

Ein Beitrag zur Theorie der Farbenempfindungen.

Von Dr. Peter Geuter (auf dem Felde der Ehre gefallen).

§ 1. Einleitung.

Eine Theorie von Sinnesempfindungen hat eine psychophysische Aufgabe zu lösen. Sie sucht verständlich zu machen, wie bestimmte physikalische oder chemische Energien („Reize“) durch Vorgänge im belebten Körper („physiologische Prozesse“) bestimmte seelische Vorgänge („Empfindungen“) auslösen. In gleicher Weise müssen demnach 1) die Natur des Reizes, 2) die anatomischen und physiologischen Befunde und 3) die Aussagen des Bewusstseins berücksichtigt werden. Für die Helligkeits- und Farbenempfindungen ist der spezifische Reiz das Licht. Es beruht nach neueren Anschauungen auf elektromagnetischen Schwingungen des Aethers bezw. des Vakuums, wobei deren Amplitude die Stärke und deren Wellenlänge¹⁾ bezw. die damit umgekehrt proportionale Schwingungszahl die Art der Schwingung angibt. Nur ein kleines Gebiet, im allgemeinen von 6900 bis 3900 AE, in günstigsten Fällen von 8100 bis 2570 AE, aus der Gesamtheit der Wellenlänge wirkt als Reiz. Unter den körperlichen Befunden ist von Wichtigkeit, dass trotz der flächenförmigen Ausbreitung der Netzhaut jedes kleine Gebiet des mittleren Teiles, insbesondere des gelben Flecks, eine grosse Menge von Licht- und Farbenempfindungen vermitteln kann. Eine weitere für jede Theorie beachtenswerte Tatsache ist die Hintereinanderlagerung einer Anzahl von nervösen Gebilden in jedem Netzhautteile. Von physiologischen Vorgängen infolge der Lichtwirkung sind zwar einige bekannt: Bleichung des Sehpurpurs, Pigmentwanderung, Netz-

¹⁾ Die Wellenlänge wird in dezimalen Bruchteilen des Millimeters angegeben. Für die langwelligen „ultraroten“ Lichter wird häufig das Tausendstel Millimeter (μ) als Einheit genommen, für die sichtbaren und für die noch kurzwelligeren „ultravioletten“ Lichter jedoch entweder das Milliontel Millimeter ($\mu\mu$) oder neuerdings meist das Zehnmilliontel Millimeter (Angström, A oder AE Angströmsche Einheiten). Sind, wie im 6. Band des für die Spektroskopie massgebenden Werkes „Handbuch der Spektroskopie“ von H. Kayer, die Werte auf absolute Messungen der Wellenlänge zurückgeführt, so bezeichnet man sie mit I. A. = Internationale Angström. Der Unterschied macht sich jedoch erst in den Bruchteilen der A, also in den Hundertmilliontel oder Tausendmilliontel Millimeter geltend, und ist daher für die späteren Angaben dieser Abhandlung bedeutungslos.

hautströme, Fluoreszenz der Netzhaut; doch ist bis jetzt für Theorien des Farbensehens die Kenntnis dieser Erscheinungen von geringer Bedeutung geblieben.¹⁾

Als psychophysischen Grundsatz betrachten wir den, dass einfachen Empfindungen einfache physiologische Vorgänge, und beliebig mischbaren Empfindungen voneinander unabhängige Vorgänge entsprechen.²⁾ Diesem Grundsatz haftet eine gewisse Unbestimmtheit an, da er es unentschieden lässt, was man als „einfachen“ Vorgang zu betrachten hat. Auch herrscht noch keine Einstimmigkeit darüber, welches die „einfachen“ Empfindungen beim Farbensehen sind.

§ 2. Einfache und Mischempfindungen.

Unter den Empfindungsurteilen sind zunächst diejenigen über Gleichheit von Empfindungen von grosser Bedeutung. Erfahrungsgemäss können verschiedenartige Reize gleiche Empfindungen auslösen. Mischt man z. B. mit einem spektralen Farbenmischapparat oder mittels eines Farbkreisels ein bestimmtes rotes und ein bestimmtes grünes Licht, so erhält man denselben Farbeindruck, wie wenn man ein bestimmtes gelbes Licht mit einer geringen Menge weissen Lichtes mischt. Die Herstellung derartiger „Farbengleichungen“ ist eine wichtige Aufgabe psychophysischer Versuche und Messungen, und die Möglichkeit solcher Gleichungen bedarf natürlich eine theoretische Erklärung. Angesichts der Wichtigkeit derartiger Versuche erklärt es sich, dass manchmal bei der Bewertung von Farbentheorien die Frage als fast allein ausschlaggebend erscheint, ob die durch Gleichheitsurteile hergeleiteten Erscheinungen der Farbmischung durch die betreffende Theorie möglichst einfach gedeutet werden. Vom psychologischen Standpunkt aus beanspruchen jedoch die Erscheinungen der Aehnlichkeit und Unähnlichkeit die gleiche Berechtigung wie die Erscheinungen der Gleichheit, wenn sich auch Messungen nur in geringem Masse, z. B. über die Unterschiedsschwelle, anstellen lassen.

Die Farbenempfindungen bilden trotz ihrer ungeheuren Menge eine derart geschlossene Mannigfaltigkeit, dass sie sich unschwer nach ihrer Aehnlichkeit ordnen lassen. Aus einer sehr reichhaltigen Sammlung farbiger Papiere wähle man etwa ein bestimmtes Blau aus und stelle damit diejenigen Farben zusammen, die ihm mehr oder minder ähnlich sind. Wir erhalten da dem Blau ähnliche Farben, die zugleich eine Aehnlichkeit mit Rot zeigen (violette Farben); andere sind dem Grün zugleich ähnlich (Blaugrün); wieder andere blaue Farben sind zugleich weisslich (Hellblau) oder schwärzlich

¹⁾ Eine Darstellung der Anatomie der Netzhaut und der physiologischen Vorgänge habe ich in § 2 der Schrift „Der Farbensinn und seine Störungen“ gegeben. — Die neuen Untersuchungen von Fröhlich über Netzhautströme im Tintenfischeauge sind jedenfalls auch von grosser theoretischer Bedeutung.

²⁾ Vgl. auch G. F. Lipps, Grundriss der Psychophysik, 2, Leipzig 1909, 89.

(Dunkelblau). Die beiden letzten Gruppen zeigen noch eine andere Besonderheit, die schon in der Bezeichnung steckt: Die weisslichen Papiere sind zugleich hell, die schwärzlichen zugleich dunkel. Bleiben wir jedoch bei gleichhellen Papieren, so erhalten wir noch eine weitere Gruppe: die eine Reihe von Farben nähert sich allmählich einem Grau (Graublau oder Mattblau), die andere entfernt sich von Grau (Gesättigtes Blau). Aus den drei Paaren von Gegensätzen: 1) Rotblau, Blau, Grünblau, 2) Hellblau, Blau, Dunkelblau, 3) Mattblau, Blau, Sattblau ergibt sich, dass unsere Farbenempfindungen eine dreifach veränderliche Mannigfaltigkeit bilden.

Um sich diese wichtige Eigenschaft zu veranschaulichen, empfiehlt es sich, die Farbenempfindungen mit räumlichen Gebilden zu verkoppeln. Ist je ein Punkt das Bild einer Farbenempfindung, so kommt die Veränderlichkeit der Farbenempfindungen nach drei Richtungen in einem dreidimensionalen Raumgebilde, einem „Farbenkörper“ zum Ausdruck. — Die Punktreihen sind nicht unbegrenzt. Bei abnehmender Sättigung kommt man zu einem Grau, das mit dem betreffenden Blau nur mehr die Helligkeit, aber nicht mehr die Farbe gemeinsam hat. Auch die Sättigung, die Weisslichkeit und die Schwärzlichkeit lassen sich nicht über eine gewisse Grenze hinaus steigern. Bei Benutzung farbiger Papiere kommt man sehr bald an diese Grenze heran. Der Farbenkörper ist aber für die durch farbige Papiere erregbaren Empfindungen von geringer Grösse. Weiter kommt man mit farbigen Lichtquellen. Nimmt man noch die Adaptationserscheinungen, räumlichen und zeitlichen Kontrast hinzu, so erhält der Farbenkörper seine grösste Ausdehnung. Man muss sich dabei darüber klar sein, dass der Farbenkörper einen ganz bestimmten Sinn nur für einen bestimmten physiologischen Zustand des Auges hat, dass es aber je nach diesen Zuständen verschiedene Farbenkörper gibt.

Schwarz und Weiss sind, wie Grau, völlig ungesättigte Empfindungen; beim Uebergang zu diesen verliert Blau, und auch jede andere Farbenempfindung, immer mehr an Sättigung. Da wir die ungesättigten Empfindungen von Blau (Mattblau) nach rechts verlegt haben, so gehören Weiss und Schwarz nicht senkrecht oberhalb bzw. unterhalb Blau, sondern rechts davon, senkrecht oberhalb bzw. unterhalb Grau, und die Uebergänge von Blau zu Weiss und Schwarz verlaufen schräg nach rechts aufwärts bzw. abwärts.

Wenn wir die entsprechende Betrachtung auch für andere Farben anstellen, so ergibt sich, dass sich diese um eine Achse gruppieren lassen, deren oberer Pol Weiss, deren Mitte Grau und deren unterer Pol Schwarz ist. Solange keine weiteren Eigenschaften der Farbenempfindungen zur Veranschaulichung kommen sollen, ist die Kugel der einfachste Farbenkörper.

Da Weiss und die verschiedenen Stufen von Grau und Schwarz die Achse des Farbenkörpers bilden, und da keine andere derartige Achse möglich ist, so hat die Farbenkugel eine bestimmte Lage. Bereits jetzt heben sich Weiss, Grau und Schwarz durch diese Eigen-

schaft als farblose oder tonlose Lichtempfindungen oder reine Helligkeitsempfindungen von den übrigen Lichtempfindungen, den eigentlichen Farbenempfindungen, scharf ab.

Durch die Lage der Achse ist der obere Pol der Farbkugel das Bild der Empfindung Weiss, der untere Pol das Bild von Schwarz. Der Aequator enthält die verschiedenen gesättigten Farben (die „Farbentöne“). Aus der grossen Zahl dieser nennen wir: Rot, Rotorange, Orange, Gelborange (Goldgelb), Gelb, Grünlichgelb (Schwefelgelb), Gelbgrün, Grün, Blaugrün, Zyanblau, Indigoblau, Violett, Purpur, Karmin. Auf den Meridianen liegen die bei der betreffenden Helligkeit am meisten gesättigten Uebergänge (die „Beschattungen“).

Wir wollen die Reihe der gesättigten Farben noch näher betrachten. Fassen wir die obigen, willkürlich herausgegriffenen Farben Rot, Rotorange usw. als bestimmte Einzelempfindungen auf, so liegen in ihren Zwischengebieten noch jedesmal eine Reihe von Farben, die mit den genannten anstossenden Farben (Grenzfarben) Aehnlichkeit besitzen und die als deren Mischempfindungen betrachtet werden können. Die Zwischengebiete lassen sich zunächst mit Leichtigkeit durch Auslassen solcher Farben vergrössern, die durch die Bezeichnung bereits als Mischempfindungen gekennzeichnet sind, wie Rotorange, Gelborange usw. Wir hätten dann nur mehr die Grenzfarben Rot, Orange, Gelb usw. Doch auch hier zeigt sich noch die Möglichkeit einer Verringerung der Zahl der Farben. So zeigt Orange eine deutliche Aehnlichkeit mit Rot und Gelb und lässt sich daher auch als Rotgelb bezeichnen. Das Zwischengebiet lässt sich daher dadurch, dass Orange als Grenzfarbe wegfällt und ins Zwischengebiet aufgenommen wird, vergrössern. Eine beliebige Vergrösserung der Zwischengebiete ist natürlich nicht möglich, da sonst alle Qualitätsunterschiede, also „Farben“, wegfielen. Versuchten wir etwa in der Farbenreihe Rot, Gelb, Grün das Gelb als Grenzfarbe zu streichen und ins Zwischengebiet zu verweisen, so würden dem die Aussagen des Bewusstseins widersprechen. Keine psychische Analyse hat bisher Gelb als Mischempfindung von Rot und Grün, als „Rotgrün“, zu erklären vermocht. Eine Theorie, die Gelb als „Rotgrün“ betrachtet, widerstreitet also der Erfahrung. Ebenso wenig, wie Gelb Mischempfindung ist, kann Blau als Mischempfindung, etwa als „Grünviolett“ oder „Grünrot“, oder Rot als „Blaugelb“ oder „Violettgelb“ oder Grün als „Gelbblau“ oder „Gelbviolett“ erklärt werden, wohl aber Violett als „Blaurot“. Wir erhalten demnach als einfache Farbenempfindungen: Rot, Gelb, Grün und Blau. Auffällig ist freilich, dass die Aussagen über Einfachheit und Zusammengesetztheit nicht gleichmässig entschieden ausfallen; so wird man z. B. eher geneigt sein, von Grün als von Gelb die Eigenschaft der Einfachheit zu bestreiten, oder eher bei Blaurot (Violett) als bei Blaugrün die Einfachheit anzunehmen.

Die ungesättigten, die dunkeln und die matten Farben sind leicht als Mischempfindungen der gesättigten Farben mit Weiss, Schwarz

und Grau, Grau hingegen als Mischempfindung zwischen Weiss und Schwarz zu erkennen. Diese beiden Empfindungen wiederum müssen als einfache Empfindungen betrachtet werden. Dies ergibt sich als Antwort auf die Frage, welche Grundfarben in Weiss oder Schwarz als Bestandteile empfunden werden können: Weiss und Schwarz zeigen nichts von Rot, Gelb usw., treten vielmehr als „farblose Empfindungen“ in Gegensatz zu diesen.

Die Sonderstellung der einfachen Empfindungen Rot, Gelb, Grün, Blau, Weiss und Schwarz kommt deutlicher als in der Farbenkugel in einer Doppelpyramide zum Ausdruck. Man vgl. Abbildung 3 in meiner Schrift „Der Farbensinn und seine Störungen“ (Leipzig 1914 bei Gustav Fock, 1 Mk.), worin auch die Frage der Einfachheit von Farbenempfindungen etwas ausführlicher besprochen ist.

§ 3. Unmittelbare Empfindungen. Heringsche Theorie.

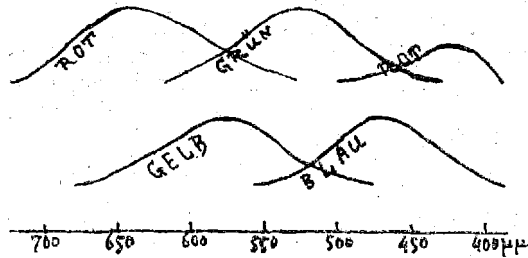
Eine Eigenschaft der Mischempfindungen ergibt sich aus der Möglichkeit, die gesättigten Farben durch eine geschlossene Linie, so z. B. in der Farbenkugel durch deren Aequator, darzustellen. Mischempfindungen liegen in den Zwischengebieten zwischen zwei Grenzfarben, wobei diese zunächst noch nicht als Grundfarben vorausgesetzt zu werden brauchen. Zwei Zwischengebiete sind entweder völlig getrennt, oder haben nur den Grenzpunkt gemeinsam. Daraus folgt, dass eine bestimmte Farbe nicht zwei Gebieten zugehören kann, also nicht z. B. zugleich rotorange und gelborange, nicht zugleich rotgelb und grüngelb sein kann. Demnach kann eine Mischempfindung nur zwei, nie mehr, Farbenbestandteile enthalten. Ferner folgt, dass nur zwischen Farben, die als benachbart betrachtet werden können, Mischempfindungen möglich sind, z. B. zwischen Orange und Gelb, aber nicht zwischen Orange und Violett. Für die einfachen Farben erhalten wir daraus die Möglichkeit der Mischung zwischen Rot und Gelb, zwischen Gelb und Grün, zwischen Grün und Blau, zwischen Blau und Rot, aber nicht zwischen Rot und Grün, ferner nicht zwischen Gelb und Blau. Rot und Grün, sowie Gelb und Blau heissen wegen dieses Verhaltens (Unvereinbarkeit) auch „Gegensfarben“. Mischungen von Farben mit den farblosen Qualitäten Weiss und Schwarz sind beliebig möglich. So ist Matthila (Grauviolett) die Mischung von Rot, Blau, Weiss und Schwarz.

Die gegenseitige Abhängigkeit der Farben und andererseits die Unabhängigkeit der farblosen Qualitäten, die in der Farbenkugel bezw. der Farbenpyramide zur Darstellung kommt, ist natürlich durch dieses Bild noch nicht erklärt, sondern muss physiologisch befreiflich gemacht werden.

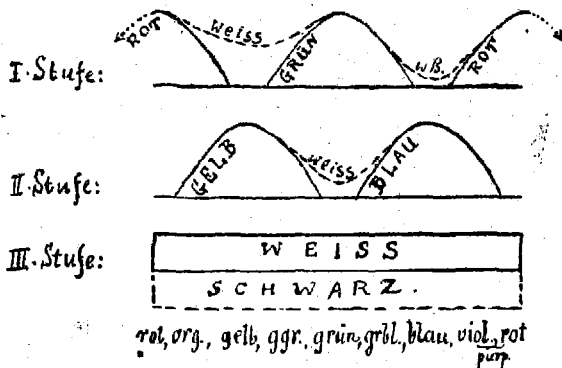
Hatten wir oben unter „Rot“, „Gelb“ usw. zunächst bestimmte Punkte der Farbenreihe verstanden, so kommen wir durch den Begriff der Mischempfindung dazu, unter Rot, Gelb usw. ganze Empfindungsgebiete oder -streifen zu verstehen von der Art, dass sich je zwei benachbarte Gebiete zum grossen Teil überdecken. Wegen

der Mischbarkeit (Vereinbarkeit) der Empfindungen Rot und Gelb, Gelb und Grün usw. haben wir uns die physiologischen Grundlagen der Empfindungen Rot und Gelb, sowie Gelb und Grün als von einander unabhängig vorzustellen. Hingegen sind die Grundlagen der „Gegenfarben“ Rot und Grün, sowie Gelb und Blau als voneinander abhängig zu betrachten.

In den beiden folgenden schematischen Figuren (1 und 1a):



Abbild. 1.



Abbild. 1a. Anwendung der Abb. 1 auf das Spektrum.

sind die einander überdeckenden Farbstreifen der Deutlichkeit wegen in zwei Stufen auseinander gezogen. Dadurch sind gleichzeitig die als von einander physiologisch unabhängig zu betrachtenden Empfindungen auf verschiedene Stufen gerückt, die voneinander abhängigen jedoch auf gleicher Stufe belassen. Auf eine dritte Stufe könnte man die Empfindungen Weiss und Schwarz setzen, insofern diese von den beiden vorhergehenden Stufen unabhängig sind, aber untereinander als entfernteste Punkte der Achse der Farbkugel in einem gewissen Gegensatz stehen. Wenn wir den Grund der Unabhängigkeit darin sehen, dass die betr. physiologischen Vorgänge in verschiedenen Substanzen, den Grund der Abhängigkeit jedoch darin, dass zwei einander ausschliessende Vorgänge in derselben Substanz auftreten, so haben wir den Grundgedanken der Theorie der Gegenfarben von Hering. Ihm zufolge setzt sich das Sehorgan,

die psychophysische Sehsubstanz (über die peripheren Vorgänge wird hierbei nichts ausgesagt) aus drei Bestandteilen zusammen, von denen der eine (die schwarz-weiße Sehsubstanz) wesentlich die Helligkeitsempfindungen bestimmen würde, während die beiden andern (rotgrüne und gelbblaue Sehsubstanz) die Träger der farbigen Qualitäten wären. Des weitern wird angenommen, dass in jeder dieser Substanzen Vorgänge entgegengesetzter Art ablaufen, die Hering als assimilatorische und dissimilatorische (A- und D-Vorgänge) bezeichnet. Das Verhältnis, genauer: die Differenz dieser entgegengesetzten Vorgänge soll nun für die Empfindung bestimmend sein. Ihr Gleichgewicht in einer der farbigen Substanzen würde bedingen, dass die Empfindung weder die eine oder die andere Farbe des betr. Paares aufweist. Beim Gleichgewicht in beiden farbigen Substanzen ist die Empfindung farblos. Das Gleichgewicht in der schwarz-weißen Sehsubstanz entspricht einem bestimmten mittleren Grau. Weiss, Rot und Gelb in zunehmender Helligkeit resp. Sättigung entspricht dem steigenden Uebergewicht der D-Vorgänge, Schwarz, Grün und Blau ebenso dem Uebergewicht der A-Vorgänge. . . Als Dauerzustand ist stets nur der eines Gleichmasses von A- und D-Vorgängen möglich, also ein Grau von bestimmter Helligkeit und ohne Farbe¹⁾.

Was an der Hypothese am meisten auffällt, ist die Gleichordnung der dritten Substanz mit den beiden vorhergehenden. Weiss kann zu jeder Farbe des Spektrums in beliebigem Grade hinzutreten, ebenso Schwarz. Wollte man dies bei der dritten Stufe zeichnerisch darstellen, so müsste für jede Farbe Weiss und Schwarz zugleich abgetragen werden, also etwa Weiss nach oben, Schwarz nach unten, ohne dass eine bestimmte von der Farbe abhängige Höhe angegeben werden könnte. Weiss und Schwarz nehmen also eine Sonderstellung gegenüber den Farben ein, die bei Hering nicht zur Darstellung gelangt. Auch in anderer Beziehung unterscheiden sich Weiss und Schwarz von den Farben. Zwischen Rot und Grün sind Mischfarben unvorstellbar, zwischen Weiss und Schwarz sind die Mischfarben bekanntlich die verschiedenen Abstufungen von Grau; auch dieses kann zu jeder Farbe hinzutreten. (Beide Besonderheiten kommen übrigens in der Farbkugel deutlich zur Anschauung.) Wegen der Mischbarkeit sind demnach unserm psychophysischen Grundsatz entsprechend Weiss und Schwarz nur als unabhängige Empfindungen und nicht als Gegenfarben zu betrachten.

In obiger Darstellung der Farbenstreifen ist den Kurven Rot und Grün, wie auch Gelb und Blau noch eine durch eine gestrichelte Linie abgegrenzte Fläche aufgelagert. Dies soll den Grad der Weisslichkeit, den die mittleren Farben des Spektrums haben, veranschaulichen. Orange, Gelb, Grün und Zyanblau haben bekanntlich gegenüber Rot, Blau und Violett eine grössere „spezifische Helligkeit“, die sich als eine nähere Beziehung zu Weiss kennzeichnet. Diese spezifische

¹⁾ Nach v. Kries, im Handbuch der Physiologischen Optik von H. von Helmholtz^s (1911) 361/2, später nur zitiert als „Helmholtz Optik II“.

Helligkeit ist von den Farben untrennbar, gehört also in der Darstellung zu diesen.

Die Gefühlsrichtungen, räumlichen und zeitlichen Eigenschaften der Empfindungen werden wir trotz ihrer Wichtigkeit nur gelegentlich streifen.

§ 4. Reiz und Empfindung. Art der Erregung.

Berücksichtigen wir nunmehr das Verhältnis von Reiz und Empfindung. Als erste Tatsache heben wir hervor, dass der Gesichtssinn eine Empfindung ohne ausserkörperlichen Reiz hat, nämlich Schwarz. Die zweite bedeutsame Tatsache ist die, dass nur wenigen einfachen Reizen eine einfache Empfindung, den meisten einfachen Reizen eine Mischempfindung entspricht. Die Reize bilden eine unter dem Gesichtspunkt des „Grösser“ (mit Rücksicht auf die Schwingungszahl) bzw. „Kleiner“ (hinsichtlich der Wellenlänge) stetig veränderliche Mannigfaltigkeit. Den zugehörigen einfachen Empfindungen fehlt eine entsprechende Eigenschaft. Während die einfachen Gehörsempfindungen sich entsprechend den Reizen dem Grössenbegriff unterordnen lassen, indem dem „Grösser“ an Schwingungszahl das „Höher“ des Tones entspricht, zeigen die vier einfachen Farbenempfindungen nur einen Qualitätsunterschied, der nicht dem Grössenbegriff etwa als „Farbenhöhe“ einfügbar ist.

Von einer andern Seite aus betrachtet zeigen die Farbenempfindungen doch noch eine Beziehung zum Grössenbegriff. Ebenso wie der Klang ausser der als „Grösse“ auffassbaren Eigenschaft der Tonhöhe jeweilig noch den der Intensität, der Tonstärke, besitzt, so haben auch die Farbenqualitäten die Eigenschaft der Intensität, nämlich die der Lichtstärke. Freilich tritt dies nur bei mittlerer Reizstärke rein hervor, während bei hoher bzw. niederer Reizstärke noch durch Weisslich- bzw. Schwärzlichwerden eine Qualitätsänderung hinzutritt. Für das folgende nehmen wir also die Reize von mittlerer Intensität. Da nun den meisten Reizen keine einfache Farbenqualität, sondern eine Mischempfindung entspricht, z. B. dem Licht der Fraunhoferschen Linie G ein rötliches Blau, dem von H jedoch Rotblau (Violett), so ergibt sich aus den Lichtstärken der einfachen Empfindungsbestandteile die Möglichkeit einer Abstufung und einer Beurteilung einfacher Reize. So unterscheiden sich die den Linien G und H entsprechenden Empfindungen durch das Verhältnis der beiden Bestandteile Blau und Rot. Die absolute Stärke der Empfindungselemente Blau und Rot ist für ein mittleres Reizgebiet gleichgültig, d. h. auch wenn die Lichtquelle etwas stärker oder schwächer leuchtet, so ändern die Empfindungen Rötlichblau und Rotblau ihren Ton nicht. Bei einer Mischfarbenempfindung ergibt also die Summe der Lichtstärken der beiden farbigen Empfindungsbestandteile die Intensität der Gesamtfarbenempfindung, das Verhältnis der beiden Intensitäten ergibt jedoch die Qualität der Mischempfindung. Da dieses Verhältnis der Intensitäten eine stetig veränderliche Grösse ist, so unterliegen die zwischen zwei einfachen Empfindungen liegenden Mischempfindungen

auch dem Grössen- und dem Messungsbegriff. Sind zwei getrennte Punkte das Bild zweier einfachen Farbenempfindungen, so sind die Mischfarben durch die von der Verbindungsstrecke gebildete Punktreihe charakterisiert. Eine bestimmte Mischempfindung ist zahlenmässig festgelegt durch ihren Abstand von den beiden Endpunkten der Strecke, den Fixpunkten der Empfindung. Da nach obigem die Qualitäten der vier einfachen Farbenempfindungen dem Grössenbegriff widerstreben, so haben wir die eigentümliche Erscheinung, dass auf die Gesamtheit der Qualitäten der Farbenempfindungen der Grössenbegriff nicht anwendbar ist, wohl aber auf die vier Gruppen der Mischempfindungen einzeln.¹⁾

Aus der Eigenschaft der Reize und der entsprechenden Empfindungen lassen sich Schlüsse auf die physiologischen Vorgänge ziehen. Ein einfacher physiologischer Vorgang, z. B. der der Rotempfindung zugrunde liegende, muss durch eine ganze Reihe einfacher Reize (die verschiedenen Wellenlängen) angeregt werden können; andererseits müssen einfache Reize die Eigenschaft haben, gleichzeitig mehrere Vorgänge auslösen zu können. Beides wird in der Heringschen Hypothese durch die Ausbreitung eines einzelnen Vorgangs, z. B. für Rotempfindung, über ein grösseres Spektralgebiet und das Ueberlagern eines zweiten Vorgangs, z. B. für Gelbempfindung, in einer unabhängigen Substanz, über einen Teil desselben Gebiets hinreichend erklärt. Nur fragt es sich, ob die Art des Vorgangs festgehalten werden kann. Zu § 3 hatten wir schwere Bedenken wegen der Gleichstellung von Weiss und Schwarz mit den Farben. Hier reiht sich noch ein physiologisches Bedenken an. Die reizlose Empfindung Schwarz soll assimilatorischer Natur sein, d. h. auf Wiederaufbau zersetzter Sehsubstanzen beruhen. Ist dies der Fall, so klingt es wenig wahrscheinlich, dass die auf Reize hin erfolgenden Empfindungen Grün und Blau ebenfalls assimilatorisch seien. Aus psychologischen und physiologischen Gründen wollen wir daher Weiss und Schwarz eine Sonderstellung einräumen und müssen wir uns nach einer andern Erregungsform, als sie Hering annimmt, umsehen. Das nächstliegende wäre nun, für alle Farbenempfindungen Dissimilation, Substanzzersetzungen, anzunehmen. Dies tut z. B. Chr. Ladd-Franklin²⁾. Finden diese Zersetzungen von einer oder mehreren Substanzen in der Netzhaut statt, so hätte man für jede Zersetzungsart auch eine besondere Leitung oder eine besondere Art der Leitung nach dem Gehirn anzunehmen. Nach Ladd-Franklin bewirkt eine einzige Art von Farbmolekeln je nach dem Grad der Zersetzung Rot-, Grün- oder Blauempfindung. Danach muss bei verschiedenen Leitungen jede einzelne Leitung chemisch oder physikalisch anders reagieren; erst recht müsste man bei gemeinsamer Leitung dieser eine für die verschiedenen Farbenempfindungen verschiedene Reaktionsfähigkeit

¹⁾ Den Messungsbegriff halten wir theoretisch auch auf Empfindungen bis zu einem bestimmten Grad für anwendbar.

²⁾ Zeitschr. für Psychol. u. Physiol. der Sinn. 4 (1893) 211 ff. „Eine neue Theorie der Farbenempfindungen“.

zuschreiben. Das Verhalten der Leitung muss daher auf jeden Fall mit berücksichtigt werden. Nimmt man nun an, die Zersetzung pflanze sich durch den ganzen leitenden Nerv fort, so hat man folgende Schwierigkeit: Wirkt ein bestimmter Reiz längere Zeit auf dieselbe Netzhautstelle, so ist bereits beim ersten Eintreten der Empfindung die Substanz zersetzt. Am Wiederaufbau hindert sie der auf Zersetzung hinwirkende Reiz. Wie kann dann trotzdem die Empfindung weiter bestehen?

Statt einer Substanzänderung empfiehlt sich demnach als Grundlage der Erregung eher eine Bewegungsform. Da der Reiz, das Licht, auf einer Wellenbewegung beruht, so kommen wir dazu, analog auch für die Erregung im Nerven einen wellenartig weiterschreitenden Vorgang anzunehmen. Da die Lichtschwingungen elektromagnetischer Natur sind, und da auch in der Netzhaut elektromagnetische Vorgänge nachgewiesen sind, so stellen wir uns die Erregung im Nerven auch als eine elektromagnetische vor. Die verschiedenen Qualitäten der Empfindung erklären wir uns durch einen verschiedenen Rhythmus der Erregung. Dem Rot und Gelb können wir, entsprechend der grösseren Wellenlänge des Reizes, einen langsameren Rhythmus als dem Grün und Blau zuschreiben. Auf diesem Gegensatz beruht vielleicht der Gegensatz der Gefühlsbetonung: Rot und Gelb gelten als „warme“ Farben, ihre Gefühlsrichtung ist (nach St. Stefanescu-Granga¹⁾) Erregung, Grün und Blau sind „kalte“ Farben, ihre Gefühlsrichtung ist Beruhigung.

Wir halten es für vorteilhaft, wenn auch nicht für unbedingt notwendig, dem verschiedenen Rhythmus der beiden Leitungssubstanzen einen verschiedenen Träger zu geben. Die Verschiedenheit beruht nach unserer Auffassung auf verschiedenem chemischen Aufbau der Leitung. Da jede Substanz Trägerin von Gegenfarben ist, muss auch jede eines doppelten Rhythmus fähig sein. Dies erklären wir so, dass jede Substanz durch Umlagerung der Atome in zwei verschiedene isomere Modifikationen übergehen kann. Bei verschiedenem Rhythmus bleibt für dieselbe Substanz demnach dieselbe prozentuale Zusammensetzung aus Atomen, es verändert sich aber die Struktur der Molekel. Dass die Art der Lagerung der Atome auf die elektromagnetischen Kräfte von Einfluss ist, zeigt z. B. das Verhalten der Weinsäure, von der drei isomere Modifikationen vorkommen: Rechtsweinsäure, die polarisiertes Licht rechts dreht, Linksweinsäure, die es links dreht, und Traubensäure, die optisch unwirksam ist. — Bei diesen Annahmen haben wir auch chemische Umlagerungen, doch bilden sie nicht die eigentliche Erregung, sondern nur eine Vorbedingung dieser. Sie bilden gewissermassen das „Abstimmen“ der Leitung und gehen der rhythmischen Erregung voraus.

Uebrigens hindert nichts, auch bei einer Zersetzungstheorie einen verschiedenen Rhythmus in der Leitung anzunehmen. Stellt man sich vor, dass die Zersetzung nur in der Peripherie stattfindet, so sind

¹⁾ Psychol. Studien, herausgegeben von Wundt (1911) 284, zitiert nach dem „Philos. Jahrbuch“.

bestimmte Annahmen über die Natur der rhythmischen Erregung nicht notwendig; denkt man sich die Zersetzung in der Leitung selbst, so kann man sich einen Rhythmus der Zersetzung und des Wiederaufbaues der Substanz vorstellen.

Kehren wir zur Empfindung Schwarz zurück. Von einem Wiederaufbau zerstörter Leitungssubstanzen kann bei unserer Betrachtungsweise kaum die Rede sein. Die erwähnten, der Erregung vorausgehenden Umlagerungen verlaufen natürlich so rasch, dass sie den je nach den Umständen stundenlangen Schwarzempfindungen nicht zugrunde liegen können. Die Grundlage der Schwarzempfindung können wir allgemeiner auffassen als Lebensbetätigung, Stoffwechselvorgang in nicht gereiztem Organ. Wenn dieser Vorgang in der Peripherie des Sinnesorgans stattfindet, so muss auch, damit er zum Bewusstsein kommt, eine besondere Art der Leitung nach dem Gehirn angenommen werden. Unsere Annahmen werden daher vereinfacht, wenn wir die der Schwarzempfindung zugrunde liegenden Stoffwechselvorgänge in den Zellen des zentralen Apparates selber suchen. ¹⁾

§ 5. Weiss und komplementäre Lichter.

Betrachten wir nunmehr die noch übrig bleibende einfache Empfindung Weiss. Das ganz Merkwürdige an ihr ist, dass sie bei mittlerer Reizstärke nicht von einem einfachen, sondern stets nur von einem zusammengesetzten Reize erzeugt wird. Meist wird Weiss durch ein aus zahllosen Einzelreizen zusammengesetztes Licht, das diffus reflektierte Sonnenlicht, erregt. Doch auch eine beliebige Zahl passend zusammengestellter einfacher Reize kann zusammen Weissempfindung ergeben. Insbesondere nennt man zwei einfache, zusammen die Empfindung Weiss erregende Reize „komplementäre“ Lichter. So sind nach Helmholtz u. a. komplementär die Wellenlängen 656 $\mu\mu$ (Rot) und 492 $\mu\mu$ (Grünblau); 574 $\mu\mu$ (Goldgelb) und 482 $\mu\mu$ (Blau); 567 $\mu\mu$ (Gelb) und 464,5 $\mu\mu$ (Indigoblau). Zu Grün ist ein zusammengesetzter Reiz, Purpur, komplementär. Es sind also die Lichter von Gelb und Blau, sowie annähernd von Rot und Grün, also von je zwei Gegenfarben, komplementär. Die komplementären Lichter erlauben uns eine genauere Vorstellung über den Grund der Unvereinbarkeit der Gegenfarben. Die Vorgänge der Roterregung und Grünerregung, sowie die der Gelberregung und der Blauerregung erscheinen deshalb unvereinbar, weil statt der Gleichzeitigkeit der beiden Erregungen eine neue einfache Erregung, die Weisserregung, eintritt. Zunächst haben wir noch die Schwierigkeit, dass die zu spektralem Rot bzw. Grün komplementäre Farbe nicht die reine Gegenfarbe (Grün bzw. Rot), sondern diese mit einem Zusatz Blau (also Blau-

¹⁾ Diese Annahme ist unabhängig von der Vorstellung G. E. Müllers und Titcheners von einer zentralen Grauerregung gemacht worden. Ueber letztere Hypothese vgl. meine Schrift: „Der Farbensinn und seine Störungen“ S. 24.

grün, bezw. Purpur) ist. Infolgedessen ergeben spektrales rotes und grünes Licht zusammen nicht Weiss, sondern Weisslichgelb. Eine Lösung der Schwierigkeit liegt in der Annahme, dass das spektrale rote Licht nicht die einfache Empfindung Rot, sondern eine Mischempfindung von Rot mit Gelb ergibt. Dieses Gelb bedürfte dann zur Aufhebung zu Weiss eben den Zusatz Blau. Die Annahme wird bestätigt dadurch, dass tatsächlich Hering bei der Herstellung der Lichter, die die ihm einfach erscheinenden Empfindungen (das „Urot“, „Urgelb“ usw) erregten, zu dem spektralen Rot noch eine beträchtliche Menge Blau hinzufügen musste. Aehnlich finden König und Dieterici¹⁾ als Grundempfindung „R ein Rot, welches etwas von dem Rot der langwelligen Endstrecke im Spektrum nach dem Purpur abweicht.“

Ergeben mehr als zwei Lichter zusammen Weiss, so erklärt sich die Empfindung dadurch, dass beide Paare von Gegenfarben in einem solchen Verhältnis angeregt werden, dass jedes Paar Weiss ergibt.

Bei der Heringschen Annahme von Assimilation und Dissimilation folgt die Unvereinbarkeit der Gegenfarbe aus der Gegensätzlichkeit der Vorgänge in den Sehsubstanzen, sodass also Dissimilation und Assimilation bei gleichzeitiger Einwirkung entsprechender Reize, etwa roter und grüner Lichter, einander wie positive und negative Grössen aufheben. Dem Erfolg nach ist die Erregung gleich Null, ob man nun ein Fehlen von Assimilation und Dissimilation annimmt, oder auch ein Gleichmass der beiden Vorgänge. Was aber empfinden wir bei dieser Erregung von der Grösse Null? Bei Weiss und Schwarz soll es das neutrale Grau sein. Dies wäre also eine Empfindung ohne Erregung des Organs. Wie im Ruhezustand die Grauempfindung zustande kommt, ist unerklärt.²⁾ Neben dieser Schwierigkeit haben wir noch die weitere, dass der Zusammenhang von Weiss mit den Gegenfarben bei Hering nicht klar hervortritt. Denn es bleibt nicht etwa bei komplementären Lichtern von beiden Einzelempfindungen die jeder Farbe anhaftende Weissempfindung übrig, sondern die Weissempfindung ist, wie sich schon aus der Lichtstärke ergibt, das Ergebnis, der Empfindungserfolg der beiden Farbenwirkungen. Der Zusammenhang von Weiss mit den Farben zeigt sich auch bei den Ermüdungserscheinungen. „Auf positive Schwierigkeiten stösst die Theorie gegenüber den Tatsachen, die lehren, dass durch Weissermüdungen auch die Substrate der farbigen Bestimmungen in ihrer Erregbarkeit herabgesetzt werden.“³⁾

Es fragt sich nun, wie wir uns die Weissempfindung als Erfolg der Rot- und Grün- bezw. Gelb- und Blau-Reize auf grund einer Schwingungshypothese erklären sollen. Die Annahme eines gleich-

¹⁾ Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinn. 4 (1893) 333.

²⁾ G. E. Müller und Titchener suchen diese Schwierigkeit durch Annahme einer zentralen endogenen Grauempfindung zu beseitigen; diese Annahme bietet jedoch grosse Schwierigkeiten. Vergl. mein Schrift: „Der Farbensinn und seine Störungen“ S. 24.

³⁾ v. Kries, in Helmholtz Optik II 369.

zeitigen Bestehens von Schwingungen für Rot und für Grün mit Weisempfindung als Erfolg erscheint nicht zulässig. Wellenbewegungen von verschiedenem Rhythmus heben einander bekanntlich nicht auf, sondern überlagern einander. Diese Superposition müsste dann wohl auch bei der rhythmischen Erregung für Rot und Grün eintreten. Die sich ergebende Empfindung wäre also eine Mischempfindung zwischen Rot und Grün, keine einfache Empfindung, wie es Weiss ist. Die Vorstellung über einen verschiedenen molekularen Bau derselben Substanz bei verschiedener Schwingung bietet auch noch keine Lösung der Schwierigkeit. Denn die leitende Substanz könnte bei Einwirkung komplementärer Lichter ein Gemisch von roterregbaren und grünerregbaren Molekeln enthalten. Wir würden also wieder statt der einfachen Weisempfindung eine Mischempfindung von Rot und Grün erhalten. Ferner wäre noch unerklärt, wie sowohl die Rotgrünsubstanz als auch die Gelbblausubstanz die gleiche Weisserregung vermitteln kann. Eine vollständige Ausschaltung beider Substanzen und die Anregung einer dritten Substanz, einer Weisssubstanz, würde das Problem auch nicht vereinfachen, da auch diese Umschaltung einer Erklärung bedürfte. Statt der Ausschaltung der beiden Substanzen erscheint uns die Ausschaltung der beiden Erregungsweisen und die Einleitung einer neuen Erregungsweise in derselben Substanz einfacher. Demnach begnügen wir uns mit zwei Leitungssubstanzen, einer Rotgrünsubstanz und einer Gelbblausubstanz, und schreiben jeder dieser Substanzen die zweifache, aber nicht gleichzeitige Erregbarkeit für Farben und die Weisserregbarkeit zu.

Die Entscheidung darüber, ob Farbenerregung oder Weisserregung eintritt, muss natürlich am Kopf der Leitung schon getroffen sein. Als Grundlage dieser Entscheidung nehmen wir je ein zelliges Gebilde an, welches je vor einer Leitung liegt, und nennen dieses „Anregerzelle“. In der Netzhaut sind zwischen den Zapfen und den Fasern des Nervus opticus jedesmal mehrere Zellen hintereinander geschaltet, sowie, nach den Bildern von Ramon y Cajal,¹⁾ unipolare Neuronen (Amakrinen) nebengeschaltet, sodass die anatomische Grundlage für solche Anregerzellen wohl vorliegt. Nicht mehr durch rein physikalische Wirkungen, sondern auf grund der Lebenstätigkeit dieser Zelle wird als Reaktion auf einfache Lichtreize eine rhythmische Erregung, bei der einen Leitung entweder Rot- oder Grünerregung, bei der andern Gelb- oder Blauerregung hervorgehoben; als Reaktion auf gleichzeitige komplementäre Reize erfolgt in beiden Leitungen eine neue Erregungsweise, die Weisserregung. Diese fassen wir als unrhythmisch auf. Infolge der Annahme einer unrhythmischen Erregungsweise brauchen wir keine besondern Vorstellungen über die Struktur der Leitung und haben zugleich die Erklärung für das Vorkommen derselben Erregungsweise in beiden

¹⁾ Wiedergegeben in Abb. 4, S. 19, meiner Schrift: „Der Farbensinn und seine Störungen“.

Leitungen.¹⁾ Gleichzeitig erhalten wir einen scharfen Gegensatz zwischen Farben- als rhythmischer und Weisserrregung als unrhythmischer Erregung. Aus dem Fehlen des Rhythmus erklärt sich vielleicht auch die geringere Gefühlsbetonung der farblosen Qualitäten gegenüber den Farbenempfindungen, die auch in Bräuchen der verschiedenen Völker zum Ausdruck kommt, indem Schwarz und Weiss bei ernststen und feierlichen Gelegenheiten und als Farbe der Trauer angewandt werden.

Da Weissempfindung und Farbenempfindung vereinbar sind, so muss die gleichzeitige Einleitung rhythmischer und unrhythmischer Erregung möglich sein und zwar je nach der Entstehung von Weiss in verschiedenen Leitungen oder in derselben Leitung.

§ 6. Die Aufnahme des Lichtes.

Der Anregerzelle schreiben wir zwar die Aufgabe zu, die Lichtreize für die spezifische Erregungsweise der Leitung zu verarbeiten. Die unmittelbare Aufnahme der Lichtschwingungen halten wir jedoch für die Leistung eines besondern Gebildes, des „Aufnahmeapparates“. Als Organe der Lichtaufnahme gelten allgemein die Stäbchen und Zapfen in der Netzhaut; für die spezielle Aufnahme der Farbwirkung dienen nach der „Duplizitätstheorie“ (v. Kries) nur die Zapfen. Schon aus den anatomischen Grundlagen erscheint eine Trennung des eigentlichen Aufnahmeapparats von der Anregerzelle wahrscheinlich. Ausserdem glauben wir, dass bei Zusammenfassung des Aufnahmeapparats und der Anregerzelle dieses Gebilde eine zu verwickelte Aufgabe zu lösen hätte. Die Aufnahme des Lichtes, d. h. die Umwandlung der Aether- bzw. elektromagnetischen Schwingungen in molekulare Bewegungen beruht nach den meisten Theorien auf chemischer Zersetzung, nach unserer Auffassung auf einer Absorption des Lichtes in einer Flüssigkeit. Die Atome bzw. Elektronen der in der Flüssigkeit schwebenden absorbierenden Molekel geraten dabei in Schwingungen, die wir mit Rücksicht auf die Empfindungserfolge als Rotbewegung, Gelbbewegung, Grünbewegung und Blaubewegung bezeichnen wollen. Es können, aber es brauchen nicht viererlei Molekel angenommen zu werden, da auch eine Molekel verschiedenartiger Schwingungen fähig sein kann. Wie die Umwandlung der Energie der imponderablen Materie in solche der ponderablen Materie vor sich gehen kann, ist noch nicht völlig geklärt.²⁾ Häufig wird sie durch das Bild der Resonanz erläutert. Für Gase und Dämpfe gilt das Kirchhoffsche Gesetz, wonach sie solche Wellenlängen stark absorbieren, die sie stark emittieren. Bei Flüssig-

¹⁾ Statt der unrhythmischen Erregung, die jedenfalls auch ihre Schwierigkeiten hat, lässt sich auch annehmen, dass bei Einwirkung komplementärer Lichter die hochgebauten Molekel in einfachere Molekel zerfallen, wobei das Zerfallsprodukt in beiden Substanzen das gleiche wäre. Der Rhythmus dieser zerfallenen Molekel ergäbe dann in beiden Substanzen die gleiche Weissempfindung.

²⁾ Man vgl. darüber die Ausführung über Absorption und über anomale Dispersion in Kayzers Handbuch der Spektroskopie Bd. 3 (1905) u. 4 (1908).

keiten haben wir kontinuierliche Absorption oder mehr oder weniger breite Absorptionsstreifen. Dies erklärt sich dadurch, dass die Molekel der Flüssigkeiten nur einen beschränkten Grad der Freiheit haben und daher häufiger Stösse erleiden. Jedoch wird die Stelle der stärksten Absorption der Eigenschwingung der Molekel entsprechen. Die Absorptionsstreifen denken wir uns ähnlich wie die Erregungskurven der Abb. 1 (bezw. der spätern Abb. 2 S. 161 und die Molekularschwingungen, die „Rotbewegung“ usw. als Reize auf die Anregerzelle wirkend. Man könnte sich freilich auch vorstellen, dass die Schwingungen bis zur Zerstörung des Gefüges der absorbierenden Molekel führen und dass die Zersetzungsprodukte irgendwie als Reiz wirken.

Bei Anblick der Erregungskurven (Abb. 1a) fällt auf, dass für die kürzesten Wellen, also violettes Licht, dieselbe Erregung (Rot-erregung) aufritt, wie für die längsten. Bei reiner Absorptionswirkung hätte man zu erwarten, dass die Schwingungen der kurzwelliges Licht absorbierenden Molekel die raschesten seien. Es muss also hier noch etwas hinzutreten, was die Wirkung der kürzesten Wellen der der längsten gleichmacht. Man könnte an Vorgänge zwischen Aufnahmeapparat und Leitung, also wohl in der Anregerzelle, denken. Wir brauchen aber die mit den Wechselwirkungen zwischen Lichtäther und wägbarer Materie zusammenhängenden Erscheinungen nicht zu verlassen, um zu einer Erklärung zu kommen. Denn die Aufnahme von Lichtschwingungen und ihre Umwandlung in solche von anderer Wellenlänge ist eine unter dem Namen Fluoreszenz bekannte physikalische Erscheinung. Nach der Stokesschen Regel werden, wie wir auch für unsern Fall annehmen müssen, die absorbierten Strahlen in solche von geringerer Schwingungszahl, d. h. grösserer Wellenlänge, umgewandelt. Da nun Fluoreszenz in der Netzhaut bereits von Helmholtz¹⁾ angegeben ist, so stösst diese Erklärung nicht auf Schwierigkeiten.

§ 7. Farbenmischung. Helmholtzsche Theorie.

Bisher haben wir nur solche zusammengesetzte Reize betrachtet, deren Ergebnis die Weisempfindung ist. Bei der Mischung beliebiger Lichter ergeben sich nun keine neuen Farben, sondern nur die Grundfarben, ausserdem Weiss und Schwarz in verschiedenen Mischungsverhältnissen. Dasselbe erhält man auch schon bei der Mischung von nur je zwei einfachen Reizen. In Uebereinstimmung mit diesen einfachen Tatsachen ist die Theorie der Gegenfarben. Mischt man nämlich beliebige Lichter, so erhält man nur die vier Grundfarbenerregungen. Durch die Gegensätzlichkeit von je zweien tritt von jedem Paar nur eine in die Empfindung, dazu Weiss. Wir erhalten also stets nur die

¹⁾ Helmholtz, Optik II 61. Wenn hier für die Einwirkung ultravioletten Lichtes grünlich-weisses Fluoreszenzlicht angegeben wird, so spricht das nicht gegen obige Erklärung, da die Farbe des Fluoreszenzlichtes von der Wellenlänge des erregenden Lichtes abhängt.

gesättigte Mischempfindung von zwei nicht gegensätzlichen Farben. Durch das Hinzutreten von Weiss erklärt sich auch die Erscheinung, die Helmholtz hervorhebt: „Es gibt keine solche drei einfachen Farben, durch deren Zusammensetzung man auch nur erträglich die zwischenliegenden Farben des Spektrums nachbilden könnte, welche immer viel gesättigter erscheinen als die zusammengesetzten Farben.“¹⁾

Ueber die Mischung von Farben existieren nun bestimmte Gesetze, die die Konstruktion bezw. Berechnung einer Farbentafel unter Berücksichtigung der Lichtstärke ermöglichen. Das richtigste sich hieraus ergebende Moment ist die Erkenntnis, dass aus der Wahl der Orte für nur 3 Farben die Orte sämtlicher Farben und Mischfarben einschliesslich Weiss bestimmt sind, mit anderen Worten, dass unsere Farbenempfindungen nur auf drei von einander unabhängigen veränderlichen Grössen beruhen.

Die Young-Helmholtzsche Theorie der Farbenempfindungen ist nun zunächst und ihrem Wesen nach nichts anderes, als eine Uebertragung der in der Farbentafel mathematisch ausgedrückten Beziehungen der Farbmischungen in die Sprache der Physiologie. Helmholtz sagt selbst darüber: „Das Wesentliche der Hypothese von Young . . . scheint nur darin zu liegen, dass die Farbenempfindungen vorgestellt werden als zusammengesetzt aus drei voneinander vollständig unabhängigen Vorgängen in der Nervensubstanz“²⁾. Versteht man unter der „Helmholtzischen Theorie“ nur diesen vom Urheber selbst ausgesprochenen Grundgedanken, so wird sie wohl dauernd eine Grundlage aller Farbentheorien zu bilden haben.

Welches diese drei veränderlichen Grössen sind, darüber sagt freilich die Farbentafel noch nichts aus. Jedoch wird uns die Betrachtung einer beliebigen Mischempfindung von Nutzen sein. Denn die in der Farbentafel ausgedrückten Beziehungen sind psychophysischer Natur: physikalische Grössen, die gemischten Reize, werden bezüglich ihres psychischen Erfolges, der Gleichheit oder Ungleichheit von Empfindungen, verglichen. Demnach werden wir erwarten können, dass die drei Veränderlichen in den Empfindungserfolgen zum Vorschein kommen. Helmholtz gibt folgende psychophysische Beziehung an: Es „kann der Eindruck, den beliebig gemischtes Licht auf das Auge macht, immer dargestellt werden als eine Funktion von nur drei Variablen, . . . nämlich 1. der Quantität gesättigten farbigen Lichtes, 2. der Quantität weissen Lichtes . . ., 3. der Wellenlänge des farbigen Lichtes“³⁾. Vorher werden die (diesen physikalischen Grössen entsprechenden) psychischen Qualitäten genannt: Lichtstärke (1. entsprechend wäre es genauer „Farbenstärke“), Sättigung (entgegengesetzt 2. verlaufend) und Farbenton.

Der Farbenton ist nun, da er stets auf einer einfachen Farbenempfindung oder der Mischempfindung von zwei Farben beruht, auszudrücken durch den Abstand von zwei Fixpunkten, den beiden jewei-

¹⁾ Helmholtz, Optik II 118 — ²⁾ Optik II 120; vgl. auch v. Kries ebenda S. 355.

³⁾ Helmholtz, Optik II 110.

ligen Grundfarbenempfindungen (der auch gleich Null sein kann) oder, anders ausgedrückt, durch das Verhältnis der Intensitäten der beiden einzelnen Farbenempfindungen z. B. in % ausgedrückt (vgl. S. 146). Die Farbenstärke ihrerseits ist gleich der Summe der Intensitäten der beiden Einzelfarben. Da ein Intensitätsverhältnis nur eine zahlenmässige Beziehung zwischen zwei Empfindungen ist, so erhalten wir durch Umrechnung aus Farbenton und Farbenstärke folgende psychischen veränderlichen Grundgrössen: 1. Intensität der einen Farbenempfindung, z. B. Grün, 2. Intensität der zweiten Farbenempfindung, z. B. Blau, dazu kommt 3. Intensität der Weissempfindung. Wir erhalten also in unserem Beispiele ein bestimmtes ungesättigtes Blaugrün. Aus der Summe von 1. und 2. ergibt sich die Farbenstärke, aus der Summe 1. + 2. + 3. die Gesamtlichtstärke, aus dem Verhältnis 1. : 2. der Farbenton, aus 3. : (1. + 2.) die Weisslichkeit und entgegengesetzt damit verlaufend die Sättigung. Psychisch gedeutet sind also die drei Veränderlichen der Empfindungen drei Intensitäten von zwei nicht gegensätzlichen Farben und von Weiss. Diese drei Veränderlichen betrachten wir auch als die drei Veränderlichen der Farbentafel. Nun haben wir aber bei der Theorie der Gegenfarben in der Gesamtheit der Farbenempfindungen vier Grundfarben, ausserdem Weiss und Schwarz. Danach ist die Anzahl der Veränderlichen grösser als drei: die Farbentafel sagt aber in Wirklichkeit nichts aus über die Anzahl der überhaupt vorhandenen Veränderlichen, sondern nur, dass nicht mehr als drei u n a b h ä n g i g e Veränderliche da sind. Wäre die Zahl der Grundfarbenempfindungen grösser als drei, „so müssten, wenigstens bei den tatsächlich vorhandenen Farbenempfindungen, stets bestimmte, durch Gleichungen darstellbare Verknüpfungen zwischen den Intensitäten der ausgelösten Grundempfindungen vorhanden sein, und zwar müsste die Zahl dieser Verknüpfungen ebensogross sein, wie die Differenz der Anzahl der Grundempfindungen und der Anzahl unserer Elementarempfindungen,“¹⁾ d. h. der Zahl drei. Zunächst ist nun die Stärke der Schwarzempfindung bestimmt durch die Gesamtlichtstärke, also keine unabhängige Veränderliche. Für die fünf noch vorhandenen Veränderlichen erhalten wir die beiden geforderten Verknüpfungen aus der Eigenschaft der Gegenfarben. Zu der Einheit der Intensität Rot gehört eine bestimmte Intensität Grün, die mit ihr eine bestimmte Intensität Weiss ergibt; ebenso ergibt mit der Einheit der Intensität Gelb eine bestimmte Intensität Blau eine bestimmte Intensität Weiss. Damit ist also, wie übrigens bereits Hering²⁾ nachgewiesen hat, die Theorie der Gegenfarben in voller Uebereinstimmung mit dem Grundgedanken der Helmholtzschen Farbentheorie. Die Theorien von Hering und Helmholtz bilden in ihren Grundgedanken also keine Gegensätze, sondern notwendige Ergänzungen. Die eine berücksichtigt vorwiegend die psychischen Daten, die andere psychophysische.

¹⁾ König und Dieterici, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. S. 4 (1893) 324.

²⁾ Pflügers Archiv 42 (1888) 502/6.

Unter den Reizen eignen sich die aus Anfang, Mitte und Ende des Spektrums genommenen physikalisch einfachen Lichter Rot, Grün und Violett besonders zur Herstellung von gemischten Reizen. Dies war wohl der Grund, dass Helmholtz nicht die von ihm selbst beschriebenen Qualitäten der Empfindung als Ausgangspunkt nahm, sondern die Reize, und im Anschluss an Young annahm, dass durch die einfachen Reize Rot, Grün und Violett auch drei einfache Erregungen im Sehnervenapparat eintreten ¹⁾, und dass dies die einzigen einfachen Erregungen seien. Dann müssen aber einerseits die Mischempfindung Violett von einem einfachen physiologischen Prozess, andererseits dagegen die einfachen Empfindungen Gelb, Blau und Weiss von gemischten Erregungen des nervösen Apparats begleitet sein. (Z. B. „Das einfache Gelb erregt mässig stark die rot- und grünempfindenden [Faserarten], schwach die violetten; Empfindung: Gelb“ ²⁾). Dies widerspricht dem von uns in der Einleitung angenommenen Grundsatz, dass einfachen Empfindungen einfache psychophysiologische Vorgänge entsprechen und umgekehrt; oder wir hätten die psychologisch unwahrscheinliche Annahme zu machen, dass Violett eine einfache, Gelb, Blau und Weiss hingegen Mischempfindungen seien. Aus diesem Grunde lehnen wir diese spezielle Ausgestaltung der Helmholtzschen Theorie ab. Auch Anhänger von Helmholtz scheinen mit obigem Grundsatz und der Annahme der Einfachheit mindestens von Weiss übereinzustimmen, wenn sie eine Ergänzung der Youngschen Rot-Grün-Violetttheorie durch die sogen. Zonentheorie befürworten. So sagt v. Kries: Man darf „es wohl für wahrscheinlich halten, dass die von der Helmholtzschen Theorie angenommene Gliederung in drei Bestandteile nicht für das ganze Sehorgan zutrifft, sondern nur für seine peripheren Teile, d. h. diejenigen, die den unmittelbaren Angriffspunkt der Lichtwirkung bilden und eine längere oder kürzere Reihe sich anschliessender, dass dagegen die Enderfolge, die unmittelbaren Substrate der Empfindung, von anderer Natur sind, und dass daher an irgend einer Stelle eine Umsetzung jener drei unabhängigen Reizerfolge in Vorgänge anderer Art und Gliederung stattfindet“ ³⁾. Durch einen derartigen Zusatz wird freilich ein Hauptvorzug der Helmholtzschen Theorie, der der Einfachheit, preisgegeben, und es fragt sich, ob es angesichts dieser Sachlage nicht einfacher ist, nur den Grundgedanken von Helmholtz beizubehalten und die spezielle Ausgestaltung der Theorie ganz fallen zu lassen. Auch stehen die Erscheinungen der Farbensinnstörungen bei Helmholtz im Widerspruch mit der ursprünglichen Theorie und führen zu mehr oder weniger gezwungenen Erklärungsversuchen.

§ 8. Störungen des Farbensinnes.

Normalfarbensichtige haben als Grundlage der Empfindungen drei unabhängige Veränderliche und werden deshalb neuer-

¹⁾ Das Genauere s. Helmholtz, Optik II 119—120.

²⁾ Helmholtz ebenda.

³⁾ In Helmholtz, Optik II 359.

dings als Trichromaten bezeichnet. Theoretisch folgert Helmholtz aus der Farbentafel, dass ein Verwechsler von Farben, etwa von Rot und Grün, nur zwei unabhängige Veränderliche besitzt; er wird deshalb jetzt als Dichromat bezeichnet. Aus den drei Grundfarbenerregungen schliesst Helmholtz das Bestehen von drei Arten von Dichromasie: Rotblindheit, Grünblindheit und Violettblindheit. Die Rotblindheit wird als eine Lähmung der rot-empfindenden Nerven erklärt. „Daraus würde nun folgen, dass die Rotblinden nur Grün, Violett und ihre Mischung, das Blau, empfinden. . . . Weiss im Sinne der Rotblinden ist natürlich eine Mischung der beiden Grundfarben in einem bestimmten Verhältnis, welches uns grünblau erscheint“¹⁾. Entsprechend müsste der Grünblinde Rot, Violett und deren Mischfarben sehen; Weiss erschiene als Purpur. Spätere Beobachtungen an einseitig Farbenblinden wiesen die Unrichtigkeit dieser Folgerungen nach. Tatsächlich haben die beiden Gruppen von Farbenblinden, welche man jetzt häufig nach dem Vorschlage von v. Kries als Protanopen und Deutanopen bezeichnet, die Weissempfindung und die Farbenempfindungen Gelb und Blau. Demnach werden die speziellen Annahmen Helmholtz' auch durch die Erscheinungen der Farbenblindheit erschüttert. Das Sehen der Farben Gelb und Blau übereinstimmend bei Protanopen und Deutanopen findet auch keine Erklärung in den Helmholtzschen Kurven²⁾ der Rot-, Grün- und Violettempfindlichkeit. Diese sind zur Mitte von Grün fast symmetrisch; daher sollte man beim Ausfall der Grünkurve erwarten, dass sich die Deutanopie fast ebenso der Tritanopie, der Violettblindheit, wie der Protanopie, der Rotblindheit, nähere. Die Erscheinungen der Farbschwäche, der „anormalen Trichromasie“, führten nun dazu, die Störungen des Farbensinnes nicht als Ausfalls-, sondern als Alterationserscheinungen aufzufassen und eine Modifikation der Valenzkurven, bei der einen Gruppe für den Rot-, bei der andern für den Grünbestandteil, anzunehmen, derart, dass sich die veränderte Kurve von der normalgebliebenen Kurve beim Anormalen weniger unterscheidet, als beim Farbentüchtigten, und dass sie beim Farbenblinden mit der normalgebliebenen zusammenfällt. Bei Dichromasie fehlt demnach nicht einfach der eine Bestandteil des Sehorgans, sondern z. B. beim Protanopen besitzt der erste hinsichtlich seiner Affizierbarkeit durch verschiedene Lichtarten nicht die normale, sondern die normalerweise dem zweiten Bestandteil zukommende Beschaffenheit.³⁾

Einen wichtigen Erfolg hatte die Helmholtzsche Hypothese: die Voraussage von drei Formen der Dichromasie. Doch wird dieser aufgewogen durch einen entsprechenden heuristischen Erfolg der Hering'schen Hypothese: Durch das Aufsuchen der Weissvalenzen wurden die Erscheinungen des Dämmerungssehens eingehend bekannt. (Betreffs des Dämmerungssehens stellen wir uns im folgenden auf

¹⁾ Helmholtz, Optik II 126.

²⁾ Helmholtz, Optik II 120.

³⁾ Nach v. Kries, in Helmholtz, Optik II 356.

den Standpunkt der Duplizitätstheorie ¹⁾, wonach die Zapfen die Farbenempfindung beim Tagessehen und die Stäbchen die Helligkeitsempfindung beim Dämmerungssehen vermitteln.)

Aus der Heringschen Hypothese ergeben sich zwei Hauptformen der Farbenblindheit: Rotgrünblindheit bei Fehlen der rotgrünen Sehsubstanz, und Blaugelbblindheit bei Fehlen der blaugelben Sehsubstanz. Aus der Tätigkeit der beiden übrigbleibenden Sehsubstanzen folgt in einer schönen Uebereinstimmung mit den Tatsachen, dass bei der Rotgrünblindheit noch Gelb, Blau und Weiss empfunden werden. Bei der zweiten Form würde folgen, dass Rot, Grün und Weiss noch empfunden werden. Damit stimmt, dass nach den Untersuchungen von König, Vintschgau und Hering Tritanopen Gelb, Blau und Weiss übereinstimmend sehen, d. h. verwechseln können. Hier haben wir also eine offenbare Ueberlegenheit der Theorie der Gegenfarben.

Aus der Gleichsetzung der schwarzweissen Sehsubstanz mit den beiden Farbensubstanzen bei Hering müsste man auch eine dritte Form, eine Schwarzweissblindheit, erwarten. In dem Fehlen dieser Form bekundet sich wieder die Sonderstellung der Weiss- und der Schwarzempfindung. Auch in einem andern Punkte versagt die Heringsche Hypothese. Der Unterschied zwischen protanopen und deuteranopen Rotgrünblinden wird als unwesentlich hingestellt und auf Absorption des Lichtes in den gefärbten Medien des Auges, insbesondere im Pigment der *Macula lutea*, zurückgeführt. Diese Annahme hat sich bei genauerer Prüfung als unzulässig herausgestellt. „Es kann gegenwärtig also wohl kein Zweifel darüber obwalten, dass die Vierfarbentheorie hier versagt, und dass speziell die Deutung, die Hering für den Unterschied der genannten beiden Arten von Farbenblindheit versuchte, mit der Tatsache nicht vereinbar ist. Dies schliesst natürlich nicht aus, dass die Annahme der Theorie, insbesondere der alte Grundgedanke der Vierfarbentheorie, in irgend einem Sinne doch zutreffen können. Sicher ist nur, dass die Anomalien des Farbensinnes mit Notwendigkeit auf irgendwelche in der Theorie nicht berücksichtigte Verhältnisse hinweisen, somit einer Einschränkung oder Ergänzung bedürfen“ ²⁾.

Der erwähnte Unterschied zwischen Protanopen und Deuteranopen zeigt sich in der Erregbarkeit für rotes Licht. Nach v. Kries ³⁾ ist die Verteilung der Blauwerte für Protanope und Deuteranope die nämliche; der Unterschied liegt in der Verteilung der Rotwerte. Die v. Kriesschen Kurven über die Verteilung der Rotwerte ⁴⁾ fallen für beide Gruppen deutlich auseinander. Dies zeigt sich auch in folgenden Zahlen: Bei einer grössern Anzahl von untersuchten Dichromaten betrug die Menge des einem bestimmten Gelb gleich erscheinenden Rot bei Deuteranopen zwischen 36 und 40, bei Protanopen

1) Vgl. Nagel, in Helmholtz, Optik II 290 ff.

2) v. Kries, in Helmholtz, Optik II 363.

3) v. Kries, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinn. 13. Jahrg. 241 ff. 274.

4) Ebenda. S. 253.

zwischen 196 und 225 gewisse Einheiten der Lichtstärke¹⁾. Rote, d. h. langwellige Lichter üben also auf das Auge des Protanopen eine sehr viel geringere Wirkung aus, als auf das des Deuteranopen. Infolge dieser geringen Erregbarkeit für rotes Licht erscheint dem Protanopen das Spektrum links, d. h. am roten Ende, verkürzt.

Etwas ähnliches zeigt sich bei Protanomalen. Die anomalen Trichromaten empfinden wohl Rot, Gelb, Grün und Blau. Sie unterscheiden sich aber von den Normalfarbensichtigen hauptsächlich durch die sogen. Rayleighgleichung. Hierbei sind Rotgrüngemische (Rot von der Lithiumlinie 671 $\mu\mu$ und Gelbgrün von der Thalliumlinie 536 $\mu\mu$), die die Anomalen so eingestellt haben, dass sie ihnen dem Natriumgelb (589 $\mu\mu$) gleich erscheinen, für den normalen Trichromaten in dem einen Fall ausgesprochen grün („Deuteranomale“ nach Nagel), in dem andern Falle („Protanomale“) ausgesprochen rot²⁾.

Was bedeutet eine solche Farbenmischung vom Standpunkte der Theorie der Gegenfarben aus? Wenn die Lichter 671 $\mu\mu$ und 536 $\mu\mu$ gemischt weder Rot noch Grün, sondern nur mehr Gelb (wir sehen hier vom Farbenton des gerade gewählten Gelb ab) erkennen lassen, so müssen deren Rot- und Grünerfolge („Rot-“ und „Grünbewegung“) einander im Leitungsapparat bzw. in der „Anregerzelle“ zu Weiss aufheben, sodass nur mehr die von beiden Lichtern hervorgerufene Gelbbewegung in der Leitung eine Farbenerregung hervorruft. Demnach sind die beiden bei der Rayleigh-Gleichung verwendeten Mengen Licht von 671 $\mu\mu$ und 536 $\mu\mu$ ein Mass für das Mengenverhältnis von Rot und Grün, die in dem betr. Auge einander gerade zu Weiss aufheben, und das man etwa als „Kompensationsverhältnis“ bezeichnen kann. Es ergibt sich demnach eine Alteration des Kompensationsverhältnisses gegenüber dem Normalen zuungunsten von Rot beim Protanomalen, zuungunsten von Grün beim Deuteranomalen. Diese Alteration erklärt sich so, dass der Protanomale eine geringere Erregbarkeit für Rot, der Deuteranomale eine geringere Erregbarkeit für Grün besitzt. Da nun der Anomale noch der Farbenunterscheidung, seine Leitung also noch der Farbenerregung fähig ist, so vermuten wir den Sitz dieser Herabsetzung der Erregbarkeit nicht in der Leitung, sondern in einem peripheren Teile, entweder dem Empfangsapparat oder der Anregerzelle. Der Sitz der entsprechenden charakteristischen Störung ist dann beim Protanopen natürlich ebenfalls im peripheren Teile zu suchen.

Die Eigenart des Protanopen gegenüber dem Deuteranopen liegt also nach dem Vorhergehenden in einer auf Störung im peripheren Teil des Farbenapparates beruhenden herabgesetzten Erregbarkeit für langwellige Lichter. Beiden Gruppen gemeinsam ist das Verhalten der Rotgrünleitungs-substanz. Da nach unserer Annahme diese nicht bloss der Rot- und Grünerregung, sondern auch der Weisserregung fähig ist, so brauchen wir nicht ein Fehlen dieser Substanz anzu-

¹⁾ v. Kries, in Helmholtz Optik II 337. — ²⁾ v. Kries, in Helmholtz Optik II 343/4.

nehmen, sondern wir begnügen uns mit der Annahme einer Funktionsunfähigkeit dieser Leitung für rhythmische oder Farbenerregung unter Beibehaltung der Möglichkeit unrhythmischer oder Weiss-Erregung.

Für die Störungen des Farbensinnes kommen bei unserer Betrachtungsweise zweierlei Teile des Organs in Betracht: Der periphere und die Leitung. Bei jedem glauben wir drei Stufen unterscheiden zu müssen: normale, herabgesetzte und fehlende Funktionsfähigkeit für die verschiedenen Lichter bezw. Farben. Für jeden Teil und jede Stufe empfiehlt es sich wohl, der Kürze und Deutlichkeit wegen, unterscheidende Ausdrücke einzuführen¹⁾.

Für den peripheren Teil möchten wir folgende Ausdrücke vorschlagen:

- 1) normale Lichtartenaufnahme oder Lichtartenklarheit,
- 2) Lichtartentrübung,
- 3) Lichtartenblindheit (oder Lichtartenauslöschung).

Die Ausdrücke Klarheit, Trübung, Blindheit werden auch auf lichtdurchlässige Medien, z. B. Glas, angewandt. Da der periphere Teil die Lichter einlässt, so passen diese Ausdrücke wohl. Auch der dritte; denn ein Auge, das etwa durch rotes Licht nicht erregt wird, ist tatsächlich für Rot blind. (Um Verwechslungen mit dem bisherigen Gebrauch von „Rotblindheit“ zu vermeiden, könnte man auch von „Rotlichtblindheit“ oder von „Rotauslöschung“ sprechen). Hingegen passt der Ausdruck Farbenblindheit bezw. Rotblindheit nicht für ein Auge, das wohl von Rot erregt wird, das aber durch Störungen in der Leitung Rot und Grün verwechselt. In diesem Sinne sollte man ihn, weil irreführend, unbedingt vermeiden und lieber von einer physiologischen „Rotgrünverwechslung“ sprechen. Hingegen kann man Verwechslung von Farben, die nicht physiologisch begründet ist, sondern auf mangelnder Uebung der Farbenbeurteilung beruht, nach dem Vorschlag von Reuss²⁾ mit dem derben Namen „Farbendummheit“ bezeichnen.

Durch die Ausdrücke Schärfe, Stumpfheit und Lähmung liessen sich wohl normale, herabgesetzte und fehlende Funktionsfähigkeit für Farbenerregung unterscheiden. Wir hätten also für den Leitungsa p p a r a t:

- A. Farbenschärfe,
- B. Rotgrünverwechslung,
 - I. Rotgrünstumpfheit,
 - II. Rotgrünlähmung,
- C. Gelbblauverwechslung,
 - I. Gelbblaustumpfheit,
 - II. Gelbblaulähmung,
- D. Gesamtfarbenverwechslung,
 - I. Gesamtfarbenstumpfheit,

¹⁾ Diese Ausdrücke haben wir bereits in der Schrift: „Der Farbensinn und seine Störungen“ zur Anwendung gebracht.

²⁾ Ueber die Erziehung des Farbensinnes, Wien, 1908, 28.

II. Gesamtfarbenlähmung (= Farbenlähmung des Tagesapparats),

III. Gesamt(farben- und weiss-)Lähmung des Tagesapparats (= Lähmung des Tagesapparats).

Wenden wir diese Ausdrücke auf die bekanntesten Eigenarten des Farbensinnes an, so haben wir:

- 1) Normale Trichromasie = Farbenschärfe mit Lichtartenklarheit, klarheit,
- 2) Anomale Trichromasie
 - a) Protanomalie = Farbenschärfe mit Rottrübung,
 - b) Deuteranomalie = Farbenschärfe mit Grünlichtrübung,
 - c) Extreme Protanomalie = Rotgrünstumpfheit mit Rottrübung,
 - d) Extreme Deuteranomalie = Rotgrünstumpfheit mit Grüntrübung,
- 3) Dichromasie,
 - a) Protanopie = Rotgrünlähmung mit Rottrübung (oder mit Rotblindheit),
 - b) Deuteranopie = Rotgrünlähmung (mit Grüntrübung),
 - c) Tritanopie = Gelbbaulähmung.
- 4) Achromasie
 - a) erworbene totale Farbenblindheit = Gesamtfarbenlähmung,
 - b) „typische angeborene totale Farbenblindheit“ = Gesamtlähmung des Tagesapparates.

Hingegen gehört die Gesamtfarbenstumpfheit zur anomalen Trichromasie.

Zur Erläuterung hätten wir noch hinzuzufügen, dass die Anomalien Uebergänge zur Dichromasie zeigen; deswegen nahmen wir bei den extremen Anomalien Rotgrünstumpfheit sowie bei der Deuteranopie geringe Grüntrübungen an.

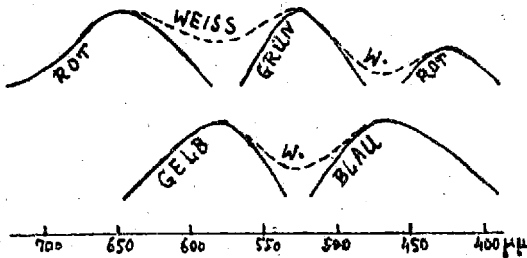
§ 9. Kurze Darstellung der eigenen Anschauungen.

Im vorhergehenden haben wir die wichtigsten Erscheinungen des Farbensehens, soweit die räumlichen und zeitlichen Verhältnisse nicht inbetracht kommen, im Anschluss an die Heringsche und Helmholtzsche Hypothese betrachtet und diejenigen Änderungen hergeleitet, welche uns in erster Linie zu einer physiologischen Darstellung der Tatsachen notwendig erschienen. Im folgenden soll nun diese modifizierte Hypothese zunächst in Kürze zusammengestellt werden, unter Andeutung der wichtigsten Hilfsannahmen in [eckiger] Klammer; sodann sollen einige Annahmen etwas ausführlicher erläutert werden.

Beim Farbensehwerkzeug werden unterschieden I. der Aufnahmeapparat, II. der Leitungsapparat, III. der zentrale Apparat.

I. Der Aufnahmeapparat nimmt die Aetherschwingungen von etwa $690 \mu\mu$ bis etwa $390 \mu\mu$ Wellenlänge [durch Absorption] auf und wandelt diese Mannigfaltigkeit von unendlich vielen stetig veränderlichen Reizen in die Zahl von vier diskreten molekularen

Bewegungen [Schwingungen] um, die wir als „Rotbewegung“, „Gelbbewegung“, „Grünbewegung“ und „Blaubewegung“ bezeichnen. Die [Absorption und damit die] Rotbewegung kann [bei Fehlen eines „Sensibilisators“] auf ein Minimum reduziert sein. Die langwelligen Aetherschwingungen bewirken eine schwache Rotbewegung; etwas kürzere bewirken starke Rotbewegung und schwache Gelbbewegung; dann folgt schwache Rotbewegung mit stärkerer Gelbbewegung, dann starke Gelbbewegung [entweder allein, ähnlich Abb. 1, oder mit gleichzeitiger Rot- und Grünbewegung nach Abb. 2] usw.; dann folgt Grünbewegung, zunächst mit Gelbbewegung, dann allein [bezw. mit Gelb- und Blaubewegung], dann Grünbewegung mit Blaubewegung, dann Blaubewegung, schliesslich bewirken die kürzesten Wellen (violett Licht) Blaubewegung und [durch Fluoreszenz] Rotbewegung.



Abbild. 2.

II. Der Leitungsapparat besteht aus zwei Substanzen, der „Rotgrünsubstanz“ und der „Gelbblausubstanz“. In jeder der Leitungssubstanzen kann je nach den Bewegungen des Aufnahmeapparates eine von zwei Farberregungen, oder die Weisserregung, oder eine Farberregung und die Weisserregung zugleich hervorgerufen werden. So bewirkt in der Rotgrünsubstanz eine Rotbewegung des Aufnahmeapparates eine „Roterregung“, die Grünbewegung bewirkt eine „Grünerregung“. Gleichzeitige Rot- und Grünbewegung von bestimmtem Stärkeverhältnis bewirken eine besondere Erregung, die „Weisserregung“; bei anderem Stärkeverhältnis entsteht die Weisserregung und zugleich entsprechend dem Ueberschuss der stärkern Bewegung die betreffende Farberregung. [Von einer „Anregerzelle“ werden die Bewegungen, d. h. Schwingungen der Aufnahmesubstanz verarbeitet und rhythmische d. h. Farberregung oder unrythmische d. h. Weisserregung weitergegeben; zweifacher Rhythmus ist möglich auf Grund isomerer Umlagerungen in der Leitung.]

III. Im zentralen Apparat werden durch die Erregungen des Leitungsapparates Vorgänge bewirkt, deren psychisches Korrelat die Farbenempfindungen bzw. die Weisempfindung sind. Das Korrelat der Stoffwechselfvorgänge bei unerregter Leitung ist die Schwarzempfindung.

§ 10. Die Funktion der Anregerzellen.

Die „Bewegungen“ im Aufnahmeapparat und die „Erregungen“ in der Leitungssubstanz haben als Schwingungen einen vorwiegend physikalischen Charakter, wenn sie auch im lebenden Körper auftreten. Die besondere Lebenstätigkeit einer zwischen Aufnahmeapparat und jeder Leitung gelegenen Zelle, der „Anregerzelle“, hatten wir für notwendig erachtet zur Vermeidung einer Superposition von Roterregung und Grünerregung in der Leitung und zur Erklärung der statt dessen eintretenden Weisserregung.

Wir stellen uns vor, dass die Schwingungszahlen bei Erregung der Leitung nicht identisch sind mit denen des Aufnahmeapparates, die, wenn auf Absorption beruhend, denen des Lichtes ähnlich sind, sondern dass sie der besonderen Substanz der Leitung angepasst sind. Dann haben die Anregerzellen die Aufgabe, die Bewegungen des Aufnahmeapparates auf sich als Reiz einwirken zu lassen, diesen Reiz zu verarbeiten und als Reaktion eine Erregung der Leitung zu bewirken. Zweierlei Möglichkeiten der Erregung schreiben wir der Anregerzelle zu: eine schwingungsartige und eine ohne Rhythmus. Da nach dem Gesagten die Schwingungsform der Leitung von der Anregerzelle erst erzeugt wird, so halten wir die rhythmische Erregung für die kompliziertere. Insbesondere ist dies der Fall, wenn die Zelle noch die Aufgabe hat, vor der rhythmischen Erregung den molekularen Aufbau der Leitung auf den betreffenden Erregungsrhythmus „abzustimmen“. Sie ist also in diesem Falle zugleich auch „Umschalter“ für die Struktur der Leitung.

Ist schon eine einzelne rhythmische Erregung für eine Anregerzelle nicht die einfachste Tätigkeit, so würde die gleichzeitige Erregung von zwei verschiedenen Rhythmen, etwa Roterregung und Grünerregung, noch viel schwieriger werden. Wie sollte zunächst das Abstimmen oder Umschalten der Leitung vor sich gehen, etwa zur Hälfte für Rot, zur Hälfte für Grün? In Wirklichkeit treten nicht gleichzeitig Rot- und Grünerregung ein, sondern die einfachere Weisserregung. Wir stellen uns dies so vor, dass zweierlei gleichzeitig auf dieselbe Anregerzelle treffende Reize, Rot- und Grünbewegung, in dieser ein Gegenspiel mit dem Ergebnis hervorrufen, dass die beiden Reize einander in einem bestimmten Stärkeverhältnis, dem „Kompensationsverhältnis der Anregerzelle“, bezüglich der rhythmischen Erregung binden. Infolgedessen wird der Rhythmus, der dem schwächeren Reiz entsprochen hätte, überhaupt nicht ausgebildet, und der dem stärkeren Reize entsprechende Rhythmus wird nur gemäss dem Anteil, der beim Gegenspiel nicht gebunden ist, entwickelt. Diese Bindung bezüglich des Rhythmus ist aber noch keine gegenseitige Vernichtung der Reize; vielmehr bleibt die Gesamtenergie der beiden einander bindenden Bewegungsreize erhalten und löst durch die Tätigkeit der Zelle die unrhythmische Erregung aus. Empfundener wird also bei gleichzeitiger Einwirkung von rotem und grünem Licht, ebenso bei gelbem und blauem Licht nur die überwiegende Farbe mit weisslichem Ton, d. h. ungesättigt. Bei einem ganz bestimmten

Stärkeverhältnis, dem Kompensationsverhältnis, ist die Bindung vollständig, wir empfinden nur Weiss.

Die Mitberücksichtigung der Tätigkeit einer lebenden Zelle bei der Erregung der Leitung erklärt unseres Erachtens mancherlei Besonderheiten des Farbensehens, und gerade solche die in der Farben-
tafel nicht zum Ausdruck kommen. Ist die unrythmische Erregung für die Anregerzelle die einfachere Reaktion, so wird sie auch bei ungemischtem Reize eintreten können, wenn dieser nicht eine für die rhythmische Erregung günstige Grösse besitzt. Es folgt daraus, dass „das Auge von der Unterlage der stets möglichen Schwarzempfindungen leichter zu Grau- und Weissempfindungen als zu Farbempfindungen emporsteigt.“¹⁾ Wie man bei den Reaktionen der lebenden Substanz Reizen gegenüber überhaupt ein Minimum, Maximum und Optimum des Reizes unterscheiden kann, so finden wir auch bei den Reaktionen durch rhythmische Erregungen ein Minimum, Optimum und Maximum des Reizes. Ist also ein einfarbiges Licht zwar noch sehr schwach, hat es aber dabei bereits eine solche Stärke, dass es den Schwellenwert für Lichtempfindung überhaupt überschreitet, so wird es unrythmische Erregung auslösen. In der Tat bewirkt auch beim Tagesssehen einfarbiges Licht, wenn es sehr klein und schwach ist, nur Grau- und nicht Farbenempfindung. Steigt die Lichtstärke, so wird das Minimum der Farberregung überschritten und das Licht farbig empfunden. Bei einem gewissen Reizbereich haben wir ein Optimum; hierbei kommt die farbige Qualität des Objektes am stärksten zur Geltung. Je weiter der Reiz dies Optimum überschreitet, desto heller wird er zwar empfunden, aber um so weniger farbig. Schliesslich wird bei sehr hoher Lichtstärke das Maximum für rhythmische Erregung überschritten und das einfarbige Licht erscheint wieder farblos, weiss.

Minimum und Maximum der rhythmischen Erregung scheinen für die beiden Farbenpaare verschieden zu sein und für Gelb und Blau höher zu liegen als für Rot und Grün. Dies zeigt sich darin, dass bei grosser Lichtstärke Gelb und Blau im Spektrum vorherrschen, bei geringer Lichtstärke jedoch Rot und Grün.²⁾

Bei der geringsten Lichtstärke haben wir die Erscheinung des Dämmerungssehens. Die Farbe beim Dämmerungssehen wird gewöhnlich als Grau („Düsternebelgrau“, „Gespenstergrau“, „Magisches Weiss“, „Stäbchenweiss“³⁾), zuweilen auch als hellblau angegeben. Angesichts der Tatsache, dass die Aufnahmeapparate des Dämmerungssehens, die Stäbchen, in grosser Zahl an eine gemeinschaftliche Nervenzelle, angeschlossen sind, und auch mit Rücksicht auf die geringe Lichtstärke der inbetracht kommenden Reize ist die unrythmische Erregung leicht erklärlich. Bei einer rhythmischen Erregung, soweit die Leitung überhaupt hierfür geeignet ist, wür-

¹⁾ Nach Wundt, in Hagemann-Dyroff, Psychologie⁷ (1905) 72.

²⁾ G. F. Lipps, Grundriss der Psychophysik² (1909) 123.

³⁾ O. Lummer, in Unterrichtsblätter f. Mathem. u. Naturwissenschaften 17 (1911), Nr. 1. S. 5.

den leicht Störungen durch die Anreize von verschiedenen Stäbchen aus eintreten. Möglicherweise sind diese Störungen bei den kürzesten Schwingungen, also bei Blauerregung, am geringsten. — Der Dämmerungsapparat ist für rotes Licht unempfindlich, also „rotblind“.

Durch den Wettstreit des Dämmerungssehens mit dem Tagessehen erklärt sich das Purkinjesche Phänomen, wonach bei geringem Licht Rot verhältnissmässig dunkler aussieht als die übrigen Farben. Sehen wir aber von der Wirkung des Dämmerungsapparates ab, so scheint gerade für Rot eine ziemlich leichte Erregbarkeit bei mittleren und niederen Reizintensitäten vorzuliegen. Das Purkinjesche Phänomen spricht nicht dagegen, da es für die Fovea centralis, d. h. für den Farbenapparat in Reinkultur, fehlt.¹⁾ Rot bleibt für ein dunkeladaptiertes Auge bei Herabsetzung der Lichtstärke eines Spektrums am längsten eine gesättigte Farbe. Durch die Wahl einer bestimmten recht geringen Intensität und durch sehr gründliche Dunkeladaptation kann man es dahin bringen, dass man fast das ganze Spektrum in hellblauem Schimmer, dem Dämmerungslichte, sieht, nur auf der einen Seite von der einzigen kräftigen Farbe, dem Rot, begrenzt.²⁾ Eine grössere Leichtigkeit der Roterregung möchten wir auch aus einer anderen Erscheinung herleiten. Wenn man Scheiben mit schwarzen und weissen Sektoren rotieren lässt, so sieht man bei gewissen Geschwindigkeiten die weissen Sektoren sich an ihrem vorauslaufenden Rande rötlich, am hinteren Rande bläulich färben. „Es scheint hiernach, als ob die Rotkomponente etwas schneller als die anderen reagierte.“²⁾ Die Erscheinung erklären wir uns durch eine leichtere und von geringerem Energieverbrauch begleitete Auslösung der Roterregung durch die Anregerzelle, infolge deren diese Erregung bereits eintritt, ehe das Gegenspiel von Rot und Grün in der Anregerzelle begonnen hat. Vielleicht ist die Leitung auch im Ruhezustand nicht indifferent, sondern bereits auf Rot abgestimmt, d. h. die für Roterregung geeigneten Molekel herrschen vor. — Wird Farbenblindheit erst durch Sehnervenerkrankung erworben, so geht zuerst die Grün-, dann die Rotempfindung, schliesslich die Gelb- und die Blauempfindung verloren. Diese grössere Haltbarkeit der Roterregung gegenüber der Grünerregung scheint auch dafür zu sprechen, dass die Roterregung für die Anregerzelle die leichtere Funktion ist. Bei Verkümmern des Farbenapparats wird dann die schwierigere Funktion zunächst einen übernormalen Reiz verlangen und schliesslich ganz verloren gehen.

§ 11. „Rottrübung“ und „Grüntrübung“.

Hiermit kommen wir zu einer etwas genauern Vorstellung über den Unterschied der Störungen in der Rotsubstanz. Bei Protanomalie und Protanopie hatten wir „Rottrübung“, bei Deuteranomalie „Grün-

¹⁾ Nagel, in Helmholtz, Optik II 305.

²⁾ Nagel, in Helmholtz, Optik II 303.

³⁾ v. Kries, in Helmholtz, Optik II 371.

trübung“ als charakteristisch in § 8 hergeleitet und den Sitz der „Trübung“, d. h. herabgesetzten Erregbarkeit, in peripheren, d. h. vor der Leitung gelegenen Teilen gesucht. Sind die Deutungen betr. leichter Erregbarkeit von Rot durch die Anregerzelle richtig, so werden wir den Sitz der Rottrübung nicht wohl in der Anregerzelle suchen können. Wir suchen ihn im eigentlichen Aufnahmeapparat, dem Sitz der Lichtabsorption. Die Stärke der Absorption in einer Flüssigkeit wird wesentlich beeinflusst durch die Helligkeit der Lichtquelle, die Dicke und die Konzentration der absorbierenden Schicht und durch die chemische Zusammensetzung des Lösungsmittels, worin sich die absorbierende Substanz befindet.¹⁾ Eine Verbreiterung der Absorptionsstreifen bei grösserer Helligkeit kann ein stärkeres Uebereinanderlagern der verschiedenen Farbenbewegungen bewirken und damit auch eine Veranlassung neben dem im vorigen § angegebenen Grunde zum Weisslichwerden der Farben bei hoher Lichtstärke werden. Konzentrationsunterschiede und chemische Aenderungen im Lösungsmittel können Ursache von kleineren Abweichungen des Farbensinnes vom Normalen sein. Gewisse Bestandteile des Lösungsmittels, die man dann als „Sensibilisatoren“ bezeichnet, können imstande sein, die Absorption für gewisse Wellenlängen erst zu vermitteln. Das Fehlen oder der geringere Zusatz eines solchen Sensibilisators erklärt unseres Erachtens die herabgesetzte Fähigkeit der Rotbewegung, die Rottrübung, bei Protanomalie und Protanopie. Wir kommen hiermit zu derselben Erklärung wie Schenk²⁾ für diese Störungen. Diese Erklärung unterscheidet sich natürlich von der Heringschen; ähnlich wie die Sensibilisation einer photographischen Platte eine Wirkung erzielt, die sich nicht durch Vorsetzen eines Farbfilters erreichen lässt.

Für die Grüntrübungen werden wir nach dem vorhergehenden § die Ursache in der Anregerzelle suchen. Man könnte ja auch an Veränderungen in der Absorption denken, und diese mögen in Fällen von völliger „Grünblindheit“ („Grünauslöschung“) hinzukommen. Die gewöhnlichen Fälle möchten wir so deuten, dass bei herabgesetzter Funktionsfähigkeit der Anregerzelle die Grünerregung einen stärkeren Reiz als gewöhnlich beansprucht, infolgedessen das Kompensationsverhältnis geändert wird (Deuteranomalie = Farbenschärfe mit Grüntrübung). Verkümmert die Anregerzelle noch weiter, so werden beide Farbenerregungen davon betroffen, jedoch Grün wohl stärker, ausser bei Fehlen des Sensibilisators (Rotgrünstumpfheit mit Grün- bzw. Rottrübung = extreme Anomalie). Bei noch höherem Grade der Verkümmernung wird eine Farbenerregung gar nicht mehr eintreten (Rotgrünlähmung = Deuteranopie bzw. Protanopie), je-

¹⁾ Vgl. Kayser, Handbuch der Spektroskopie, Bd. 3. Ueber den Einfluss der Konzentration, vgl. z. B. die Abbild. in Wilh. Reich, Die Absorptionsspektren von Neodym- und Praseodymchlorid, Bonner Diss. 1906; über chemische Einflüsse vgl. Bernh. Schaeffers, Ueber den Einfl. des säurebildenden Bestandteils auf die Absorptionsspektren der Salze des Neodyms, Bonner Diss. 1907.

²⁾ F. Schenk, Ueber die physiologischen Grundlagen des Farbensinns (1906) 16—19.

doch die rhythmische Erregung, also Grauempfindung noch möglich sein (Rotgrünlähmung ist daher Farbenverwechslung, nicht Farbenblindheit). Bei einer „Gesamtlähmung des Tagesapparates“, der „typischen angeborenen totalen Farbenblindheit“, wo die Degeneration beide Anregerzellen betrifft, fällt auch die Grauempfindung für den Tagesapparat weg, und nur der Dämmerungsapparat vermittelt diese Empfindung.

§ 12. Zeitliche Verhältnisse.

Eine weitere Reihe von Erscheinungen ist jedenfalls auch der Tätigkeit der Anregerzellen zuzuschreiben, nämlich die zeitlichen Verhältnisse der Farbenempfindungen. Lässt man einen hellen, farbigen Gegenstand in dunklem Gesichtsfeld kreisen, so erscheint 1) zunächst das primäre Bild, das gegenüber dem ruhenden in die Länge gezogen ist, 2) eine dunkle Stelle, 3) ein schwächeres sekundäres Bild in komplementärer Farbe, 4) ein zweites Dunkelintervall, 5) ein tertiäres farbloses oder dem primären schwach gleiches Bild, 6) eine nochmalige Verdunkelung, die die durchlaufene Bahn als tiefschwarzen Streifen kenntlich macht. Die Erscheinungen sind offenbar in ihrer Gesamtheit so zu deuten, dass die von dem Aufnahmeapparat herkommende Bewegung nicht einfach weitergegeben wird, sondern nur als Reiz auf die Anregerzelle wirkt. Diese löst als Reaktion eine spezifische Betätigung aus (Bild) und übt diese auch noch kurze Zeit nach Einwirkung des Reizes aus (primäres Nachbild); nach dieser Betätigung (erstes Dunkelintervall) ist jedoch das Gleichgewicht durch Ermüdung für diese Farbe innerhalb der Zelle gestört und wird durch die entgegengesetzte Reaktion wiederherzustellen gesucht (sekundäres, komplementäres Nachbild). Dieser Ausgleich scheint nun ähnlich wie beim Ausgleich zweier Flüssigkeitsniveaus oder zweier elektrischen Potentialdifferenzen pendelartig vor sich zu gehen, wodurch sich das nach kurzer Zeit (zweites Dunkelintervall) eintretende tertiäre Nachbild und seine Farbe erklärt. Ist die Erregung der Zelle hierbei nur mehr sehr gering, so wird sie unrhythmisch und das tertiäre Nachbild farblos. Das darauf folgende tiefe Schwarz erklärt sich durch die stärkeren Lebensvorgänge der vorher gereizten zentralen Zellen. Dass für Rot das sekundäre Nachbild fehlt,¹⁾ erklärt sich möglicherweise daraus, dass, wie früher geschlossen, die Roterregung leichter vonstatten geht, also wohl auch das Gleichgewicht in der Zelle weniger stört. Zur Herstellung des Gleichgewichtes ist das Nebeneinander in der Netzhaut von irgendwelcher Bedeutung, insbesondere der Umstand, ob die farbenempfindlichen Elemente (Zapfen) dicht beisammen stehen oder unter den helligkeitsempfindlichen (Stäbchen) zerstreut sind. Dies zeigt die Tatsache, dass in der Macula lutea das sekundäre Nachbild verschwindet.²⁾ Dies Nebeneinander ist natürlich für den simultanen Kontrast

¹⁾ Ziehen, Leitf. der physiol. Psychologie 7, 113; v. Kries,³⁾ in Helmholtz, Optik II 371.

²⁾ Ziehen, ebend.; v. Kries, ebend.

massgebend. Hingegen sind für den sukzessiven Kontrast Ermüdungserscheinungen, wie herkömmlich, heranzuziehen.

§ 13. Erscheinungen von verschiedener Deutungsfähigkeit.

Angesichts des hypothetischen Charakters unserer Erklärungen gibt es verschiedene Erscheinungen, die eine mehrfache Deutung zulassen. Zur Erklärung der Weisslichkeit des mittleren Teiles des Spektrums kann man zweierlei Möglichkeiten heranziehen: es können den beiden Leitungssubstanzen entsprechend zwei getrennte Aufnahmeapparate bestehen, oder es besteht nur ein gemeinschaftlicher Aufnahmeapparat. Im ersten Fall haben wir zwei verschiedene absorbierende Substanzen, in deren einer die Rot- und Grünbewegung, in deren anderer die Gelb- und Blaubewegung entsteht. An jede Leitung, und vorher an jede Anregerzelle kommt dann nur der spezifische Reiz heran. Gelbes Licht bewirkt also für den Gelbblauapparat nur Gelbbewegung und weiterhin Gelberregung. Die Weisslichkeit des Gelb muss daher von dem benachbarten Rot-Grünapparat bewirkt werden. Das Absorptionsspektrum ist also so zu deuten, dass bei gelbem Licht nicht bloss eine Gelbbewegung eintritt, sondern zugleich eine Rot- und eine Grünbewegung von im Kompensationsverhältnis stehenden Stärken. Der Erfolg ist dann Gelberregung und Weisserregung in der Leitung. Entsprechend wäre bei grünem Licht ausser der Grünbewegung noch Gelb- und Blaubewegung vorhanden mit Grünerregung und Weisserregung als Erfolg. Es ergibt sich daraus ein Uebereinandergreifen der beiden Absorptionstreifen nach Abb. 2, und dadurch in den beiden Substanzen kontinuierliche Absorption von Rot bis Violett bezw. Orange bis Violett mit Maximum der Absorption in Rot, Grün und Violett, bezw. Gelb und Blau.

Besteht aber nur ein gemeinschaftlicher Aufnahmeapparat, so können auch die Absorptionstreifen getrennt sein wie in Abb. 1. Wegen der gemeinschaftlichen Verbindung müssen alle Bewegungen der Aufnahmesubstanz auf beiderlei dahinterliegenden Anregerzellen als Reiz wirken. Die Gelbbewegung würde dann auch auf die Anregerzelle der Rotgrünsubstanz als Reiz wirken können, und zwar stärker als die Blaubewegung, da ihre Schwingungszahl zwischen der von Rot- und Grünbewegung liegt. Da sie aber kein spezifischer Reiz ist, wird sie nur eine unrythmische Erregung auslösen. Entsprechend würde die nach der Schwingungszahl zwischen Gelb- und Blaubewegung liegende Grünbewegung auf die Anregerzelle der Gelbblauleitungssubstanz wirken können. — Hier liegt die Möglichkeit vor, dass die verschiedenen Absorptionstreifen durch dieselbe Substanz oder durch Substanzen, die sich praktisch nicht trennen lassen, hervorgerufen werden. Dann erhalten wir ein einziges kontinuierliches Absorptionsspektrum von Rot bis Violett, vielleicht mit einigen Intensitätsschwankungen.

Wie die Weisslichkeit des mittleren Spektrums doppelter Deutung fähig ist, so könnte man auch über die Weisserregung überhaupt noch

eine etwas andere Vorstellung ausbilden. Zunächst könnte man den Vorgang der Weisserregung auch hinter die Leitung legen, in der also dann noch gegensätzliche Farbenerregungen möglich wären. Das Gegenspiel der Erregungen würde dann erst zentralwärts zu einer einfachen, der Weisserregung, führen. Behalten wir aber die Weisserregung vor der Leitung bei, so könnte man statt der unrythmischen Erregung der Substanz, in der eine besondere Molekularstruktur hierfür nicht erfordert wird, auch an eine rythmische Erregung mit besonderer Schwingungsform denken. Infolge der Gegenwirkung von Rot und Grün hätten wir uns als Grundlage die abgebauten Molekel der Rotgrünsubstanz vorzustellen. Da auch bei Gelb und Blau die Weisserregung eintritt, so wäre anzunehmen, dass die Abbauprodukte der Gelbblaulitungssubstanz mit denen der Rotgrünsubstanz identisch wären. Dies wäre noch keine unwahrscheinliche Annahme, wenn man von dem Gedanken ausgeht, dass die Farbensubstanzen durch Differenzierung aus der Weisssubstanz entstanden sein können.¹⁾ Die Möglichkeit der Weissempfindung bei hoher Lichtstärke wäre so zu erklären, dass durch die Energie des Lichtes die Molekel der Farbenleitungssubstanzen zertrümmert würden. Um die Weissempfindung bei geringer Lichtstärke, das Dämmerungssehen, zu erklären, kann man annehmen, dass die Leitungssubstanz der Stäbchen die noch nicht differenzierte Weisssubstanz ist; aus dieser hätten sich durch Zusammensetzung der einfach gebauten Molekeln die hochgebauten Molekel der beiden farbigen Substanzen, der Rotgrünsubstanz und der Gelbblausubstanz, gebildet.

Eine andere Vorstellung lässt sich vielleicht noch modifizieren: Als Grundlage für den Rhythmus der Farbenerregung hatten wir verschiedenartige Molekel in den Leitungssubstanzen angenommen. Hält man jedoch diese Annahme nicht für notwendig, so könnte natürlich eine einzige Leitungssubstanz der Träger sämtlicher rythmischer und unrythmischer Erregungen sein. Statt der beiden Leitungssubstanzen bräuchten wir also nur zwei Anregerzellen, eine für Rot- und Grünerregung, die andere für Gelb- und Blauerregung; beide dazu noch befähigt der Weisserregung. Man könnte sogar daran denken, die Tätigkeiten der beiden Anregerzellen nur einer einzigen zuzuweisen, die also sämtliche Bewegungen des Aufnahmeapparates zu verarbeiten hätte. Um aber die Gegensätzlichkeit von Rot und Grün, sowie von Gelb und Blau noch erklären zu können, müsste man schliesslich doch noch bestimmten Teilen dieser Zelle die Rot- und Grünerregung, sowie deren Kompensation zu Weiss, andern Teilen die Gelb-, Blau- und Weisserregung zuschreiben. Also auch bei nur einer Leitung und einer Anregerzelle behielten wir eine Rotgrünsubstanz und eine Gelbblausubstanz bei, jedoch räumlich zusammengefasst. Ob aber eine Zelle mit derartig komplizierten Tätigkeiten, wie der Erregung von vier verschiedenen Rhythmen, aber Kompensation von je zweien zu unrythmischer Erregung, einigermassen wahrscheinlich ist, erscheint doch etwas fraglich.

¹⁾ Vgl. Schenck, Ueb. die physiol. Grundl. des Farbensinns (1906) 9.

§ 14. Schlussbemerkungen.

Zum Schluss möchten wir noch auf zwei Abhandlungen hinweisen, die eine gewisse Bestätigung unserer Anschauungen bilden. Beide wurden uns erst bekannt, als unsere auf Annahme von Schwingungen beruhende Weiterbildung der Hering'schen Hypothese schon niedergeschrieben war. Die eine, von Ebbinghaus¹⁾, ist zwar schon längst erschienen, konnte uns aber bei der Bestellung von der betr. Universitätsbibliothek nicht geliefert werden und wurde von uns daher später durch den Buchhandel bezogen; die andere, von Fröhlich²⁾ ist ein vor kurzem [diese Arbeit wurde im Spätsommer 1913 bereits niedergeschrieben] erschienener vorläufiger Bericht. Ebbinghaus sucht, wie wir, die Lichtwirkung auf das Auge durch Absorption zu erklären, jedoch durch drei infolge Zersetzung wirksame Substanzen, und nimmt für die weitere Erregung einen Vorgang an, den er *provisorisch* Rhythmisierung³⁾ nennt und nicht weiter erläutert. Die Annahme von Absorption des Lichtes und bei seiner Wellennatur die eines Rhythmus im Organ erscheint naheliegend; daraus ergibt sich im Zusammenhang mit der Hering'schen Theorie von selbst eine Uebereinstimmung in einigen Grundzügen. Die Untersuchungen von Fröhlich beweisen das Auftreten von regelmässig schwankenden elektrischen Strömen in der Netzhaut eines Tintenfischauges bei Belichtung. Hierbei zeigt sich eine Abhängigkeit der Frequenz der Schwingungen von der Wellenlänge, andererseits auch von der Intensität der Belichtung. Ueber das Farbensehen des Weichtierauges wissen wir einstweilen noch nichts Bestimmtes. Wie weit im einzelnen die Ergebnisse auf das Auge der höheren Wirbeltiere und des Menschen übertragbar sind, bedarf noch der Prüfung. Aus der starken Abhängigkeit der Frequenz von der Lichtstärke liesse sich auf eine starke Veränderung des Farbentons bei Veränderung der Lichtstärke schliessen. Erst recht wissen wir nicht, ob das Tintenfischauge auch das System der Gegenfarben besitzt, ob es z. B. bei gleichzeitiger Einwirkung von rotem und grünem Licht eine Mischfarbe, „Rotgrün“, oder eine neue Qualität, „Weiss“, sieht. Trotz der hochinteressanten Versuche und der unsere Vorstellung vom Rhythmus der Erregung bestätigenden Ergebnisse liegt daher einstweilen keine Veranlassung vor, unsere Anschauungen, wie wir sie oben entwickelt haben, zu ändern.

¹⁾ H. Ebbinghaus, Theorie des Farbensehens, 1893. (Sonderabdruck aus Zeitschr. für Psychol. u. Physiol. der Sinnesorgane).

²⁾ F. W. Fröhlich, „Licht- und Farbensinn“ in „Die Umschau“ 17 (1913) Nr. 43, S. 890 ff.; ferner „Vergleichende Untersuchungen über den Licht- u. Farbensinn“ in „Deutsche Medizinische Wochenschrift“ 39 (1913) Nr. 30, S. 1453 ff.

³⁾ Auch F. Schenck, a. a. O. S. 11, spricht von einem verschiedenen Rhythmus des Erregungsverlaufes.