Gedruckt mit Unterstützung aus dem Jerome und Margaret Stonborough-Fonds

Über das Verhältnis der Vierfarben- zur Dreifarbentheorie

Von

Erwin Schrödinger

(Mit 4 Textfiguren)

(Vorgelegt in der Sitzung am 17. Dezember 1925)

I.

Bekanntlich stehen einander bis heute zwei anscheinend sehr verschiedene Auffassungen des Farbenkontinuums gegenüber, die gewöhnlich mit dem Namen Helmholtz verknüpfte Dreifarbentheorie und die auf Aubert zurückgehende, von Hering mit Nachdruck vertretene Vierfarbentheorie. Die erstere behauptet, in Anlehnung an die — nicht zu bezweifelnde — Dreidimensionalität des Farbenkontinuums, daß jede Farbe aufzufassen sei als Mischung dreier Grundfarben, eines Grundrot, Grundgrün und Grundblau (oder -violett) und setzt sich damit in einen nicht zu leugnenden Gegensatz zur unmittelbaren Anschauung. Denn für den naiven Beschauer ist neben Rot, Grün, Blau auch das reine Gelb eine psychologisch einheitliche Farbempfindung, in der er beim besten Willen nicht eine Mischung gleicher Mengen von Rot und Grün zu erblicken vermag, was sie nach der Dreifarbentheorie sein soll; und ebenso hat die Empfindung des reinen Weiß schlechterdings nichts mit einer der genannten Farben zu tun, sondern ist psychologisch etwas Einheitliches, nicht weiter Analysierbares, während sie nach der Dreifarbentheorie durch Mischung gleicher Quanta von allen drei Grundfarben zustande kommt.

Die Vierfarbentheorie dagegen schließt sich eng an die psychologische Farbenordnung an. Nach Hering besitzt jede spezielle Farbe neben einer »Weiß-Valenz« noch zwei farbige Valenzen, deren erste als »Rot-Grünvalenz« bezeichnet wird und für eine bestimmte Farbe entweder Rot oder Grün ist, während die zweite als »Blau-Gelb-Valenz« entweder Blau oder Gelb ist. Das entspricht völlig dem psychologischen Befund, daß einerseits die Empfindungen Rot mit Grün, Blau mit Gelb schlechterdings unvereinbar sind, während anderseits jede Farbempfindung ihrem Farbton nach zwischen eine der beiden Farben des ersten und eine der beiden Farben des zweiten »Gegenfarbenpaares« eingeordnet wird. Einer Erhöhung der Weißvalenz soll eine Aufhellung, bei ungeänderten Farbvalenzen zugleich ein Weißlicherwerden (Entsättigung) entsprechen, einer Verminderung der Weißvalenz ein Dunkler- und Schwärzlicherwerden. Doch soll der

Hinzutritt von Farbvalenz zu reiner Weißvalenz die Helligkeit nicht ungeändert lassen, vielmehr komme dem Rot und Gelb eine spezifisch »aufhellende«, dem Grün und Blau eine spezifisch »verdunkelnde« Wirkung zu.

Diese Lehre, die bekanntlich bei Hering der Ausfluß — oder vielleicht eher der Anlaß — zu einer ganz bestimmten physiologisch-chemischen Deutung des Sehprozesses war, zählt noch heute zahlreiche Anhänger, und zwar begreiflicherweise gerade bei den Psychologen, während ihr von der anderen Seite der Vorwurf gemacht wird, daß sie schon allein durch die überflüssige Vermehrung der Variablen mit der empirischen Dreidimensionalität des Farbenkontinuums kaum vereinbar sei und deshalb auch keine quantitative Untersuchung über Farben in ihrer Sprache adäquat auszudrücken vermöge. Eine vermittelnde Stellung hat bekanntlich v. Kries eingenommen in seiner sogenannten Zonentheorie.[1] Danach soll die Dreifarbenauffassung den physiologischen Prozeß auf der Retina erfassen, die Vierfarbenauffassung dagegen für eine weiter zentripetal gelegen »Zone« des Sehorgans zutreffen, wodurch ihr engerer Anschluß an die psychologische Farbenordnung verständlich würde.

Diese Kries'sche Wendung der Theorie hat für mich eine sehr große Wahrscheinlichkeit. Was ich im folgenden zeigen will, ist jedoch von der tiefer liegenden Auffassung über das physiologische Substrat des Sehvorganges ganz unabhängig. Es handelt sich um die bloße Feststellung, daß rein formal das Verhältnis zwischen den beiden Theorien — der Drei- und der Vierfarbentheorie — als ein außerordentlich einfaches aufzufassen ist, nämlich als eine bloße Transformation der Variablen. Der Sachverhalt ist vom rein mathematischen Standpunkt nicht besonders tiefliegend, ist aber gleichwohl meines Wissens bisher noch nie mit voller Klarheit ausgesprochen und gewiß auch von vielen nicht erkannt worden, sonst würde er die Diskussion auf andere Bahnen gelenkt haben. Zur Verschleierung mag der anschaulich zahlenmäßige Gegensatz beigetragen haben, der auch durch die gewählten Bezeichnungen gleichsam als etwas sehr Wesentliches fixiert wird.

Betrachten wir das konventionelle Farbendreieck der Helmholtz'schen Theorie, Fig. 1. Die drei Grundfarbenanteile einer Farbe, die wir kurz als ihre Koordinaten und mit x_1, x_2, x_3 bezeichnen werden, bedeuten darin geometrisch die projektiven oder Dreieckskoordinaten des der betreffenden Farbe entsprechenden Punktes, wobei als »Einheitspunkt« (im Sinne der projektiven Geometrie) der Dreiecksschwerpunkt gewählt ist (geometrische Verabredung). Während aber die Koordinaten der projektiven Geometrie nur als Verhältniszahlen Bedeutung haben, haben die Farbkoordinaten

[1] Vgl. z. B. Nagels Handbuch der Physiologie des Menschen, 3. Bd., Artikel J. v. Kries, Die Gesichtsempfindungen, p. 269 (Braunschweig, bei Vieweg 1905). Dieser grundlegende Artikel wird im folgenden mit J. v. Kries, G. E., zitiert.

außerdem noch die absolute Bedeutung, daß ihre Summe $x_1 + x_2 + x_3$ die Masse angibt, die man dem Farbenpunkt zuteilen muß, um das Ergebnis einer Farbenmischung nach der bekannten Schwerpunktkonstruktion aufzufinden. Eine weitere, übrigens nicht durchaus nötige Verabredung über die zu wählenden Einheiten der Aichlichter verlegt üblicherweise das Weiß in den Schwerpunkt des Dreiecks (physikalisch-physiologische Verabredung).

Die drei Farbkoordinaten der Spektrallichter im Gitterspektrum des irdischen Sonnenlichtes, als Funktionen der Wellenlänge auf-

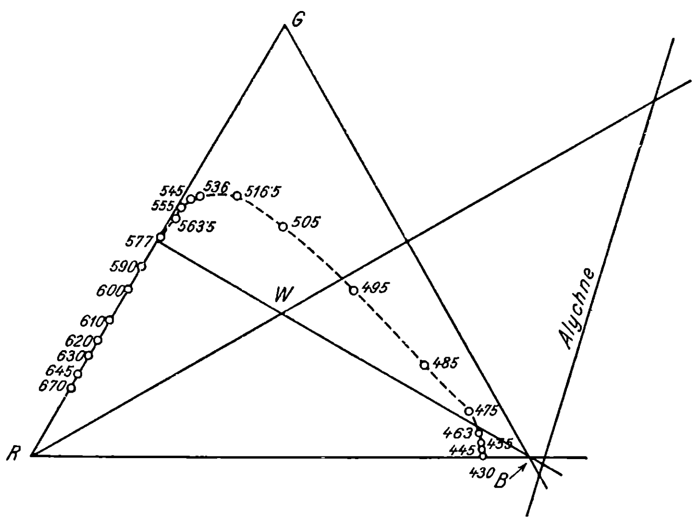

Fig. 1.

König'sches Farbendreieck.

getragen, werden als »Grundempfindungskurven« (GrEK.) bezeichnet.[1] Die betreffenden Farbpunkte liegen — übrigens für ein Spektrum von beliebiger Intensitätsverteilung — auf der in Fig. 1 gestrichelten »Spektralkurve«.

Man kann nun die Spektralfarben und damit natürlich auch alle übrigen Farben anstatt auf das gewählte Koordinatendreieck — dem freilich nach der Helmholtz'schen Theorie auf Grund der Untersuchungen an Dichromaten eine tiefere Bedeutung zukommen soll —, auch auf ein beliebiges anderes Dreieck beziehen, was bekanntlich einfach einer linear-homogenen

---

[1] A. König u. C. Dieterici, Zeitschr. f. Psych. Phys. d. Sinnesorgane *4*, 241 bis 347, 1892.

A. König, Ges. Abh., p. 310 (Leipzig, J. A. Barth, 1903).

Transformation der Koordinaten entspricht. Dabei ändern natürlich auch die GrEK. ihre Gestalt, indem jede der neuen GrEK. eine Superposition (mit gewissen konstanten Koeffizienten) der alten ist. Es fragt sich, ob dem Koordinatendreieck eine solche Gestalt gegeben werden kann, daß die neuen GrEK. direkt als die Hering'schen Valenzkurven angesprochen werden dürfen — wozu sie, nebenbei bemerkt, nur gewissen qualitativen Forderungen zu genügen brauchen, da Quantitatives über die Valenzen aus der Hering'schen Theorie nicht bekannt ist.

Nun haben die Hering'schen Valenzwerte qualitativ entlang dem Spektrum folgenden Verlauf. Die langwelligen homogenen Lichter vom roten Ende bis etwa $\lambda = 575$ $\mu\mu$ (»Urgelb«) besitzen erst zunehmende, dann wieder abnehmende Rotvalenz, daneben zunehmende Gelbvalenz. Beim Urgelb verschwindet die Rotvalenz und geht in Grünvalenz über. Bis $\lambda = 495$ (»Urgrün«) besteht abnehmende Gelbvalenz neben zunehmender Grünvalenz, von da an bis $\lambda = 472$ (»Urblau«) abnehmende Grünvalenz neben zunehmender Blauvalenz. Von da an tritt wieder Rotvalenz an die Stelle der Grünvalenz, durchläuft ein sekundäres Maximum, um dann natürlich, zugleich mit der Blauvalenz, am violetten Ende zu verschwinden. Urgelb und Urblau sind komplementär, d. h. sie liegen im Farbendreieck auf einer Geraden durch den Weißpunkt. Ein physikalisch homogenes »Urrot« gibt es nicht, es wird dargestellt durch Endrot mit einem kleinen Blauzusatz, der das Gemisch zu Urgrün komplementär macht. Die Weißvalenz soll entlang dem Spektrum folgende Eigenschaft haben. Sie soll unter Rücksicht auf einen gewissen »aufhellenden« Einfluß der Rot- und der Gelbvalenz und auf einen »verdunkelnden« Einfluß der Grün- und der Blauvalenz die direkt beobachtete spektrale Helligkeitsverteilung ergeben.

Man suche nun folgende Wellenlänge im König'schen Farbendreieck auf oder noch besser in den König'schen GrEK., wo sie sich genauer als die Abszissen der Schnittpunkte von je zwei GrEK. darstellen: erstens die, welche komplementär ist zum König'schen Grundblau (langwelliger Schnittpunkt der Rot- und Grünkurve, etwa $\lambda = 577$); zweitens die Wellenlänge, die komplementär ist zum Grundrot (Schnittpunkt der Grün- und Blaukurve, etwa $\lambda = 497$); drittens die Wellenlänge des Grundblaus (kurzwelliger Schnittpunkt der Rot- und Grünkurve, etwa $\lambda = 469$). Diese drei Wellenlängen stimmen mit den oben für das Hering'sche Urgelb, Urgrün und Urblau angegebenen innerhalb der Genauigkeit überein, mit der einerseits die Schnittpunkte der GrEK. nach verschiedenen Methoden[1] bestimmbar sind, anderseits die Hering'schen Urfarben, bei deren Festlegung ja bekanntlich in erster Linie der psychologische Befund eines normal gestimmten Auges maßgebend

[1] Siehe diese Berichte (2a) *111*, Juni 1902 (F. Exner); *115*, p. 39, 1906 (O. Steindler); *122*, p. 1915, 1913 (L. Richtera); *123*, p. 629, 1914 (F. Hauer).

war, z. B.: dieses Gelb ist rein Gelb, weder mit rötlichem noch mit grünlichem Stich. — Damit ist dann natürlich auch die sehr angenäherte Übereinstimmung des Hering'schen Urrot mit dem König'schen Grundrot gegeben, so daß wir sagen können: die Hering'schen Urfarben stimmen im Farbton mit Grundrot und Grundblau und ihren Komplementen überein, während das Grundgrün (dessen Wellenlänge übrigens dem Komplement des Grundrot sehr nahe liegt), für die Hering'sche Theorie keine ausgezeichnete Rolle spielt.[2]

Die durch den Weißpunkt gehenden Verbindungsgeraden der beiden eben genannten Komplementärfarbenpaare sind die Geraden RW und BW der Fig. 1. Nimmt man sie unter die Seiten des neuen Koordinatendreiecks auf, so ergibt sich aus der geometrischen Bedeutung der projektiven Koordinaten ganz unmittelbar, daß die zwei ihnen zugeordneten neuen »GrEK.« die richtigen Vorzeichenwechsel aufweisen werden, um etwa die positiven Ordinaten der einen (BW zugeordneten) als Rotvalenzen, ihre negativen Ordinaten als Grünvalenzen im Hering'schen Sinne zu deuten und ebenso die positiven Ordinaten der anderen (RW zugeordneten) neuen GrEK. als Gelbvalenzen, ihre negativen Ordinaten als Blauvalenzen. Das ergibt sich daraus, daß ja jede projektive Koordinate eines Punktes dem von diesem Punkt auf eine der Seiten des Grunddreiecks gefällten Lote proportional ist und das Vorzeichen wechselt, wenn der Punkt von dem einen nach dem anderen Ufer der betreffenden Dreieckseite übertritt.

Die Wahl der dritten Dreieckseite bleibt vorläufig noch frei. Es fragt sich, wie sie zu legen ist, damit die dritte neue GrEK. als Weißvalenz im Sinne Hering's angesprochen werden kann.

Da wollen wir, um die Wahl dieser dritten Seite übersichtlicher zu gestalten, einen Zwischenschritt einschalten. Wir wählen sie nämlich fürs erste so, daß als dritte neue GrEK. die Helligkeitsverteilung im Gitterspektrum der Sonne auftritt. Nach den eingehenden Untersuchungen Franz Exner's[2] über die Berechnung der Helligkeit einer beliebigen Farbe aus ihren (König'schen) Grundempfindungsanteilen ist das möglich und überaus einfach. Nach Exner drückt sich nämlich die Helligkeit durch die Grundempfindungsanteile x_1, x_2, x_3 homogen-linear aus

$$h = \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3.$$

Für die drei Koeffizienten, die nur als Verhältniszahlen aufzufassen sind, fand Exner die Werte

$$\alpha = 1 \qquad \beta = 0 \cdot 756 \qquad \gamma = 0 \cdot 024. \tag{1}$$

---

[1] S. a. A. König u. C. Dieterici, l. c. Ges. Abh., p. 317, Anmerkung.

[2] F. Exner, Diese Berichte (2a) *127*, p. 1829, 1918; *129*, p. 27, 1920.

Man braucht nun offenbar nur als dritte Seite des neuen Dreiecks die Gerade zu wählen, die bezogen auf das König'sche Dreieck die Gleichung hat

$$\alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 = 0. \tag{2}$$

Dann ist ja die dritte von den neuen Koordinaten diesem linearen Ausdruck, mithin der Helligkeit proportional. Die Gerade (2) ist in Fig. 1 konstruiert und, aus gleich zu erörternden Gründen, als Alychne (»Lichtlose«) bezeichnet.

Die Geraden *RW* und *BW* haben im König'schen Dreieck die Gleichungen

$$\begin{aligned} x_3 - x_2 &= 0 \\ x_2 - x_1 &= 0. \end{aligned} \tag{3}$$

Die Umrechnungsformeln, welche auf das aus den drei eben genannten Geraden gebildete Dreieck als Koordinatendreieck transformieren, haben also folgende Gestalt:

$$\begin{aligned} x_1' &= a\,(x_3 - x_2) \\ x_2' &= b\,(x_2 - x_1) \\ x_3' &= c\,(\alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3) \end{aligned} \tag{4}$$

Hier sind $a\ b\ c$ zunächst willkürlich. Es ist bequem, sie aus der Forderung zu bestimmen, daß identisch

$$x_1' + x_2' + x_3' \equiv x_1 + x_2 + x_3 \tag{5}$$

sein soll. Es bleibt dadurch für jede Farbe die Masse, mit welcher sie in eine Schwerpunktkonstruktion, eingeht, erhalten und dem in Fig. 1 gezeichneten Farbenkontinuum kommen, ohne daß man es zu verzerren braucht, die baryzentrischen Koordinaten x_i' bezüglich des neuen Farbendreiecks zu. Die Forderung (5) führt auf

$$\begin{aligned} a &= \frac{\alpha + \beta - 2\gamma}{\alpha + \beta + \gamma}, \\ b &= \frac{2\alpha - \beta - \gamma}{\alpha + \beta + \gamma}, \\ c &= \frac{3}{\alpha + \beta + \gamma}. \end{aligned} \tag{6}$$

Das gibt, mit (1) in (4) eingesetzt die numerischen Formeln

$$x_1' = 0 \cdot 960\,(x_3 - x_2) \tag{4'}$$

$$x_2' = 0 \cdot 685\,(x_2 - x_1)$$

$$x_3' = 1 \cdot 685\,x_1 + 1 \cdot 274\,x_2 + 0 \cdot 040\,x_3. \tag{4'}$$

Bevor wir die so gewonnene Darstellung näher ins Auge fassen, wollen wir noch einige Bemerkungen an die interessante Exner'sche Gerade, Gleichung (2), knüpfen, die wir Alychne nannten.

Diese Gerade ist, was im ersten Moment recht mystisch anmutet, der geometrische Ort der Farben von verschwindender Helligkeit. Natürlich sind diese Farben von verschwindender Helligkeit alle virtuell, die Gerade schneidet die reelle Farbenfläche nicht. Zwei solcher Farben sind in der Darstellung (4') zu Grundfarben gewählt, die dritte Grundfarbe ist Weiß. Etwas Mystisches haben diese Farben übrigens durchaus nicht an sich. Was es bedeutet, eine solche Farbe einer Mischung hinzuzufügen, läßt sich nicht nur angeben, sondern auch leicht, z. B. am Farbenkreisel wirklich durchführen, viel leichter als etwa die Hinzufügung einer der König'schen Grundfarben. Es bedeutet nämlich einfach, den Farbton (und eventuell die Sättigung) abändern bei konstant gehaltener Helligkeit. Nimmt man also z. B. zwei Farbpapiere von gleicher Helligkeit her und mischt sie am Farbenkreisel in verschiedenen Verhältnissen, so unterscheiden sich alle diese Gemische lediglich durch wechselnden Gehalt an einer bestimmten auf der Geraden (2) gelegenen Farbe. Der Ort dieser Farbe wird erhalten, indem man die Gerade (2) mit der Geraden zum Schnitt bringt, welche die Orte der beiden Farbpapiere verbindet.

Wie man sieht, läuft die Alychne ganz nahe am König'schen Grundblau vorüber. Das ist eine Folge des kleinen Wertes der spezifischen Helligkeit γ des Grundblaus. Nun ist die Wahl dieses Grundblaus bekanntlich ziemlich konventionell, die Spektraleichungen gestatten dafür einen noch viel breiteren Spielraum als beim Grundrot und Grundgrün, weil Blaublindheit fast immer nur an schwer erkrankten Sehorganen auftritt, mit denen sich nicht genau und nicht anhaltend experimentieren läßt. Jedenfalls erscheint eine so kleine Verschiebung des Blaupunktes, wie hinreicht, um ihn auf die Alychne zu verlegen, durchaus im Bereich des Zulässigen. Die König'schen GrEK. würden dadurch nur ganz unmerklich abgeändert werden, man kann es sogar so einrichten, daß die Abszissen ihrer Schnittpunkte (die bekanntlich auch nach anderen Methoden bestätigt sind)[1] erhalten bleiben, indem man nämlich den Blaupunkt auf der Geraden BW nach außen verschiebt. — Durch diese Abänderung würde jedenfalls der praktische Vorteil erzielt, daß $\gamma = 0$ würde, d. h. man könnte dann die Helligkeit jeder Farbe aus ihrem Rot- und Grüngehalt allein berechnen, ohne den Blaugehalt mit berücksichtigen zu müssen, der ohnedies schon jetzt für die Helligkeit fast nichts austrägt. Auch ist die Bestimmung

[1] Siehe die obigen Zitate (F. Exner, O. Steindler usw.).

dieses kleinen Blaukoeffizienten durch verschiedene Beobachter so unsicher und wechselnd (Kohlrausch[1] findet 0·047, Ives[2] 0·011, alles umgerechnet auf $\alpha = 1$), daß es nicht allzu gewagt wäre, diese Werte überhaupt als Fehlerreste zu taxieren, die sich vielleicht gelegentlich auch einmal negativ ergeben könnten. Vom Standpunkt der Young-Helmholtz'schen Theorie würde der Auffassung, daß der Blauempfindung in Strenge die Helligkeit Null zukommt — eine Auffassung, die, wie gesagt, beinahe als durch das Experiment

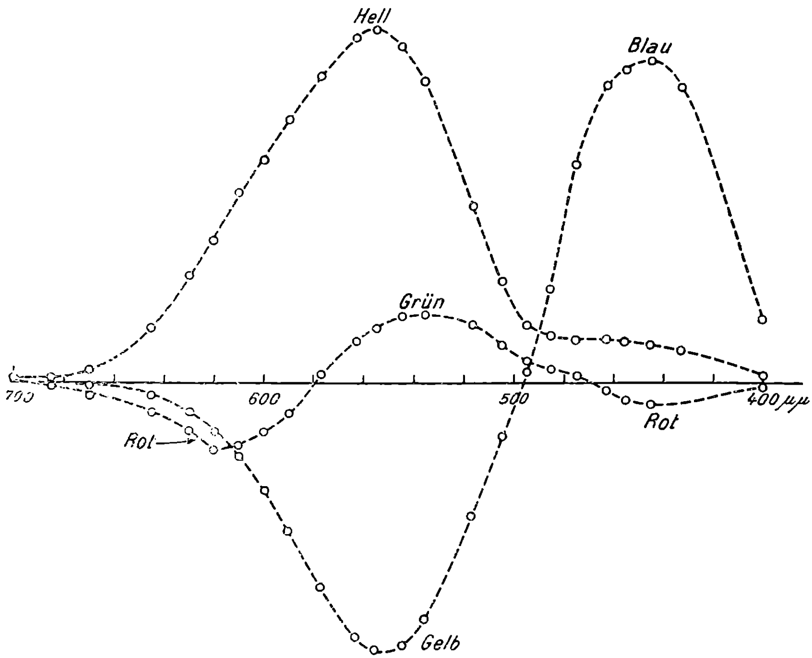

Fig. 2.
Hering'sche Valenzkurven, aus den König'schen Grundempfindungskurven abgeleitet.

erwiesen gelten kann — recht erhebliche Bedeutung zukommen. Der »Blauprozeß« dieser Theorie wäre dann doch wohl als etwas wesentlich anderes anzusehen als die beiden anderen, sofern er nur die Qualität der Lichtempfindung modifiziert, ihre Intensität ungeändert läßt.

Wir wollen aber für das Folgende gleichwohl von dieser Bemerkung zunächst keinen Gebrauch machen, damit es nicht scheine, als ob wir dem vorliegenden Beobachtungsmaterial Gewalt antun wollten oder müßten.

Kehren wir nun zurück zu den Formeln (4'). Fig. 2 stellt die diesen Formeln entsprechenden neuen »Grundempfindungskurven«

[1] K. W. F. Kohlrausch, Phys. Zeitschr. *21*, 423, 1920.

[2] Journ. Franklin Inst., *195*, p. 23, Jan. 1923 (H. E. Ives).

dar, d. h. die drei Größen x_i' für die Spektrallichter im Gitterspektrum der Sonne als Funktionen der Wellenlänge. Dabei sind für die x_i die Originalwerte König's benützt. Wie vorausgesehen, geben die ersten beiden Kurven ein zutreffendes Bild der Hering'schen farbigen Valenzen, wenn man die negativen Ordinaten von x_1' als Rotvalenzen, die positiven Ordinaten derselben Kurve als Grünvalenzen, ferner die negativen Ordinaten von x_2' als Gelbvalenzen, ihre positiven Ordinaten als Blauvalenzen deutet. Die Schnittpunkte mit der γ-Achse sind das Urgelb, Urgrün und Urblau, während das Urrot natürlich nicht in Erscheinung treten kann, da es im Spektrum nicht vorkommt. Die dritte Kurve (die in der Figur aus Raumgründen im halben Ordinatenmaßstab gezeichnet ist) gibt einfach die Helligkeitsverteilung, und zwar ist sie genau identisch mit der von Franz Exner l. c. aus den originalen König'schen Daten mittels seiner eigenen (auch von uns benützten) Werte von α, β, γ berechneten Helligkeitsverteilung.[1] Die Werte von x_3' können also noch nicht mit den Hering'schen Weißvalenzen identifiziert werden, weil diese ja — so will es die Hering'sche Schule — nicht für sich allein die Helligkeit bestimmen sollen, sondern die Farbvalenzen, wenn sie hinzutreten, noch eine spezifisch aufhellende oder verdunkelnde Wirkung haben sollen. Es wäre aber leicht, und zwar noch auf ∞^2 Arten möglich, die Kurven durch eine zweite lineare Transformation so abzuändern, daß die ersten beiden nach wie vor als Hering'sche Farbvalenzen aufgefaßt werden können und die letzte als Hering'sche Weißvalenz, und zwar jetzt unter Rücksicht auf den behaupteten spezifischen Helligkeitscharakter der Farbvalenzen. Anders gesprochen, man könnte diesen spezifischen Helligkeitscharakter der Farbvalenzen rein formal herbeiführen. Dazu hätte man nur zu setzen

$$\begin{aligned} x_1'' &= -A\,x_1' \\ x_2'' &= -B\,x_2' \\ x_3'' &= x_3' + A\,x_1' + B\,x_2' \end{aligned} \tag{7}$$

$$\text{Helligkeit} = x_1'' + x_2'' + x_3'' \;(= x_3').$$

A und B sind zunächst völlig willkürliche positive Koeffizienten. Natürlich sind jetzt, gerade umgekehrt wie früher, die positiven x_1'' als Rotvalenzen zu deuten, die negativen als Grünvalenzen und ähnlich bei x_2''. Die Helligkeit ist die Farbkoordinaten-

[1] F. Exner, Diese Berichte (2a), *129*, p. 40f., Tab. IV und Fig. 2, ausgezogene Kurve, 1920. — Von der Korrektur der König'schen GrEK., die Exner weiterhin vornimmt, konnte ich aus dem Grunde keinen Gebrauch machen, weil sie Schönheitsfehler (Konkavitäten nach außen) der Spektralkurve in der Farbentafel nach sich zieht.

summe, Rot und Gelb wirken aufhellend, Blau und Grün verdunkelnd. (Natürlich kann man durch negatives Vorzeichen von A und B ebenso leicht das Umgekehrte herbeiführen. Auch dieser bizarren Auffassung fehlt es in der neueren Literatur nicht an Vertretern.)[1]

Nach der von der Hering'schen Schule ursprünglich vertretenen Auffassung sollen die Weißvalenzen durch die Dämmerungswerte gegeben sein. A und B wären demnach so zu bestimmen, daß x_3'' mit der Kurve der Dämmerungshelligkeiten zusammenfällt, die ihr Maximum im Interferenzspektrum der Sonne bei etwa $\lambda = 505$ hat. Wie von Kries mit allem Nachdruck betont hat,[2] kommt aber diese Auffassung der Dämmerungswerte, als die von den Einflüssen der Farbvalenzen befreite reine Weißvalenz, heute nicht mehr in Betracht; sie wird widerlegt durch die Tatsache, daß dem Deuteranopen gewisse tagesgleiche und für ihn farblose Lichtgemische bei Herabsetzung der Intensität, ohne daß eine Verschiedenheit des Farbtons bemerkbar würde, ein Purkinje-Phänomen in dem enormen Betrag von 1 : 100 zeigen. Diese Tatsache verbietet es wohl auch für den Trichromaten, die starke Verschiedenheit der Dämmerungs- und Tageshelligkeiten lediglich durch die Ausschaltung der Farbvalenzen zu erklären. — Zu diesem Argument fügt unsere jetzige Überlegung ein weiteres hinzu. Bei näherem Zusehen erweist es sich nämlich als unmöglich, die obigen Größen A und B so zu wählen, daß x_3'' die Dämmerungshelligkeit darstellt. Es müßte ja sonst schon aus den ursprünglichen König'schen GrEK. durch lineare Kombination mit passenden (positiven oder negativen) Koeffizienten die Dämmerungskurve sich aufbauen lassen. Und daß dies unmöglich ist, erkennt man beinahe auf den ersten Blick, da das Maximum der Dämmerungskurve an einer Stelle liegt, wo alle drei GrEK. relativ kleine Werte haben. Ich habe übrigens die Anpassung versucht, indem ich an drei Stellen, am Gipfel der Dämmerungskurve und an zwei Stellen in mittlerer Höhe, die Übereinstimmung herzustellen suchte. Man gelangt so zu ganz unsinnigen Werten der Koeffizienten, die an anderen Stellen der Superpositionskurve sehr große negative Werte erteilen.

Die einzige vernünftige Deutung der Weißvalenzen im Rahmen der Vierfarbentheorie ist wohl die von v. Kries vorgeschlagene, nämlich als Peripheriewerte.[3] Hier zeigt sich nun, daß mit dem Zurücktreten der farbigen Qualität im exzentrischen Sehen so gut wie überhaupt keine Änderung der Helligkeit verbunden ist. Denn eine deutliche Verschiedenheit der zentralen oder parazentralen farbigen und der peripheren farblosen Helligkeiten ist, wenn man bei Bestimmung der letzteren sorgfältig auf volle Helladaption

[1] F. W. Fröhlich, Grundzüge einer Lehre vom Licht- und Farbensinn; Jena bei G. Fischer 1921 (p. 46, 51, 82).

[2] J. v. Kries, G. E., p. 192f.

[3] J. v. Kries, G. E., p. 203.

achtet und im Falle streng zentraler Beobachtung der Makulatinktion Rechnung trägt, bisher nicht festgestellt.[1] Dem entspricht nun genau unsere Darstellung (4'), in welcher neben Weiß zwei »helligkeitsfreie« Farben auf der Alychne zu »Grundfarben« gewählt sind. Zur Durchführung der weiteren Transformation (7) besteht daher vorläufig kein Anlaß, die durch (4') eingeführten x'_i erscheinen als der einfachste quantitative Ausdruck der Vierfarbentheorie.

Er bietet noch einige ganz unverhofft interessante Züge dar. Es ist in letzter Zeit von verschiedenen Seiten betont worden,[2] wieviel zweckmäßiger es zur Ausführung wirklicher Konstruktionen im Farbendreieck ist, anstatt eines gleichseitigen ein rechtwinkeliges Farbendreieck zu verwenden, eventuell mit verschiedenem Maßstab für Abszisse und Ordinate. Als rechtwinkelige kartesische Koordinaten sind dann einfach aufzutragen

$$
\begin{aligned}
x &= \frac{x'_1}{x'_1 + x'_2 + x'_3} \\
y &= \frac{x'_2}{x'_1 + x'_2 + x'_3},
\end{aligned} \tag{8}
$$

während der Quotient aus der dritten Farbkoordinate durch die Farbkoordinatensumme entweder algebraisch als $1 - x - y$ oder geometrisch als der in einer passenden Längeneinheit gemessene Abstand des Farbenpunktes von der (durch die Punkte [1,0] und [0,1] auf den Achsen gelegten) Hypotenuse gegeben wird. Tun wir so mit den Farbkoordinaten x'_i, so gelangen wir zu der Fig. 3, in welche außer der Spektralkurve auch noch die ursprünglichen König'schen Grundfarben eingetragen sind. Im Ursprung liegt Weiß. Die Koordinaten x, y geben je nach ihrem Vorzeichen den Grün-, Rot-, Blau-, Gelbgehalt. Der Abstand von der Hypotenuse — in der wir natürlich die Alychne erkennen — mißt die Helligkeit des Einheitsquantums der betreffenden Farbe. Das Quantum — die Koordinatensumme — haben wir, wie erinnerlich, bei der Transformation (4') invariant gelassen, es hat also denselben Wert wie bei König und ist auch in Fig. 3 diejenige Masse, die man dem Farbpunkt bei Ausführung einer Schwerpunktkonstruktion beizulegen hat. — So ist z. B. aus der Figur die bekannte Frage leicht zu beantworten: wie verhalten sich die Helligkeiten zweier (einfacher oder zusammengesetzter) Lichter in einem komplementären Gemisch? Man hat dazu nur für jedes der beiden Lichter seinen Abstand von der Alychne durch seinen Abstand vom

---

[1] Vgl. die Diskussion bei J. v. Kries, Zeitschr. f. techn. Physik, *5*, 327, 1924, bes. p. 340.

[2] Journ. Opt. Soc. Amer. and Rev. Scient. Inst. *6*, p. 527, August 1922. — Guild, Trans. Opt. Soc. London *26*, 139, 1925.

Weißpunkt zu dividieren. Wünscht man zwei gleichhelle Komplementärfarben, so findet man sie also auf einem Kegelschnitt, der seinen Brennpunkt im Weißpunkt und die Alychne zur (zugehörigen) Direktrix hat.

All das sind verhältnismäßig triviale Folgerungen, die im übrigen mutatis mutandis auch schon im König'schen Farbendreieck

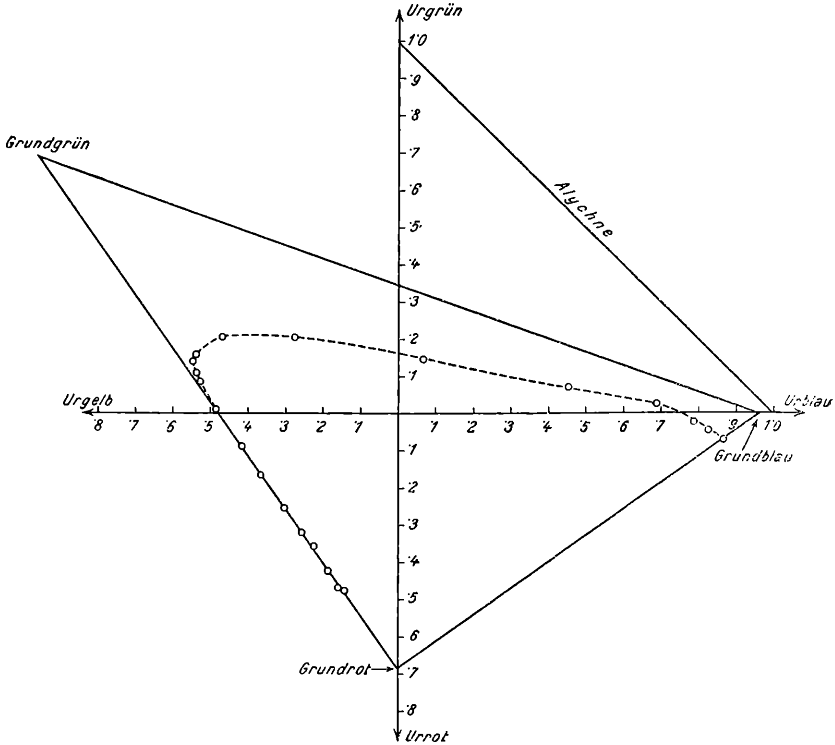

Fig. 3.

Hering'sche Farbvalenzen pro Einheitsquantum, aufgetragen als rechtwinkelige kartesische Koordinaten.

gelten, nachdem man sich die Alychne aus Exner's Daten konstruiert hat. Durch die geometrische Umzeichnung ist lediglich die Vereinfachung erzielt worden, daß die beiden in Betracht kommenden Schwerlinien des Königdreiecks jetzt aufeinander senkrecht stehen, und daß die Alychne, deren Konstruktion früher verhältnismäßig umständlich war und die Verwendung der speziellen Zahlenwerte α, β, γ erforderte, jetzt zur 45°-Geraden geworden ist. Natürlich ist zu erwarten, daß dafür jetzt das Königdreieck seine einfache Gestalt eingebüßt hat und seinerseits nur unter Zuhilfenahme der Zahlenwerte α, β, γ richtig in die Figur hineingelegt werden kann.

Das trifft nun höchst merkwürdigerweise nicht zu. Das Königdreieck Grundrot-Grundgrün-Grundblau der Fig. 3, dessen Eckpunkte natürlich regelrecht nach den Formeln (4') konstruiert sind als die Punkte, die den Wertetripeln (1,0,0), (0,1,0), (0,0,1) der ungestrichenen Koordinaten entsprechen, erweist sich infolge der zufälligen Zahlenwerte der Koeffizienten in (4'), die ihrerseits von den empirischen Werten der Exner'schen Helligkeitskoeffizienten $\alpha\ \beta\ \gamma$ abhängen, sozusagen rein zufällig als rechtwinkelig, mit dem rechten Winkel beim Grundrot. Ebenso erweisen sich zufällig die Katheten dieses Dreiecks als im Verhältnis 1 $\sqrt{2}$ stehend. Letzteres ist übrigens nicht ein neuer »Zufall«, sondern erweist sich als notwendige Folge des ersten, wenn man bedenkt, daß die Koordinaten x, y der Eckpunkte des Königdreiecks nach (4), (5) und (8) jedenfalls die Gestalt haben müssen

$$\begin{array}{ll} (\ \ 0, & -b) \\ (-a, & \ \ b) \\ (\ \ a, & \ \ 0), \end{array}$$

wobei die speziellen Werte von α, β, γ nur bewirken, daß gerade

$$\begin{aligned} a &= 0 \cdot 960 \\ b &= 0 \cdot 685. \end{aligned}$$

Dies erkannt, überlege man, daß, wenn bei Grundrot ein rechter Winkel auftreten soll, die beiden unterhalb der x-Achse gelegenen rechtwinkeligen Dreiecke als Teildreiecke des rechtwinkeligen Dreiecks, dessen Hypotenuse in der x-Achse liegt, einander und dem letztgenannten Dreieck ähnlich sein müssen. (Und umgekehrt, sind diese zwei Dreiecke einander ähnlich, so liegt bei Grundrot ein rechter Winkel und sie sind auch dem aus ihnen zusammengesetzten Dreieck ähnlich.) Nun sind die Katheten dieser beiden kleinen Dreiecke (Absolutwerte):

$$\begin{array}{lll} a/2, & b & \text{für das linke,} \\ b\ , & a & \text{für das rechte.} \end{array}$$

Die Ähnlichkeit erfordert also

$$a = b\sqrt{2}$$

Diese Beziehung wird durch obige Zahlwerte bis auf weniger als ein Prozent erfüllt. Dann ist aber die kleinere (rechts gelegene)

Kathete des K ö n i g dreiecks

$$\sqrt{a^2 + b^2} = b\sqrt{3}$$

und seine größere (links gelegene) Kathete

$$2\sqrt{b^2 + a^2/4} = b\sqrt{6}$$

Es ist also auch das Königdreieck allen früher genannten ähnlich, es hat gleichfalls das Kathetenverhältnis $1 \quad \sqrt{2}$, wie behauptet.

Erklärt man die Katheten des Königdreiecks als Maßeinheiten der Abszisse und Ordinate in dem rechtwinkeligen Achsenkreuz, das aus diesen Katheten gebildet wird, so haben die kartesischen Koordinaten der Farbpunkte bezüglich dieses Achsenkreuzes die Bedeutung

$$\frac{x_3}{x_1 + x_2 + x_3},$$

$$\frac{x_2}{x_1 + x_2 + x_3},$$

d. h. König'scher Blauwert, beziehungsweise König'scher Grünwert durch Koordinatensumme, während der entsprechende Quotient für den König'schen Rotwert durch Subtraktion dieser beiden Größen von 1 (oder auch aus dem Abstand von der Hypotenuse des Königdreiecks) leicht gefunden wird.

Unsere Darstellung leistet also folgendes. Sie stellt in e i n e r Figur die Farbvalenzen nach dem Helmholtz-König'schen Dreifarbensystem und nach dem Hering'schen Vierfarbensystem dar, und zwar b e i d e in der einfachsten und für praktische Konstruktionen bequemsten Form als rechtwinkelige kartesische Koordinaten, wobei das Hering'sche Achsenkreuz einfach die Schwerlinien des rechtwinkeligen Königdreiecks bildet. Gleichzeitig bringt sie die spezifischen Helligkeiten aller (einfachen und zusammengesetzten) Lichter nach den Messungen E x n e r's zur direkten anschaulichen Darstellung. Daß diese Vereinigung überhaupt möglich ist, hängt an dem empirischen Wert der von E x n e r ermittelten spezifischen Helligkeiten der Grundfarben, und zwar vor allem (wie wir gleich sehen werden) des Verhältnisses der Grün- zur Rothelligkeit.

Um unser Doppelkoordinatensystem zu konstruieren, bedarf es nach dem bisher festgestellten nur noch e i n e r speziellen Zahlenangabe, z. B. der Angabe, daß das Grundblau bei $x = 0 \cdot 960$ zu liegen hat. Dieser Notwendigkeit wären wir überhoben, wenn der Exner'sche γ-Wert exakt 0 statt $0 \cdot 024$ lautete. Denn dann würde das Grundblau auf der Alychne, mithin bei $x = 1$ liegen. Ich habe schon oben erwähnt, daß keine Beobachtung diese kleine Verschiebung des Grundblaus (unter leichter Umrechnung der König'schen Rot- und Grünkurve) verbietet. Ich habe dieser Bemerkung zunächst nur aus dem Grund keine Folge gegeben, um nicht den Verdacht zu erwecken, daß schon die bisher erzielte Vereinfachung an diesen Schritt geknüpft sei. Ich werde übrigens auch jetzt nicht diesen Weg beschreiten, sondern einen noch einfacheren. Es scheint mir nämlich der kleine, nicht verschwindende γ-Wert, welcher sich aus den Exner'schen Farbscheibenversuchen allerdings ergeben hat, doch kein genügend sicherer Anhaltspunkt dafür zu sein, daß und wie das Grundblau zu verschieben wäre, um es mit besserer Annäherung zu einer helligkeitsfreien Farbe zu machen, als es das ohnehin auch nach seiner jetzigen Bestimmung schon ist. In praxi erweisen sich die geringfügigen Blauhelligkeiten, die man bisher aus Gewissenhaftigkeit stets mit in Rechnung zu stellen pflegte, als so unbedeutend, daß kaum irgendein Versuch mit Entschiedenheit dafür sprechen dürfte, daß man einen Fehler begeht, wenn man sie einfach fortläßt. Die von Exner berechnete Helligkeitsverteilung im Sonnenspektrum wird durch Fortlassen der Blauhelligkeit nur außerordentlich wenig abgeändert, viel weniger als die am kurzwelligen Ende nicht ganz unbedeutende Abweichung der berechneten von der beobachteten Helligkeitsverteilung beträgt. (Die Abweichung wird überdies durch Fortlassen der Blauhelligkeit vermindert!) Wenn schon bei diesen gesättigtesten blauen Tönen, die es gibt, der Beitrag des Blaugehaltes zur Helligkeit nicht mit Sicherheit nachweisbar ist, läßt sich absehen, wieviel weniger es bei anderen Farben der Fall ist. Daß Ives einen weniger denn halb so großen Blauwert findet als Exner, haben wir schon oben erwähnt und fügen hinzu, daß dagegen der wichtige Grünwert von ihm ganz übereinstimmend zu 0·750 (Exner 0·756) angegeben wird (Rotwert stets gleich 1 gesetzt, wie oben).

Kurz gesagt, wir halten uns vorläufig für berechtigt, $\gamma = 0$ zu setzen, auch ohne dies durch eine Abänderung der GrEK. zu kompensieren. Die Zahlenkoeffizienten der Gleichungen (4') werden dann folgende

$$
\begin{aligned}
x_1' &= x_3 - x_2 \\
x_2' &= 0\cdot 708\,(x_2 - x_1) = \frac{1}{\sqrt{2}}\,(x_2 - x_1) \qquad (9)\\
x_3' &= 1\cdot 708\,x_1 + 1\cdot 292\,x_2 = \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right)x_1 + \left(2 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right)x_2,
\end{aligned}
$$

Die simultane Rechtwinkeligkeit der beiden Achsenkreuze in Fig. 3 bleibt nicht nur erhalten, sondern wird eher noch exakter, das

$\sqrt{2}$-Verhältnis besteht für die neuen Koeffizienten mit noch größerer Annäherung;

$$1:0\cdot708 = 1\cdot41 \qquad = \sqrt{2}.$$

Geht man jetzt an Hand von (4) und (6) der Frage etwas genauer nach, wie diese Beziehung zustande kommt, so findet man ($\alpha = 1$, $\gamma = 0$):

$$\frac{2-\beta}{1+\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

oder ausgerechnet

$$\beta = 5 - 3\sqrt{2} = 0\cdot75736 \qquad \text{(beobachtet } 0\cdot756\text{).}$$

Diesem skurrilen Wert der beobachteten Grünhelligkeit verdanken wir also die Vereinfachung.

Zur Herstellung der neuen Figur werden nun alle im vorausgehenden angegebenen Umrechnungen (die trotz ihrer Einfachheit recht umständlich sind, da sie stets für einige zwanzig Stellen entlang dem Spektrum numerisch ausgeführt werden müssen) vollkommen überflüssig. Der Vorgang ist folgender: Man zeichnet die Farbkoordinaten der Spektralfarben oder irgenwelcher anderer Farben, für die man sich interessiert, in ein im Verhältnis 1 $\sqrt{2}$ überhöhtes rechtwinkeliges Farbendreieck ein, und zwar den relativen (d. h. durch die Koordinatensumme dividierten) Blauwert als Abszisse, den relativen Grünwert als Ordinate. Man zeichnet in diesem Dreieck das Paar der sich rechtwinkelig kreuzenden Schwerlinien, auf denen beiden der Abstand Weißpunkt-Blaupunkt als Einheit gilt. Endlich zieht man durch den Blaupunkt, unter 45° gegen die beiden Schwerlinien geneigt die Exnergerade. Diese Figur bringt dann die König-Helmholtz'schen und die Hering'schen Valenzen und die Helligkeiten der Farben in genau derselben Weise, wie schon oben für Fig. 3 beschrieben, zum Ausdruck. Der Unterschied der beiden Figuren dürfte innerhalb der zurzeit erreichten Genauigkeit der verwendeten Daten liegen.

Ob der ganz besonderen Vereinfachung, welche die Konstruktion der Fig. 4 durch den speziellen Exner-Ives'schen Zahlenwert der relativen Grünhelligkeit erfahren hat, eine tiefere Bedeutung für die Auffassung des Sehvorganges zukommt, möchte ich vorläufig dahingestellt sein lassen. Es darf nicht verschwiegen werden, daß K. W. F. Kohlrausch l. c. einen ziemlich abweichenden Zahlenwert für die Grünhelligkeit gefunden hat, nämlich $0\cdot618$ (gegen $0\cdot756$), und daß auch von Abney[1] ein starkes individuelles Variieren des Koeffizienten behauptet wird, von letzterem freilich auf

[1] W. Abney, Proc. Roy. Soc. A. *83*, 462; *84*, 449, 1910; *86*, 42, 1911 *87*, 326, 1912.

Grund nicht ganz einwandfreier Methoden, die ihn zu der widerspruchsvollen Behauptung geführt haben, daß die anomale Trichromasie lediglich in einem abnormen Verhältnis der Grün- zur Rothelligkeit bestehe. (In Wahrheit müssen, rein logisch, die Helligkeitskoeffizienten auf eine exakte Farbengleichung ganz ohne Einfluß sein, d. h. wenn experimentell gefunden wird, daß zwei

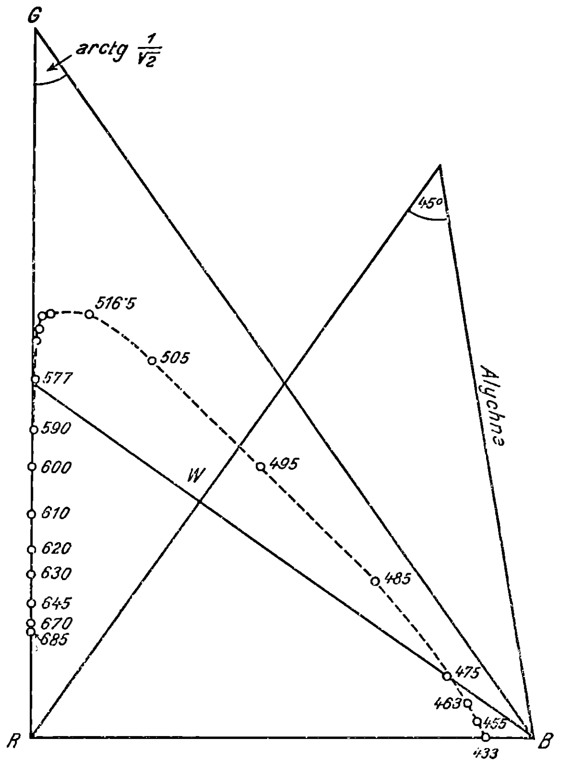

Fig. 4.

Direkte Konstruktion der (unwesentlich vereinfachten) Fig. 3 aus den nicht umgerechneten König'schen Daten.

Individuen ihre Farbengleichungen gegenseitig nicht anerkennen,[1] so besteht der adäquate theoretische Ausdruck dieser Tatsache keinesfalls lediglich in einer Verschiedenheit der Helligkeitskoeffizienten.)

Mit einem anderen Wert des Grünkoeffizienten als dem Exner-Ives'schen kann man zwar die Konstruktion der Fig. 4 auch stets so einrichten, daß die Schwerlinien des rechtwinkeligen Königdreiecks sich rechtwinkelig kreuzen, indem man demselben

[1] Was bei normalen und anomalen Trichromaten bekanntlich der Fall ist.

die Überhöhung $\sqrt{2}$ 1 erteilt; die beiden Hering'schen Achsen haben aber dann nicht den gleichen Maßstab; infolgedessen ist die Alychne nicht mehr eine 45°-Gerade im Hering'schen Achsenkreuz.

Mit derselben Reserve hinsichtlich einer etwaigen tieferen Bedeutung möchte ich schließlich noch den weiteren auffallenden Umstand erwähnen, daß in Fig. 4 der absteigende Ast der Spektralkurve mit sehr großer Genauigkeit der Hypotenuse eines *gleichschenkeligen* rechtwinkeligen Dreiecks sich anschmiegt, dessen horizontale Kathete RB ist.

Dagegen erscheint mir von unzweifelhafter Wichtigkeit für das tiefere Verständnis des Sehprozesses die Erkenntnis, daß das *Grundblau* — sei es das bisher angenommene, sei es eines, das mit völlig gleichem Recht an seine Stelle gesetzt werden darf — eine *helligkeitsfreie Farbe* ist. Ist das richtig, dann sind die drei »Komponenten« des Sehorgans doch wohl *nicht gleichartig*, die durch die Theorie suggerierte Vorstellung von der *symmetrischen Rolle* der drei Komponenten fällt dahin, und das dürfte bei der Suche nach dem physiologischen Substrat zu beachten sein.

II.

Es sei nun kurz das Verhältnis der Dreifarben- zur Vierfarbentheorie noch von einem anderen Gesichtspunkt aus beleuchtet, den ich allerdings vorläufig nicht in eine direkte Beziehung zu den vorher mitgeteilten graphischen Darstellungen zu setzen vermag.[1]

Schon einleitend wurde als der schärfste Gegensatz zwischen den beiden Auffassungen hervorgehoben, daß nach der *einen Weiß* und *Gelb* als psychologisch einfache Empfindungen fast (Weiß) oder ganz (Gelb) gleichberechtigt zu den drei anderen Farben (Rot, Grün, Blau) hinzutreten, nach der *anderen* dagegen Weiß und Gelb nur den einfachsten Mischungsverhältnissen entsprechen, nämlich 1 1 1 (per definitionem) und 1 1 : 0 (per experimentum).

Denkt man nun der phylogenetischen Entstehung eines Licht perzipierenden Organs nach, so ergibt sich die beinahe selbstverständliche Vermutung, daß in den primitivsten Anfängen seine Funktion darauf beschränkt sein wird, auf Ätherstrahlung *überhaupt* zu reagieren — zwar natürlich nur auf die Strahlung eines *beschränkten* Frequenzbereiches, das ergibt sich schon aus der ungeheuren Verschiedenheit der physikalischen Wirkung von den Radiowellen bis zu den γ-Strahlen. Als eine *zweite* Stufe der Anpassung wird es anzusehen sein, wenn das Organ beginnt,

[1] Siehe auch Die Naturwissenschaften, *12*, 927, 1924.

innerhalb dieses Frequenzbereiches auf verschiedene Frequenzen qualitativ verschieden zu reagieren. Dabei ist nun ein Entwicklungsgang ähnlich wie beim Ohr — »individuell« verschiedene Reaktion für jeden kleinen Frequenzbereich in feinster Abstufung — für ein Lichtorgan von vornherein ausgeschlossen, weil dasselbe unter natürlichen Verhältnissen niemals annähernd reinen Frequenzen ausgesetzt ist. (Würden dünne Schichten leuchtender Gasmassen biologisch eine große Rolle spielen, so könnte das anders sein.) Da also für die Entwicklung eines individuellen Unterscheidungsvermögens der einzelnen Frequenzen die Vorbedingungen fehlen, ist wohl das Wahrscheinlichste die Ausbildung eines summarischen Unterscheidungsvermögens, indem ein Überwiegen der kurzwelligen oder der langwelligen Bestandteile im Vergleich zu der »normalen« Lichtbeschaffenheit (Sonnenlicht) durch ein besonderes Empfindungsmerkmal angezeigt wird. Dies Empfindungsmerkmal ist die Blau-Gelb-Reihe, mit dem neutralen Weiß als Übergangspunkt, dem seine primitive Einfachheit natürlich nicht abhanden kommen wird dadurch, daß Abweichungen von der Norm allmählich eine empfindungsmäßige Betonung erlangen. Der erreichte Zustand ist der der Dichromasie, den wir außer an den partiell Farbenblinden auch auf der normalen Netzhautperipherie und, wie es scheint, auch bei vielen Tieren (Insekten) beobachten.

Zur Trichromasie führt ein zweiter, dem ersten vollkommen analoger Schritt. Die Spaltung auf Grund des Überwiegens kurz- oder langwelliger Strahlung, die früher das ganze perzipierte Frequenzgebiet betraf, wiederholt sich ein zweites Mal im Gebiet der langwelligen Lichter allein. So tritt Gelb in Rot und Grün auseinander, wie früher Weiß in Blau und Gelb. Ebensowenig wie früher dem Weiß geht jetzt dem Gelb sein bereits gefestigter einfacher Farbcharakter verloren durch die weitere Differentiation. Gelb ist für das Farbenpaar Rot-Grün dasselbe, wie Weiß für das Farbenpaar Blau-Gelb, nämlich sein neutraler Übergangspunkt.

Wenn diese Vorstellung von der sukzessiven Entstehung des Farbensinnes auch nicht durch strenge quantitative Methoden beweisbar ist, so scheint sie mir doch die Wurzel des Streites um die »Einfachheit« des Weiß und des Gelbs, ihre Rolle als Grundempfindungen, aufzudecken. Weiß und Gelb sind echte Grundempfindungen, aber nicht rezente, sondern anzestrale, die eine aus dem monochromatischen, die andere aus dem dichromatischen Stadium. Von den heute noch »ungespaltenen« Grundempfindungen stammt eine (Blau) noch aus dem Dichromatenstadium, die beiden anderen (Rot und Grün) sind neueste Erwerbung. Das erklärt, weshalb diese beiden noch den meisten Störungen und »Rückfällen« ausgesetzt sind, es erklärt auch, weshalb eine Störung der Blauempfindung allein, die nach der Dreikomponententheorie ebensogut möglich sein sollte, als physiologische Anomalie nicht vorkommt, weil die Ahnenreihe überhaupt kein Entwicklungsstadium dieser Art aufweist.

Mit dem »Blaugelbsinn« fehlt regelmäßig auch der »Rotgrünsinn«, es liegt dann angeborene totale Farbenblindheit vor. Es sind in der Tat Fälle beobachtet, in denen dieselbe nicht auf reinem Stäbchensehen, sondern auf einer Degeneration oder, wie wir lieber sagen, einem Atavismus des Tagesapparates zu beruhen scheint.[1]

Trifft die Auffassung zu, so haben wir auf den peripheren Zonen der normalen Netzhaut gleichsam eine Musterkarte der sukzessiven Stadien anzestraler Sehweisen vor uns, die ältesten am weitesten hinausgerückt. Bei der biologischen Wichtigkeit des fovealen Sehens erscheint es durchaus verständlich, daß neue Differentiationen in der fovea ihren Ausgang nehmen und erst allmählich auf die Peripherie ausstrahlen. —

Obgleich die vorstehende Arbeit rein theoretischer Natur ist, möchte ich doch nicht versäumen, auch an dieser Stelle der Stiftung für wissenschaftliche Forschung an der Universität Zürich meinen herzlichsten Dank zu sagen, durch deren Munifizenz mir die experimentelle Inangriffnahme einiger Probleme auf dem Gebiet der Farbe ermöglicht worden ist. Ich verdanke diesem Umstand die Anregung auch zu dieser theoretischen Untersuchung.

[1] F. Exner, Diese Berichte (2a), *131*, 636, 1922.