

Über die Gültigkeit von NEWTONs Farbenmischungsgesetz.

Von

EMIL TONN.

Es ist eine bekannte Thatsache, daß die Farben der Gegenstände ihren Ton ändern, wenn die Intensität der Beleuchtung geändert wird. Dasselbe Faktum ist auch für die reinen Farben des Spektrums mehrfach beobachtet worden.

Wenn man nun auf zwei verschiedene Weisen durch Mischung von Spektralfarben zwei genau gleichfarbige Felder erhalten hat und dann gleichmäßig für beide Felder die Intensität der Beleuchtung ändert, so ändern nach dem oben Gesagten beide Felder ihre Farbe; aber es entsteht die Frage: Wird diese Farbenänderung für beide Felder genau die nämliche sein? oder in der Sprache der Mathematik: Wird die Farbgleichung bestehen bleiben, wenn sie auf beiden Seiten mit derselben, aber beliebigen Zahl multipliziert oder dividiert wird?

Da nun die Multiplikation nur ein spezieller Fall der Addition ist, so ist die gestellte Frage nur ein spezieller Fall der allgemeineren Frage, ob gleich aussehende Farben gemischt gleich aussehende Mischungen geben.

Daß diese Frage zu bejahen sei, galt früheren Forschern für so ausgemacht, daß z. B. H. GRASSMANN¹ dem Beweise für die Richtigkeit des NEWTONschen Farbenmischungsgesetzes als dritte Voraussetzung den Satz zu Grunde legte, daß „zwei Farben, deren jede konstanten Farbenton, konstante Farbenintensität und konstante Intensität des beigemischten Weiß

¹ H. GRASSMANN, *Pogg. Ann.* Bd. 89. S. 69. 1853.

hat, auch konstante Farbmischung geben, gleichviel aus welchen Farben jene zusammengesetzt seien“.

Nun ist aber inzwischen eine Reihe von Untersuchungen veröffentlicht worden, die GRASSMANN'S dritte Voraussetzung und damit auch die Gültigkeit des Farbmischungsgesetzes erschütterten durch den Nachweis, daß bei Intensitätsveränderungen ursprünglich bestehende Farbgleichungen zu Farbenungleichungen wurden. Doch fanden diese Ergebnisse nicht allgemeine Geltung, von Hrn. HERING¹ sogar scharfe Zurückweisung; er erklärte: „Wenn heute jemand zu beweisen versuchen würde, daß die Atomgewichte sich mit dem absoluten Gewicht ändern, so könnte dies für den Chemiker nicht weniger überraschend sein, als die Behauptungen . . . für den Physiologen sind. Denn wären sie richtig, so müßte, wie dort die Chemie, so hier die Lehre vom Farbensinn wieder von vorn beginnen.“

Bei diesem Stande der Sache waren neue Untersuchungen erwünscht. Auf Anregung und mit gütiger Unterstützung des Herrn Professor KÖNIG unternahm es in den Jahren 1887 und 1888 der Verfasser, im Physikalischen Institut zu Berlin neue Versuchsreihen anzustellen. Die Veröffentlichung der Resultate hat sich leider sehr verzögert; doch sind inzwischen keine neueren Untersuchungen veröffentlicht worden, die eine endgiltige Entscheidung hätten herbeiführen können, wie aus der historischen Übersicht, die Hr. BRODHUN in *dieser Zeitschrift*, Bd. V, S. 323, gegeben hat, ersichtlich ist, so daß also die vorliegende Mitteilung noch immer als zeitgemäß erscheinen kann. Auf eine seitdem erschienene hierauf bezügliche Abhandlung des Hrn. E. HERING² wird weiter unten eingegangen werden.

Der Apparat.

Das Prinzip des von mir benutzten HELMHOLTZ'schen Farbmischapparates ist schon von Hrn. BRODHUN³ und den Hrn. A. KÖNIG und C. DIETERICI⁴ auseinandergesetzt worden. Der

¹ E. HERING, Über individuelle Verschiedenheiten des Farbensinnes. *Lotos*. Neue Folge Bd. VI. 1885. Auch separat erschienen. Prag. 1885.

² E. HERING, *Pflügers Archiv*. Bd. 54. S. 277. 1893.

³ E. BRODHUN, *Beiträge zur Farbenlehre*. Inaug.-Diss. Berlin 1887.

⁴ A. KÖNIG und C. DIETERICI, *Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum*. Hamburg

Apparat ist ein Doppelspektroskop mit gleichzeitigem Prisma, zwei um die Achse desselben drehbaren Kollimatoren und einem Fernrohr, dessen Achse in der Richtung einer Ecke des Prismadurchschnittes liegt. In den Brennpunkten der Objektive aller drei Rohre sind Spalte angebracht, von denen diejenigen der Kollimatoren in gleicher Weise mit bilateral beweglichen Schneiden versehen sind, während der dritte eigenartig gebaut ist. Bei den eigentlichen Versuchen wird das Okular des Fernrohres entfernt; das Licht, das durch jeden der Kollimatorspalte geht, giebt ein Spektrum in der Ebene des Okularspaltes, aus dem durch den letzteren ein Streifen ausgeschnitten wird. Man sieht, wenn das Auge nahe an den Spalt gebracht wird, die beiden Prismenflächen erleuchtet durch das Licht, welches durch sie gebrochen gerade nach dem Spalt gelangt. Die Farbe derselben ändert sich mit der Stellung der Kollimatoren. Durch einen in jedem Kollimator verschiebbaren achromatisierten Doppelspath entstehen infolge der Doppelbrechung statt eines jeden der beiden Spektren zwei neue senkrecht zu einander polarisierte Spektren, die aufeinanderfallen, wenn der Spath am Spaltende steht, und mit dem Näherrücken des Spathes an das Objektivende sich so übereinander fortschieben, daß jede Farbe des einen mit jeder Farbe des anderen Spektrums zur Mischung gebracht werden kann. Zwischen jedem Spalt und der zugehörigen Lampe befindet sich ein NICOLSches Prisma, durch welches die Komponenten in verschiedener Menge miteinander gemischt werden können. Man hat also zur Vergleichung zwei nebeneinanderliegende, gleichmäßig gefärbte Felder, die durch monochromatisches oder gemischtes Licht in durch die Spalte geregelter Helligkeit leuchten.

Der bei den mitzuteilenden Untersuchungen benutzte, von der Firma F. Schmidt und Haensch in Berlin neu gebaute Apparat war nach Abstellung einiger Mängel dem früheren von den Hrn. A. KÖNIG, C. DIETERICI und E. BRODHUN benutzten Apparate weit überlegen. Seine hauptsächlichen Vorteile sind folgende: Die Gaslampen, Dreiflambrenner, deren geschwärmzte Thoncyliner in Flammenhöhe je eine Konvexlinse besitzen, die

ihren Brennpunkt in der mittleren Flamme hat, sind an den Kollimatoren selbst befestigt und behalten also diesen gegenüber immer dieselbe Stellung. Zwischen ihnen und den erwähnten Nicolschen Prismen sind Alaunkästchen angebracht, um die ultraroten Wärmestrahlen von dem Apparat abzuhalten. Die Beobachtungsfelder haben die Gestalt zweier Halbkreise, die nur durch eine schwache dunkle Linie getrennt sind, so daß die Einstellung auf ihre Gleichheit sehr genau ausgeführt werden kann.

Als sehr wertvolle Verbesserung ist noch zu erwähnen, daß statt des früher unveränderlichen Okularspaltes jetzt ein Spalt angebracht ist, der sowohl in vertikaler wie horizontaler Richtung durch bilateral bewegliche Schneiden verbreitert oder verengert werden kann. Die jedesmalige Weite wird durch Zeiger angegeben, die über einer kleinen Skala sich bewegen. Die Skalenteile waren vor den definitiven Versuchsreihen mit Hülfe eines Mikroskops ausgewertet worden.

Da das Tischchen, über dem die Kollimatoren sich bewegen, nicht groß genug ist, um eine hinreichend genaue Kreisteilung zu ermöglichen, so ist die alte Methode zur Bestimmung der Lage der Kollimatoren und damit der benutzten Farben beibehalten worden. Es sind nämlich auf den Kollimatoren kleine Spiegel angebracht, in denen man durch Fernrohre mit Fadenkreuz eine Millimeterskala gespiegelt sieht. Mit Benutzung des Okulars können durch Drehung der Kollimatoren bekannte Linien (z. B. *Na*, *Li_a* etc.) eingestellt und für die entsprechende Lage der Kollimatoren mit Hülfe der Fernrohre die zugehörigen Skalenteile aufgesucht werden. Die mittlere Wellenlänge des die Fläche färbenden Lichtes konnte dann aus dem abgelesenen Skalenteilstrich berechnet werden mittelst der Formel

$$T = A + \frac{B}{\lambda^2},$$

wo T den Skalenteil, λ die Wellenlänge und A und B zwei Konstanten bedeuten, die aus den Werten von T und λ für die nächsten beobachteten hellen Linien berechnet waren.

Der Apparat und die Fernrohre sind auf einem festen steinernen Pfeiler aufgekittet, die Skala ist an der Wand befestigt. Vor Beginn und nach Beendigung einer Versuchs-

reihe wurden die Skalenteile der Linie Na oder Li_α kontrolliert. Ebenso wurden täglich die Nullpunkte der Spalte bestimmt.

Das System der Farbenblinden.¹

Im Spektrum der Farbenblinden giebt es eine Stelle (den neutralen Punkt), deren Farbe gleich dem Gemisch aller Farben des Spektrums, also weiß ist. Von diesem Punkte aus nach dem langwelligen Spektrumende zu haben die Farben den Charakter des „Warmen“, und nach dem kurzwelligen Ende den des „Kühlen, Kalten“. Zunächst glaubt der Farbenblinde, daß seine warmen Farben, also das Rot, Orange, Gelb, Grün der Normalsichtigen auch für ihn voneinander spezifisch verschieden sind und ebenso die kalten Farben; doch belehren ihn einige Versuche 1. darüber, daß an jedem Ende eine Region („Endstrecke“) von Farbennüancen besteht, die alle durch Änderung der objektiven Intensität ineinander überzuführen sind, und 2. darüber, daß die übrigen Farben der warmen Spektrumseite, das sog. Orange, Gelb u. s. w., durch Zumischen von Weiß zur warmen Elementarfarbe, dagegen das Indigo, Cyan durch Zumischen von Weiß zur kalten entstehen können. In den „Endstrecken“ sind die Elementarfarben am gesättigtsten; sie werden in der „Mittelstrecke“ immer weißlicher, je näher man dem neutralen Punkte kommt, in dem sie durch Weiß ineinander übergehen. Die Farbenblinden können alle Farben ihrer Mittelstrecke aber auch durch Mischen der warmen und kalten Elementarfarbe erhalten; aus diesem Grunde werden sie „Dichromaten“ genannt. Schon A. SEEBECK hat 1837 zwei Klassen derselben unterschieden. Charakteristische Unterschiede beider Klassen werden später die Elementarempfindungskurven zeigen; doch läßt sich schon hier bemerken, daß bei der „ersten Klasse“, den „Grünblinden“, die Intensitätsverhältnisse der Farben im Spektrum denen der Normalsichtigen gleichen, während der „zweiten Klasse“, den „Rotblinden“, das langwellige Spektrumende dunkler und verkürzt erscheint.

Die Farbenempfindungen des Dichromaten sowohl als des Normalsichtigen sind wie alle Empfindungen qualitativ unter-

¹ Die im Folgenden benutzten Bezeichnungen: Endstrecke, Elementarfarbe u. s. w. sind der oben erwähnten Abhandlung der Hrn. A. KÖNIG und C. DIETERICI entnommen. Es wird daher wegen ihrer Definition auf diese Abhandlung verwiesen.

einander verschieden. Da sich nun alle Farbennüancen des Farbenblinden durch objektiv zu regulierende Mischung je einer Farbe der warmen und kalten Endstrecke herstellen lassen, so ist die für jede exakte Untersuchung erforderliche Möglichkeit gegeben, qualitative Verschiedenheiten durch quantitative zu ersetzen. Die Farbe des Dichromaten an jeder beliebigen Spektrumstelle λ ist genau bestimmt, wenn angegeben wird, wie stark in einer gleich aussehenden Mischung von bestimmten Farben λ_1 und λ_2 der Endstrecke die Intensität der Komponenten W_λ und K_λ , verglichen mit ihrer eigentlichen Spektralintensität W_{λ_1} und K_{λ_2} , wie groß also

$$a = \frac{W_\lambda}{W_{\lambda_1}} \text{ und } b = \frac{K_\lambda}{K_{\lambda_2}}$$

ist. Werden dann in einem Koordinatensystem, dessen Abscissen die Wellenlängen des Dispersionsspektrums sind, diese Größen a und b als Ordinaten eingetragen, so entstehen zwei Kurven, die nach dem Vorschlag von KÖNIG und DIETERICI „Elementar-empfindungskurven“ heißen mögen. Um leichter eine Vergleichung anstellen zu können, werden die Ordinaten so umgerechnet, daß die von den Kurven und der Abscissenachse begrenzten Flächen gleich sind:

$$\int K d\lambda = \int W d\lambda = 1000.$$

Dieses Verfahren ist auch in den Kurven der vorliegenden Abhandlung (Tafel I) angewandt worden; dagegen mußte hier die Umrechnung auf das Interferenzspektrum unterbleiben, weil bei den benutzten Intensitäten die Ordinaten sich nicht proportional änderten.

In Bezug auf die Berechnung der Kurven sei noch folgendes bemerkt: Als Komponenten sind bei allen Mischungsversuchen von Farbenblinden die Spektralfarben von der Wellenlänge $\lambda_1 = 645 \mu\mu$ und $\lambda_2 = 435 \mu\mu$ benutzt worden. Der linke Kollimator und sein Doppelspath wurden immer so eingestellt, daß die rechte Hälfte des Gesichtsfeldes durch ein Gemisch dieser Farben erhellt war, während die linke durch Drehen des rechten Kollimatorrohres (bei endständigem Doppelspath, Nullage des zugehörigen NICOLSchen Prisma und konstanter Spaltbreite s)

monochromatisches Licht aus verschiedenen Stellen des Spektrums aufwies. Durch Drehen des NICOLSchen Prisma im linken Kollimator um den Winkel α wurde die Intensität der Komponenten und durch Änderung des linken Kollimatorspaltes s_1 die Intensität der Mischung so reguliert, daß Gleichheit beider Felder eintrat. Aus diesen Größen α , s und s_1 werden die Werte a und b bestimmt durch die Gleichungen

$$a = \frac{s_1}{s} \cdot \cos^2 \alpha$$

und

$$b = \frac{s_1}{s} \cdot \sin^2 \alpha.$$

Ebenso wie die Breite des rechten Kollimatorspaltes blieb diejenige des Okularspaltes für dieselbe Versuchsreihe ungeändert. Durch diese Spalte ist die Intensität des monochromatischen Lichtes für eine Versuchsreihe objektiv festgelegt; sie ist, subjektiv betrachtet, für die verschiedenen Stellen des Spektrums nicht dieselbe, und es war deshalb in Erwägung gezogen worden, ob nicht besser nach dem Vorgang VAN DER WEYDES der Spalt auf der Mischungsseite konstant zu erhalten sei. Im allgemeinen werden aber bei der letzteren Methode die Komponenten verschiedene Helligkeit haben und daher auch jeder neuen Mischung eine andere subjektive Intensität geben. Sollten aber für einen Farbenblinden zwei gleich helle Komponenten gewählt sein, so würden dieselben Komponenten für einen Dichromaten der anderen Klasse ganz verschiedene Helligkeit haben. Für die Untersuchung eines trichromatischen Systems würden die Schwierigkeiten noch größer sein. Deshalb wurde von der VAN DER WEYDESchen Methode Abstand genommen und, wie oben angegeben, für das monochromatische Licht konstante Spaltbreite festgehalten.

Was nun die hier ausgeführten Änderungen der Intensität anbetrifft, so sind ihnen durch die Natur der Spalte Grenzen gesteckt: Bei zu großer Breite der Kollimatorspalte werden die Felder ungleichmäßig gefärbt; bei zu geringer Breite des Okularspaltes treten Interferenzstreifen auf. Der Okularspalt darf weder in horizontaler noch in vertikaler Richtung so weit geöffnet werden, daß der Pupillendurchmesser übertroffen wird.

Wenn die niedrigste Intensität, bei der beobachtet wurde, gleich 1 gesetzt wird, dann ist die höchste 240. Die letztere ist die gewöhnliche Intensität, bei der wohl die meisten Farbengleichungen hergestellt sind; die Intensität, bei der die Hrn. A. KÖNIG und C. DIETERICI ihre oben erwähnten Untersuchungen angestellt haben, liegt ihr jedenfalls sehr nahe.

Bei den Intensitäten 1, 2, 10, 30, 60 und 240 ist von Hrn. Dr. R. RITTER, der auch schon früher Farbengleichungen bestimmt hat und ein sehr guter Beobachter ist, eine große Reihe von Einstellungen gemacht worden. Für seine Güte sei ihm auch hier herzlicher Dank ausgesprochen. In der Tabelle I sind die auf die oben angegebene Weise berechneten Werte der Ordinaten a und b angegeben. Wären die Farbengleichungen von der Intensität unabhängig, dann müßten für dieselbe Wellenlänge die Größen a und b der W - und K -Kurve auch für ganz verschiedene Intensitäten dieselben Werte behalten. Ein Blick auf die Tabelle zeigt aber, daß von einer Konstanz der Größen a und b nicht die Rede sein kann. Besonders auffallend sind die Änderungen bei der K -Kurve. Bei den Wellenlängen $\lambda = 590 \mu\mu$ bis $\lambda = 510 \mu\mu$ nehmen die Werte (von der Intensität 240 bis herab zur geringsten) beständig zu, bei $\lambda = 490 \mu\mu$ bis $\lambda = 435 \mu\mu$ ebenso regelmäÙig ab. Bei der Intensität 10 sind zwei vollständige Versuchsreihen durchgeführt und in der Tabelle angegeben worden. Aus den mitgeteilten Zahlen ist zu ersehen, wie weit Beobachtungsfehler auf das Resultat Einfluß haben können, und daß es ganz unmöglich ist, die großen Änderungen der a und b etwa auf solche Beobachtungsfehler zurückzuführen. Weniger groß sind die Veränderungen bei der W -Kurve, jedoch auch hier durch ihre Stetigkeit leicht zu erkennen, besonders bei den Wellenlängen $510 \mu\mu$ und $490 \mu\mu$; etwas abweichend sind die Werte der Intensität 2.

Ferner hatten die Hrn. HENZE und SCHULZ, die zu jener Zeit Primaner waren, die Güte, eine Reihe von Farbengleichungen herzustellen, wofür ihnen auch hier herzlicher Dank ausgesprochen sei.

Die Versuche wurden in derselben Weise wie bei Hrn. RITTER durchgeführt. Hrn. HENZES Farbensystem wurde bei den Intensitäten 1, 10, 30, 240, dasjenige des Hrn. SCHULZ bei den Helligkeiten 10 und 240 untersucht. Die in früher

Tabelle I.
Beobachter: Hr. R. RITTER.

Intensität	W ₂					K						
	240	60	30	10	2	1	240	60	30	10	2	1
645 μμ	2,33	1,96	1,47	1,40	1,31	1,85	1,44	0	0	0	0	0
630 "	4,09	3,33	2,80	—	—	3,02	2,29	0	0	—	—	—
620 "	—	—	4,46	—	—	—	—	—	0,160	—	—	—
610 "	7,84	7,26	6,50	6,31	6,11	6,73	5,47	0,060	0,903	0,245	0,159	0,831
600 "	—	—	8,66	—	—	—	—	—	1,40	—	—	—
590 "	11,38	10,92	10,56	10,27	9,97	10,75	9,14	0,302	2,24	2,76	2,33	2,37
580 "	—	—	12,04	—	—	—	—	—	2,12	—	—	—
570 "	12,00	12,36	12,35	12,01	12,04	11,90	11,28	0,708	2,69	4,94	4,89	6,53
560 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,65
550 "	9,96	10,27	10,12	9,96	10,32	9,66	10,08	1,45	3,24	6,82	6,64	8,72
540 "	—	—	8,69	—	—	—	—	—	—	—	—	—
530 "	6,32	6,70	6,98	6,89	6,97	6,64	7,68	1,87	3,88	6,69	6,57	8,54
520 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
510 "	2,71	3,26	3,31	—	3,70	3,49	4,38	3,25	4,70	5,28	6,19	7,36
500 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
490 "	0,907	1,05	1,04	1,38	—	1,56	2,14	6,26	5,85	4,93	4,76	4,50
480 "	—	0,551	—	—	—	—	—	—	6,58	—	—	—
470 "	0,216	0,293	0,413	0,555	0,574	0,621	0	8,60	6,95	5,78	3,99	2,89
460 "	—	0,135	—	—	—	—	—	—	6,03	—	—	—
450 "	0,021	0,035	0,073	0,047	0,262	0	0	6,06	4,49	3,73	2,32	1,38
435 "	0	0	0	0	0	0	0	3,60	1,84	1,80	1,18	0,296

Tabelle II.
Beobachter: die Hrn. Henze und Schulz.

Beobachter	Henze										Schulz					
	W_1					K					W_1			K		
	240	30	10	1	240	30	10	1	240	10	240	10	240	10	240	10
Intensität																
645 $\mu\mu$	5,50	5,77	6,57	5,86	0	0	0	0	5,48	6,50	0	0				
630 "	—	—	—	8,28	—	—	—	0,182	—	—	—	—	—	—	—	—
620 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
610 "	13,48	13,37	12,64	11,99	0,848	0,768	0,627	0,853	16,59	14,30	0,680	0,757				
600 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
590 "	13,29	13,04	12,62	10,93	1,05	2,35	1,50	3,45	13,62	11,21	0,925	3,58				
580 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
570 "	10,48	10,29	9,73	8,82	0,90	3,84	5,86	7,26	9,30	8,72	1,53	5,39				
560 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
550 "	6,49	6,06	6,26	6,50	1,02	4,82	6,44	8,85	5,44	5,72	1,95	6,73				
540 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
530 "	3,14	3,27	3,30	4,25	1,96	5,71	6,87	9,82	2,74	3,32	2,07	7,24				
520 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
510 "	1,24	1,28	1,84	2,53	3,40	4,97	6,03	6,28	0,983	1,81	2,56	6,56				
500 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
490 "	0,308	0,513	0,781	1,10	5,98	5,10	5,35	4,08	0,347	0,759	5,85	5,25				
480 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
470 "	0,066	—	0,273	0,317	8,24	5,25	4,04	2,12	0,058	0,298	8,10	3,78				
460 "	0,015	—	—	—	7,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
450 "	0	0	0	0	6,10	3,65	2,03	0,974	0	0	6,10	1,97				
435 "	0	0	0	0	3,44	1,92	1,29	0,501	0	0	3,76	0,661				

beschriebener Weise berechneten Werte der a und b sind in der Tabelle II zusammengestellt. Außerdem sind noch bei den Intensitäten 240 und 10 die für die Wellenlänge $660 \mu\mu$ gültigen Werte, welche durch Helligkeitsvergleichen gefunden wurden, angegeben. Da beide Herren nicht dieselbe groſse Übung im Farbenvergleichen hatten, die Hr. RITTER besaß, so waren ihre Einstellungen nicht von derselben Genauigkeit; einzelne Unregelmäßigkeiten im Verlaufe der erhaltenen Kurven sind wohl hieraus zu erklären.

Um die W -Ordinaten der drei Farbenblinden bei den verschiedenen Intensitäten besser vergleichen zu können, sind sie in der Tabelle III besonders zusammengestellt worden. (Für die Intensität 10 bei Hrn. RITTER die Mittel aus beiden Versuchsreihen.) Es fällt sofort in die Augen, daß die W -Kurven der Hrn. HENZE und SCHULZ untereinander sehr ähnlich, von derjenigen des Hrn. RITTER aber gänzlich verschieden sein müssen. Um die Übersichtlichkeit in dem Kurvengewirr der Tafel I nicht gänzlich verschwinden zu lassen, sind die beiden Kurven des Hrn. SCHULZ nicht mit eingezeichnet worden. Die W -Kurven des Hrn. HENZE haben ihr Maximum bei der Wellenlänge $605 \mu\mu$, also an derselben Stelle wie die W -Kurve des Hrn. BRODHUN,¹ während bei den RITTERschen W -Kurven der höchste Punkt zwischen den Wellenlängen $570 \mu\mu$ und $580 \mu\mu$, ungefähr $30 \mu\mu$ von dem ersteren entfernt, liegt.

Aus den Kurven ist ferner ersichtlich, daß für Hrn. RITTER das langwellige Spektrumende dunkler und verkürzt erscheint; wir haben in ihm daher einen Vertreter der Farbenblinden zweiter Klasse, während die anderen den Farbenblinden erster Klasse zuzurechnen sind. So verschieden nun auch im allgemeinen die W -Kurven der Hrn. RITTER und HENZE sind, so sind doch die durch Intensitätsverringern bewirkten Gestaltänderungen ganz analoge. Im besonderen ist hervorzuheben, daß, je kleiner die Intensität wird, desto auffallender das Maximum der Kurve sich verringert und ihr kurzwelliger Fuß sich hebt. Die von Hrn. BRODHUN im 5. Bd. *dieser Zeitschrift*, S. 332 veröffentlichten Kurven zeigen die eben be-

¹ EUGEN BRODHUN, Über die Gültigkeit des NEWTONSchen Farbenmischungsgesetzes bei dem sog. grünblinden Farbensystem. *Diese Zeitschrift*, Bd. V, S. 323. — Die Kurven sind auch in der oben citierten Abhandlung der Hrn. A. KÖNIG und C. DIETERICI enthalten.

sprochenen Eigenschaften nicht, wahrscheinlich weil die Komponenten nicht den Endstrecken entnommen sind.

Es müssen nun in ähnlicher Weise die *K*-Kurven miteinander verglichen werden. Die berechneten Werte ihrer Ordinaten sind zu leichterem Übersicht in Tab. IV. zusammengestellt worden. In der Kolumne für die Intensität 10 finden sich die Resultate von 2 Versuchsreihen des Hrn. RITTER und von je einer der Hrn. HENZE und SCHULZ. Es ist ersichtlich, daß von dem Mittel aus den 4 Zahlen für dieselbe Wellenlänge die Werte der Hrn. HENZE und SCHULZ im ganzen ungefähr dieselben Abweichungen zeigen, wie die Werte des Hrn. RITTER, daß mithin diese Abweichungen aus Beobachtungsfehlern und nicht aus wesentlichen Verschiedenheiten zu erklären sind.

Es ist damit auch für geringe Intensitäten die auffallende Übereinstimmung der *K*-Kurve für Farbenblinde nachgewiesen, die für die gewöhnliche Intensität von den Herren VAN DER WEYDE¹, KÖNIG und DIETERICI² konstatiert worden ist. Aus diesem Grunde sind in Tafel I für die verschiedenen Wellenlängen die Mittelwerte aus allen berechneten Werten derselben Intensität eingetragen. Die Figur zeigt nun, daß die *K*-Kurve in ganz erstaunlicher Weise ihre Gestalt ändert. Bei der höchsten Intensität liegt ihr Maximum etwa bei $475 \mu\mu$; bei Verringerung der Helligkeit fällt die Kurve an dieser Stelle, während ein neues Maximum ungefähr bei $535 \mu\mu$, also $60 \mu\mu$ entfernt, herauswächst. Eine ganz eigentümliche Gestalt mit zwei Buckeln zeigt die Kurve der Intensität 30. Hrn. BRODHUNS Kurve für die geringste Intensität zeigt das Maximum ungefähr an der hier mitgeteilten Stelle. Wäre seine Kurve für die Spaltbreite 5 durch den für $500 \mu\mu$ wirklich gefundenen Wert gezogen worden, dann würde auch sie eine ähnliche Gestalt ergeben, wie diejenige für unsere Intensität 30. Von der auf der Tafel I punktiert gezeichneten Kurve wird an einer späteren Stelle zu sprechen sein.

Der neutrale Punkt der Farbenblinden.

Experimentell wurde derselbe in der schon von Herrn KÖNIG³ beschriebenen Weise bestimmt: Die rechte Prismen-

¹ VAN DER WEYDE, *Methodisch Onderzoek der kleurstelsels van kleurblinden*, Dissertation, Utrecht, Dannenfelser. 1882.

² KÖNIG und DIETERICI, *Die Grundempfindungen etc.*

³ A. KÖNIG, *Gräfes Archiv*. Bd. 30 (2). S. 155. 1884.

Tabelle III. W-Kurve.

Intensität	240	60	30	10		2	1	240		30	10		1
				R.	R.			H.	Sch.		H.	Sch.	
Beobachter													
645 $\mu\mu$	2,33	1,96	1,47	1,35 1,40	1,31	1,85	1,44	5,50	5,48	5,77	6,57	6,50	5,86
630 "	4,09	3,33	2,80	—	—	3,02	2,29	—	—	—	—	—	8,28
620 "	—	—	4,46	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
610 "	7,84	7,26	6,50	6,21 6,31	6,11	6,73	5,47	13,48	16,59	13,37	12,64	14,30	11,99
600 "	—	—	8,66	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
590 "	11,38	10,92	10,56	10,12 10,27	9,97	10,75	9,14	13,29	13,62	13,04	12,62	11,21	10,93
580 "	—	—	12,04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
570 "	12,00	12,36	12,35	12,02 12,01	12,04	11,90	11,28	10,48	9,30	10,29	9,73	8,72	8,82
560 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
550 "	9,96	10,27	10,12	10,14 9,96	10,32	9,66	10,08	6,49	5,44	6,06	6,26	5,72	6,50
540 "	—	—	8,69	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
530 "	6,32	6,70	6,98	6,93 6,89	6,97	6,64	7,68	3,14	2,74	3,27	3,30	3,32	4,25
520 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
510 "	2,71	3,26	3,31	—	3,70	3,49	4,38	1,24	0,983	1,28	1,84	1,81	2,53
500 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
490 "	0,907	1,05	1,04	1,38	—	1,56	2,14	0,308	0,347	0,513	0,781	0,759	1,10
480 "	—	0,551	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
470 "	0,216	0,293	0,413	0,565 0,555	0,574	0,621	0	0,066	0,058	—	0,273	0,298	0,317
460 "	—	0,135	—	—	—	—	—	0,015	—	—	—	—	—
450 "	0,021	0,035	0,073	0,154 0,047	0,262	0	0	0	0	0	0	0	0
435 "	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle IV.

K-Kurve.

Mittel aus allen K-Ordinaten
für jede Intensität.

Intensität	240			60		30		10			2		1		240	60	30	10	2	1
	R.	H.	Sch.	R.	H.	R.	H.	R.	H.	Sch.	R.	H.	R.	H.						
645 $\mu\mu$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
630 "	0	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0	—	—	0,182
620 "	0,060	0,848	0,680	0,903	0,618	0,768	0,245	0,159	0,627	0,757	0,831	0,069	0,553	0,529	0,903	0,693	0,447	0,831	0,461	—
610 "	—	—	—	—	0,160	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,160	—	—	—
600 "	0,302	1,05	0,925	2,24	1,40	2,35	2,76	2,33	1,50	3,58	2,92	2,37	3,45	0,759	2,24	2,24	2,54	2,92	2,91	—
590 "	—	—	—	—	2,69	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
580 "	—	—	—	—	3,79	3,84	4,94	4,89	5,86	5,39	6,53	5,65	7,26	1,05	2,69	3,81	5,27	6,53	6,46	—
570 "	0,708	0,90	1,53	2,69	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
560 "	—	—	—	—	4,44	4,82	6,82	6,64	6,44	6,73	8,72	9,09	8,85	1,47	3,24	4,63	6,66	8,72	8,97	—
550 "	1,45	1,02	1,95	3,24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
540 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
530 "	1,87	1,96	2,07	3,88	5,30	5,71	6,69	6,57	6,87	7,24	8,54	9,88	9,82	1,97	3,88	5,50	6,84	8,54	9,85	—
520 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
510 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
500 "	3,25	3,40	2,56	4,70	5,28	4,97	—	6,19	6,03	6,56	6,64	7,36	6,28	3,07	4,70	5,12	6,26	6,64	6,82	—
490 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
480 "	6,26	5,98	5,85	5,85	4,93	5,10	4,76	—	5,35	5,25	4,51	4,50	4,08	6,03	5,85	5,01	5,12	4,51	4,29	—
470 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
460 "	8,60	8,24	8,10	6,03	5,78	5,25	3,99	4,70	4,04	3,78	3,05	2,89	2,12	8,31	6,95	5,51	4,13	3,05	2,50	—
450 "	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
440 "	6,06	6,10	6,10	4,49	3,73	3,65	2,32	2,57	2,03	1,97	1,38	0,926	0,974	6,09	4,49	3,69	2,22	1,38	0,950	—
435 "	3,60	3,44	3,75	1,84	1,80	1,92	1,18	1,22	1,29	0,651	0,432	0,296	0,501	3,60	1,84	1,86	1,09	0,432	0,398	—

fläche des Apparates war mit durch Magnesiumoxyd weißgefärbtem Papier belegt, das durch einen senkrecht dazu gestellten Triplexbrenner der früher beschriebenen Art beleuchtet wurde, während die linke Fläche durch monochromatisches Licht erhellt war. Der rechte Kollimator wurde dann gedreht, bis annähernd Licht von der Stelle des neutralen Punktes die linke Prismenfläche färbte; darauf wurde die senkrechte Entfernung der Flamme von der rechten Prismenfläche so geändert, daß beide Felder gleich hell erschienen. Darauf mußte durch Drehen des rechten Kollimators die genaue Einstellung auf Farbgleichheit geschehen. Trat dabei ein Helligkeitsunterschied auf, so mußte die Flammenentfernung und dann eventuell wieder die Lage des Kollimators geändert werden, bis beide Felder in Helligkeit und Färbung vollständig gleich waren. Die Intensität war wie bei den früheren Versuchen durch den Okular- und den rechten Kollimators spalt bestimmt. Für jede Intensität wurde eine Reihe von Bestimmungen gemacht, die dadurch umständlich und zeitraubend waren, daß die Stellung der Flamme zur Papierfläche kontrolliert werden mußte. Hr. RITTER erhielt als Wellenlänge λ_n des neutralen Punktes bei

Intensität:	1	2	10	30	45	60	240
λ_n	549,2	547,9	530,6	522,1	515	513,9	510,8

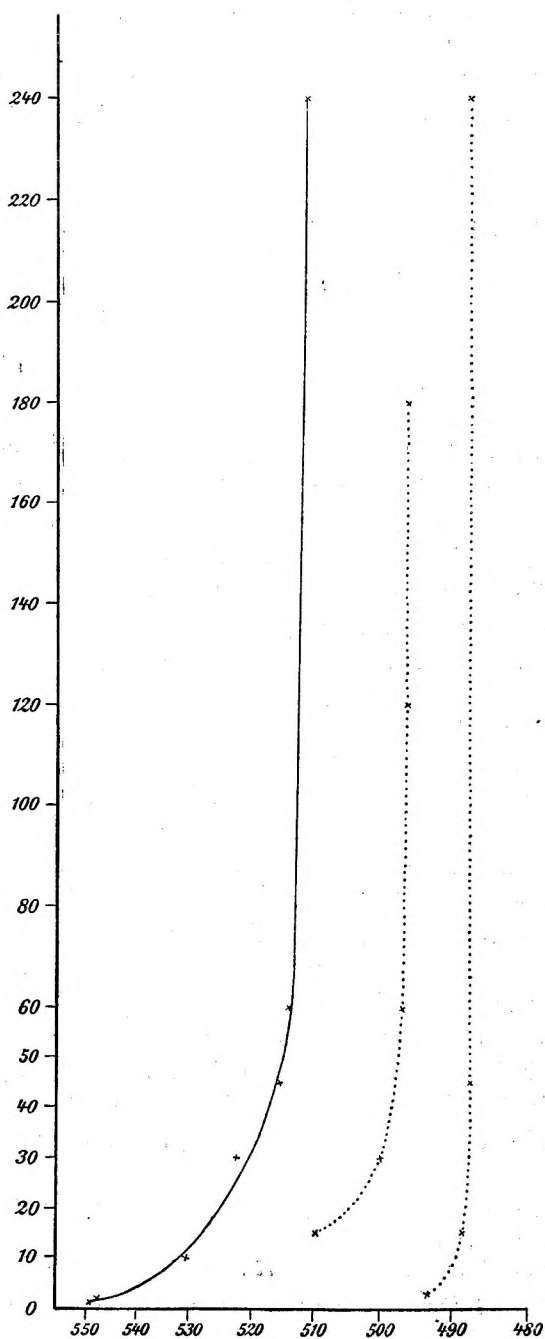
Es ist damit die von den Hrn. PREYER¹, VAN DER WEYDE², KÖNIG³ und BRODHUN⁴ beobachtete, von Hrn. E. HERING aber bestrittene Thatsache der Wanderung des neutralen Punktes im Spektrum bei Intensitätsänderungen von neuem bestätigt worden. Werden die Wellenlängen als Abscissen, die Intensitäten als Ordinaten eingetragen, so ergibt sich eine Kurve, die den von Hrn. KÖNIG für Wolkenlicht und von Hrn. BRODHUN für eine Mischfarbe aus zwei homogenen Lichtern gefundenen Kurven ähnlich ist. Diese drei Kurven enthält die Figur auf der folgenden Seite und zwar stellt die ausgezogene Kurve die Werte von λ_n dar, während die kürzere punktierte Kurve die von Hrn. KÖNIG

¹ W. PREYER, *Pflügers Archiv*, Bd. 25. S. 31. 1881. und *Über den Farben- und Temperatursinn, mit besonderer Rücksicht auf Farbenblindheit*. Bonn 1881.

² VAN DER WEYDE, *Methodisch Onderzoek der kleurstelsels van kleurblinden*.

³ A. KÖNIG, *Wied. Ann.* Bd. 22. S. 567. 1884. *Gräfes Archiv*, Bd. 30. Abt. 2. S. 155. 1884.

⁴ E. BRODHUN, *diese Zeitschrift*, Bd. V. S. 323.



erhaltenen Werte für die Wellenlängen des neutralen Punktes angiebt; die längere punktierte Kurve ist die von Hrn. BRODHUN in der genannten Weise erhaltene. Eine vollständige Übereinstimmung ist nicht zu erwarten, da das zur Bestimmung des neutralen Punktes benutzte Weiß und ebenso die gebrauchten Intensitätsgrade bei den Beobachtern verschieden waren. Aus allen Kurven ergibt sich, daß mit wachsender Intensität der neutrale Punkt nach dem kurzwelligen Spektrumende wandert, und zwar bei den niedrigen Intensitäten sehr viel schneller als bei den höheren; bei den höchsten (von Intensität 60 bis 240) ist das Vorrücken ganz minimal.

Es entsteht nun die Frage: Steht das durch Intensitätsveränderung bewirkte Vorrücken des neutralen Punktes mit den durch dieselbe Ursache hervorgebrachten Änderungen der Elementarempfindungskurven in einem kausalen Zusammenhange? Der neutrale Punkt ist diejenige Stelle des Spektrums, die vom Farbenblinden mit Weiß verwechselt wird. Weiß entsteht nun als Gemisch aller Spektralfarben; jede einzelne derselben kann aber durch Mischung einer warmen und einer kalten Komponente hergestellt werden; daher wird Weiß als Gemisch der Summe aller warmen und aller kalten Komponenten (der $\int Wd\lambda$ und $\int Kd\lambda$) aufzufassen sein, und im neutralen Licht müssen die W_{λ_n} und K_{λ_n} in demselben Verhältnis stehen, wie im weißen Licht die $\int Wd\lambda$ und $\int Kd\lambda$. In Tafel I sind nun die Kurven so gezeichnet, daß $\int Wd\lambda = \int Kd\lambda$ ist, daher müssen auch die W_{λ_n} und K_{λ_n} einander gleich sein, der neutrale Punkt also im Durchschnitt der W - und K -Kurve liegen. In der folgenden Tabelle sind für Hrn. RITTER die beobachteten Wellenlängen des neutralen Punktes λ_n und die Wellenlängen des Kurvenschnittpunktes λ_p für die einzelnen Intensitäten untereinander gestellt:

Intensität	1	2	10	30	60	240
λ_n	549,2	547,9	530,6	522,1	513,9	510,8
λ_p	545,2	544,8	528,4	522,5	517,2	512,7

In beiden Fällen ist mit wachsender Intensität ein Vorrücken nach dem kurzwelligen Spektrumende zu konstatieren.

Eine vollständige Übereinstimmung der entsprechenden Wellenlängen ist nicht vorhanden, aber auch nicht nötig; denn die oben angestellte theoretische Ableitung ist genau richtig nur unter der Voraussetzung, daß Farbengleichungen addiert wieder genau richtige Farbengleichungen geben, und daß eben diese Voraussetzung nicht der Wirklichkeit entspricht, ist das Ergebnis der mitgeteilten Farbmischungen. Es konnte daher nicht eine Übereinstimmung in den Zahlen der letzten Tabelle erwartet werden, wohl aber mußte für den Kurven-Durchschnittspunkt ein analoges Vorrücken nach dem kalten Ende wie für den neutralen Punkt verlangt werden, und das ist festgestellt.

Das trichromatische System.

Da sich hier in den beiden „Endstrecken“ des Spektrums alle Farbenshattierungen durch Änderungen der objektiven Intensität einer derselben herstellen lassen, so werden, wie bei den Farbenblinden, die hier erregten Empfindungen des Rot und Violett als Elementarempfindungen für unsere Betrachtung gewählt. Die nach der Mitte zu folgenden „Zwischenstrecken“ verhalten sich ähnlich wie die Mittelstrecke der Dichromaten. Die Farbentöne derselben sind mischbar aus einer Farbe der Endstrecke und einer anderen, die aber nicht diejenige der anderen Endstrecke sein kann, denn solche Mischungen zeigen nur Nuancen von Purpur. In der „Mittelstrecke“ der Normal-sichtigen braucht man zur Mischung drei Komponenten, außer denjenigen der Endstrecken R und V noch eine dritte, die durch G bezeichnet werden mag.

Durch Lord RAYLEIGH,¹ DONDERS,² KÖNIG und DIETERICI³ ist nachgewiesen worden, daß auch unter den Trichromaten zwei Klassen zu unterscheiden sind, von denen die eine (diejenige der anomalen Trichromaten) nicht viel mehr Vertreter hat, als die Klasse der Dichromaten.

Es haben die Herren KÖNIG und DIETERICI die schwierige Bestimmung der Elementarempfindungskurven für Trichromaten durchgeführt und gefunden, daß die V -Kurve für normale und

¹ RAYLEIGH, *Nature*. Vol. 25. S. 64. 1881.

² F. C. DONDERS. *Onderzoek etc.* 3^{de} Reek DVIII. Bl. 170, und *Du Bois-Reymonds Archiv f. Physiol.* 1884. S. 518.

³ KÖNIG und DIETERICI, *Die Grundempfindungen etc.*

anomale Trichromaten dieselbe Gestalt besitzt wie die *K*-Kurve der Dichromaten. Bleibt diese Übereinstimmung auch bei Intensitätsänderungen bestehen, dann kann auch für das trichromatische Farbensystem das NEWTONSche Farbenmischungsgesetz seine uneingeschränkte Gültigkeit nicht behalten. In der That hat schon Herr ALBERT¹ gezeigt, daß für sein trichromatisches System Farbengleichungen bei Intensitätsänderungen nicht bestehen blieben; er fand, daß bei Veränderung der Intensität ein homogenes Gelb rötlich, dagegen ein aus homogenem Rot und homogenem Grün gemischtes gleichfarbiges Gelb grünlich wird.

Hr. A. KÖNIG² bestätigte, daß eine bei mittlerer Intensität gültige Farbengleichung für Gelb bei niedriger nicht mehr richtig blieb, und zeigte weiter, daß in der Gleichung:

$$a'L_{670} + b'L_{520} = c'L_{580} + d'L_{475}$$

die Sättigung auf der linken Seite bei abnehmender Intensität mehr als auf der rechten verringert wird, ferner daß in der Gleichung:

$$a''L_{670} + b''L_{590} = L_{630}$$

bei abnehmender Intensität die Mischung weißlicher wird, dagegen die Gleichung:

$$a'''L_{475} + b'''L_{430} = L_{460}$$

bei allen Intensitäten bestehen bleibt.

Andererseits erklärten die Hrn. E. HERING³ und J. VON KRIES und BRAUNECK,⁴ daß in allen von ihnen beobachteten Fällen die Gleichheit beider Felder bei beliebiger Intensitätsveränderung vollkommen erhalten blieb.

Schon bei vorbereitenden Versuchen ist dagegen auch vom Verfasser beobachtet worden, daß bei hoher Intensität be-

¹ E. ALBERT, *Wied. Ann.* Bd. 16. S. 129. 1882.

² A. KÖNIG, *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin.* 1887. S. 311.

³ E. HERING, *Über individuelle Verschiedenheiten des Farbensinns.* 1885. *Lotos.* Neue Folge. Bd. 6.

⁴ J. VON KRIES und BRAUNECK, *Archiv f. Anat. u. Physiol., Physiol. Abt.* 1885. S. 79.

stehende Farbengleichungen bei Intensitätsverminderung die Probe nicht mehr bestanden, und zwar traten hauptsächlich Sättigungsunterschiede zwischen den beiden Feldern auf.

Die definitiven Versuchsreihen des Verfassers beschränkten sich auf eine bestimmte Gruppe von Farbenmischungen; sie betrafen die Mischung von Komplementärfarben zu Weiß bei verschiedenen Intensitäten.

Die Versuchsanordnung war die folgende:

Wie bei der Bestimmung des neutralen Punktes war die eine Prismenfläche (hier die linke) mit Papier belegt, das durch Magnesiumoxyd weiß gefärbt war. Die Intensität des Feldes wurde dadurch geändert, daß ein Triplexbrenner der Fläche senkrecht genähert oder von ihr entfernt wurde. Während der Doppelspath am Ende stand, wurde der linke Kollimator so eingestellt, daß die rechte Prismenfläche von dem Licht erleuchtet wurde, zu dem die Komplementärfarbe zu suchen war. Dann wurde der Doppelspath nach dem Objektiv zu bewegt und dadurch immer kurzwelligeres Licht zu dem ursprünglichen hinzugemischt. Durch Drehen des NICOLschen Prismas wurde für jede Mischung die Stärke der Komponenten geändert. Die Lage des Doppelspathes, des NICOLschen Prismas und der Lampe wurde so lange geändert, bis vollständige Gleichheit beider Felder hergestellt war. Darauf wurde auf einer längs des Kollimators angebrachten Skala die Stelle des Doppelspathes abgelesen. So wurden für jede Intensität und jede Komplementärfarbe eine Reihe von Gleichungen hergestellt. Aus den abgelesenen Skalenteilen wurde das Mittel genommen und der Spath an die berechnete Stelle gebracht. Nun kam es darauf an, die Wellenlängen der so erhaltenen Komplementärfarben zu bestimmen. Dazu mußte der weiße Belag von der linken Prismenfläche entfernt und dann der rechte Kollimator so eingestellt werden, daß Farbengleichung besteht zunächst, wenn der linke Nikol auf 0° , darauf, wenn er auf 90° steht; in beiden Fällen wurde eine Reihe von Einstellungen gemacht und mittelst Fernrohr und Spiegel auf der an der Wand befestigten Skala die Teilstriche abgelesen. Aus dem Mittelwert dieser Ablesungen ergab sich die Wellenlänge für jede der Komplementärfarben. Schon bei vorläufigen Versuchen zeigte sich, daß bei der Bestimmung der Komplementärfarbe zu Rot, nachdem bei einer mittleren

Intensität beide Flächen gleich weiß gemacht worden waren, bei Vergrößerung der Intensität die Mischung gelblicher, bei Verringerung bläulicher wurde, während eine Gleichung zwischen Weiß und einer Mischung aus Violett und seiner Komplementärfarbe bei Intensitätsänderungen nicht verändert wurde.

Für den Trichromaten entsteht dann immer die Empfindung Weiß, wenn die drei Elementarempfindungen zu einander in demselben Verhältnis stehen wie die Summe aller *R*-Empfindungen zur Summe der *G*-Empfindungen und zur Summe der *V*-Empfindungen im ganzen Spektrum, wenn sie sich also verhalten wie die Flächen der drei Elementarempfindungskurven. Die Kurven werden aber so reduziert, daß ihre Flächen gleich sind. Soll nun zu einem Rot der Endstrecke, in dem weder die *G*- noch die *V*-Empfindung zur Geltung kommt, die Komplementärfarbe gesucht werden, so kann sie nur an der Stelle des Spektrums liegen, an welcher *G*- und *V*-Empfindung gleich sind, die entsprechenden Kurven sich schneiden. In dem Fall, daß für alle Intensitätsgrade die *G*- mit der *W*₂-Empfindungskurve, die *V*- mit der *K*-Kurve zusammenfällt, müßten die Komplementärfarben zu Rot dieselbe Wellenlänge haben wie die neutrale Stelle der Farbenblinden zweiter Klasse. Diese Betrachtung ist aus denselben Gründen, die bei der Vergleichung des neutralen Punktes mit dem Durchschnitt der *W*₂- und *K*-Kurve aus der Inkonstanz der Farbgleichungen hergeleitet sind, nur annähernd richtig; dazu kommt, daß nach den Untersuchungen von KÖNIG und DIETERICI die *G*- mit der *W*₂-Kurve nicht zu identifizieren ist; man wird daher nur eine gewisse Übereinstimmung im Vorrücken der verglichenen Farben erwarten können.

In der folgenden Tabelle sind zum Vergleich gestellt die vom Verfasser beobachteten Wellenlängen der Komplementärfarben zu *Li*-Rot und die Wellenlängen der neutralen Farbe des Hrn. RITTER.

Intensität	1	10	30	60	240
λ der Komplementärfarbe zu <i>Li</i> α	551,8	527,7	519,0	515,7	510,1
λ des neutralen Punktes des Hrn. RITTER	549,2	530,6	522,1	513,9	510,8

Ähnlich wie beim neutralen Punkte ist also mit Verringerung der Intensität zunächst ein langsames und später ein immer schnelleres Vorrücken dieser Komplementärfarbe nach dem langwelligen Spektrumende zu konstatieren. Dieses Wandern muß aus Änderungen der *V*-Kurve erklärt werden, die denjenigen der *K*-Kurve ganz analog sind. Denn daß die *G*-Kurve und die *R*-Kurve nur geringe Veränderungen erleiden können, geht aus der Thatsache hervor, daß bei den benutzten Intensitäten eine Störung der Gleichung zwischen Weiß und dem Gemisch von Violett und seiner Komplementärfarbe, die annähernd im Schnittpunkt der *R*- und *G*-Kurve liegen muß, nicht beobachtet werden konnte. Der Grund dafür, daß Änderungen der Farbgleichungen von Dichromaten früher und leichter beobachtet worden sind, als von Trichromaten, ist darin zu suchen, daß bei jenen neben der stark variablen Komponente nur eine, bei diesen zwei ziemlich konstante Komponenten vorhanden sind, von denen jede überdies noch die variable Komponente an Intensität weit übertrifft.

Um die lästige Verschiebung der Lampe zu vermeiden, wurden bei den nun folgenden Komplementärfarbestimmungen die Intensitätsänderungen nur mittelst des Okulardoppelspaltes bewirkt. Die in der folgenden Tabelle angegebenen Intensitätsbezeichnungen sind mit den früheren nicht zu verwechseln, da schon die geringste Intensität eine verschiedene war.

Wellenlänge der Komplementärfarbe.

Intensität	1	1½	4	8	20	40
670,8 $\mu\mu$	547,3 $\mu\mu$	540,8 $\mu\mu$	533,7 $\mu\mu$	520,8 $\mu\mu$	512,2 $\mu\mu$	511,8 $\mu\mu$
641,4 "	—		—	—	—	512,3 "
640,0 "	—	539,4 "	—	—	—	
612,4 "	—	522,8 "	—	—	—	
610,0 "	—		—	—	—	507,6 "
595,0 "	—	498,9 "	—	—	—	499,4 "
586,5 "	—	447,6 "	—	—	—	447,6 "

Die Komplementärfarbe zu $586,5 \mu\mu$ hat die Wellenlänge $447,6 \mu\mu$, sie ist für die geringere und höhere Intensität dieselbe; die Gleichung wird durch Intensitätsänderungen nicht gestört. $447,6 \mu\mu$ liegt nun in der violetten Endstrecke. Aus Überlegungen, ganz analog denjenigen, die bei Erörterung der Komplementärfarbe zum Rot der Endstrecke angestellt sind, ergibt sich, daß die Komplementärfarbe zu Violett in der Nähe des Schnittpunktes der W_1 - und W_2 -Kurve zu suchen ist. Der Schnittpunkt dieser Kurven liegt bei $583,9 \mu\mu$, die beobachtete Komplementärfarbe zu Violett bei $586,5 \mu\mu$, die Differenz beträgt also nur $2,6 \mu\mu$; und wie die Komplementärfarbe zu Violett für alle angewandten Intensitäten dieselbe bleibt, so ändert auch der Schnittpunkt der Kurven für die gebrauchten Intensitäten kaum seine Lage. Je mehr man sich aber dem langwelligen Spektrumende nähert, desto größere Abweichungen zeigen die Komplementärfarben für die verschiedenen Intensitäten.

An dieser Stelle ist der in der Einleitung erwähnten Abhandlung des Hrn. HERING über den Einfluß der Macula lutea auf spektrale Farbengleichungen zu gedenken. In den vier ersten Abschnitten zeigt Hr. HERING, daß bei den durch eine Irisblende bewirkten Änderungen der Größe des Farbefeldes aus Farbengleichungen Farbenungleichungen werden, und erklärt diese Erscheinungen aus dem Einfluß der Macula lutea; in den folgenden Abschnitten werden die durch Intensitätsveränderung bewirkten Störungen der Farbengleichungen auf die durch Helligkeitsänderung verursachte Änderung des „makularen Gefälles für das terminale monochromatische Licht“ zurückgeführt. Wenn nun auch ein Einfluß der Macula lutea auf diese Erscheinungen nicht zu leugnen ist, so sind doch die Änderungen, welche die Kurven, der neutrale Punkt und die Komplementärfarbe zum Rot der Endstrecke zeigen, zu groß, um daraus allein erklärt werden zu können. Man muß direkt Änderungen in den Processen annehmen, welche in den percipierenden Elementen der Netzhaut vor sich gehen. Diese werden durch die Absorption in der Macula gehemmt werden; so wird im besonderen die von Hrn. HERING beobachtete geringe Störung der Farbengleichungen kleiner Felder durch Intensitätsänderungen auf eine durch die Macula bewirkte Verlangsamung der Veränderungen in den percipierenden Elementen zurückzuführen sein.

Die Helligkeitskurve und die Elementarempfindungskurven.

Der Erste, welcher Helligkeitsmessungen für die verschiedenen Teile des Spektrums ausführte, war FRAUNHOFER. Die von ihm erhaltene Kurve ist bekannt und der von K. v. VIERORDT etwa 50 Jahre später gefundenen ähnlich. In neuerer Zeit hat Hr. BRODHUN¹ unter Erkennung des Einflusses, den das PURKINJESCHE Phänomen ausübt, bei hoher Intensität die Helligkeitskurven für sich („Grünblind“), Hrn. RITTER („Rotblind“) und Hrn. KÖNIG (normaler Trichromat) bestimmt. Er fand zwischen den Kurven des Grünblinden und des Normalen eine so große Übereinstimmung, daß sie für zwei Personen desselben Systemes nicht besser zu erwarten war; davon wich die des Rotblinden erheblich ab.

Bei Vergleichung seiner Helligkeitskurve mit den Elementarempfindungskurven wurde Hr. BRODHUN zu der Vermutung geführt, daß die Intensitätskurve mit der W_1 -Kurve übereinstimmt.

Die von Hrn. BRODHUN veröffentlichte Intensitätskurve des Hrn. RITTER läßt sich, da die Beobachtungen an einem ähnlich gebauten Apparate gemacht waren, vergleichen mit den auf Tafel I angegebenen Elementarempfindungskurven; und da ist die Ähnlichkeit der Intensitätskurve mit der W_2 -Kurve nicht zu verkennen.

Das schon oben angeführte PURKINJESCHE Phänomen giebt uns nun ein Mittel, die Vergleichung der Intensitätskurven mit den W -Kurven weiter fortzusetzen. Das nach seinem Entdecker benannte Phänomen besteht darin, daß gleich helle, aber verschieden gefärbte Felder bei gleichmäßiger Änderung der objektiven Intensität ungleich hell werden und daß dabei die kurzwelligere Farbe die geringere Helligkeitsänderung erleidet. Dieses Phänomen wurde später von DOVE, GRAILICH und AUBERT, und für Spektralfarben besonders eingehend von den Hrn. H. v. HELMHOLTZ und BRODHUN untersucht. Der Letztere fand 1. daß dieses Phänomen sich nur bei niedrigen Intensitäten zeigt, und zwar mit stärkerer Verringerung derselben immer auffallender, und sich bei höheren Intensitäten die scheinbaren Helligkeiten aller homogenen Lichtarten proportional ändern, und 2. daß es sich viel tiefer in das Spektrum hinein erstreckt (vom Violetten bis ins Gelbe, etwa bis $570 \mu\mu$) als man bisher angenommen hatte. Diese Resultate galten sowohl für das dichromatische, als für das trichromatische System (Hr. KÖNIG).

¹ E. BRODHUN, *Beiträge zur Farbenlehre*. Berlin 1887.

Die bei hohen Intensitäten zu erhaltenden Helligkeitskurven müssen, wenn sie auf gleiche Fläche gebracht werden, eben wegen dieser Proportionalität sich decken, die bei niedrigen Intensitätsgraden zu beobachtenden Kurven dagegen eine abweichende Gestalt haben. Nun sollen mit abnehmender objektiver Intensität die kurzwelligen Helligkeitsordinaten weniger schnell abnehmen als die langwelligen, und zwar um so auffallender, je geringer die Intensität wird; daher muß bei den auf Flächengleichheit reduzierten Kurven der kurzwellige Abhang der Kurve immer mehr wachsen gegenüber dem langwelligen Teile der Kurve.

Gerade diese verlangten Formänderungen nun zeigen die W_1 - und W_2 -Kurven der Hrn. RITTER und HENZE. Das deutet darauf, daß die von Hrn. BRODHUN vermutete Übereinstimmung der Intensitätskurven mit den W -Kurven auch bei geringeren Intensitäten anzunehmen ist.

Weiter führen uns noch die von Hrn. A. KÖNIG¹ veröffentlichten Untersuchungen über den Helligkeitswert der Spektralfarben bei verschiedener absoluter Intensität. Auf Tafel IV dieser Schrift sind die Helligkeitskurven des Hrn. RITTER abgebildet. Die Intensität war in weit umfassenderer Weise variiert, als bei den oben beschriebenen Versuchen. Die Intensitätskurve zeigt für die Helligkeitsstufen H bis D analoge Veränderungen wie die W_2 -Kurve des Hrn. RITTER: ein langsames Vorrücken des Maximum nach dem kurzwelligen Ende, ein Abnehmen der Ordinaten auf dem langwelligen, ein Ansteigen auf dem kurzwelligen Abhang.

Die auf Tafel III ebendasselbst angegebenen Intensitätskurven des Hrn. KÖNIG für die Stufen H bis E zeigen ähnliche Formveränderungen wie die W_1 -Kurven des Hrn. HENZE; das Maximum schwankt etwas um eine Mittellage, die langwelligen Ordinaten nehmen wie auch bei Hrn. RITTER zu, die kurzwelligen ab. Besonders bemerkenswert ist weiterhin noch, daß bei den niedrigsten Intensitäten die Helligkeitskurve sowohl des Hrn. KÖNIG als des Hrn. RITTER ihr Maximum an derselben Stelle

¹ A. KÖNIG, Über den Helligkeitswert der Spektralfarben bei verschiedener absoluter Intensität (nach gemeinsam mit R. RITTER ausgeführten Versuchen) Hamburg, Leopold Voss. 1891. Separat-Ausgabe aus: *Beiträge zur Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane, Helmholtz-Festschrift*. Hamburg, Leopold Voss. 1891.

haben, wie die bei niedriger Intensität für die bei den Hrn. RITTER und HENZE gefundene *K*-Kurve. Zur leichteren Vergleichung ist in unserer Tafel I punktiert die auf gleiche Fläche berechnete niedrigste Helligkeitskurve des Hrn. RITTER eingezeichnet. Ihre Ähnlichkeit mit der *K*-Kurve bei der Intensität 1 springt in die Augen.

Zum Schluß seien die Hauptergebnisse der Arbeit noch kurz zusammengefaßt.

Durch Vergleich des PURKINJESchen Phänomens und besonders der von Hrn. KÖNIG veröffentlichten Helligkeitskurven mit den gefundenen Elementarempfindungskurven ist die von Hrn. BRODHUN vermutete Übereinstimmung der Intensitätskurven mit den *W*-Kurven auch für geringe Intensitäten sehr wahrscheinlich gemacht.

Was die Elementarempfindungskurven betrifft, so hat bei den hier benutzten Intensitäten die *K*-Kurve die größten Veränderungen erlitten, während die *W*-Kurven relativ stabil bleiben; bei weiteren Verminderungen, wie sie Hr. KÖNIG angewandt hat, wird voraussichtlich sich eine starke Formänderung der *W*-Kurven herausstellen, während die *K*-Kurve nur geringen Änderungen unterworfen sein wird. Das geht schon daraus hervor, daß, sobald die Helligkeitskurven ihr Maximum an derselben Stelle gefunden haben, wie die *K*-Kurve der geringen Intensität, auch die ersten Spuren des Verlöschens der Farbenunterschiede auftreten. Bei der geringsten Intensität müßten sich (mit Ausnahme des roten Endes) die Kurven vollständig decken; das Spektrum wäre dann monochromatisch geworden.

Doch das sind mehr oder weniger berechtigte Vermutungen; sicher festgestellt dagegen ist durch die Mischungsversuche der Farbenblinden, durch die Bestätigung des Wanderns des neutralen Punktes und durch die Mischung der Komplementärfarben für das trichromatische System des Verfassers, daß die allen Systemen gemeinsame *K*- oder *V*-Kurve sehr starke, die *W*-Kurve viel geringere Gestaltänderungen erleidet, die bedingt sind durch Änderungen der Intensität, und daß damit das NEWTONsche Farbenmischungsgesetz nur in engen Grenzen der gewöhnlichen Intensität anwendbar ist, für geringere Helligkeitsgrade aber seine Gültigkeit einbüßt.
