

Werk

Titel: Eine neue Theorie der Farbenempfindung

Autor: Bernstein, Julius

Ort: Braunschweig

Jahr: 1906

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?385489110_0021 | LOG_0393

Kontakt/Contact

[Digizeitschriften e.V.](#)
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

✉ info@digizeitschriften.de

Dafür, daß im Erdinneren sämtliche denkbaren Zustände in lückenloser Aufeinanderfolge vorhanden sind, sprechen die verschiedenartigsten Gründe, und insonderheit ist die Möglichkeit, daß das Magmameer sich unmittelbar an die Innenfläche der starren Erdrinde anschließe, mit dem, was uns die höhere Mathematik und Mechanik über den Betrag der Achsenrotation eines festen und eines teils festen, teils flüssigen Körpers gelehrt haben, einfach unvereinbar. Wenn aber der Übergang aus dem einen Molekularzustand der Materie zu einem anderen kein sprunghafter, sondern ein ganz allmählich sich vollziehender ist, dann muß sich notwendig eine innere Schale der Erdpanzerung ihrer Zusammensetzung und ihren physikalischen Eigenschaften nach von den äußeren Partien unterscheiden. Die letzteren bestehen aus nachgiebigem Stoffe; der Zustand der unteren Gesteinshülle dagegen ist ein latent-plastischer. Damit soll gesagt sein, daß die kleinsten Partikel eine so hochgradig leichte Verschiebbarkeit gegen einander besitzen, als wäre nahezu bereits erreicht, was bei tropfbar-flüssigen Körpern die eigentliche Definition ausmacht. Sofort ist jedoch evident geworden, daß dann geschmolzene Silikatmassen von jenseits unmöglich mehr den Weg durch eine Zwischenschicht von latenter Plastizität hindurch finden können; denn wäre selbst für den Augenblick die Bildung eines Spaltes denkbar, so müßte sich doch dieser unverzüglich wieder schließen. Dieser Einwurf, unseres Wissens zuerst von Loewl¹⁾ erhoben, beseitigt endgültig die Zulässigkeit einer Kommunikation zwischen dem Magma und der Außenseite durch die erwähnte Zwischenschicht hindurch, deren Existenz für jeden eine Denknöwendigkeit bildet, der auf der einen Seite die Kontinuirlichkeit der Aggregatzustände aufrecht erhalten und auf der anderen die Entstehung der Gebirge mit Suess und Heim auf die Schrumpfung der sich stetig abkühlenden Erde zurückgeführt sehen möchte.

Bei solcher Sachlage dürfte mithin lediglich die Verlegung räumlich getrennter Hohlräume in die Erdpanzerung einen logisch befriedigenden Ausweg gewähren, in denen die als Magma bekannte, bei ihrem Austritt als Lava zu kennzeichnende glutflüssige Masse enthalten ist. Daß solche Nester zurückbleiben konnten, ja mußten, ist nicht zu bestreiten, sobald man sich auf den Standpunkt der Evolutionshypothese stellt, die ganz irrigerweise eine Kant-Laplacesche genannt wird. Hat sie doch mit dem ersteren, der ganz andere Ideen pflegte, so gut wie gar nichts zu tun, und hat sie doch auch mit dem großen französischen Astronomen nur insofern Beziehung, als dessen

dem wird jeder, der sich mit der Hypothese einer gasförmigen Zentralkugel von nicht ganz kleinem Halbmesser vertraut machen will, das bekannte größere Werk von Svante Arrhenius (Lehrbuch der kosmischen Physik, 1. Band, Leipzig 1903) zu Rate zu ziehen genötigt sein, dessen Beweisgang sich als ein von dem sonst gewohnten nicht unbeträchtlich verschiedener zu erkennen gibt.

¹⁾ Loewl, Spalten und Vulkane, Verhandl. d. k. k. Geologischen Reichsanstalt, Wien 1887.

Grundvorstellung, konsekutive Entwicklung aus einem Urgasballe, für berechtigt erklärt wird. Wer von dieser Rekonstruktion des Anfangszustandes eines Weltsystems seinen Ausgang nimmt, wird nicht umhin können, durchaus unabhängig zu dem nämlichen Schlusse zu gelangen, der in der ersten Stübelschen These einen prägnanten Ausdruck fand. Die weiteren Konsequenzen derselben, vorab ihre Stellung zu der Streitfrage, ob Spalten eine unumgängliche Voraussetzung vulkanischer Kraftleistung seien oder nicht¹⁾, bleibt hiervon ganz unberührt. Wie dringend wünschenswert es aber ist, beim Auftauchen irgend einer neuen naturwissenschaftlichen Hypothese diese nicht für sich allein, sondern nur im engsten Kontakte mit anderen und namentlich älteren Behandlungsweisen des gleichen Gegenstandes in Betracht zu ziehen, das dürfte durch vorliegende kleine Studie rückschauenden Charakters wohl wieder hinreichend erhärtet sein.

Eine neue Theorie der Farbenempfindung.

Von Julius Bernstein (Halle a. S.).

Die beiden bekanntesten Theorien der Farbenempfindung, die Young-Helmholtzsche und die Heringsche, stehen bisher noch ziemlich unvermittelt neben einander. Die erstere besitzt den großen Vorzug, daß sie sich mit den Folgerungen der allgemeinen Nervenphysiologie in guter Übereinstimmung befindet. Dieselbe nimmt bekanntlich an, daß es in jedem farbenempfindlichen Element der Netzhaut mindestens drei farbenempfindliche Endapparate mit zugehörigen Nervenfasern gibt, für welche von Helmholtz als maximale Reizlichter das Rot, das Grün und das Violett des Spektrums zu Grundfarben ausgewählt wurden. Nach der Lehre von der spezifischen Energie der Nerven und der Identität der Nervenregung entsteht die spezifische Qualität der Lichtempfindung erst nach Zuleitung der im übrigen identischen Nervenregung zu den den drei Faserarten zukommenden Zentralapparaten im Gehirn. Ein Mangel dieser Theorie aber bestand bisher in der Erklärung der Weißempfindung durch eine Kombination der Erregungen durch alle oder die drei Grundfarben, bzw. durch die der komplementären Farbenpaare. Man mußte sich damit begnügen, die auf diese Weise entstehende Weißempfindung als eine Erfahrungstatsache ohne weitere Deutung hinzunehmen.

Die Heringsche Theorie hat dagegen den Vorzug, daß sie die Empfindung des Weiß, bzw. des farblosen Lichtes als eine Elementarempfindung ansieht. Sie nimmt bekanntlich drei Sehsinnssubstanzen an,

¹⁾ In dieser Hinsicht verweisen wir auf Bergéat (A. Stübels Untersuchungen über die Eruptionszentren in Südamerika, Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie 1902, S. 718 ff.). Auch Simmer (Der aktive Vulkanismus auf dem afrikanischen Festlande und den afrikanischen Inseln, München 1906, S. 9 ff.) spricht sich hierüber aus.

eine für Schwarz und Weiß, eine für Rot und Grün und eine für Gelb und Blau. Weißempfindung entsteht hiernach durch Dissimilierung der schwarz-weißen Sehsubstanz, Schwarzempfindung durch Assimilierung derselben; Rot- und Grünempfindungen entstehen durch Assimilierung bzw. Dissimilierung der rot-grünen Sehsubstanz oder umgekehrt; Gelb- und Blauempfindung entstehen ebenso durch Assimilierung und Dissimilierung der gelb-blauen Sehsubstanz oder umgekehrt. Hierzu muß noch die Annahme hinzugefügt werden, daß jede dieser vier Grundfarben auch, entsprechend ihrer Weißvalenz, eine Dissimilierung der schwarz-weißen Sehsubstanz herbeiführe. Infolgedessen heben sich bei Vermischung zweier komplementärer Farben die Farbenempfindungen auf, indem sich Assimilierung und Dissimilierung die Wage halten, und es bleibt als Differenz die Weißempfindung übrig.

Eine Schwierigkeit dieser Theorie besteht erstens darin, daß die wohlbegründete Annahme einer Assimilierung bei Einwirkung des Schwarz (bzw. des Dunkel) auch per Analogie auf eine der beiden komplementären Farben übertragen wird; denn welcher physikalische Grund sollte wohl dafür vorliegen, daß etwa 400 Billionen Lichtschwingungen in der Sekunde im Rot, nehmen wir an, eine Assimilierung, etwa 500 dagegen im Grün eine Dissimilierung ein und derselben Substanz bewirken. Zu einer solchen Hypothese fehlt vorläufig jede tatsächliche Grundlage. Es bringen zwar die Lichtstrahlen in der chlorophyllhaltigen Zelle Assimilierungen chemischer Substanzen hervor, aber dieser Prozeß besteht ja in einer Transformation kinetischer Energie der Lichtstrahlen in potentielle chemische Energie, ein Vorgang, der im Tierkörper nicht stattfinden kann. Welche Ursache sollte dafür vorliegen, daß ein solcher Prozeß, wenn er stattfände, sich bei einer Steigerung der Geschwindigkeit von 400 auf 500 Billionen Schwingungen in der Sekunde in sein Gegenteil umkehre? Vielmehr haben wir gegenüber dieser höchst unwahrscheinlichen Hypothese die Lichtstrahlen verschiedener Wellenlängen alle als gleichartige Reize anzusehen, welche auf die organischen Sehsubstanzen alle im Sinne einer Dissimilierung wirken, wie es alle Reize tun, welche Nervelemente erregen.

Eine zweite Schwierigkeit der Heringschen Theorie besteht darin, daß sie mit der wohlbegründeten Lehre von der spezifischen Energie der Nerven und der Identität der Nervenregung nicht gut in Übereinstimmung zu bringen ist. Seitdem wir mit Bestimmtheit wissen, daß es in der äußeren Haut besondere Tast- und Schmerznerven, besondere Wärme- und Kältnerven mit getrennten Endapparaten gibt, kann man an der Allgemeinheit des Gesetzes von der spezifischen Energie der Nerven nicht mehr zweifeln, aber ebensowenig auch daran, daß der Prozeß der Nervenregung in allen Nervenfasern verschiedener Funktion ein gleichartiger ist. Die spezifische Energie der Sinnesnerven besteht nur darin, daß dieselben bei ihrer Erregung in den verschiedenen Sinneszentren Prozesse auslösen, welche mit verschiedenen spezifi-

sehen Empfindungen verknüpft sind. Wie sollte es sonst möglich sein, daß bei Reizung eines Kältnerven durch Einwirkung von Wärme auf seine Endapparate doch nichts anderes als Kälteempfindung entsteht und ebenso umgekehrt? Der Erregungsprozeß im Nerven kann nichts mehr von dem Charakter des einwirkenden Reizes an sich tragen, denn die verschiedensten Reize haben bei demselben Nerven immer nur ein und denselben Effekt im Zentrum oder in der Peripherie.

Von diesem Gesichtspunkte aus kann man es nicht verstehen, daß die Sehsubstanzen Herings, wenn man dieselben in die Netzhaut verlegt, durch ein und dieselbe Nervenfasern dem Gehirn davon Nachricht geben könnten, ob in ihnen eine Assimilierung oder eine Dissimilierung stattfindet. Man könnte aber jeder Sehsubstanz zwei Nervenfasern zuerteilen, von denen die eine bei der Assimilierung, die andere bei der Dissimilierung in Erregung versetzt würde. Doch ist diese Art der Verknüpfung eines Aufnahmeapparates mit einer Nervenfasern schwer vorstellbar.

Trotz dieser Widersprüche und Schwierigkeiten hat die Heringsche Anschauung von dem Gegensätzlichen in der Empfindung zweier komplementärer Farben ihre Berechtigung. Wir haben in der Tat die Empfindung, als ob zwei komplementäre Farben bei ihrer Mischung sich gegenseitig auslöschten und nur ein in ihnen enthaltenes Weiß übrig ließen. Hering hat uns aber selbst in der Deutung dieser Vorgänge einen sehr willkommenen Ausweg offen gelassen, indem er gleich in seiner ersten Publikation es als unentschieden hingestellt hat, ob die von ihm postulierten Sehsubstanzen in der Retina oder in anderen Teilen des Sehnervenapparates ihren Sitz haben. Indem wir im folgenden von dieser Freiheit Gebrauch machen, werden wir sehen, daß wir den sinnreichen Anschauungen Herings auch vom Standpunkte der Identitätslehre aus hinreichend Genugtuung verschaffen können.

Wir werden gut tun, bei der Darlegung unserer Theorie von der jetzt durch die Untersuchungen von A. König und v. Kries wohlbegründeten und von M. Schulze schon vorher vermuteten Tatsache auszugehen, daß die Stäbchen der Netzhaut nur der Weißempfindung bzw. der des farblosen Lichtes und daß die Zapfen außer der Empfindung des Weiß der des farbigen Lichtes dienen. Somit besteht die Netzhaut aus zwei verschiedenen Systemen, aus dem einfachen, monochromatischen „Stäbchensystem“ und dem komplizierteren, polychromatischen „Zapfensystem“. Daß der Sehpurpur die photochemische Substanz der Stäbchen ist und daß seine Zersetzung die Empfindung des Stäbchen-Weiß (bzw. farblosen Lichtes) vermittelt, dürfte wohl auch eine ziemlich allgemein verbreitete Ansicht sein. Hiernach dürfte es auch als konsequent erscheinen, in den Zapfen ähnliche Sebstoffe zum Zwecke der Farbenwahrnehmung anzunehmen, die sich bis jetzt mangels einer Farbe oder Farbreaktion noch nicht haben nachweisen lassen. Auch diese Hypothesen der photochemischen Theorie des Sehens wollen wir in dem folgenden mit zu Hilfe nehmen.

Ein zweiter Ausgangspunkt unserer Theorie ist eine phylogenetische Betrachtung über die Entwicklung und Vervollkommnung des Sehorgans in der Tierreihe. Es liegt nahe, zu vermuten, daß das einfache Stäbchensystem das ursprüngliche und ältere der beiden Systeme ist, und daß sich aus diesem erst das kompliziertere Zapfensystem entwickelt hat. Der Zapfen der lichtempfindlichen Schicht der Netzhaut ist als ein aus dem Stäbchen durch Variabilität, Anpassung und Vererbung hervorgegangenes Gewebeelement zu betrachten, das bei der natürlichen Züchtung der Organismen sicherlich eine große Rolle gespielt hat. Schon bei vielen wirbellosen Tieren sehen wir Stäbchengebilde, mit Sehpurpur versehen, auftreten, aber erst bei den Wirbeltieren kommt die Umbildung der Stäbchen in Zapfen zustande, wie es scheint, gleichzeitig mit jener so zweckmäßigen Umordnung der Retinaschichten, bei welcher die Stäbchen- und Zapfenschicht zur äußersten, der lichtabsorbierenden Chorioidea anliegenden Schicht wird. Die älteste und ursprüngliche Qualität der Lichtempfindung, welche sich mit der Reizung der Stäbchengebilde verknüpft hat, kann daher nur eine einfache, d. h. die des farblosen Lichtes gewesen sein und ist es auch noch heutzutage bei dem Stäbchensystem unserer Netzhaut.

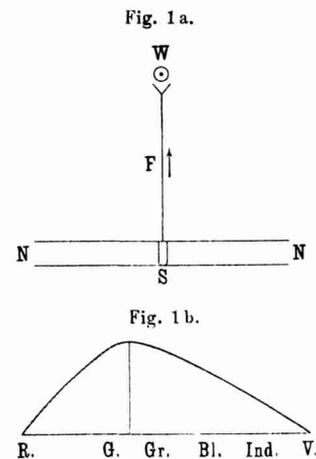
Den dritten Ausgangspunkt unserer Betrachtung bildet eine konsequente Anwendung der modernen Gehirnphysiologie. Wir wollen hierbei nicht etwa die Lokalisationstheorie der Gehirnfunktionen in ihren Extremen zu Hilfe nehmen, sondern nur postulieren, daß jeder spezifischen Sinnesempfindung auch spezielle zentrale Elemente zugeordnet sein müssen, gleichgültig, in welcher Weise sie topographisch verteilt sein mögen. In unserem speziellen Falle postulieren wir also, daß die Empfindung des Weiß (bzw. farblosen Lichtes) mit der physiologischen Tätigkeit bestimmter zentraler Elemente verknüpft sein muß, daß die Empfindung irgend einer angenommenen Grundfarbe eines Farbensystems mit der physiologischen Tätigkeit anderer und bestimmter zentraler Elemente verknüpft sein muß, und daß diese qualitativ verschiedenartigen Empfindungen nur dann auftreten, wenn diesen zentralen Elementen eine Erregung gleichartiger Natur durch eine reizleitende Nervenfasern zugeführt wird, oder wenn sie durch innere Reize in Erregung versetzt werden. Diese Voraussetzungen allein genügen aber noch nicht zur Erklärung aller Erscheinungen der Lichtempfindung, es muß vielmehr noch ein anderes Prinzip der Nervenphysiologie zu Hilfe genommen werden, welches den Heringschen Gegensätzlichkeiten der Assimilierung und Dissimilierung Genüge leistet. Dies ist das Prinzip der „Hemmung“, welches in dem Gebiete der Nerventätigkeiten ja anerkanntermaßen eine wichtige Rolle spielt. Daß verschiedene Zentren im Gehirn und Rückenmark nicht nur durch erregende, sondern auch durch hemmende Nervenfasern mit einander verbunden sind, geht ja aus den bekannten Erscheinungen der Reflexhemmungen und der willkürlichen

Hemmungen von Reflexen hervor und muß meines Erachtens auch zur Erklärung der Assoziationen in der Hirnrinde zugelassen werden. Die Hemmung der Tätigkeit eines zentralen oder peripheren Apparates muß aber, wie z. B. die des Herzens bei Vagus-Reizung, mit einer den Ruhezustand begleitenden Assimilierung verbunden sein, was ja bekanntlich von Gaskell aus dem Ansteigen des Muskelstromes am Herzen bei Vagus-Reizung geschlossen wird.

Vorausgesetzt wird ferner, was ja ohne weiteres einleuchtet, daß mit der phylogenetischen Vervollkommnung des Sehorgans auch eine weitere Entwicklung der Nervenzentra desselben einhergeht. Damit sind denn alle Grundlagen gewonnen, um mit einer zweckmäßigen Kombination der angeführten Prinzipien die neue Theorie der Farbenempfindung auf den beiden älteren aufzubauen.

Gehen wir nun auf den einfachen und ursprünglichen Zustand des Sehorgans zurück, in welchem die Retina nur mit einer gleichförmigen Stäbchenschicht ausgestattet ist, so supponieren wir, daß diese Elemente nur einen Sehstoff beherbergen und durch eine Faserart mit einem Zentrum verbunden sind, welches nur die Empfindung farblosen Lichtes vermittelt. In diesem Zustande befindet sich auch heute noch das Stäbchensystem unserer Netzhaut mit dem ihm zugehörigen Sehnervenzentrum. Daß letzteres bei den höheren Tieren eigentlich aus einem subkortikalen und kortikalen besteht, davon soll hier abgesehen werden, denn darauf kommt es im Prinzip hier nicht weiter an. In Fig. 1a möge dieses Verhältnis schematisch dargestellt sein, indem *NN* die Netzhaut mit einem darin befindlichen Stäbchen *S* bedeute. Von diesem führe eine Faser *F* zu dem zentralen Element *W*, dessen Erregung von einer farblosen Lichtempfindung oder, wie wir sie nennen wollen, der Empfindung des Stäbchen-Weiß begleitet sein möge. Die in dem Spektrum des Sonnenlichtes enthaltenen Farbenstrahlen mögen, wie die Kurve Fig. 1b angibt, das Stäbchen in verschiedener Stärke, maximal, wie es der menschlichen Netzhaut entspricht, im Gelb-Grün reizen. Die Qualität der Empfindung sei aber über das ganze Spektrum eine unterschiedslose.

Gehen wir nun zu einer höheren Entwicklungsstufe der Netzhaut über, auf der sich gewisse Stäbchen in Zapfen verwandelt haben, in denen sich zunächst zwei differente Sehstoffe *a* und *b* gebildet haben mögen. Mit dieser Bildung muß dann aber auch die weitere Differenzierung im Sehnervenapparat vor sich gegangen sein. Den beiden Sehstoffen eines Zapfens *Z* (Fig. 2a)



gehören die Fasern F_a und F_b an, welche, wie bei den Stäbchen, zunächst zu den farblos bzw. weißes Licht empfindenden Zentren W_a und W_b führen. In diesem Zentralorgan hat aber gleichzeitig eine Weiterentwicklung zur Bildung der beiden farbenempfindlichen Zentren A und B geführt, von denen durch direkte Leitung durch die Fasern E , von W_a und W_b aus, A die Empfindung der Farbe a und B die Empfindung der Farbe b hervorruft. Das Weiß bleibt daher auch beim Zapfensehen die ursprüngliche und elementare Lichtempfindung. Jede Farbe hat, entsprechend der Heringschen Forderung, ihre Weißvalenz. Zu diesem Zapfen-Weiß gesellt sich aber, dasselbe übertönend, durch Leitung der Erregung von W nach A oder B eine Farbenempfindung hinzu. Nun geschehe aber diese Differenzierung der zentralen Elemente aus Weiß zu Farben empfindenden unter gleichzeitiger Bildung von Hemmungsfasern HH , von denen die aus W_a das Element B und die aus W_b das Ele-

Fig. 2 a.

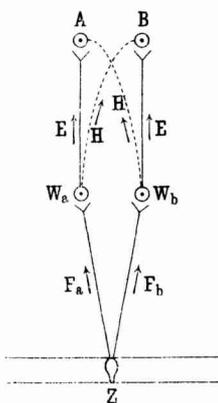
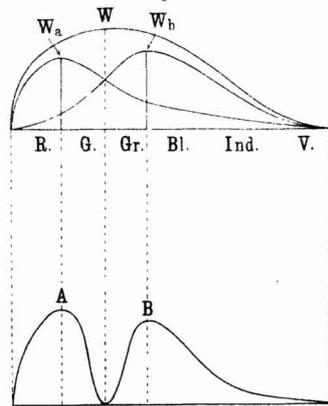


Fig. 2 b.



ment A hemmen mögen. Wirken demnach beide Farben a und b in gewisser Stärke gleichzeitig ein, so wird sowohl A wie B außer Tätigkeit gesetzt, d. h. die Farbenempfindung wird ausgelöscht, und es bleiben nur die Weißerregungen in W_a und W_b übrig. Die Farben a und b verhalten sich unter dieser Bedingung wie komplementäre. Daß die beiden zentralen Elemente A und B in der angegebenen Weise durch eine erregende und hemmende Faser mit je einem zentralen Element W_a und W_b verbunden sind, ist eine durchaus logische Annahme, welche mit den Tatsachen im Gebiete der Hemmungen von Reflexen und Empfindungen in guter Übereinstimmung steht. Wir wissen, daß eine sensible Reizung die reflektorische Wirkung eines anderen Reizes schwächen und aufheben kann, und bekannt ist es auch, daß zwei gleichzeitig stattfindende Sinnes-Erregungen bzw. Empfindungen sich gegenseitig stören und hemmen können. Die Entwicklung der Zentren A und B geschieht nach diesem Prinzip unter gegenseitiger Hemmung ihrer Funktionen, so daß sich die ihnen entsprechenden Qualitäten der Empfindung gegenseitig ausschließen.

Es seien nun in Fig. 2 b die beiden Kurven W_a und W_b die über dem Spektrum errichteten Erregungskurven der zentralen Elemente W_a und W_b (Fig. 2 a).

Wir wollen, wenn die Farben a und b einzeln einwirken, die Größe der Farbenerregung in A und B den Ordinaten der Kurven W_a und W_b proportional setzen. Ebenso wollen wir auch die Hemmungen der Erregungen in A und B in demselben Maße der Intensität von W_a und W_b proportional setzen. Es wird daher für jede Stelle des Spektrums die Farbenerregung in den Elementen A und B , deren Größe wir selbst mit A und B bezeichnen wollen, sein: $A = K(W_a - W_b)$ und $B = K(W_b - W_a)$, worin K eine Konstante bedeutet (und nur positive Werte von $W_a - W_b$ und $W_b - W_a$ gelten).

Konstruieren wir uns hieraus die Kurven für die Größe der Farbenempfindungen in den Elementen A und B , so erhalten wir dafür die beiden über dem Spektrum errichteten Kurven A und B (Fig. 2 b). Für die Weißvalenz derselben erhalten wir die aus der W_a - und W_b -Kurve summierte W -Kurve¹⁾. Das Auge würde in diesem Falle ein dichromatisches sein. Nehmen wir an, daß das Maximum der A -Kurve im stärksten Rot und das der B -Kurve im Grün-Blau liege, entsprechend dem komplementären Farbenpaare des farbtüchtigen Menschen, so wird das Spektrum mit Rot beginnen, nach dem Gelb-Grün in ein Weiß übergehen und dann würde das Grün-Blau mit einem Maximum im Grün-Blau bis zum violetten Ende des Spektrums folgen. Das Auge verhielte sich wie das eines Gelb-Blau-Blinden nach Hering.

Ein weiterer Schritt besteht nun in der Annahme, daß in den Zapfen ein zweites Paar von Sehstoffen entstehe, welche je durch ein zweites komplementäres Farbenpaar des Spektrums maximal zersetzt würden. Nennen wir diese Stoffe c und d , ihre zugehörigen Fasern F_c und F_d , die Weiß empfindenden Zentren W_c und W_d und die zugehörigen Farben empfindenden Zentren C und D , so übertragen wir auch diesen Zentren die Eigenschaft, daß sie in derselben Weise wie die W_a -, W_b - und A - und B -Zentren unter einander durch erregende und hemmende Fasern verbunden seien. Der Erfolg ist nun ganz analog demjenigen, den wir eben an den A - und B -Zentren angegeben haben. Es wird am nächsten liegen, für diese beiden Farben das Gelb und Blau (bzw. Indigo) des Spektrums auszuwählen. Wir konstruieren dann die Weißvalenzkurven W_c und W_d , die summierte W -Kurve und die entsprechenden Kurven C und D ganz analog der Konstruktion von Fig. 2 b. Durch die Kombination der A - und B -Kurven mit den C - und D -Kurven würden sich demnach schon unter Annahme der Farben Rot und Grün (bzw. Grünblau), Gelb und Blau (bzw. Indigo) die Farbenempfindungen des farbtüchtigen Auges nach Hering ergeben. Das Fehlen der Rot- und Grün-Elemente würde der Rot-Grün-Blindheit entsprechen. Es würde aber im Prinzip kein Widerspruch sein, wenn man noch ein drittes komplementäres Farbenpaar mit den ihnen entsprechenden Sehstoffen, Fasern und Zentren in analoger Ver-

¹⁾ Die Einheiten der Ordinaten der Kurven A und B gegenüber denen von W_a , W_b , W sind keineswegs dieselben und hängen von der Konstante K ab.