

(Aus der physikalischen Abteilung des physiologischen Instituts
der Universität Berlin.¹⁾)

Über die Helligkeitsverteilung im Spektrum für das helladaptierte Auge.

Zugleich ein Beitrag
zur Lehre von den „anormalen Trichromaten“.

Von
Dr MAX LEVY (Suhl).

1.

Die Voraussage von HERING und HILLEBRAND², daß die Helligkeitsverteilung, in welcher ein lichtschwaches Spektrum dem bis zur Farbenblindheit dunkeladaptierten, normalen Auge erscheint, keine andere sei als diejenige, in welcher dieselben Strahlungen vom Totalfarbenblinden überhaupt wahrgenommen werden, ist durch das Experiment von HERING³ selbst und in gleicher Weise von anderen Forschern bestätigt worden. Es

¹ Da ich in der vorliegenden Arbeit die Fragestellung nicht sonderlich glücklich finde, benütze ich diesen Anlaß, um ein- für allemal zu erklären, daß mit der Bezeichnung einer Arbeit: „aus der physikalischen Abteilung usw.“ nicht gesagt sein soll, daß diese Arbeit meine eigenen Anschauungen zum Ausdruck bringt. Ich erkenne damit vielmehr nur an, daß die in der betreffenden Arbeit mitgeteilten Untersuchungen mir zuverlässig erscheinen (auf Grund persönlicher Beaufsichtigung der Versuche) und daß die Veröffentlichung der Versuche wissenschaftliches Interesse bietet.

NAGEL.

² F. HILLEBRAND: Aus den Sitzungsber. d. Kais. Akad. d. Wiss. in Wien. Math.-nat. Klasse 48, Abt. III, 1889, S. 42.

³ E. HERING: Untersuchung eines Totalfarbenblinden. *Pflügers Archiv* 49, 1891, S. 563.

durfte weiterhin — auf Grund der Theorie der Gegenfarben — erwartet werden, daß auch für die anderen bisher bekannten Farbensysteme diese Übereinstimmung mit dem totalfarbenblinden besteht oder nur insoweit Abweichungen vorkommen als die „individuellen Verschiedenheiten der brechenden Medien“, also physikalische Faktoren dafür verantwortlich gemacht werden können.

Tatsächlich hat sich nun auch eine solche Gleichartigkeit der „weißen Valenzen“ (HERING) oder „Dämmerungswerte“ (v. KRIES und NAGEL) bisher immer konstatieren lassen, sowohl für die bekannten Typen der partiell Farbenblinden, wie für die von RAYLEIGH gefundene ungewöhnliche Art der Farbentüchtigten¹, die „anormalen Trichromaten“ (KÖNIG, v. KRIES) oder „relativ Gelbsichtigen“ (HERING, TSCHERMAK), und schließlich auch für den in neuester Zeit beschriebenen „zweiten Typus des anomalen trichromatischen Farbensystems.“²

Es kann somit als festgestellt gelten, daß das Sehen mit entsprechend dunkeladaptiertem Auge an einen Faktor oder Bestandteil geknüpft ist, der in allen daraufhin untersuchten Farbensystemen in gleicher Weise vertreten sein muß und befähigt ist, isoliert von den die farbigen Empfindungen bestimmenden Bestandteilen in Wirksamkeit zu treten; mit anderen Worten: die Helligkeitsverteilung, in der das „Dunkelauge“ die verschiedenartigen „farbigen“ Strahlungen wahrnimmt, ist unabhängig von der Art seiner farbigen Empfindungen.

Diese Konsequenz mußte gezogen werden, gleichgültig ob man in jener Übereinstimmung das selbständige Wirken eines allen Systemen zukommenden, für die Aufnahme schwacher Lichtreize eingerichteten Spezialapparats erblicken wollte (den durch die purpurhaltigen Stäbchen repräsentierten Dunkelapparat von v. KRIES) oder aber die isolierte Tätigkeit einer im Hellen wie im Dunkeln funktionierenden Sehsubstanz, welche in allen Systemen und in jedem Adaptationszustand die einzige und alleinige Vermittlerin farbloser Empfindungen sei. (HERINGS schwarz-weiße Sehsubstanz.) Während aber bei der

¹ ARTH. LOTZE: Untersuchung eines anomalen trichromat. Farbensystems. (Dissertation.) Freiburg 1898.

² MAX LEVY: Über einen zweiten Typus des anomalen trichrom. Farbensystems etc. (Dissertation.) Freiburg 1903.

ersteren Auffassung aus einer Feststellung der spektralen Reizwerte für das „Dunkelauge“, also der „Stäbchenvalenzen“; Schlüsse auf die Helligkeitsverhältnisse für das „Hellauge“ überhaupt nicht gezogen werden konnten, galt diese Beschränkung keineswegs für die Anschauung, daß im hell- wie im dunkeladaptierten Auge die Empfindung farbloser Helligkeit in einer einheitlichen Weise zustande komme. Es mußte hiernach vielmehr neben anderem gefordert werden, daß beim sog. indirekten Sehen, bei dem alle Strahlungen auch für das helladaptierte Auge farblos erscheinen, sich das isolierte Wirken jener schwarz-weißen Sehsubstanz in ganz gleicher Weise dokumentieren werde wie beim Farblossehen des dunkeladaptierten Auges.

So nahe diese Annahme von jenem Standpunkt aus lag, so wenig wurde sie durch die experimentelle Prüfung bestätigt.

Die tatsächlichen Helligkeitsverhältnisse nämlich, so wie sie für die nur farblossehende helladaptierte Netzhautzone von v. KRIES¹ gefunden wurden, unterscheiden sich prinzipiell von den für das Dunkelaugenge geltenden.

In doppelter Hinsicht:

Erstens stellen sich die „Peripheriewerte“ für den Farbentüchtigen (v. KRIES) als eine durchaus andere Funktion der Wellenlänge dar wie die „Dämmerungswerte“ für denselben Beobachter.

Zweitens besteht im Hellauge hinsichtlich der relativen Helligkeitswerte der Lichter keineswegs jene Übereinstimmung der verschiedenen Farbensysteme, deren Vorhandensein uns eben nötigte im Sehen des Dunkelauges das Wirken eines von den farbigen Empfindungen unabhängigen Faktors zu erblicken. Die für den „Protanopen“ gefundene Verteilung der Peripheriewerte, so stellte v. KRIES fest, weicht in einer jede Parallelisierung ausschließenden Weise von der für den normalen Farbentüchtigen und den Deuteranopen geltenden ab; die zwischen dem Farbentüchtigen und Deuteranopen gleichfalls gefundene Differenz war eine zwar geringe aber doch bestimmt nachweisbare.

¹ v. KRIES: Über die Farbenblindheit der Netzhautperipherie. *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane* 15, S. 247.

Wiewohl nun die späteren Untersuchungen POLIMANTIS¹ und die TSCHERMAKS² es wahrscheinlich gemacht haben, daß unter den normalen Farbentüchtigen hinsichtlich der für sie geltenden „Peripheriewerte“ eine gewisse Schwankungsbreite besteht und damit die vermutete Unterscheidung von den sog. Grünblinden verwischt wird, so bestätigen doch andererseits dieselben Autoren, daß zwischen den sog. Rotblinden einesteils und den Farbentüchtigen wie sog. Grünblinden andernteils eine typische Verschiedenheit in diesem Punkte existiert. Zu demselben Ergebnis führten die Untersuchungen von VAN DER WEYDE³ und die von TRENDELENBURG⁴ für sein normales Auge neuerdings festgestellte Verteilung der Peripheriewerte im Spektrum.

Wenn aber, wie v. KRIES vermutet, die Bestimmung der Peripheriewerte homogener Strahlungen insofern als Bestimmung der relativen Helligkeitswerte der Farben gelten können, als voraussichtlich „Lichter, die auf den total farbenblinden Hellapparat der Peripherie gleich stark wirken, auf die farbenentüchtigen Netzhautpartien den Eindruck gleicher Helligkeit machen“, so würde unsere obige Feststellung besagen: In der Art der Helligkeitswahrnehmung homogener Lichter unterscheidet sich der sog. Rotblinde in typischer Weise vom sog. Grünblinden und vom Normalen, solange die Beobachtung mit dem Hellauge erfolgt, mit anderen Worten: Es besteht eine gesetzmäßige Beziehung zwischen dem Aufbau dieser Farbensysteme und der Art der Helligkeitswirkung „farbiger“ Strahlungen.⁵

¹ O. POLIMANTI: Über die sog. Flimmerphotometrie. *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane* 19, S. 263.

² A. TSCHERMAK: Beob. über die relat. Farbenblindheit im indir. Sehen. *Pflügers Archiv* 82, S. 552. 1900.

³ A. J. VAN DER WEYDE: Die Lichtstrahlen des Spektrum in der Peripherie der Netzhaut. *Onderzoek. Physiol. Labor. Utrecht. Vijfde Reeks* III, II. Aflevering S. 292.

⁴ In der oben zitierten Dissertation des Verfassers.

⁵ HILLEBRAND und HERING, die durch direkte heterochrome Messungen die Verschiedenheit der spektralen Helligkeitskurven des Normalen und eines sog. Rotblinden ebenfalls konstatiert hatten, suchten jene gesetzmäßige Beziehung darin, daß den „Rotgrünblinden“ ganz allgemein im Rot ein erhellender, im Grün ein verdunkelnder Faktor fehle (l. c. S. 42). Freilich werden heute die jener Lehre von der spezifischen Helligkeit der Farben zur Basis dienenden Erscheinungen in ganz anderer Weise gedeutet, auch von Autoren die im übrigen an der Theorie der Gegenfarben

Für diese Annahme sprechen in der Tat auch die Ergebnisse der direkten „heterochromen“ Helligkeitsbestimmungen: Schon DONDEERS¹ fand, wiewohl seine Resultate durch die Nichtbeachtung des Adaptationszustands getrübt werden, daß die spektralen Helligkeitskurven des sog. Rotblinden und sog. Grünblinden in typischer Weise voneinander abweichend verlaufen; in einwandsfreierer Weise stellte BRODHUN² eine solche Verschiedenheit für sich, (grünblind) und RITTER (rotblind) fest, solange die Beobachtungen mit hohen Lichtstärken angeführt wurden; auch der HILLEBRANDSche Befund (s. obige Anmerkung S. 77) gehört hierher.

Eine andere durch POLIMANTI³ festgestellte Tatsache läßt es noch mehr berechtigt erscheinen, in der charakteristischen spektralen Verteilung der Peripheriewerte den zutreffenden Ausdruck für die entsprechenden relativen Helligkeitswerte der Farben (für die Netzhautmitte) zu erblicken: „Flimmerwerte“ (für die Netzhautmitte bestimmt) und Peripheriewerte haben nach POLIMANTI im Spektrum nahezu die gleiche Verteilung, sind annähernd dieselbe Funktion der Wellenlänge.

Tatsächlich tritt dementsprechend, wie POLIMANTI zeigte, auch in der Verteilung der „Flimmerwerte“ im Spektrum die typische Abweichung des protanopischen vom deuteranopischen und normalen System zu Tage. Freilich darf man auch die durch die sog. Flimmerphotometrie gefundene Reizwertverteilung (die Intermittenzhelligkeiten nach SCHENCK) nur insoweit als eine Bestimmung der relativen Helligkeiten der Farben gelten lassen, als sich der von ROOD ausgehende Satz als richtig erweist: Zwei objektive Lichter, in bestimmtem Rhythmus miteinander intermittierend zur Einwirkung auf dieselbe Netzhautstelle gebracht, werden, unabhängig von der Art ihrer „farbigen“ Wirkung um so schwerer als getrennte Reize wahrgenommen, je weniger sie sich hinsichtlich ihrer subjektiven Helligkeiten unterscheiden. Wiewohl diese Voraussetzung nicht bewiesen ist, so muß unsere

festhalten (G. E. MÜLLER: „Die Verschiedenheit der H-Werte und D-Werte der Weißvalenzen“ infolge des sensibilatorischen Einflusses des Seh-
purpurs auf die Schwarz-Weiß-Substanz; TSCHERMAK: „die adaptive Verschiedenheit der Weißvalenzen“).

¹ DONDEERS F. C.: Über Farbensysteme. *Graefes Archiv* 27, 1881.

² BRODHUN: Beiträge zur Farbenlehre. (Dissertation.) Berlin 1887.

³ O. POLIMANTI l. c.

obige Vermutung doch wesentlich gestützt werden durch die tatsächlich übereinstimmende Aussage zweier so verschiedenartiger Bestimmungen wie die der Peripheriewerte einmal und die auf zentralem Netzhautfelde gewonnene der Flimmerwerte.

Die unten angeführten Experimente beweisen nunmehr auf direktem Wege, daß — für die beiden untersuchten Farbensysteme wenigstens — die Feststellung der Flimmerwerte homogener Lichter (und somit auch die Feststellung der Peripheriewerte) ein zutreffendes Bild gibt von den relativen Helligkeitswerten der entsprechenden Farben bei Beobachtung mit fovealem Felde¹ und bestätigen somit auch die v. KRIESSche Auffassung von den Peripheriehelligkeiten.

2.

Es ist neuerdings von mir² ein Farbensystem beschrieben worden³, welches als „trichromatisches“ zwar prinzipiell verschieden ist von den Systemen der partiell Farbenblinden, gleichwohl eine dem normalen Farbensystem nicht zukommende Ähnlichkeit mit dem protanopischen aufweist. Wiewohl nämlich die Unterschiedsempfindlichkeit dieses „anormalen Trichromaten“ gegen Veränderung des Farbentons eine wesentliche Herabsetzung gegenüber der Unterschiedsempfindlichkeit des Normalen nicht erkennen läßt, ist die Erregbarkeit für langwellige Lichter und die entsprechende untere Farbenreiz-

¹ v. KRIES weist entsprechend darauf hin (l. c. S. 273), daß seine Peripheriewerte, soweit sie bestimmt werden konnten, sich der von KÖNIG auf direktem Wege ermittelten Verteilung der Gesamthelligkeit (bei ungleicher Farbe) sehr annähern. — SCHENCK fand andererseits für Pigmentpapiere (*Pflügers Archiv* 68, 1897) keine völlige Übereinstimmung der Flimmerwerte mit den direkt bestimmten Helligkeitsverhältnissen.

² MAX LEVY l. c.

³ Lord RAYLEIGH hatte die Freundlichkeit, mich auf eine von mir seinerzeit übersehene Arbeit von ARTHUR SCHUSTER hinzuweisen (*Experiments with Lord RAYLEIGHs colour box*, *Proceedings of the Royal Society of London*, June 5, 1890). SCHUSTER fand unter 75 untersuchten Personen unter anderen auch eine, die zu einem gewissen grünen Licht fünfmal mehr rotes Licht zumischen mußte als der Normale, um das Mischlicht einem gegebenen homogenen gelben gleich zu machen. Das Farbensystem dieses Beobachters ist — soweit nach dieser Mischungsgleichung geschlossen werden darf — der Gruppe, die von mir als „zweiter Typus des anormalen trichromatischen Farbensystems“ beschrieben wurde, zuzuzählen.

schwelle (bei helladaptiertem Auge) in ähnlicher Weise herabgesetzt, wie dies für den sog. Rotblinden längst bekannt ist; das hierauf beruhende Phänomen der scheinbaren Verkürzung des mäßig lichtstarken Spektrums am langwelligen Ende besteht daher auch für diesen „anormalen Trichromaten“.

Es wurde nachgewiesen, daß der Grund dieser und auch der übrigen Eigentümlichkeiten des Systems nicht in abnormen Absorptionsbedingungen der brechenden Medien liegt, sondern in der abnormen Beschaffenheit von Sehsubstanzen, welche im helladaptierten Auge funktionieren. In Übereinstimmung damit ließen die Dämmerungswerte keine besonderen Abweichungen von den normalen erkennen, während in den Peripheriewerten, also auf helladaptierter Netzhaut, die Anomalie in charakteristischer Weise zutage trat: Die für mich, den anomalen Trichromaten, festgestellte spektrale Kurve der Peripheriewerte zeigte, gänzlich abweichend von der des Normalen, eine große Ähnlichkeit des Verlaufs mit einer älteren für den Protanopen MARX gefundenen Kurve. (Die Untersuchung reichte von $\lambda = 660 \mu\mu$ bis $\lambda = 530 \mu\mu$). Es wurde die Vermutung nahe gelegt, daß eine völlige Übereinstimmung der Peripheriewertverteilung für die beiden Systeme bestehe.

Wie wir vorausschickten, scheint es berechtigt zu sein, in der Peripheriewertverteilung den Ausdruck der Helligkeitsverhältnisse zu erblicken, welche für die farbigsehenden Netzhautteile gelten. Wäre die vermutete Übereinstimmung der beiden Systeme hinsichtlich der Peripheriewerte eine notorische, so müßte hiernach für den Protanopen und unsern anomalen Trichromaten vom II. Typus — ungeachtet des sehr verschiedenen farbigen Eindrucks — die gleiche Helligkeitsverteilung im Spektrum bestehen, sofern man die individuellen Verschiedenheiten der Absorption durch die Medien in Abrechnung bringen könnte.

Hierüber völlige Sicherheit zu erhalten, schien einer speziellen Untersuchung wert, schon im Hinblick auf die fundamentale Frage, in welcher Weise sich die von den Farbentheorien angenommenen Komponenten an dem Zustandekommen der Empfindung farbloser Helligkeit im helladaptierten Auge beteiligen.

Es entstand also als nächste Aufgabe die, nochmals durch systematische Parallelbeobachtungen am Spektrum für

beide Systeme festzustellen entweder die Verteilung der Peripheriewerte oder die nach POLIMANTI damit übereinstimmende Verteilung der Flimmerwerte; es könnte dann — die Richtigkeit unserer früheren Annahme vorausgesetzt — das Ergebnis dieser Untersuchungen ohne weiteres für die gestellte Frage nach den Helligkeitsverhältnissen in den beiden Farbensystemen verwertet werden.

Als zweite Aufgabe stellten wir uns, durch sog. heterochrome Helligkeitsgleichungen auf fovealem Felde die Frage der Helligkeitsverteilung in direkter Weise zu entscheiden; daß die Herstellung derartiger Gleichungen mit einer zwar individuell verschiedenen Unsicherheit behaftet, aber annäherungsweise möglich ist, daran braucht nur erinnert zu werden; ebenso daran, daß die individuell verschiedene Makularingierung das Ergebnis (vorwiegend in den kurzwelligen Lichtern) hier sowohl wie bei Bestimmung der Flimmerwerte beeinflussen kann.

Statt der schwierigen Peripheriebeobachtungen, deren Ergebnis leicht durch die rasch, auch bei kurzer Beobachtung eintretende Dunkeladaptation getrübt wird, wählten wir die Methode der Flimmerwertbestimmung.

Ein Vergleich dieser Bestimmungen mit den durch direkte „heterochrome“ Helligkeitsgleichungen erhaltenen gestattete schliesslich das schon oben ausgesprochene Urteil über die Brauchbarkeit der „Flimmermethode“ zur Feststellung der scheinbaren Helligkeitsverteilung im Spektrum.

I. Aufgabe.

Vergleich der Flimmerwerte beider Systeme.

Anordnung und Methode entsprach im Prinzip der von POLIMANTI im Freiburger Institut verwendeten. Ein Auerlichtspektrum, dessen reelles Bild mit der Ebene des Okularspalts zusammenfällt; durch Verschiebung des ca. 0,5 mm breiten, 2,5 mm hohen Okularspalts auf graduiertem Stabe konnten die verschiedenen Lichter rein ausgewählt werden. Die Auswertung der Skala nach Wellenlängen geschah in bekannter Weise, die Lage der Natriumlinie wurde an jedem Versuchstag kontrolliert.

Die Intensität der spektralen Lichter konnte durch die Weite des vor der Lichtquelle befindlichen Spalts in beträchtlichen Grenzen variiert werden, ohne die Reinheit der im Okularspalt jeweils sichtbaren Farbe zu gefährden

Das Beobachtungsfeld wurde auf die Gröfse von $1,3^\circ$ eingeschränkt durch einen hinter dem Okularspalt aufgestellten weissen, mit Auerlicht erhellten Schirm der mit entsprechendem kreisförmigem Loch versehen war. Ca. 16 cm dahinter stand die rotierende Scheibe. Zwei gegenüberliegende Quadranten derselben waren ausgestanzt, die zwei anderen waren mit weissem Barytpapier glatt überzogen und wurden hell beleuchtet durch seitlich aufgestellte Auerlichtbrenner. Die Helligkeit der Sektoren konnte — der ganzen Anordnung nach — während einer Versuchsreihe als konstant angesehen werden.

Bei gleichmässiger Rotation der Scheibe trat auf das vor dem Okularspalt befindliche Auge gleichlang und abwechselnd das reflektierte weisse Licht eines Sektors und das durch einen Ausschnitt fallende spektrale Licht. Durch einen Elektromotor wurde die Rotation besorgt mit einer passend ausgewählten, für alle Lichter und für beide Beobachter unveränderten Geschwindigkeit.

Gleichmässige Helladaptation wurde dadurch erreicht, dafs vor jeder Beobachtung eine seitlich befindliche, sehr helle weisse Fläche betrachtet wurde.

Der Flimmerwert für das mit dem konstanten weissen Licht des Sektors intermittierende spektrale Licht wurde in folgender Weise festgestellt: Der Beobachter vermochte, während er durch den Okularspalt das zentrale kleine Feld beobachtete, den Lichtspalt und damit die Intensität des spektralen Lichts mittels eines Schnurlaufs leicht und in feinen Abstufungen zu variieren. Er suchte nun diejenige Spaltweite auf, bei der der flimmernde Eindruck eben aufhörte, einmal indem er von der zu geringen Lichtstärke sukzessive zu gröfserer aufstieg, das andere Mal umgekehrt von zu grofser herabstieg. In dieser Weise stellten die beiden Beobachter (für jedes der gewählten Lichter unmittelbar nacheinander) durch das „aufsteigende und das absteigende Verfahren“ je drei Spaltbreiten fest, deren jeweiliger Mittelwert als die „obere und die untere Schwelle des Flimmerns“ angesehen wurde. Das Gebiet innerhalb der beiden Schwellen, also das „nicht flimmernde Gebiet“, wenn ich so sagen darf, war bei der konstant gehaltenen Intermittenzzahl ein verschieden grofses sowohl hinsichtlich der einzelnen Strahlungen als auch hinsichtlich der beiden Beobachter, wie aus der Tabelle zu ersehen ist.

Die Tabelle I gibt das Resultat einer sorgfältig durchgeführten Versuchsreihe an, in welcher Herr cand. med. MAX COHN (Protanop) einerseits, ich selbst (anomaler Trichromat des zweiten Typus) andererseits die Beobachtungen ausführten.¹

Kolumne 1 enthält die Wellenlänge des gewählten Lichts.

Kolumne 2 gibt in Spaltbreiten ohne Umrechnung das Mittel aus der durchschnittlichen oberen und durchschnittlichen unteren „Flimmerschwelle“ für den Protanopen an.

Kolumne 3 die durchschnittliche Gröfse des zwischen diesen Schwellen gelegenen „nicht flimmernden Gebiets“ in Prozenten des betr. Mittels aus den beiden Schwellen, für den Protanopen.

Kolumne 4 und 5 gelten, 2 und 3 ganz entsprechend, für den trichromatischen Beobachter.

Tabelle I. 1. März 1904.

Wellenlänge in $\mu\mu$	Protanop		Anomaler Trichromat II. Typus	
	Mittel aus der oberen und der unteren Schwelle des Flimmerns in Spaltweiten	Gröfse des „nicht flimmernden Gebiets“ in % des betr. Mittels	Mittel aus der oberen und der unteren Schwelle des Flimmerns in Spaltweiten	Gröfse des „nicht flimmernden Gebiets“ in % des betr. Mittels
663,4	—	—	208	4
649,0	168	9	166	7
622,7	58,5	21	56,4	19
589,3	15,2	9	15,2	5
569,0	—	—	11,3	5,5
559,5	11,0	4	10,9	7
534,1	12,6	3	13,0	3
511,9	24,8	1 $\frac{3}{4}$	23,8	3
499,2	61,0	7	54,6	6
494,5	—	—	86,5	7

Resultat: Betrachten wir zunächst die Verteilung der Flimmerwerte im ganzen, so zeigt sich, daß in beiden Reihen dem Lichte von 559,5 $\mu\mu$ Wellenlänge, entsprechend der geringsten Spaltbreite, der höchste Flimmerwert zukommt, eine Abweichung von den Flimmerwerten des Normalen², wie sie ganz entsprechend für den Protanopen MARX von POLIMANTI gefunden war.

Vergleichen wir die Einzelwerte der beiden Reihen miteinander, so ergibt sich eine sehr nahe Übereinstimmung von

¹ An drei Stellen wurde die Beobachtung von mir allein ausgeführt.

² In unseren Versuchen wurde für den farbentüchtigen Dr. ANGLER das Maximum bei 590 $\mu\mu$ gefunden.

$\lambda = 649 \mu\mu$ bis etwa $\lambda = 511,9 \mu\mu$. Dagegen tritt schon hier und mit abnehmender Wellenlänge immer deutlicher, wie wir uns in anderen Versuchsreihen überzeugen mußten, eine regelmäßige Differenz zutage: Der Protanop verlangt stets die größere Intensität des spektralen Lichts.

Da nun bekanntlich die makuläre Absorption der Strahlungen gerade in dieser Gegend des Spektrums beginnt, merklich zu werden und nach dem kurzwelligen Ende mehr und mehr zunimmt, so könnte die gefundene Differenz der Flimmerwerte als eine nur accidentelle aufgefaßt werden, wenn entsprechende Differenzen in der Makularingierung der beiden Beobachter bestünden. Tatsächlich ergab sich nun auch aus Versuchen, welche in einem Kurs Prof. NAGELS am HELMHOLTZschen Mischapparat gewonnen waren, daß von ca. 10 Untersuchten Herr COHN unter die stark pigmentierten, ich selbst unter die am schwächsten pigmentierten einzureihen war.

Da übrigens das Aufsuchen einer Flimmergrenze schon in den blaugrünen Strahlungen recht schwierig wurde, glaubten wir von einer weiteren Ausdehnung der Reihe absehen zu können.

Auch in anderen teils systematisch, teils einzeln ausgeführten Versuchen überzeugten wir uns, daß der von dem einen von uns beiden eingestellte Flimmerwert auch von dem anderen stets „anerkannt“ wird (innerhalb der angegebenen Wellenlängen), während dies keineswegs der Fall war für die gelegentlich mitbeobachtenden Normalen (Dr. ANGIER, Dr. PIPEB), für den Grünblinden (Prof. NAGEL) und den anomalen Trichromaten des RAYLEIGH-DONDERSSchen Typus (Dr. GUTTMANN). Ich glaube daher behaupten zu können, daß hinsichtlich der Verteilung der Flimmerwerte im Spektrum das dichromatische System des Protanopen übereinstimmt mit dem zweiten Typus des anomalen trichromatischen.

II. Aufgabe.

Vergleich der durch direkte heterochrome Helligkeitsbestimmung gefundenen Wertreihen beider Systeme.

Anordnung und Methode: Die heterochromen Helligkeitsgleichungen wurden an demselben Apparat unter den gleichen Versuchsbedingungen wie die Flimmerwerte gewonnen. Es wurden die verschiedenen spektralen Lichter der Reihe nach in Parallelversuchen verglichen mit dem konstanten, gemischten

Licht, welches der vom Auerlicht erhellte weiße Sektor der Rotationsscheibe lieferte. Es bedurfte dazu nur einer geringen Änderung der früheren Versuchseinrichtung: Einer der beiden weißen Sektoren wurde — nach Ausschaltung des Elektromotors — so festgestellt, daß er genau die Hälfte unseres kreisförmigen fovealen Gesichtsfelds einnahm, während die andere erfüllt schien von dem gerade gewählten spektralen Licht; eine feine, freilich nicht ganz senkrechte, Linie schien dann die beiden gleichgroßen Felder zu trennen. Die Helligkeitsvergleiche geschah in folgender Weise: Der Beobachter begann den Vergleich der beiden Felder mit einer Intensität des farbigen Lichts bei der für ihn kein Zweifel bestand, daß es dunkler erscheine als das Mischlicht in der anderen Hälfte des Gesichtsfelds. Er vergrößerte nun sukzessive (ohne Ermüdung herbeizuführen) den Lichtspalt so lange, bis sein Urteil über die Helligkeitsungleichheit unsicher wurde. In ganz analoger Weise verfuhr er dann, von einem unzweifelhaft zu hellem Licht ausgehend und abwärts steigend. Für jedes Licht wurde durch dieses aufsteigende und absteigende Verfahren je dreimal die „obere“ und dreimal die „untere Schwelle zweifelloser Helligkeitsverschiedenheit“ festgestellt. Aus beiden durchschnittlichen Schwellen wurde das Mittel genommen.

Die Anordnung der Tabelle II entspricht im übrigen ganz der für Tabelle I geschilderten.

Tabelle II. 2. März 1904.

Wellenlänge in $\mu\mu$	Protanop		Anomaler Trichromat II. Typus	
	Mittel aus der oberen u. unteren Schwelle zweifelloser Helligkeitsverschiedenheit, in Spaltbreiten	Größe des Gebiets zw. den Schwellen in % des Mittels	Mittel aus der oberen u. unteren Schwelle zweifelloser Helligkeitsverschiedenheit, in Spaltbreiten	Größe des Gebiets zw. den Schwellen in % des Mittels
649,0	148	7	144,4	8
622,7	52,1	7	44,8	6,6
604,2	38,3	9	35,2	14
589,3	13,4	4	12,8	5,7
559,5	9,9	2,7	9,8	6
534,1	11,9	2,5	11,0	4,5
511,9	24,2	4,5	20,5	3
499,2	83,0	3	45,1	3,5
494,5	—	—	54,5	7

Resultat: Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß die Verteilung der scheinbaren Helligkeit bis zu $\lambda = 511,9 \mu\mu$ für beide Beobachter nahezu dieselbe ist. Auch hier tritt in charakteristischer Weise die Abweichung vom Normalen zutage: Während für den Normalen bekanntlich das Licht der Natriumlinie annähernd die hellste Stelle im Spektrum bildet, liegt in den beiden zu vergleichenden Systemen das Helligkeitsmaximum in übereinstimmender Weise nach Grün hin verschoben. Auch im Speziellen zeigt der Vergleich beider Reihen miteinander eine weitgehende Übereinstimmung der Verteilung. (Die absoluten Zahlen des Protanopen sind durchweg um ein wenig niedriger.) Wie in den Reihen der Flimmerwerte tritt jedoch auch bei $\lambda = 499,2 \mu\mu$ eine stärkere Abweichung zutage, die auch hier auf eine akzidentelle individuelle Ursache (die Verschiedenheit der Makularingierung) zum Teil wenigstens zurückgeführt werden muß. In der Tat zeigt sich der individuelle Charakter dieser Abweichung sogleich darin, daß ein beliebig gewählter anderer „Rotblinder“ (Dr. KARPLUS) diese Abweichung von unserem Trichromaten im entgegengesetzten Sinne — bei sonstiger Übereinstimmung — aufweist. Aus den weiter unten dargestellten Kurven ist dies Verhältnis unmittelbar zu sehen. Wir kommen also auch hier zu dem Ergebnis: Hinsichtlich der Helligkeitsverteilung im Spektrum stimmt der protanopische Typus der Dichromaten mit dem zweiten Typus der anomalen Trichromaten überein.

III. Aufgabe.

Vergleich der Verteilung der Flimmerwerte mit der Verteilung der scheinbaren Helligkeiten.

Die beiden Paare von Wertreihen haben, wie schon die übereinstimmende Lage des Maximums bei $\lambda = 559,5 \mu\mu$ andeutete und wie ein Vergleich von Tab. I mit Tab. II weiterhin lehrt, wesentlich dieselbe funktionale Beziehung zur Wellenlänge.

Um diese Übereinstimmung deutlicher zur Anschauung zu bringen und ihr zugleich eine etwas allgemeinere Bedeutung zu geben ist die folgende kurvenmäßige Darstellung ausgeführt:

1. Die Helligkeitskurve von KARPLUS¹, wie er sie für sein

¹ SIGMAR KARPLUS: Beitrag zur Lehre von den Gesichtsempfindungen. (Dissertation.) Berlin 1902. KARPLUS fand diese Kurve ziemlich übereinstimmend mit seiner durch die VIERORDTSche Methode erhaltenen.

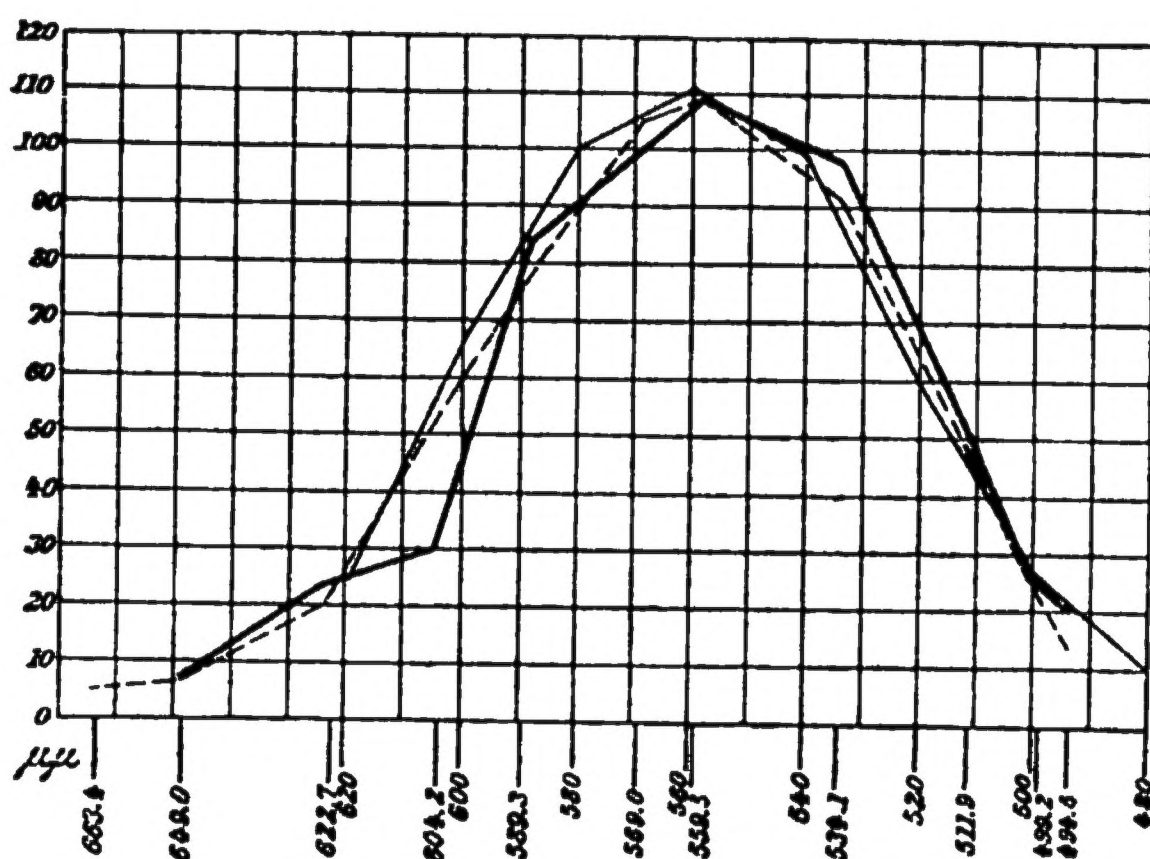
protanopisches Auge durch direkte „heterochrome Photometrie“ in einem dem unsern ähnlichen Auerlichtspektrum (unter A. KÖNIG) gewonnen hatte.

2. Die Helligkeitskurve des anomalen Trichromaten nach Tab. II.

3. Die Kurve der Flimmerwerte desselben Beobachters nach Tab. I.

Die Ordinaten der Kurven 2 und 3 wurden derart festgestellt, daß wir den KARPLUSSchen Maßstab benutzend, dem kleinsten Spaltwert unserer Tabelle, dessen Lage übrigens zusammenfiel mit dem Helligkeitsmaximum der KARPLUSSchen Bestimmungen den Helligkeitswert 109 willkürlich erteilten. Die übrigen Ordinatenwerte ergaben sich hiernach umgekehrt proportional der gefundenen Spaltbreite.

Fig. 1.



— — — — — Verteilung der Flimmerwerte für den zweiten Typus des anomalen Trichromaten (LEVY).

————— Verteilung der Helligkeiten für denselben Beobachter.

————— Verteilung der Helligkeiten für den Protanopen (nach KARPLUS).

Resultat: Die Kurve der Flimmerwerte unseres Trichromaten stimmt mit dessen Helligkeitskurve — von den irregulären Überschneidungen abgesehen — gut überein, in noch viel höherem Maße aber mit der älteren und exakteren Helligkeitskurve des Protanopen KARPLUS.

Nach alledem glauben wir für unsere Farbensysteme wenigstens und innerhalb der angegebenen Grenzen den Satz aufstellen zu

können: Die Bestimmung der relativen Flimmerwerte für die helladaptierte Netzhautmitte gibt ein zutreffendes Bild von den daselbst geltenden relativen Helligkeiten derselben Strahlungen.

Schluss.

Wir fanden: Zwei hinsichtlich des Aufbaues ihrer Farbensysteme prinzipiell verschiedene Beobachter, ein Dichromat und Trichromat, weichen in der Beurteilung der Helligkeiten spektraler Lichter in gleichem Sinne ab von normalen und sog. grünblinden Beobachtern, stimmen aber untereinander im wesentlichen überein. Es folgt daraus im Sinne der Komponententheorien ganz allgemein, daß die die Helligkeit (im Hellauge) bestimmenden Komponenten in beiden Systemen dieselben und von gleicher Art sein müssen, in den anderen Systemen aber die Beteiligung der Komponenten eine andere sein muß.

Unter dem speziellen Gesichtspunkt der YOUNG-HELMHOLTZschen Dreikomponententheorie betrachtet in der Form, zu der sie sich heute entwickelt hat, ergibt sich hieraus Folgendes:

Da im protanopischen Reduktionssystem des Normalen nur die Grün- und Blaukomponente wirksam ist, kann jener den beiden untersuchten Systemen gemeinsame „Helligkeitsfaktor“ nur in diesen beiden Komponenten gesucht werden. Da aber die Blaukomponente, soweit sie überhaupt die Helligkeit mitbestimmt¹, in dem größten Teile des hier untersuchten Spektralgebiets nach v. KRIES und W. NAGEL² nicht merklich beteiligt sein kann, kommen wir zu dem Schluss, daß die Grünkomponente den gemeinsamen „Helligkeitsfaktor“ enthält. Diese Folgerung setzt freilich die gleiche Beschaffenheit der Grünkomponente in beiden Systemen voraus, verlangt also, daß die Anomalie des trichromatischen Systems nicht die Grünkomponente betreffe. Tatsächlich erschien es schon nach den Untersuchungen meiner Dissertation wahrscheinlich,

¹ Schon KÖNIG kam zu der Folgerung, „daß die Helligkeit einer Farbenempfindung jedenfalls nur sehr unwesentlich von dem Blauwert des betreffenden Lichtes abhängt“. *Beiträge zur Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane*, H. v. HELMHOLTZ als Festgruß dargebracht. 1891. § 10, Anm.

² v. KRIES u. W. NAGEL: Einfluß von Lichtstärke und Adaptation etc. *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane* 12, S. 1 ff.

daß lediglich eine abnorme Beschaffenheit der Rotkomponente vorliege. Dies und damit unsere Voraussetzung kann nun durch eine neuere Feststellung als erwiesen gelten: Gleichungen, die sich aus einem Gemisch von spektralem Rot und Grün einerseits, einem homogenen gelben Licht andererseits mit helladaptiertem Auge herstellte, wurden nämlich von unserem Rotblinden als zutreffend anerkannt, vom Grünblinden dagegen nicht.

Da ferner die Peripheriewerte nach POLIMANTI wesentlich dieselbe Verteilung im Spektrum haben wie die Flimmerwerte desselben Beobachters und da wiederum die Verteilung der Flimmerwerte mit der der scheinbaren Helligkeiten (bei ungleicher Farbe) übereinstimmend gefunden wurde, so kommen wir zu dem Schluß: In beiden Farbensystemen wird die Verteilung der Peripheriewerte, der Flimmerwerte und der scheinbaren Helligkeiten der Farben innerhalb der angegebenen Grenzen bei Helladaptation lediglich durch das Maß bestimmt, in welchem die jeweilige Strahlung die Grünkomponente affiziert.

Ganz in Übereinstimmung mit diesem Resultat steht die von BRODHUN¹ angegebene tatsächliche Feststellung, daß die spektrale Helligkeitskurve (gewonnen bei einer das PURKINJÉSche Phänomen ausschließenden Lichtstärke) des „rotblinden“ RITTER übereinstimmt, mit der spektralen Erregbarkeitskurve seiner „W-Komponente“ d. h. der Grünkomponente. —

Den Herren, welche mich in meinen Experimenten unterstützten, insbesondere Herrn cand. med. MAX COHN, bin ich sehr zu Dank verpflichtet. Herrn Prof. Dr. W. A. NAGEL habe ich außerdem noch zu danken für die freundliche Beratung, die er mir hat zuteil werden lassen.

¹ l. c.

(Eingegangen am 15. April 1904.)
