr MARX einstellen würden, um eine Gleichung mit homogenem Licht  $496 \mu\mu$  zu erhalten, so finden wir den Quotienten  $\frac{R}{Bl}$  bei MARX mehr als 20fach größer. Wir können behaupten, daß die Einflüsse der Makula-Tingierung innerhalb der Farbentüchtigen auch nicht annähernd solche Beträge erreichen.



die Verwechselungsfarben handelt, ein Rotblinder jederzeit in einen „Grünblinden“ verwandeln, ebenso wie sich jeder blau-sichtige Farbentüchtigte auf diese Weise in einen Gelbsichtigen verwandeln läßt. Es gilt daher ganz allgemein die Regel, daß die Farbengleichungen, welche man für einen durch eine kräftig tingierte Makula blickenden „Rotblinden“ herstellen kann, analog denjenigen sind, welche man für „Grünblinde“ gemacht hat“. Daß H. sich zu dieser unzulässigen Verallgemeinerung verführen ließ, erscheint um so rätselhafter, wenn man bedenkt, daß damals zahlreiche Thatsachen bereits bekannt waren, welche dieser Verallgemeinerung entgegenstanden, vornehmlich dadurch, daß sie einen großen Unterschied auch bezüglich der Rot-Gelb-Gleichungen herausstellten. Sieht man von den ausgedehnten Untersuchungen HOLMGRENS ab, bei denen keine homogenen Lichter benutzt und die nicht numerisch fixiert sind, so lagen doch schon Mitteilungen von Lord RAYLEIGH vor, nach denen das Intensitätsverhältnis, in welchem *Li*-Rot und *Na*-Gelb einander gleich gesehen werden, bei den beiden Dichromatenarten ganz verschieden ist.<sup>1</sup> Das Gleiche zeigte an einem ziemlich großen Material die von HERING bereits mehrfach zitierte Arbeit von DONDEES, Beobachtungen, die ich oben schon angeführt habe. — Indessen habe ich nicht zu untersuchen, weshalb H. seine Beobachtungen auf diese Verhältnisse nicht erstreckt hat; und die Gründe, aus denen ihm die erwähnten Angaben anderer Autoren nicht richtig oder nicht zuverlässig erschienen sind (das muß doch wohl der Fall gewesen sein), entziehen sich, da sie nicht mitgeteilt sind, der Beurteilung. Mir liegt nur daran, zu konstatieren, daß, wenn H. die Thatsachen an der Hand seiner Theorie verständlich machen zu können glaubte, der Grund hierfür lediglich in der außerordentlichen Spezialisierung seiner Untersuchungen zu finden ist. Wir werden uns mit dieser Antwort auf die oben gestellte Frage bescheiden dürfen und können andererseits betonen, daß sich auch in HERINGS Beobachtungen Nichts findet, was etwa mit unseren Ergebnissen in thatsächlichem Widerspruch stände. —

In einigen wenig erheblichen Beziehungen ist dies Resultat zu ergänzen. Zunächst findet sich auch in HERINGS Beobach-

---

<sup>1</sup> *Nature*. Vol. XXV. S. 66. 1883.

tungen wenigstens ein Hinweis auf die scharfe Scheidung der beiden Dichromaten-Gruppen. „Unter den wenigen Rotblinden“, sagt H., „die ich zur genaueren Untersuchung herbeiziehen konnte oder wollte, war keiner, dem ich die oben erwähnte genaue Mittelstellung zwischen starker Blau- und starker Gelbsichtigkeit hätte anweisen können. Vielmehr gruppierten sich die einen mit ihrer allerdings verschiedenen Blausichtigkeit um Dr. SINGER, die anderen mit ihrer ebenfalls verschiedenen Gelbsichtigkeit um Professor BIEDERMANN.“

H. läßt es aus diesem Grunde dahingestellt, „ob der von Manchen angenommenen strengen Teilung der Rotgrünblinden in „Rot-“ und „Grünblinde“ eine gewisse Berechtigung insofern zukommt, als die höheren Grade von Blausichtigkeit oder Gelbsichtigkeit häufiger vorkommen, als die Mittelgrade.“

Bedenkt man, daß ein derartiges Verhalten der Pigmentierungen doch recht unwahrscheinlich ist, auch bei den Farbentüchtigen sich nichts Analoges konstatieren läßt, so wird man sagen dürfen, daß doch auch in HERINGS Beobachtungen sich gewisse Schwierigkeiten für seine Theorie bemerklich machten. Allerdings sind diese nicht sehr entscheidender Natur, und so mag man es verständlich finden, daß H. sich darüber ohne weitere Bemerkung hinwegsetzt.

Der einzige Punkt, in dem ich H.s thatsächliche Befunde mit meinen Erfahrungen in einem gewissen Widerspruch finde, betrifft die Lage des neutralen Punktes (der Trennungslinie) im Spektrum. Zwar kann ich darin HERING zustimmen, daß die Lage desselben innerhalb gewisser Grenzen schwankt, und daß, wenn man sie durch Vergleichung mit unzerlegtem weißen Licht sucht, sowohl die wechselnde Beschaffenheit dieses letzteren wie die individuellen Verhältnisse der Makula-Pigmentierung von Einfluß auf das Ergebnis sind. Dagegen steht es mit meinen Erfahrungen nicht im Einklang, wenn HERING sagt (S. 33.): „Ich habe zahlreiche Bestimmungen des reinen Grün bei verschiedenen Farbentüchtigen und der Trennungslinie bei Farbenblinden gemacht, letzterenfalls selbstverständlich ohne weißes Vergleichungslicht, und gefunden, daß das Spektralgebiet, innerhalb dessen die Lage des reinen Grün der Farbentüchtigen und die Lage der Trennungslinie der Rotgrünblinden sich bewegt, im wesentlichen dasselbe ist.“ Nach meinen Erfahrungen kann spektrales Grün von etwa  $505 \mu\mu$  ab sicher bläulich genannt



werden. Dagegen wird ein Licht von 500 vom Rotblinden stets mit Sicherheit als gelb bezeichnet. Ich lege auf diesen Widerspruch gegen HERINGS Anschauungen schon wegen der Subjektivität der hier eingehenden Beurteilungen kein entscheidendes Gewicht; immerhin ist mir (ebenso wie KÖNIG) die Thatsache mit HERINGS Anschauungen stets schwer vereinbar erschienen. Es wäre nicht ohne Interesse, zu erfahren, ob HERINGS Farbenblinde wesentlich gröfsere Wellenlängen als neutral eingestellt haben, oder ob nach seinen Erfahrungen das reine Grün der Farbentüchtigen noch mehr gegen das brechbare Ende zu verlegen ist.

Aus dem Angeführten kann entnommen werden, dafs HERINGS Beobachtungen im Grunde nicht geeignet waren, die ältere Anschauung von dem Verhältnis der Farbenblindheiten zueinander und zum normalen Farbensinn zu entkräften. Ich halte es für eine Pflicht literarischer Gerechtigkeit, hinzuzufügen, dafs ich keineswegs für mich das Verdienst in Anspruch nehmen darf, zuerst vollgültige Beweise für dieselbe erbracht zu haben. In der That sind ja die entscheidenden Sätze, dafs nämlich die Verwechslungsgleichungen für beide Gruppen verschieden sind, und dafs die Gleichungen des Trichromaten von beiden anerkannt werden, schon vor Jahrzehnten aufgestellt und von zahlreichen Autoren bestätigt worden. Wir müssen gegenwärtig konstatieren, dafs die Aufstellung dieser Sätze nicht nur thatsächlich das Richtige traf, sondern auch nach dem vorliegenden Beobachtungsmaterial ganz berechtigt war. Die individuellen Schwankungen sind thatsächlich nicht von so grofser Bedeutung, dafs nicht die Erhärtung dieser Sätze selbst mit relativ einfachen Mitteln ganz gut gelänge. Im Grunde konnte daher, was wir jetzt behaupten, schon vor 30 Jahren als ziemlich wahrscheinlich gelten. Einen der wichtigsten Fortschritte stellten, wie ich auch jetzt noch behaupten mufs, die Untersuchungen von KÖNIG und DIETERICI dar, da hier zuerst die Farbensysteme in einer ganz systematischen Weise mit Benutzung spektraler Lichter untersucht wurden. Hier führte die zunächst unabhängig geleitete Untersuchung der Trichromaten und beider Dichromaten-Arten zu dem Ergebnis „dafs die Fundamentalfarben der Dichromaten mit je zweien des Farbentüchtigen identisch sind“, was sachlich dasselbe, wie die eben angeführten Sätze bedeutet, und es war damit für diese eine systematische und in zahlenmäfsiger Weise fixierte Bestätigung



gewonnen. Ich glaube, daß hiernach ein ernstlicher Zweifel an der Richtigkeit derselben nicht berechtigt war. Weiteren Untersuchungen blieb vorbehalten: erstens die typische Bedeutung der gefundenen Verhältnisse an einem größeren Material zu erweisen; zweitens die Abweichungen aufzuklären, welche, wie KÖNIG und seine Mitarbeiter bald danach fanden, bei stark herabgesetzter Beleuchtung auftreten, die Erscheinungen des „Dämmerungssehens“, wie ich es genannt habe; drittens endlich diejenige Rolle, welche die Unterschiede der Makula-Tingierung wirklich spielen, an zwei Farbenblinden von gleichem Typus aber stark verschiedener Tingierung klar zu legen. Meine Untersuchungen haben die Lehre von den dichromatischen Systemen nur insofern gefördert, als sie an der Beibringung dieser Ergänzungen Anteil haben; in der Hauptsache aber haben sie nur Bekanntes und schon früher Bewiesenes bestätigen können.

## VI.

Überlegen wir zusammenfassend und von einem etwas allgemeineren Standpunkte aus, was sich bezüglich der Farbensysteme ergeben hat, so finden wir Folgendes. Wir haben das trichromatische System, welches in den Helligleichungen der überwiegenden Mehrzahl von Farbensüchtigen dargestellt ist, und zwei typisch verschiedene, aus ihm als Reduktionsformen abzuleitende dichromatische Systeme, durch die Helligleichungen der einen und der anderen Art der partiell Farbenblinden repräsentiert; wir haben daneben und ohne eine erkennbare Beziehung zu jenen das monochromatische der angeborenen totalen Farbenblindheit, welches identisch ist mit demjenigen, welches auch Di- und Trichromaten beim Dämmerungssehen zeigen.

Die Sicherheit dieser Aufstellungen erscheint durch individuelle Differenzen physikalischen Ursprungs nur wenig gemindert, ja, wenn man die Präzision bedenkt, mit der sich in den Schwankungen der Mischungsgleichungen die durch direkte Beobachtung festgestellte Natur des Pigments wiederfindet, vielleicht eher noch vermehrt.

Wenden wir uns nunmehr zu der Frage, was aus diesem grossen und schliesslich eine so einfache Darstellung gestattenden Thatsachen-Komplex in Bezug auf die Bildung unseres Gesichtes-Apparates geschlossen werden kann. Ein Erstes ist hier jedenfalls sehr einfach und bedarf nur weniger Worte. Auch in der sich hier bietenden Gruppierung werden uns die Thatsachen wohl einigermaassen zwingend zu der Vorstellung führen, dass es zwei unabhängige, durch keine erkennbare Beziehung einander gleichende Apparate giebt, nämlich erstens den in den Hellgleichungen des Trichromaten zur Geltung kommenden, durch dessen Reduktion wir uns die entsprechenden Apparate des Protanopen und des Deuteranopen gebildet denken können, und zweitens denjenigen, welcher beim „Dämmerungssehen“ der Di- und Trichromaten funktioniert, und der beim total Farbenblinden allein vorhanden ist. Diese Vorstellung ist aber genau dieselbe, zu der wir auf Grund anderer Thatsachen ebenfalls gelangt waren, und die ihren Ausdruck in der Hypothese über die Funktion der Stäbchen gefunden hat. Man darf sagen, dass das Auftreten des farbenempfindlichen Apparates in drei verschiedenen, untereinander deutlich zusammenhängenden Formen (normales trichromatisches, protanopisches und deuteranopisches Farbensystem), wobei der dem Dämmerungssehen dienende in allemal gleicher Weise nebenhergeht, die Unabhängigkeit jenes farbenempfindlichen Apparates in ebenso deutlicher Weise darthut, wie andererseits die totale Farbenblindheit die Isolierung des anderen darstellt. Einen Hinweis auf die anatomische Grundlage dieser Duplizität kann natürlich die Analyse der Farbensysteme für sich allein nicht liefern; dass sie aber durch die Bestätigung ihrer allgemeinen Grundanschauung der Stäbchentheorie in erfreulicher Weise zur Stütze dient, das lässt sich wohl keinen Augenblick verkennen.

Eine weitere nicht unwichtige Stütze gewähren der Theorie die neueren Ermittlungen hauptsächlich durch die Feststellung, dass die Gleichungen der total Farbenblinden nicht in erheblichem Masse von Lichtstärke und Adaptation abhängen. In der That konnte man, so lange dies nicht feststand, ja wohl allenfalls daran denken, dass die Änderungen, welche z. B. die Gleichungen des Grünblinden erfahren, wenn wir vom Dämmerungssehen zu hohen Lichtstärken und Helladaptation übergehen, auf irgend einer dabei stattfindenden Modifikation des

Sehapparates beruhen. Nachdem wir wissen, daß für den total Farbenblinden, dessen Dämmerungssehen ganz das gleiche ist, nichts derartiges stattfindet, werden wir uns noch zwingender zu der früher schon bevorzugten Annahme gedrängt sehen, daß bei den Hellgleichungen ein anderer Apparat, ein anderer Bestandteil des Sehorgans, ins Spiel kommt.

Die nächste Frage wird nun die sein, ob wir auch über die Bildung der farbenempfindlichen (sei es tri-, sei es dichromatischen) Apparate aus den obigen Thatsachen etwas folgern können. Nur ungern entschliefse ich mich zu einer Erörterung dieser Frage; denn zur Entwicklung hierhergehöriger Vorstellungen oder gar zur Aufstellung einer Lehre, die sich den zahlreichen Theorien der Gesichtsempfindungen als eine neue anreihet, kann wohl kein Augenblick ungeeigneter sein, als der gegenwärtige. Einerseits liegt eine Anzahl physiologischer Probleme noch vor uns (schon die Aufstellung der Stäbchentheorie hat neue gestellt resp. alte wesentlich modifiziert), deren Behandlung und Lösung wir wohl von einer nicht fernen Zukunft erwarten dürfen.<sup>1</sup> Andererseits aber befinden wir uns in einem Stadium, in welchem sich unsere anatomischen Kenntnisse nicht nur vom Nervensystem überhaupt, sondern auch speziell von der Netzhaut so zu sagen täglich bereichern. Je mehr man hoffen darf, für die Physiologie der Gesichtsempfindungen hier greifbare Unterlagen zu finden und aus dem Stadium der ganz abstrakten Begriffe (Komponenten, Sehsubstanzen etc.) heraus zu kommen, um so weniger wird man zu Erörterungen Neigung fühlen, die jenen hoffnungsvolleren sich allmählich erschließenden Weg doch noch nicht einschlagen können und sich noch auf dem älteren schwankenden Boden bewegen müssen. Gleichwohl möchte ich einige Bemerkungen darüber nicht unterdrücken, was denn aus den obigen Thatsachen geschlossen werden kann. Sie werden namentlich gegenüber der oft zu bemerkenden Neigung, zu viel zu folgern, am Platze sein.

Die Beziehung eines dichromatischen zu einem trichromatischen Farbensystem, welche wir dadurch bezeichneten, daß wir jenes eine Reduktionsform von diesem nannten, läßt eine ganz einfache Deutung zu, wenn wir, wie es sowohl die HERING-

---

<sup>1</sup> Hierher rechne ich vor allem die Lehre von der Farbenblindheit der peripheren Netzhautpartien.



sche als auch die ältere Form der YOUNG-HELMHOLTZschen Theorie thaten, den Gesichtsapparat aus einer Anzahl einzelner Bestandteile zusammengesetzt denken und uns die Reduktion durch das Fehlen eines dieser Bestandteile erklären. In der That ist klar, daß alsdann dem Dichromaten alle Lichter gleich erscheinen müssen, die es für den Trichromaten sind, überdies aber auch alle, die sich für den Trichromaten ausschließlich bezüglich ihrer Wirkung auf jenen ihm (dem Dichromaten) abgehenden Bestandteil unterscheiden. Nach diesem Prinzip hat sowol die HELMHOLTZsche wie die HERINGSche Theorie die Beziehungen der Farbenblindheit zum normalen Farbensehen aufgefaßt. Die fortgesetzten Untersuchungen haben gelehrt, und wir können allmählich wohl diese Thatsache als einen gesicherten Besitz der physiologischen Optik in Anspruch nehmen, daß die Farbenblindheiten wirklich Reduktionsformen des trichromatischen Systems sind, aber Rotblindheit und Grünblindheit zwei verschiedene, und es folgt hieraus direkt, daß, wenn wir an dem Grundgedanken einer den ganzen Gesichtsapparat umfassenden Komponenten-Gliederung festhalten, zwei dieser Bestandteile in Bezug auf ihre Erregbarkeit durch Licht annähernd die ihnen von HELMHOLTZ zugeschriebene Beschaffenheit haben müssen.<sup>1</sup> Wenn nun Jemand geneigt sein könnte, hierin ganz ohne weiteres einen Beweis für die Richtigkeit der Y.-H.schen Theorie zu erblicken, so muß diese Folgerung doch in mehreren Beziehungen noch weiter geprüft und, wie sich zeigen wird, thatsächlich eingeschränkt werden.

Erstlich verbietet es sich aus zahlreichen und hinlänglich bekannten Gründen, die erwähnte Gliederung als eine den ganzen Gesichtsapparat umfassende vorzustellen. Es wäre überflüssig, oft und von verschiedenen Seiten Beigebrachtes hier zu wiederholen; es mag daher genügen, hier lediglich zu konstatieren, daß auch nach meiner Überzeugung einesteils die wirkliche Beschaffenheit unserer Empfindungen es unmöglich macht, diese als Kombination einer roten, grünen und blauen Elementar-Empfindung aufzufassen, andererseits aber auch die bei vielen Detailerscheinungen sich ergebende Unmöglichkeit, sie an der Hand

---

<sup>1</sup> Eine mathematisch formulierte Erörterung darüber, wie weit die Beschaffenheit der betr. Komponenten als festgestellt gelten darf, lasse ich unten nachfolgen.

der HELMHOLTZschen Theorie zu erklären, noch irgend welche andre, den HELMHOLTZschen Komponenten nicht entsprechende Bildungen des Gesichtsapparates wahrscheinlich macht. Aus diesem Grunde muß denn betont werden, daß es für die Erklärung der Farbenblindheiten als Reduktionsformen ausreicht, wenn man den HELMHOLTZschen Komponenten die Bedeutung einer peripheren Gliederung zuschreibt. Denn wenn der Gesichtsapparat in einem peripheren Teil diese Einrichtungen darbietet, so versteht es sich von selbst, daß zwei Lichtgemische, die auf jede jener drei Komponenten übereinstimmend wirken, auch die gleiche Empfindung geben. Eben hierin liegt es ja begründet, daß mit einer bestimmten Beschaffenheit jener Komponenten ein bestimmtes „Farbensystem“ gegeben ist, d. h. systematisch angegeben werden kann, welche Lichtgemische gleich aussehen. Nicht minder notwendig muß bei einem Ausfall einer Komponente eine Reduktionsform des ursprünglichen Farbensystems entstehen; denn auch hier gilt es, daß zwei im ursprünglichen Farbensystem gleiche Mischungen gleich bleiben müssen, außerdem aber auch alle diejenigen gleich werden, die sich im ursprünglichen System nur hinsichtlich ihrer Wirkung auf den einen nunmehr mangelnden Bestandteil unterscheiden. Wir sind hierbei zunächst garnicht veranlaßt, über die Natur der weiter zentralwärts sich abspielenden Prozesse uns irgend welche Vorstellungen zu bilden; mögen sie sein, welcher Art sie wollen: jene Folgerungen werden immer zutreffen müssen.

Erwägt man, mit welcher Präzision sich die Erscheinungen der Farbenblindheit an der Hand dieser Theorie verstehen lassen, so wird man die Behauptung gerechtfertigt finden, daß wir es hier mit einer der sichersten theoretischen Errungenschaften in der Lehre von den Gesichtsempfindungen zu thun haben. Wie hoch man ihren Wert veranschlagen will, ist natürlich eine Sache subjektiven Ermessens. Mir erscheint er groß, wenn ich bedenke, wie einfach und durchsichtig die Lehre von den verschiedenen Farbensystemen und ihrem Zusammenhang sich gestaltet. Selbstverständlich aber ist er beschränkt, sofern wir uns mit dem abstrakten Begriff der „Komponente“ begnügen, ohne ihm ein greifbares Substrat zu geben, und nicht minder, sofern der ganze gewonnene Aufschluß eben nur einen peripheren Teil des Gesichtsapparates zu umfassen scheint. Daß wir in der ersteren Beziehung durch



naheliegende Hypothesen (Substantiierung der drei Komponenten in drei lichtempfindlichen Stoffen u. dergl.) weiter gelangen können, ist so bekannt, daß der allgemeine Hinweis darauf genügt. Dagegen seien hier noch einige Bemerkungen über die erwähnte Unvollständigkeit der Theorie angefügt.

Eine bestimmte Vorstellung von der Natur der zentralen den Gesichtsempfindungen zu Grunde liegenden Vorgänge erscheint unter anderem deswegen besonders erwünscht, weil sie uns in die Lage versetzen würde, zu beurteilen, was der Farbenblinde eigentlich sieht, uns von seinen Empfindungen nach Maßgabe der unsrigen eine deutliche Vorstellung zu bilden. Was sind wir in dieser Beziehung gegenwärtig zu sagen berechtigt? Meines Erachtens ist das, was wir über die Empfindungen der Farbenblinden im Vergleich zu den unsrigen sagen können, z. Z. wenig. Am ehesten kann als wahrscheinlich gelten, daß bei den als farblos bezeichneten Empfindungen die Natur der physiologischen Prozesse und der Empfindungen selbst beim Farbenblinden und beim Farbentüchtigen übereinstimmen. Hierfür kann erstens, wie dies ja seit lange geschehen, der von HIPPEL beobachtete Fall einseitiger Farbenblindheit angeführt werden, bei welchem (leider ein Unikum) die Empfindungen des farbenblinden Auges direkt mit denen des farbentüchtigen verglichen werden konnten, und in dem sich zeigte, daß das gemischte weiße Tageslicht auch von dem farbenblinden Auge farblos gesehen wurde.

Ferner darf man darauf hinweisen, daß ein Apparat, nämlich die Stäbchen, sich bei allen Personen in übereinstimmender Bildung findet; nimmt man an, daß seine Erregung überall die gleiche Empfindung hervorruft, so würde, da diese durchweg als farblos oder nahezu farblos bezeichnet wird, auch von dieser Seite wahrscheinlich gemacht sein, daß diese Bezeichnung in Wirklichkeit durchweg gleichen Empfindungen und zentralen Vorgängen entspricht. Erachten wir dies einmal für festgestellt, so würde wohl auch weiter als wahrscheinlich gelten können, daß die Empfindungen zwei farbige Bestimmungen zulassen, die mit zweien in unserem Farbensystem komplementären etwa zusammentreffen.

Auch für diese Vorstellung bietet sich noch eine relativ einfache Erklärung ohne die Einführung von Hypothesen über die Natur der zentralen Vorgänge. Man kann sich denken, daß



beim Farbenblinden gewissermaßen die eine Komponente doppelt vorhanden ist, und daß die beiderlei zentralen Folgen, die beim Farbentüchtigen sich an die Thätigkeit der Rot- und der Grünkomponente knüpfen, hier durch die Thätigkeit zweier übereinstimmender Gebilde bewirkt werden, welche beide, sei es der Rot-Komponente, sei es der Grün-Komponente des Farbentüchtigen gleich sind. Wir könnten uns, um die Sache durch eine Fiktion etwas greifbarer zu gestalten, z. B. drei Zapfenarten denken, welche mit drei verschiedenen lichtempfindlichen Körpern A, B, C angefüllt sind; fehlte dem Farbenblinden die Substanz A, und wären nun auch die normaler Weise A-haltigen Zapfen gleichfalls mit B angefüllt,<sup>1</sup> so würde das Ergebnis wohl etwa dasjenige werden müssen, welches realisiert zu sein scheint.

Ich bin indessen weit entfernt, diese Annahme, die auch ihr Bedenkliches hat, mit Entschiedenheit zu vertreten. Lassen wir sie fallen, so wird die Möglichkeit, über das Sehen des Farbenblinden in der Sprache unserer Empfindungen etwas auszusagen und die modifizierte Beschaffenheit seines Empfindungssystems zu deuten, nur noch auf dem Boden irgend einer Hypothese über die Natur der zentralen (nervösen und psychophysischen) Vorgänge gegeben sein. Hiermit sind wir dann aber bei den Fragen angelangt, deren Behandlung mir, wie vorhing gesagt, wenig zeitgemäß erscheint, und deren weitere Erörterung also hier unterbleiben soll. Die Lücke, die wir solcherart unausgefüllt lassen, suche ich nicht zu verbergen; verzichten wir vorläufig auf eine Hypothese über die Natur der zentralen Vorgänge, so entschlagen wir uns natürlich auch der Vermutungen darüber, in welcher Weise die Zustände der peripheren Komponenten jene zentralen Vorgänge bestimmen, welche Reduktion dieser der peripheren Reduktion entspricht, und wie es etwa kommt, daß der auf zwei periphere Komponenten beschränkte Farbenblinde neben farbloser Helligkeit nur Gelb und Blau sieht. Zu betonen wäre hierbei nur, daß eine derartige Vorstellung, so unvollständig man sie finden mag, z. Z. je-

---

<sup>1</sup> Es käme dies so ziemlich auf die von KÖNIG bevorzugte Anschauung hinaus, daß die Grün-Komponente die Beschaffenheit einer Rot-Komponente angenommen habe, oder umgekehrt. Wir hätten aber hier in dem Fehlen eines peripheren Bestandteiles den angebbaren Grund für diese Modifikationen.

denfalls auf keine positiven Schwierigkeiten stößt; denn der Möglichkeiten einer solchen Aneinanderschließung verschiedenartiger und verschieden gegliederter Vorgänge, wie sie hier gefordert wird, sind jedenfalls sehr viele; eine fruchtbare Phantasie wird keine Schwierigkeit haben, so manche aufzufinden. Und auf der anderen Seite: wer glaubt denn ernsthaft, daß wir die Einrichtungen so verschiedenartiger Gebilde, wie sie der Gesichtsassarat doch thatsächlich hintereinander geschaltet aufweist (z. B. schon der Sehzellen und der Optikus-Fasern), durch eine und dieselbe Formel zutreffend darstellen können?

Das Ergebnis dieser Überlegungen wäre also, daß die Verhältnisse des Sehens der Farbenblinden, wie sie sich in den Verwechslungsgleichungen dokumentieren, in der That den aus der YOUNG-HELMHOLTZschen Lehre gezogenen Folgerungen entsprechen, daß sie insofern auch die reale Bedeutung dieser Lehre schlagend darthun. Bei dem eingeschränkten Sinne aber, in dem die Begriffe der HELMHOLTZschen Theorie jedenfalls genommen werden müssen, bleibt die Frage, was die Farbenblinden sehen, hierbei ganz unberührt, und es ist z. B. auch denkbar, daß die HERINGSche Annahme, wonach sie Gelb und Blau zu empfinden vermögen, richtig ist. — Daß die Theorie einen großen Erscheinungskomplex in einer frappanten Weise zu erklären vermag, ohne sich auf den unsicheren Boden jener Frage (was der Farbenblinde sieht) überhaupt zu begeben, das ist mir stets als ein Vorzug erschienen. Aber ich verhehle mir nicht, daß gerade dieser Umstand und der damit verknüpfte Mangel an Anschaulichkeit dem Verständnis und der Rezipierung der Theorie hindernd im Wege standen und wohl noch lange stehen werden. In der That gehört sehr viel mehr Überlegung und Abstraktion dazu, sich deutlich zu machen, welche Erfolge der Ausfall einer derartigen peripheren Komponente haben muß, als um, direkt von unseren Empfindungen ausgehend, sich gewisse in diesen charakterisierte Qualitäten hinweg zu denken. Nichts kann glatter und einfacher sein, als die Erscheinungen der Farbenblindheit aus dem Fehlen des „Rotgrünsinnes“ zu deduzieren; schade nur, daß die Thatsachen dieser einfachen Auffassung nicht entsprechen. Zuzugeben ist aber, daß auf dem Standpunkt dieser theoretischen Auffassung die Ausdrücke Rotblind und Grünblind noch weniger glücklich gewählt erscheinen, als sie schon von Anfang an waren. Denn mit Hartnäckigkeit



versteht der minder Kundige (vom Laien ganz zu schweigen) hierunter das Unvermögen, Rot resp. Grün zu empfinden, oder vielleicht das Unvermögen, rotes oder grünes Licht überhaupt zu sehen, in beiden Fällen durch den Wortsinn irre geleitet und in Widerspruch mit der Meinung derjenigen, die die Bezeichnungen einführten. Gemeint ist der Mangel eines dem Sehorgan zugeschriebenen Bestandteiles, dessen Natur und Funktionsweise durch die Bezeichnung als Rot-Komponente oder Grün-Komponente durchaus nicht unmittelbar verständlich angegeben ist und überhaupt auch garnicht mit einem Wort erschöpfend angegeben werden kann, was denn natürlich in gleicher Weise auch von der durch sein Fehlen bedingten Anomalie des Sehens gilt. Man kann sogar zugeben, daß die HERINGSche Bezeichnung Rotgrünblindheit, wenngleich sie vielen Bedenken unterliegt, doch das Verhalten beider Typen in einer sehr anschaulichen und vermutlich annähernd richtigen Weise angiebt und insofern gewisse Vorzüge besitzt. Der wissenschaftliche Sprachgebrauch wird jedoch Ausdrücke nötig haben, die den Unterschied der beiden Typen kürzer als etwa in der schwerfälligen Wendung Dichromaten (oder Rotgrünblinde) erster und zweiter Form bezeichnen, und es dürfte wohl auch gerechtfertigt sein, hier die theoretisch erfassten Gründe der ganzen Erscheinung zur Geltung zu bringen. Von diesem Gesichtspunkt aus habe ich die obigen Bezeichnungen Protanopen und Deutanopen, in Vorschlag gebracht.

Die bisherigen theoretischen Erörterungen haben durchgängig nur mit dem Gedanken operiert, daß irgend ein Bestandteil des normalen Gesichtesapparates bei einem anderen in Fortfall gekommen sein, fehlen könnte. Es wird daneben der Fall zu berücksichtigen sein, daß etwa der eine Bestandteil insbesondere durch Abänderung der für ihn geltenden Kurve der Reizwerte modifiziert wäre. Selbstverständlich ist ganz im allgemeinen auch die Möglichkeit einer derartigen Modifikation eines Bestandteiles im Auge zu behalten.

Was nun den Anlaß betrifft, der für eine solche Annahme etwa vorliegen kann, und ihre theoretische Würdigung, so müssen meines Erachtens zwei Hauptfälle unterschieden werden. Haben wir zwei trichromatische Systeme, die sich von einander unterscheiden, derart, daß die Mischungsgleichungen des einen für das andere nicht durchweg gültig sind, so können wir



dieser Thatsache stets durch die Annahme gerecht werden, daß eine oder mehrere Komponenten mit denen des anderen Systems nicht übereinstimmen. Dies versteht sich ganz von selbst. Nicht minder klar scheint mir aber auch, daß eine solche Beziehung von sehr geringem theoretischem Belang ist, wenn sich keinerlei Aufschluß darüber geben läßt, worin etwa jene Modifikation der Komponenten bestehen oder worauf sie beruhen mag. Im Grunde liegen dann eben zwei trichromatische Systeme ohne ersichtlichen Zusammenhang vor; ihr gegenseitiges Verhältnis entzieht sich der Erklärung.

Wesentlich anders liegen die Dinge, wenn es sich um ein dichromatisches System handelt, welches, wie wir es ausdrücken, eine Reduktionsform eines trichromatischen darstellt. Wie eine vollständigere Überlegung lehrt, ist auch hier das Fehlen eines Bestandteiles zwar wohl die einfachste, aber nicht die allgemeinste Annahme. Wenn wir mit  $\varphi$ ,  $\chi$  und  $\psi$  die Funktionen der Wellenlängen bezeichnen, welche die drei Bestandteile eines trichromatischen Systems charakterisieren, so wird eine Reduktionsform desselben jedes darstellen, dessen Bestandteile durch zwei Funktionen

$$\alpha \varphi + \beta \chi + \gamma \psi \text{ und} \\ \alpha' \varphi + \beta' \chi + \gamma' \psi$$

in gleichem Sinne charakterisiert sind. Es ist nur ein spezieller Fall, den wir bisher in Betracht zogen, daß von diesen Koeffizienten zwei verschwinden und somit etwa eine dieser Funktionen mit  $\varphi$ , eine andere mit  $\psi$  zusammentrifft.

Die Bedingung für das Bestehen eben jener Beziehung, derzufolge wir das eine System eine Reduktionsform des anderen nennen, haben wir hiermit noch allgemeiner formuliert als FICK, der jüngst darauf hingewiesen hat,<sup>1</sup> daß dieselbe auch dann bestehen muß, wenn die beiden Bestandteile des trichromatischen Systems gewissermaßen miteinander verschmelzen, so daß die charakterisierende Erregbarkeitskurve des neuen Bestandteils durch  $\frac{\varphi + \chi}{2}$ , das arithmetische Mittel aus den Kurven jener beiden Bestandteile dargestellt würde. Aus mehreren Gründen scheint mir aber doch die ältere Vorstellung den Vor-

<sup>1</sup> *Pflügers Arch.* Bd. LXIV. S. 313.

zug vor der hier vorgeschlagenen zu besitzen. Erstlich ist das Fehlen eines gewissen Bestandteiles doch wohl in theoretischer Beziehung das einfachste und verständlichste; gerade aus diesem Grunde ist es berechtigt, wenn man in der Bildung von Reduktionsformen eine überzeugende Bestätigung der Komponenten-Theorien von jeher erblickt hat. Von der Bildung eines neuen Bestandteils durch eine Verschmelzung von zweien, derart, daß seine Beschaffenheit das arithmetische Mittel zwischen der Beschaffenheit jener darstellte, wüßte ich mir kein anschauliches Bild zu machen. Abgesehen hiervon indessen steht einem derartigen Versuch eine Beziehung der dichromatischen Systeme gegenüber, die, wie es scheint, von FICK nicht bemerkt worden ist, die nämlich, daß ihre Blau-Kurven annähernd, (unter Berücksichtigung der Makula-Absorptionen wahrscheinlich genau) übereinstimmen. Hiernach ist es unmöglich, mit FICK anzunehmen, daß, wenn  $\varphi$ ,  $\chi$  und  $\psi$  die charakterisierenden Funktionen für die normalen Komponenten sind, die des einen Dichromaten  $\frac{\varphi + \chi}{2}$  und  $\psi$  die des anderen  $\frac{\varphi + \psi}{2}$  und  $\chi$  sein sollten. Halten wir daran fest, daß das eine Mal ein und das andere Mal ein anderes arithmetisches Mittel vorliegen soll, so könnte zwar die andere (beiden Dichromaten gemeinsame) Komponente durch eine lineare Funktion aller drei den normalen Bestandteilen zukommenden Funktionen (also durch eine Funktion von der Form  $\alpha \varphi + \beta \chi + \gamma \psi$ ) charakterisiert sein, aber es könnte nicht einfach in beiden Fällen die an der Verschmelzung nicht partizipierende dritte sein. Bei dieser Ausgestaltung sind aber die Annahmen doch wohl zu künstlich, um vorläufig zu einer weiteren Verfolgung einzuladen.

Schließen wir hier endlich noch eine kurze Erörterung darüber an, wie weit wir, bei unserer obigen Annahme stehen bleibend, die Natur der betreffenden Komponenten als durch die Ermittlungen festgestellt erachten dürfen. Hier ist nun zunächst daran zu erinnern, daß die quantitative Ermittlung schon einer Verwechslungsgleichung uns gestattet, im Sinne der älteren HELMHOLTZschen Darstellung den Ort der betreffenden Komponente in der Farbentafel anzugeben. Ähnlich bezeichnete auch MAXWELL z. B. die fehlende Komponente als  $22,6 R + 4,3 Bl - 7,7 Gr$  und so könnten auch wir sie z. B. in Einheiten des Gasdispersionsspektrums durch den Wert  $1,91 \text{ Rot } (670,8) + 0,5$

Blau (460,7) — 1,0 Blaugrün (496) entsprechend der Gleichung  $1,91 \text{ Rot} + 0,5 \text{ Blau} = 1,0 \text{ Blaugrün}$  für den Protanopen *M* ausdrücken; ähnlich durch den Wert  $1,0 \text{ Blaugrün} - 0,77 \text{ Blau} - 0,11 \text{ Rot}$  für den Deutanopen NAGEL. Zu beachten ist aber, daß diese Fixierung in der (empirisch konstruierten) Farbentafel nicht identisch ist mit der Feststellung der neuerdings meist zur Charakterisierung der Komponenten benutzten Kurven, welche die Stärke der Wirkung des Lichts auf die betreffende Komponente als Funktion der Wellenlänge angeben. Es mag daher hier noch darüber Einiges hinzugefügt werden, wieweit in diesem letzteren Sinne die Beschaffenheit der Komponenten als festgestellt gelten kann. Nennen wir die mehrerwähnten Funktionen der Wellenlänge für den Grünblinden  $\varphi$  und  $\psi$ , für den Rotblinden  $\chi$  und  $\psi$ , so könnten, sofern wir jeden derselben ganz für sich betrachten, an Stelle von  $\varphi$  und  $\psi$  auch zwei beliebige Funktionen von der Form  $\alpha\varphi + \beta\psi$  und  $\alpha'\varphi + \beta'\psi$  gewählt werden, ebenso für den Grünblinden statt  $\chi$  und  $\psi$  zwei lineare Funktionen von  $\chi$  und  $\psi$ .

Wenn also *F* und *H* resp. *G* und *H* die charakterisierenden Funktionen der realiter vorhandenen Komponenten wären, so könnte man zunächst nur sagen, daß diese Werte irgend welche lineare Funktionen jener anderen (*F* und *H* von  $\varphi$  und  $\psi$ , *G* und *H* von  $\chi$  und  $\psi$ ) sein müssen. Diese Unbestimmtheit reduziert sich indessen sogleich, wenn wir beachten, daß wir nach der Theorie ein in beiden Fällen übereinstimmendes *H* (die beiden Farbenblinden, gemeinsame Komponente) erwarten müssen, und daß wir ein in beiden Fällen übereinstimmendes  $\varphi$  (gleiche Blau-Kurven) wenigstens mit großer Annäherung gefunden haben. Es wird daraus zu schließen sein, daß die gefundenen Blau-Kurven die die Blau-Komponente charakterisierende Funktion mit großer Annäherung darstellen, und diese könnte also, wenn nicht mit absoluter Genauigkeit, doch mit Annäherung als fixiert gelten. Dagegen blieben für die charakterisierenden Funktionen der „Rot- und Grün-Komponente“ (*F* und *G*) zunächst die Möglichkeit bestehen, daß sie nicht mit  $\varphi$  resp.  $\chi$ , den gefundenen *W*-Kurven, identisch wären, sondern gegeben durch Werte von der Form  $\varphi + \varepsilon\psi$  und  $\chi + \varepsilon'\psi$ . Interpretiert würde diese mathematische Formulierung besagen, daß das in den Versuchen angewandte blaue



Licht möglicherweise noch geringe Erregungen auf die Rot- resp. Grün-Komponente ausübt. Die Kurven  $G$  und  $F$  (die charakterisierenden der realen Komponenten) würden darnach von  $530 \mu\mu$  ab etwas höher verlaufen, als die gefundenen Kurven  $\varphi$  und  $\chi$ . Dafs dies der Fall ist, können wir schon aus dem Grunde als wahrscheinlich bezeichnen, weil für den Grünblinden die Sättigung der Farbe jedenfalls bis  $436 \mu\mu$  zunimmt, also bei  $460$  sicher noch eine merkliche Miterregung der Rot-Komponente stattfindet. Für rotblinde Personen habe ich besondere Versuche hierüber nicht angestellt; es dürfte aber für sie um so mehr der Fall sein, da ja durchgängig in der brechbareren Spektralhälfte die  $W$ -Kurve des Grünblinden schneller als die des Rotblinden absinkt. Eine ganz genaue Feststellung der charakterisierenden Funktionen für die Rot- und Grün-Komponente ist also z. Z. noch nicht möglich. Immerhin wird man sagen dürfen, dafs sie erstlich bis etwa  $536 \mu\mu$  als festgestellt gelten können, da die Funktion  $\psi$  bis dahin merklich gleich Null ist, und dafs auch im weiteren Verlauf erst die letzten Endstrecken in erheblichem Mafse unsicher werden.<sup>1</sup> Bleiben daher auch einige Detailfragen noch offen, so können wir doch in der Hauptsache die Komponenten als festgestellt, d. h. die für jede geltende Abhängigkeit des Reizwertes von der Wellenlänge als ermittelt betrachten.

Wir sind, wie ich glaube, berechtigt, in den mitgeteilten Thatsachen eine äufserst schlagende Bestätigung dafür zu finden, dafs die von der HELMHOLTZschen Theorie angenommenen Be-

---

<sup>1</sup> Die in mancher Hinsicht wohl am meisten interessierende Frage, ob bei kurzwelligem Lichte wieder eine relativ stärkere Wirkung auf die Rot-Komponente stattfindet, kann man am ehesten durch Beobachtungen am Grünblinden zu entscheiden hoffen, der in diesem Falle bei abnehmenden Wellenlängen wieder weniger gesättigtes Blau würde sehen müssen. Die Beobachtungen mit Gaslicht sind jedoch hierfür nicht zu verwenden, da dasselbe im Violett zu lichtschwach ist, um noch irgend etwas mit Sicherheit feststellen zu können. Einige Beobachtungen, die ich mit Dr. NAGEL gelegentlich an meinem älteren Apparate mit Tageslicht angestellt habe, führten zu keiner sicheren Entscheidung; allerdings schienen die sehr lichtschwachen äufsersten Teile des Spektrums (um  $400 \mu\mu$ ) an Sättigung ein wenig zurück zu bleiben; doch bleibt zu berücksichtigen, dafs es sich hier schon um Einmischung von Fluoreszenz gehandelt haben kann. Bis  $436 \mu\mu$  herab nimmt, wie schon gesagt, die Sättigung jedenfalls zu.

standteile des Sehorgans eine reale Bedeutung besitzen. Gleichwohl wird natürlich der vorsichtige Forscher über die zunächst hypothetische Natur dieser Komponenten nicht im Zweifel bleiben und nicht nur von der Zukunft die Feststellung erhoffen, was sie eigentlich sind, sondern auch mit der Möglichkeit rechnen, daß sie durch irgend eine im Effekt ähnliche Einrichtung vorgetäuscht seien. Um so mehr ist es angezeigt, die rein thatsächlichen Feststellungen zu betonen, zu denen wir gelangt sind. Ohne jeden theoretischen Ausblick dürfen wir behaupten, daß, was HERING über den Unterschied der beiden Gruppen von Farbenblinden gelehrt hat, mit zahlreichen älteren Beobachtungen schon schwer vereinbar, mit den Befunden von DONDEERS, KÖNIG und mir absolut im Widerspruch, durch seine eigenen Beobachtungen nicht erwiesen, daß es thatsächlich unrichtig ist. Der Unterschied des Rot- und des Grünblinden besteht nicht in einer relativen Gelb- und Blausichtigkeit von der Art, wie sie beim Normalsehenden auch gefunden wird; er besteht vielmehr in einer anderen Verteilung der Reizwerte, welche bereits im langwelligsten Teile des Spektrums völlig scharf charakterisiert ist. Hat die einseitige Betrachtung vom Standpunkt einer Theorie aus geraume Zeit und in weiten Kreisen zu einer Verkennung dieser Thatsachen geführt, so ist es um so dringender geboten, ihnen wieder die Anerkennung und Beachtung zu vindizieren, die sie verdienen.

## VII.

Was die Technik und die rechnerische Behandlung der obigen Versuche angeht, so kann in der Hauptsache auf das verwiesen werden, was im Schlufsabschnitt der Arbeit von NAGEL und mir angegeben worden ist.<sup>1</sup> Die benutzten Spaltweiten waren bei dem anderen Grünblinden (St.) die nämlichen wie in den Versuchen von Dr. NAGEL und sind aus dem letzten Stabe der Tabelle auf Seite 8 jener Arbeit ersichtlich. Für den Rotblinden wurde als brechbarer Bestandteil nicht Gelbrot  $645 \mu\mu$  benutzt, weil dieses den Rotblinden zu schwach sichtbar ist, sondern Na-Gelb. Da zwischen diesem und den noch weniger brechbaren Lichtern sich genaue Gleichungen erzielen lassen, so hatte die Wahl dieses Lichtes kein Bedenken. Für

---

<sup>1</sup> Diese Zeitschrift XII. S. 19 f.

die Bestimmung der  $W$ -Werte bei 670,8, 656 und 642 wurde, um nicht zu geringe Spaltweiten benutzen zu müssen, das  $Na$ -Licht vermittels eines blauen Glases abgeschwächt, dessen Absorption für dieses Licht in einer Reihe besonderer Versuche sorgfältig ermittelt worden war. Im übrigen kann die Reinheit der in den Mischungsversuchen der Rotblinden benutzten Lichter aus der nachfolgenden Zusammenstellung ersehen werden.

Homogenes Licht.	0	1	2	3—12	13,5	15	16,5	18	19,5	21	23	24,7
Spaltweiten	Sp. II. = 40			Sp. II.	Sp. I.	Sp. I.		Sp. I. = 200			Sp. I. = 300	
	mit blauem			= 40	= 100	= 150						
	Glase.											

Einige Bemerkungen sind ferner erforderlich über die Berechnung der Gleichungen zwischen  $Li$ -Rot und  $Na$ -Gelb, die, wie oben angeführt, von einer größeren Anzahl von Personen erhalten wurden. Um in allen Fällen möglichst gleichartiges Licht anzuwenden, wurde auch hier die Abschwächung des  $Na$ -Lichtes, welche für die Rotblinden erforderlich war, nicht ausschließlich durch Spaltverengung, sondern durch Einschaltung eines blauen Glases bewirkt. Da dieses das  $Na$ -Licht etwa auf 0,23 schwächte, so konnten die Grünblinden ohne dieses Glas und die Rotblinden mit demselben die Gleichungen im Durchschnitt mit ziemlich nahe gleichen Spaltweiten (ca. 200 für das Rot und 40 bis 55 für das Gelb) einstellen. Die Beachtung dieses Punktes ist für die Erzielung genauer Resultate von einiger Bedeutung, denn es ist zu berücksichtigen, daß ein Licht, welches wir  $Li$ -Rot nennen und das mit Spaltweite 200 hergestellt wird, bereits ziemlich unrein ist. Beobachten wir das eine Mal mit kleinen, das andere Mal mit viel größeren Spaltweiten, so stellt sich das Helligkeitsverhältnis von  $Li$ -Rot zu  $Na$ -Gelb schon merklich anders heraus. — Im übrigen wurde bei diesen Versuchen so zu Werke gegangen, daß, um das unbekannte Helligkeitsverhältnis der beiden Spektren zu eliminieren, einmal im Kollimator I Rot und in II Gelb, sodann umgekehrt eingestellt wurde. Bei beiden Anordnungen hatten die Beobachter je 5 Einstellungen auf genaue Gleichheit der Felder zu machen. Nehmen wir an, daß die Helligkeit des Spektrums I. sich zu der des Spektrums II. wie  $\alpha$  zu 1 verhält, so würden 10 Teile  $Na$ -Licht bei der einen Anordnung die Menge  $\alpha Q$ , bei der anderen aber  $\frac{Q}{\alpha}$  vom roten  $Li$ -Licht gleich



gemacht werden, sofern  $Q$  diejenige Menge des *Li*-Lichtes ist, die 10 Teilen *Na*-Licht aus demselben Spektrum gleich erscheint. Diese letzteren Werte erhalten wir also, wenn  $Q_1$  und  $Q_2$  die eingestellten Mengen von *Li*-Licht sind, als das geometrische Mittel aus beiden  $\sqrt{Q_1 Q_2}$ . Dieser Modus der Berechnung ist eingehalten worden, was übrigens im Resultat von keiner sehr großen Bedeutung ist, da die Helligkeit der beiden Spektren nicht sehr erheblich differierte (sie verhielten sich meist etwa wie 4:5).

Um die Absorption des benutzten blauen Glases für *Na*-Licht (und zwar von der durch die Spaltweite 50 bedingten Unreinheit) zu ermitteln, benutzten wir eine Abschwächung durch Polarisation. Im Kollimator I. wurde eine Lichtmischung aus *Na*-Licht und Blau eingestellt, das Blau durch eine eingeschaltete Bichromatkammer ausgelöscht. Nunmehr konnte zunächst eine Reihe von Einstellungen auf Gleichheit mit *Na*-Gelb des Kollimator II. gemacht werden, welche einen Durchschnittswert  $s$  angeben. Sodann wurde das *Na*-Licht des Kollimator II. durch Vorschaltung des blauen Glases abgeschwächt und nachdem in Kollimator I. die Spaltweite auf jenen gefundenen Wert  $s$  eingestellt war, durch Nicoldrehung in Kollimator I. wiederum Gleichheit hergestellt und die erforderlichen Nicoldrehungen abgelesen; schliesslich wurde dann wieder nach Entfernung des blauen Glases die ursprüngliche Vergleichung wiederholt. So erhielten wir für die Helligkeit des *Na*-Lichtes in Kollimator II. mit und ohne blaues Glas zwei untereinander vergleichbare Bestimmungen mit sehr nahezu denselben Spaltweiten. Die angenommene Zahl ist das mittlere Ergebnis mehrfach wiederholter Bestimmungen, deren Genauigkeit das für unseren Zweck geforderte Mass weit übertraf.

---