

Theorie des Farbensehens.

Von

H. EBBINGHAUS.¹

Mit 5 Figuren im Text.

„τὸ ἐν διαφερόμενον αὐτὸ αὐτῷ
ἑμφέρεται ὡσπερ ἁρμονία
τόξου τε καὶ λύρας.“

Bekanntlich ist der Streit zwischen den beiden namhaftesten Theorien des Farbensehens, der YOUNG-HELMHOLTZschen und der HERINGSchen, noch immer nicht entschieden. Seit einer Reihe von Jahren vielmehr ist er anscheinend fast stationär geblieben: jede der beiden Ansichten zählt eine Anzahl gewichtiger Autoritäten zu ihren sozusagen eingeschworenen Vertretern, aber keine vermag die gegnerische ganz niederzuzwingen, oder auch nur erheblich an Terrain über sie zu gewinnen.

Dennoch ist in Wahrheit auch hier der Streit der Vater der Dinge geworden. Die Erfordernisse des theoretischen Kampfes, die Notwendigkeit, neue Argumente zu finden, um den Gegner endlich völlig aus dem Felde zu schlagen, und die alten Argumente zu stützen durch Verifikation ihrer Konsequenzen, haben eine Fülle praktischer Untersuchungen über die thatsächlichen Verhältnisse unseres Farbenempfindens hervorgerufen. Gerade in jüngster Zeit sind eine Anzahl besonders wichtiger Beiträge hierzu in rascher Aufeinanderfolge veröffentlicht worden. Wir stehen infolgedessen gegenwärtig auf einem ganz anderen, viel breiteren und viel genauer bekannten empirischen Boden als damals, wo die beiden Theorien ausgedacht wurden. Wenn ich mich nicht täusche, ist es damit bereits möglich, einen Schritt über sie beide hinauszugehen.

¹ Erweitert nach einem auf dem psychologischen Kongress zu London (August 1892) gehaltenen Vortrag. (Inhaltsübersicht am Schluss.)

kommen. Namentlich den letzten Publikationen glaube ich einigen lohnenden Ertrag abgewinnen zu können, sowohl für eine unbefangene Betrachtung der streitenden Lehren, wie auch vielleicht für eine positive Weiterbildung unserer Vorstellungen und die Verwertung von bisher rätselhaft gebliebenen Einzelheiten.

Ich versuche erst das eine und dann das andere.

I. Die HELMHOLTZsche Theorie.

1. Das lichtschwache Spektrum. Die Schwierigkeiten, die sich einer Festhaltung der HELMHOLTZschen Hypothese schon länger entgegenstellten, haben sich seit kurzem entschieden noch vermehrt. Bisher waren es wesentlich die Eigentümlichkeiten des peripheren Sehens und der Farbenblindheit, die sich ihr nicht recht fügen wollten. Neuerdings sind dazugekommen die Veränderungen, die die Farben bei sehr starker Abschwächung des objektiven Lichtes erleiden, über die wir vorher zwar im allgemeinen, aber nicht genau genug unterrichtet waren.

Vor zwei Jahren machte HERING die überraschende Mitteilung,¹ daß bei äußerst geringer objektiver Helligkeit und nach vorangegangenen längeren Aufenthalt im Dunkeln der Normalsehende das prismatische Spektrum genau ebenso sehe, wie der total Farbenblinde unter gewöhnlichen Verhältnissen. Beiden stellt es sich dar als ein farbloses graues Band, dessen größte Helligkeit nicht wie bei dem lichtstarken Spektrum des Normalsehenden in die Nähe der FRAUNHOFERSchen Linie *D*, sondern vielmehr in die Nähe von *E* fällt.² Die Verschiebung ist nicht unbedeutend; sie beträgt etwa $\frac{1}{5}$ der gewöhnlich sichtbaren Länge des Spektrums und kann also keinesfalls als eine unerhebliche Kleinigkeit betrachtet werden. In Verbindung mit ihr ist überhaupt die ganze Verteilung der Helligkeiten in dem lichtschwachen Spektrum eine andere, als in dem lichtstarken: bei geringer Intensität erscheinen alle langwelligen Farben im Vergleich mit den kurzwelligen dunkler, diese im

¹ HERING, Untersuchung eines total Farbenblinden. *Pflügers Arch.*, Bd 49, S. 563. (1891.) Übrigens hatte für HERING selbst die Sache nichts Überraschendes, da er sie auf Grund seiner Theorie vielmehr vorausgesehen hatte.

² Bei Sonnen- oder Tageslicht etwa auf die Wellenlänge $520 \mu\mu$, bei Gaslicht auf $535 \mu\mu$.

Vergleich mit jenen dagegen heller, als bei größeren Intensitäten. Und diese andere Verteilung der Helligkeiten bei schwachem Licht ist nun eben auch im einzelnen dieselbe, wie für den total Farbenblinden bei gewöhnlichen Lichtstärken.

Eine Bestätigung dieser Thatsache von anderer (und im allgemeinen gegnerischer) Seite hat nicht lange auf sich warten lassen. Aus Untersuchungen über die subjektive Helligkeit lichtschwacher Spektren, die schon gleichzeitig mit den HERING'schen begonnen waren, kam A. KÖNIG¹ zu demselben Resultat. Er zeigte zwar oder machte es doch wahrscheinlich,² daß nicht schlechthin alle total Farbenblinden das Spektrum in der eben beschriebenen Weise sehen. Bisweilen vielmehr schien ihm die Helligkeitsverteilung eine ähnliche zu sein, wie in dem gewöhnlichen lichtstarken Spektrum für das normale (oder auch das partiell farbenblinde) Auge. Aber in einer gewissen Anzahl von Fällen³ konnte er nur konstatieren, daß die von HERING gefundene Übereinstimmung durchaus besteht.

Worin liegt die Bedeutung dieses Befundes für die HELMHOLTZ'sche Theorie? Alle Einzelheiten, die bei der Sache eine Rolle spielen, waren vorher bereits bekannt. Daß bei Nacht

¹ A. KÖNIG, Über den Helligkeitswert der Spektralfarben bei verschiedener absoluter Intensität. In: *Beiträge zur Psychologie u. Physiologie d. Sinnesorgane. Festschrift zu H. von Helmholtz' 70. Geburtstage*. S. 309 ff. (1891.) (Auch separat erschienen.)

² A. a. O. § 11, besonders Fall 3 u. 4.

³ Den von KÖNIG (§ 7 C) aufgezählten drei Fällen ist noch der Fall LANDOLT aus dem Jahre 1881 hinzuzufügen. (LANDOLT, Achromatopsie totale. *Arch. d'Ophthalmol.* I. S. 114.) Die Beschreibung ist genau genug, um das erkennen zu lassen. Die Prüfung mit spektralem Licht ergibt z. B.: „Le maximum de clarté est, pour l'achromatope, un peu plus du côté du vert que pour nous.“ Vier sog. Heidelberger Papiere ordnet der Farbenblinde nach der Helligkeit in der Reihenfolge Hellgrün, Hellgelb, Blau, Orange, während für LANDOLT die Reihenfolge Hellgelb, Hellgrün, Orange, Blau gültig ist. Besonders interessant ist das Folgende. Der Farbenblinde wird aufgefordert, 52 HOLMGRENS'sche Wollproben nach ihrer Helligkeit anzuordnen. Danach thut LANDOLT dasselbe, nachdem er vorher die Beleuchtung soweit herabgemindert hat, daß er die Proben nicht mehr als farbig, sondern nur noch als verschieden hell erkennt. Die beiden Anordnungen stimmen ungefähr überein. Die Abweichungen erklärt LANDOLT selbst teilweise daraus, daß er bei so geringer Helligkeit überhaupt nicht mehr alle 52 Proben voneinander unterscheiden konnte, so daß ihre bestimmte Einrangierung mit vom Zufall abhing.

alle Katzen grau sind, d. h. dafs bei schwachem Licht zwar noch Helligkeitsverschiedenheiten, aber keine Farben mehr wahrgenommen werden, weifs schon das Sprichwort. Dafs bei diesem Verschwinden der Farben eine eigentümliche Verschiebung ihrer Helligkeiten stattfindet, dafs nämlich die langwelligeren Farben (Rot und Gelb) relativ schneller dunkeln, als die kurzwelligeren (Grün und Blau), wurde zuerst von PURKINJE bemerkt und wird nach ihm neuerdings häufig als *Purkinjesches Phänomen* bezeichnet. Auf das Vorkommen endlich der immerhin seltenen Fälle totaler Farbenblindheit war man auch schon seit einigen Jahren aufmerksam geworden und hatte die Eigentümlichkeiten dieser Anomalie mehrfach näher zu studieren Gelegenheit gehabt. Das Neue der HERINGSchen Beobachtung liegt also nicht in allen diesen Einzeldingen, sondern in der Aufweisung einer Beziehung, einer Zusammengehörigkeit zwischen ihnen, die bis dahin ebensoviel getrennte und zusammenhanglose Erfahrungen bildeten. Eben dadurch hat sie auch eine besondere theoretische Wichtigkeit.

Solange nämlich die Dinge isoliert nebeneinander standen, war es auch möglich, sie theoretisch gleichsam isoliert zu überwinden und ihnen durch verschiedene, untereinander nicht weiter verbundene Hülfsypothesen gerecht zu werden. Das ist seitens der Dreifarben Theorie geschehen.

Die totale Farbenblindheit hat sie einigermaßen beiseite geschoben als eine krankhafte Abnormität. „Da man . . . die monochromatischen Systeme“, sagen KÖNIG und DIETERICI im Jahre 1886, „wegen der übrigen immer gleichzeitig vorhandenen Eigenschaften des Gesichtssinnes als eine pathologische Abnormität zu betrachten hat, so ist der Mangel einer einfachen Beziehung zu den nicht pathologisch veränderten Farbensystemen ohne weiteren Belang.“ Das heifst mit anderen Worten: man kann die Art, wie dem total farbenblinden Auge das Spektrum erscheint, aus der Annahme von drei Grundfarben schlechterdings nicht verständlich machen, aber da jenes Auge überhaupt eine krankhafte Verbildung ist, so braucht man daran nicht weiter Anstofs zu nehmen.

Das *Purkinjesche Phänomen*, die Verschiebung der Helligkeiten bei Änderungen der Lichtstärke, erläuterte VON HELMHOLTZ durch die Vorstellung einer verschiedenen Erregbarkeit der rot- und der violett empfindenden Elemente. Gegenüber geringen

Lichtintensitäten sind die Violettfasern relativ leicht erregbar, die Rotfasern relativ träge. Nimmt die objektive Helligkeit aber zu, so wird das Erregungsquantum jener von diesen erst eingeholt und weiterhin überflügelt.

Für das Grauwerden der Farben endlich bei schwachem Licht erschien FICK¹ die Annahme „durchaus plausibel“, „dafs bei äufserst geringen . . . Intensitätsgraden der Strahlen die Erregbarkeitskurven der drei Fasergattungen nahe zusammenfallen.“ Für andere freilich hatte diese Änderung der Erregbarkeit, wenn sie ihr näher zu treten suchten, etwas sehr Rätselhaftes, VON KRIES bezeichnete sie geradezu² als „kaum denkbar“, und eine andere Vorstellung, die VON HELMHOLTZ erst neuerdings entwickelt,³ ist ihr jedenfalls vorzuziehen. Jede Spektralfarbe erregt, wie er annimmt, alle drei Grundempfindungen gleichzeitig, nur jede in verschiedener relativer Stärke. Damit nun aber diese objektiv stets vorhandenen Differenzen der Erregungsstärken uns auch zum Bewusstsein kommen und Farbenempfindungen erzeugen, ist nicht nur erforderlich, dafs sie da sind, sondern auch, dafs sie gewisse Gröfsen, nämlich die hier obwaltenden Schwellenwerte, überschreiten. Ist die objektive Lichtintensität sehr gering, so wird das unter Umständen nicht der Fall sein. Wir unterscheiden dann zwar die gesamte vorhandene Lichtmenge als etwas anderes von Dunkel, d. h. wir sehen Grau, aber die relativen Anteile der einzelnen Komponenten bleiben für uns wegen zu geringer absoluter Gröfse ihrer Verschiedenheiten unter der Schwelle.

Auf eine Diskussion dieser verschiedenen Annahmen gehe ich nicht weiter ein, denn diese ganze Art, meine ich, die Dinge isoliert und mit Hilfskonstruktionen zu erklären, die blofs auf das einzelne Phänomen zugespitzt erscheinen, ist jetzt unmöglich geworden. Die totale Farbenblindheit kann nicht beiseite geschoben werden als eine die Theorie des normalen Sehens weiter nichts angehende Abnormität, denn das normale Auge sieht die Farben unter Umständen genau wie das total farbenblinde. Das Grauwerden des Spektrums kann nicht abhängig gemacht werden von etwas, was ausschliesslich bei geringer Lichtintensität geschieht, denn der total Farben-

¹ FICK, *Hermanns Handb. d. Physiol.* III, 1, S. 200.

² V. KRIES, *Die Gesichtsempfindungen und ihre Analyse*, S. 84.

³ V. HELMHOLTZ, *Physiol. Optik*, 2. Aufl. S. 472 und *diese Zeitschr.* III. S. 121.

blinde sieht das Spektrum genau mit derselben Verteilung der Helligkeit bei beliebigen Intensitäten. Das *Purkinjesche Phänomen* endlich kann schwerlich darauf beruhen, daß die Erregungsgrößen der Grundempfindungen bei Verminderung der Lichtintensität mit verschiedener Schnelligkeit abnehmen. Denn der total Farbenblinde, dem die Grundempfindungen doch nicht fehlen dürfen, sieht das Spektrum bei ganz verschiedenen Intensitäten sozusagen mit maximalem *Purkinjeschen Phänomen*. Dieser ganze Komplex von Erfahrungen gehört durchaus enge zusammen; er muß daher auch im Zusammenhange behandelt und von einheitlichen Gesichtspunkten aus verständlich gemacht werden.

Die Auffindung dieser Gesichtspunkte aber bildet nun eben die Schwierigkeit, von der ich eingangs sagte, daß sie zu den für die YOUNG-HELMHOLTZsche Theorie schon bestehenden neuerdings hinzugekommen sei.

2. Erklärungsversuch. In welcher Weise könnte wohl im Sinne der Dreifarbentheorie eine Überwindung dieser neuen Schwierigkeit versucht werden? Das ist einigermaßen vorgezeichnet. Als die nähere Kenntnis der Eigentümlichkeiten des peripheren Sehens die nächstliegende Annahme von dem peripheren Ausfall einer oder zweier Faserarten unmöglich machte, bildete u. a. FICK folgende, seither auch von v. HELMHOLTZ acceptierte Vorstellung aus. Die spezifisch verschieden empfindenden drei Faserarten (oder drei photochemischen Substanzen) sind überall gleichmäßig vorhanden, aber die Art, wie sie durch Licht verschiedener Wellenlänge erregt werden, ist verschieden auf den verschiedenen Zonen der Retina. Nach der Peripherie hin werden die Erregbarkeitsverhältnisse der drei Faserarten einander immer ähnlicher, bis schließlich alle Unterschiede verschwinden und sie durch Licht jeder Wellenlänge gleich stark erregt werden. Oder mit anderen Worten: die Kurven, welche die Erregung der Grundempfindungen durch die spektralen Lichter darstellen, nähern sich für die peripheren Zonen der Netzhaut einander und fallen schließlich zusammen.

Eine ähnliche Annahme nun könnte für den gegenwärtigen Fall gemacht werden. In der That ist das nach dem Vorgange von FICK selbst bereits geschehen. In der Arbeit, in der, wie oben erwähnt, A. KÖNIG die HERINGSche Entdeckung im wesentlichen

bestätigt, gesteht er zu, daß die HELMHOLTZsche Theorie dieser Thatsache gegenüber so lange einen schweren Stand hat, „als sie an der Unveränderlichkeit der Intensitätskurven für die Grundempfindungen festhält.“¹ Es erscheint ihm aber zweifellos, daß dies fernerhin nicht mehr möglich ist, daß die Theorie vielmehr „die Form der Grundempfindungskurven als Variable der Helligkeit ansehen muß.“² Die Grundempfindungskurven sollen wir uns also jetzt als zwiefach variabel denken; sie sind erstens verschieden auf den verschiedenen Zonen der Retina, und sie sind zweitens abermals verschieden für die verschiedenen objektiven Lichtstärken. Mit dieser Erweiterung der Theorie aber findet KÖNIG „die Hebung des scheinbar vorhandenen Widerspruches nicht schwierig: die Zersetzbarkeit der drei photochemischen Substanzen, welche für mittlere Helligkeiten . . . [gewissen] . . . monochromatischen Farbensystemen zukommt, ist gleich derjenigen, welche für die übrigen Farbensysteme bei sehr niedriger Helligkeit besteht.“³

Ich versuche, diese Hypothese etwas konkreter zu gestalten und zu zeigen, was jene Intensitätskurven mit ihrer erstaunlichen Variabilität angesichts der im Auge möglichen Stoffe oder Prozesse wohl für einen Sinn haben können.

Die Träger der von HELMHOLTZ angenommenen drei Grundempfindungen, seien es verschiedene Faserarten oder photochemische Substanzen, müssen in gewisser Hinsicht, nämlich den Nerven gegenüber, als unveränderlich gedacht werden, da sie ja die Empfindungen Rot, Grün und Violett in stets gleicher spezifischer Verschiedenheit vermitteln sollen. Wenn sie nun doch in anderer Hinsicht, nämlich in ihrer Erregbarkeit durch das Licht, veränderlich sein sollen, so wird man diese beiden widerstreitenden Forderungen wohl nicht einfacher vereinigen können, als indem man annimmt, jene Empfindungsträger seien noch mit anderen lichtempfindlichen Stoffen verbunden, die von Hause aus eine andere Lichtabsorption haben, als sie, und diese je nach Umständen mehr oder weniger auf sie übertragen. Die Sache wäre ganz ähnlich wie in der neueren Photographie, wo man die Empfindlichkeit der Silbersalze für die verschie-

¹ A. KÖNIG, Über den Helligkeitswert der Spektralfarben etc. *Helmholtz-Festschrift*, S. 356. (Sep.-Ausg. S. 52.)

² Ebenda, S. 387. (Sep.-Ausg. S. 83.)

³ Ebenda, S. 356. (Sep.-Ausg. S. 52.)

denen Strahlen des Spektrums durch Zusatz von Fluoresceinverbindungen und anderen Stoffen (sogenannten Sensibilisatoren) nach Belieben ändert.¹ Man denke sich also, um etwas mehr ins einzelne einzutreten, die eigentlichen Rot-, Grün- und Violettsubstanzen (oder Fasern) seien alle drei in ganz derselben Weise durch Licht erregbar, sie hätten dieselben Erregungskurven. Das Maximum ihrer Erregbarkeit für Sonnenlicht liege da, wo bei geringster Lichtintensität oder bei totaler Farbenblindheit die größte Helligkeit des Spektrums gesehen wird ($520 \mu\mu$). Außerdem aber sei jede dieser Substanzen noch mit einer anderen Substanz, einem Sensibilisator, vermischt und könne durch dessen andersartige Lichtabsorption ähnlich beeinflusst werden wie die Silbersalze der photographischen Platte. Der Sensibilisator der Rotsubstanz sei vorwiegend für langwelliges Licht empfindlich, der der Grünschubstanz vorwiegend für mittelwelliges (der Gegend $550 \mu\mu$) und der der Violettschubstanz vorwiegend für kurzwelliges Licht. Endlich nehme man noch an, daß diese Sensibilisatoren weniger leicht zersetzlich seien, als die eigentlichen Sehstoffe, daß also bei wachsender Lichtintensität erst nur diese letzteren und dann allmählich wachsende Mengen jener ersteren affiziert werden. Dann lassen sich eine ganze Anzahl von Erfahrungen ungezwungen erklären.

Das Grauwerden des Spektrums bei schwächstem Licht und die damit verbundene Verschiebung seines Helligkeitsmaximums, wovon wir ausgingen, würde darauf beruhen, daß bei sehr geringen Lichtstärken die Sensibilisatoren noch gar nicht zersetzt werden, sondern nur die Sehstoffe selbst, und zwar alle drei in gleicher Stärke. Die Übereinstimmung dieses Spektrums mit dem der total Farbenblinden käme dadurch zu stande, daß bei diesen die Sensibilisatoren überhaupt fehlen und also der Effekt derselbe sein muß, wie wenn sie nicht erregt werden. Zur Erklärung der gewöhnlichen partiellen Farbenblindheit könnte man annehmen, daß hier durch eine Art Versehen der Natur ein und derselbe Sensibilisator an zwei Empfindungsstoffe geraten sei.² Sind die Rot- und Grün-

¹ VON HELMHOLTZ deutet einen solchen Gedanken bereits an in der neuen Aufl. der *Physiol. Optik*, S. 369.

² Ich entlehne diese Vorstellung Hrn. A. KÖNIG, der sie gesprächsweise einmal andeutete. Natürlich denke ich nicht daran, ihn für die

substanz beide mit dem Rot-Sensibilisator ausgestattet, so findet die Rot- und Grünerregung immer nur gleichzeitig und in gleicher Stärke statt (es wird also nach HELMHOLTZ Gelb empfunden), zugleich ist das rote Spektralende relativ hell; das wäre der Fall sogenannter Grünblindheit. Haben die beiden Substanzen dagegen beide den Grün-Sensibilisator, so wird gleichfalls Rot und Grün immer in gleicher Stärke und also als Gelb empfunden, das rote Spektralende ist aber jetzt relativ dunkel; das wäre die sogenannte Rotblindheit. Das periphere Farbensehen endlich liefse sich wohl darauf zurückführen, daß das Quantum der den Sehstoffen beigemischten Sensibilisatoren vom Centrum nach der Peripherie der Netzhaut hin allmählich abnähme. Die durch sie bedingte verschiedene Erregung der drei Empfindungssubstanzen müßte dadurch mehr und mehr zurücktreten und einer gleichzeitigen Erregung mehrerer dieser Substanzen Platz machen. Zunächst würden also mehr und mehr nur die binären Mischfarben Gelb und Blau empfunden werden, weiterhin nur die allgemeine Mischfarbe Weiß, wie es ja thatsächlich beim Fortschreiten vom Centrum der Netzhaut nach ihrer Peripherie der Fall ist.

3. Neue Schwierigkeiten. Jedoch, trotz aller dieser Erklärungsmöglichkeiten — haben die dazu erforderlichen Hilfsannahmen die Dreifarben-theorie im ganzen ansprechender und annehmbarer gemacht? Wie mir scheint, nein. Die ursprüngliche HELMHOLTZsche Theorie hatte die starken Wurzeln ihrer Kraft in der frappanten Einfachheit und Sparsamkeit, mit der sie aus einem Minimum von Grundvoraussetzungen so komplizierte Dinge, wie z. B. die Erscheinungen der Farbenmischung, soweit sie damals bekannt waren, abzuleiten vermochte. Den Vorzug einer besonderen Sparsamkeit büßt sie jetzt ein, wenn durch die Einführung der doch unumgänglichen Sensibilisatoren die Zahl der Grundstoffe direkt verdoppelt wird; mit 6 oder vielmehr mit 5 Variablen, wenn man sie so nennen will, leistet die HERINGSche Theorie alle Erklärungen auch. Und die Einfachheit? Die alten Rot-, Grün- und Violettfasern, die ihre spezifisch verschiedene Wirkung für das Bewußtsein mit

gegenwärtige Verwendung dieser Andeutung, wie überhaupt für die obigen Spezialisierungen etwa verantwortlich zu machen.

einem spezifisch verschiedenen Verhalten gegenüber den Lichtstrahlen verbanden, waren an sich ganz plausible Gebilde. Dagegen die oben angenommenen Fasern oder Sehstoffe, die für das Bewußtsein zwar auch sehr Verschiedenes leisten, aber dem Licht gegenüber sich ganz identisch verhalten (damit das Grauwerden der Farben unter den einfachsten Umständen begreiflich werde), haben etwas Künstliches und Gezwungenes, sie stellen das naturgemäÙ zu erwartende Verhalten gleichsam auf den Kopf. Die Vorstellung ferner einer gelegentlich vorkommenden Verwechslung bei der Kombinierung der Sensibilisatoren und Sehstoffe (behufs Erklärung der Farbenblindheit) ist überaus unnatürlich und, ich möchte sagen, dem Organismus unangemessen. Will man sie aber einmal zulassen, so wird es wieder schlechthin rätselhaft, weshalb von den gesamten überhaupt möglichen 26 Kombinationen, die durch ein solches Platzverwechseln der Sensibilisatoren entstehen könnten, nicht mehr als nur einige wenige erfahrungsmäÙig zu belegen sind.

Aber abgesehen von solchen mehr formalen Bedenken bestehen direkte Schwierigkeiten seitens der Thatsachen, oder doch mindestens seitens einer Thatsache. Ihr Widerspruch erscheint mir besonders schlagend, obwohl sie, infolge isolierter Betrachtung, bisher gerade für eine Stütze der HELMHOLTZschen Theorie gegolten hat.

Das Grauwerden der Farben bei geringsten Lichtintensitäten muß darauf beruhen, wie wir sahen, daß hier die Grundempfindungsstoffe alle drei gleichzeitig und in gleicher Stärke zersetzt werden. Nimmt die Lichtstärke zu, so werden mehr und mehr auch die Sensibilisatoren affiziert; durch ihre verschiedenartige Lichtempfindlichkeit wird die Erregung der Sehstoffe zunehmend differenziert, und die von diesen verursachten Grundempfindungen Rot, Grün und Violett machen sich mehr und mehr gesondert geltend. Natürlich muß man sich denken, daß alles dies allmählich und in kontinuierlichen Übergängen geschieht. Man muß also erwarten, daß bei allmählicher Steigerung der objektiven Helligkeit das Spektrum nach dem ersten Stadium des grauen Bandes zunächst die (in HELMHOLTZschem Sinne) minder differenzierten Mischfarben Gelb und Blau zeige und darnach erst, in allmählicher Verbreiterung auf Kosten jener beiden, die Grundfarben Rot, Grün und Violett. Bei dem Fortschreiten von der Peripherie

der Netzhaut zu ihrem Centrum, wobei nach unseren Annahmen gleichfalls das Quantum und die Erregung der Sensibilisatoren allmählich wachsen sollte, verhält es sich ja in der That ganz in dieser Weise.

Nun ist aber von dem, was man so nach den allgemeinen Voraussetzungen und nach der Analogie der verschiedenen Netzhautzonen bei den Helligkeitsänderungen des Spektrums erwarten sollte, das genaue Gegenteil der Fall. Wird ein Spektrum mittlerer Helligkeit allmählich verdunkelt, so verbreitern sich zunächst die Farben Rot, Grün und Blauviolett auf Kosten des Gelb und des reinen Blau, sowie ihrer Nachbarfarben Orange, Gelbgrün und Blaugrün. Mehr und mehr fallen die zuerst eingeengten Farbentöne völlig aus, und nur die drei Farben Rot, Grün und Blauviolett bleiben, unmittelbar nebeneinanderstehend, übrig.¹ Schreitet die Verdunkelung noch weiter fort, so verliert zuerst das Grün seine Farbe und verwandelt sich, ohne durch eine andere Farbe hindurchzugehen, in Grau. Die Gegenden des früheren Blau und Gelb folgen; nur das Rot behält seine Farbe sehr lange und verliert sie erst bei den stärksten Graden der Verdunkelung; dann aber auch, ohne erst den Ton einer der Farben anzunehmen, die nach der HELMHOLTZschen Theorie als Mischfarben betrachtet werden müßten. Umgekehrt, wird die Lichtintensität eines mittelhellen Spektrums noch weiter gesteigert, so zeigen seine verschiedenen Farben die zunehmende Tendenz, sich auf Gelb und Blau zu reduzieren, die allmählich über die Gebiete der anderen Farben hinübergreifen und an deren Stelle treten. Zugleich verlieren diese Farben an Sättigung, das Spektrum wird weißlicher, ganz wie es auch bei geringen Lichtintensitäten der Fall war.

Geht man also von einem Spektrum geringster Helligkeit allmählich über zu lichtstärkeren Spektren, so müßten die nach den KÖNIGSchen Vorstellungen mit der Helligkeit variablen Intensitätskurven der Grundempfindungen erst völlig zusammenfallen, dann plötzlich scharf abgesetzt auseinander und nebeneinander treten und endlich sich wieder alle gegeneinander verbreitern und dem Zusammenfallen nähern. Ich übersehe nicht

¹ W. v. BEZOLD, *Poggend. Ann.*, Bd. 150, S. 237 (1873); E. BRÜCKE, *Wiener Sitzungsber.*, Math.-Nat.-Kl., Bd. 77, III, S. 39—71 (1878). Auch VON HELMHOLTZ, *Physiol. Optik* (2. Aufl.), S. 469 u. 471.

ob es möglich ist, durch eine neue Hülfs-hypothese diese Kurvenwanderungen zu beseitigen oder doch ihrer völligen Unglaublichkeit abzu-helfen. Einstweilen aber, bis ein entsprechender Versuch vorliegt, beweisen sie für mich — was denn also das Resultat dieser ersten kritischen Betrachtung sein würde —, daß eine die KÖNIGSchen Andeutungen konkret aus-gestaltende Ergänzung der HELMHOLTZschen Theorie der bestehenden Schwierigkeiten nicht Herr zu werden vermag.

4. Die Farbenmischungen. Die neuen Schwierigkeiten also bleiben, aber bisherige Stützen der Theorie bleiben nicht; eben, während ich das Obige niederschrieb, ist die beste von allen ins Wanken geraten.

Im Jahre 1886 veröffentlichten A. KÖNIG und C. DIETERICI eine vorläufige Mitteilung über sehr zahlreiche und sehr genaue Farbengleichungen, die sie mit spektralen Lichtern hergestellt hatten.¹ Ihre wesentlichsten Resultate waren diese:

Bei Farbenblinden lassen sich sämtliche Mischungsergebnisse durch zwei Kurven darstellen, die ich hier Blau- und Gelbkurve nennen will. Die Blaukurven sind für alle Farbenblinden dieselben, abgesehen natürlich von solchen Abweichungen, die man zwanglos als Beobachtungsfehler und kleine individuelle Verschiedenheiten auffassen kann. Für die Gelbkurven dagegen ergeben sich zwei Formen, die sich namentlich dadurch unterscheiden, daß ihre Maxima an Stellen von etwa 25μ Differenz der Wellenlängen liegen. Alle Farbenblinden scheinen ausnahmslos einem dieser beiden Typen anzugehören.

Bei Farbentüchtigen sind zur Darstellung der Mischungsergebnisse drei Kurven notwendig und hinreichend; sie mögen hier als Rot-, Grün- und Blaukurve bezeichnet werden. Von diesen stimmt eine, die Blaukurve, ohne weiteres mit der Blaukurve der Farbenblinden überein. Bei den beiden anderen Kurven kann man durch eine gewisse rechnerische Transformation, auf die es hier nicht ankommt, eine Beziehung zu der Gelbkurve der Farbenblinden herstellen. Und zwar zeigt sich dann, daß die Gelbkurve des einen Typus der Farben-

¹ A. KÖNIG und C. DIETERICI, Die Grundempfindungen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum. *Sitzungsber. der Berl. Akademie* vom 29. Juli 1886.

blinden zusammenfällt mit der Rotkurve, die des anderen Typus mit der Grünkurve der Farbentüchtigen. Die Farbenempfindungen des normalen Auges lassen sich also in der That, wie die HELMHOLTZsche Theorie will, aus drei Elementen ableiten. Die ärmere Farbenmannigfaltigkeit des Farbenblinden aber kann man sich dadurch aus jener reicheren entstanden denken, daß je ein Element beiderseits übereinstimmt, während von den beiden anderen Elementen des Normalsehenden dem Farbenblinden je eines abgeht oder mit dem anderen zusammenfällt.

Diese Ergebnisse bildeten ohne Zweifel eine wertvolle Stütze der Dreifarben Theorie. Man mußte sich zwar sagen, daß Verhältnisse, die der Mensch durch drei Kurven, d. h. drei Variable, rechnerisch nachbilden und doch immer nur annähernd nachbilden kann, deshalb nicht notwendig von der Natur mit derselben Sparsamkeit vorgebildet zu sein brauchten. Wie sie dem Auge sechs Muskeln giebt, während zur Not und bei einem etwas unzuweckmäßigeren Charakter der Augenbewegungen am Ende auch vier gereicht hätten, so könnte sie das Farbensehen auf vier oder mehr Grundelemente basieren und damit vielleicht gewisse Nebenzwecke erreichen, ohne daß gerade die Farbmischungen zunächst etwas davon verrieten. Allein immerhin enthielt jene Dreizahl einen starken Hinweis auf die HELMHOLTZschen Anschauungen, den man nicht aus den Augen lassen durfte und dem man sich vorbehalten mußte, nach Vorlegung der thatsächlichen Beobachtungsunterlagen der KÖNIG-DIETERICISCHEN Folgerungen näher auf den Grund zu gehen.

Soeben ist das gesamte Thatsachenmaterial in dieser Zeitschrift veröffentlicht worden.¹ Meine Überraschung, als ich es zuerst in die Hände bekam, war nicht gering: die behauptete Übereinstimmung zwischen den Kurven der Farbenblinden und der Farbentüchtigen besteht gar nicht; gerade in dem Falle, wo sie ohne rechnerische Transformationen vorhanden sein sollte, nämlich bei der Blaukurve, widersprechen ihr die Mischungsgleichungen, auf denen sie doch beruhen sollte. Selbst-

¹ A. KÖNIG und C. DIETERICI, Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum. *Diese Zeitschr.* IV, S. 241 ff.

verständlich haben KÖNIG und DIETERICI das auch gesehen. Wenn sie nun doch jene Übereinstimmung behaupteten, um einerseits auf nur drei Kurven hinauszukommen, andererseits die Beziehung zu den Farbenblinden nicht zu verlieren, so haben sie dafür eine Erklärung. Auf diese komme ich sogleich; zunächst die Thatsache selbst.

Ich erläutere sie in Bezug auf das Interferenz-Spektrum des Gaslichtes.¹ Die experimentell gefundenen Mischungsgleichungen, auf die es hier ankommt, füge ich, umgerechnet für ein solches Spektrum, unten bei, und zwar wähle ich die Gleichungen für KÖNIG.² Die Ordinaten der nach diesen Beobachtungen von KÖNIG-DIETERICI konstruierten Kurven

¹ KÖNIG und DIETERICI geben ihre Mischungsgleichungen so, wie sie sie gefunden haben, nämlich bezogen auf ein Dispersions-Spektrum des Gaslichtes. Die Ordinaten der nach diesen Gleichungen konstruierten Empfindungskurven geben sie in verschiedenen Formen. Zunächst gleichfalls für das Dispersions-Spektrum des Gaslichtes, wodurch eine Vergleichung jeder Kurve mit den zugehörigen Gleichungen ermöglicht wird. Die Maßstäbe der einzelnen Kurven sind hier willkürlich und haben keine Beziehung zu einander, so daß eine Vergleichung dieser Kurven untereinander und für verschiedene Individuen keinen Sinn hat. Außerdem geben sie dieselben Kurven umgerechnet für die Interferenz-Spektren von Gaslicht sowohl wie Sonnenlicht, und haben hier zugleich zweckmäßigerweise die Maßstäbe der Ordinaten so gewählt, daß die von einer Kurve und der Abscissenaxe umschlossenen Flächen sämtlich gleichen Inhalt haben. Man kann auf diese Weise alle Kurven untereinander vergleichen. Will man nun aber nicht nur die Kurven, sondern sowohl sie, wie die zu Grunde liegenden Gleichungen durchweg zu einander in Beziehung setzen, so ist allemal eine Umrechnung nötig. Nimmt man die Gleichungen so wie sie vorliegen, also bezogen auf das Dispersions-Spektrum des Gaslichtes, so muß man die hierzu gehörigen Kurven auf gleiche Flächen bringen. Benutzt man die bereits auf gleiche Fläche gebrachten Kurven für eins der Interferenz-Spektren, so muß man die Mischungsgleichungen auf ein solches Spektrum umrechnen. Was man thut, ist sachlich völlig gleichgültig; es handelt sich gar nicht um materielle Änderungen, sondern immer nur darum, die Dinge auf irgend einen beliebigen Generalnenner zu bringen, damit eine durchgängige Vergleichung möglich werde. Ich muß das ausdrücklich betonen, um das Mißverständnis abzuwehren, als hätten meine gelegentlichen Änderungen der von KÖNIG-DIETERICI gegebenen Zahlen irgend etwas mit meiner Theorie zu thun.

² Es sind die Gleichungen II und IV (für K.) der Tabelle XII bei KÖNIG-DIETERICI. Für die Umrechnung geben die Autoren in Tabelle II die erforderlichen Daten.

(die ich fortfahre, als Rot-, Grün- und Blaukurve zu bezeichnen) finden sich in ihrer Tabelle XVI in den mittleren Kolonnen *R*, *G*, *V*.

Nach dieser Tabelle ist der Blauwert des Lichtes von $536 \mu\mu$ Wellenlänge für KÖNIG in einer gewissen Einheit = 2,786. Nach den Gleichungen IV kann man aus dem Licht von $536 \mu\mu$ und dem von $590 \mu\mu$ das Licht aller zwischenliegenden Stellen durch Mischung gewinnen; es fand sich z. B. experimentell

$$L_{563.5} = 0,288 L_{590} + 1,161 L_{536}$$

(*L* = Licht. Die Einheit ist eine bestimmte Spaltbreite eines bestimmten Spektrums.)

Die Stelle $563,5 \mu\mu$ hat hiernach einen etwas größeren Blaugehalt als $536 \mu\mu$; außerdem aber kann für $590 \mu\mu$ die Blau-Ordinate noch nicht einmal als Null betrachtet werden. Denn nach den Gleichungen II fand sich durch Beobachtung die weitere Relation

$$L_{590} + 0,061 L_{478} = 2,517 L_{670} + 0,722 L_{563.5}$$

Der kleine Blauzusatz, der hier auf der monochromatischen Seite nötig ist, um den sonst gegen die Mischung bestehenden Sättigungsunterschied auszugleichen, muß (nach Tabelle XVI) auf 0,769 der gewählten Einheit veranschlagt werden. Bezeichnet man nun den Blauwert von $590 \mu\mu$ mit *x*, berücksichtigt, daß für $670 \mu\mu$ eine Blau-Ordinate nicht mehr vorhanden ist, und zieht die beiden Gleichungen zusammen, so folgt

$$x + 0,769 = 0,722 (0,288 x + 1,161 \cdot 2,786)$$

und daraus

$$x = 1,979.$$

II.

$$L_{\lambda} = a \cdot L_{670} + b \cdot L_{563.5} - c \cdot L_{\lambda'}$$

IV.

$$L_{\lambda} = a \cdot L_{590} + b \cdot L_{536}$$

λ	<i>a</i>	<i>b</i>	λ'	<i>c</i>	λ	<i>a</i>	<i>b</i>
670 $\mu\mu$	1.—	0.—	—	—	590 $\mu\mu$	1.—	0.—
590 „	2.517	0.722	478 $\mu\mu$	0.0608	577 „	0.6070	0.6951
570 „	1.091	0.911	471.5 „	0.0021	563.5 „	0.2879	1.161
563.5 „	0.—	1.—	—	—	555 „	0.1742	1.194
					545 „	0.0556	1.156
					536 „	0.—	1.—

Das heißt also: hat die KÖNIGSche Blaukurve zufolge gewisser Beobachtungen bei $536 \mu\mu$ den Wert 2,786, so hat sie zufolge anderer Beobachtungen bei $590 \mu\mu$ den Wert 1,979. Ihren Verlauf für die zwischenliegenden Stellen des Spektrums kann man nun aus den Gleichungen IV berechnen. Es ergeben sich dann insgesamt folgende Werte der Ordinaten:

Tabelle I.

Wellenlängen	Blaukurve des Farbentüchtigen
536 $\mu\mu$	2,786
545 "	3,331
555 "	3,672
563,5 "	3,806
577 "	3,137
590 "	1,979

Wie verhält sich hierzu die Blaukurve der Farbenblinden? Darüber mögen die Tabellen V b und VI b bei KÖNIG-DIETERICI Auskunft geben, die eine getreue Wiedergabe der zugehörigen Beobachtungen sind.¹ Wenn man die Blauordinaten aus beiden Tabellen (mittlere Kolumne K) zu Durchschnittswerten zusammenzieht, so findet man durch graphische Interpolation für die eben benutzten Wellenlängen folgende Zahlen:

Tabelle II.

Wellenlängen	Blaukurve des Farbenblinden
536 $\mu\mu$	1,70
545 "	1,20
555 "	0,90
563,5 "	0,76
577 "	0,62
590 "	0,45

¹ Die Tabellen beziehen sich auf zwei Individuen vom Typus der sogenannten Grünblinden. Die sogenannten Rotblinden haben ähnliche Zahlen, allenfalls noch eine Spur günstiger für meine Argumentation.

Die beiden Kurven verlaufen darnach so verschieden wie möglich. Sie fallen zwar zunächst von ihrem gemeinsamen Maximum bei ca. $470 \mu\mu$ gleichmäÙig steil nach dem langwelligen Ende des Spektrums hin ab. Aber während bei den Farbenblinden dieser Abfall so schnell geschieht, daß die Kurve nur noch mit kleinen Werten im Grün anlangt und mit ganz geringfügigen durch das Gelbgrün zieht, hat er sich bei dem Farbentüchtigen in der Gegend von $536 \mu\mu$ schon etwas verlangsamt. Seine Blaukurve verläuft hier erheblich höher, als die des Farbenblinden, und statt nun gleichmäÙig weiter zu fallen, steigt sie vielmehr von hier aus nochmal an, erreicht bei $560 \mu\mu$ ein zweites kleineres Maximum und ist bei $590 \mu\mu$ erst wieder so weit gefallen, wie die Blaukurve des Farbenblinden bei $536 \mu\mu$. Und doch sollten diese beiden Kurven miteinander übereinstimmen.

Wie erklären nun KÖNIG und DIETERICI diesen Sachverhalt? Sie machen wiederholt darauf aufmerksam, daß in der Gegend von Orange bis Gelbgrün den für das normale Auge gültigen Gleichungen auf einer Seite „noch eine beträchtliche Menge blauen Lichtes“ zugemischt werden kann, ohne daß die Gleichheit gestört wird, daß also in dieser Gegend die beobachteten Mischungsgleichungen in Bezug auf das Blau ungenau sind und zu einer Konstruktion der Blaukurven hier nicht benutzt werden können.¹ Man hätte sich demnach nach ihrer Auffassung folgendes zu denken. Wenn man aus Licht von 590 und $536 \mu\mu$ z. B. dasjenige von $560 \mu\mu$ mischt, so bekommt man, um den richtigen Farbenton zwischen Gelb und Grün zu treffen, relativ viel von dem bei 536 noch vorhandenen Blau in die Mischung. In dem homogenen Licht von $560 \mu\mu$ ist laut Aussage der Gleichungen von Farbenblinden thatsächlich sehr wenig Blau enthalten. Dennoch können die beiden Gelbgrün, das monochromatische und das gemischte, für das normale Auge gleich aussehen, denn es ist für den stärkeren Blaugehalt, d. h. die gröÙere Weißlichkeit der gemischten Farbe, unempfindlich, es übersieht diesen Unterschied.

Um die Erklärung zureichend beurteilen zu können, müÙte man wissen, wie groß ungefähr jene Menge Blau ist, die man einer schon stimmenden Gleichung im Gelb einseitig noch

¹ A. a. O. S. 294, 299, 328.

beimischen darf, ohne sie zu stören; ob sie auch zureicht, die in Frage stehenden Differenzen ihrer numerischen Größe nach zu erklären. Es handelt sich nämlich hier um ganz bedeutende Beträge. Die Einheiten der KÖNIG-DIETERICISCHEN Tabellen sind zweckmäßigerweise so gewählt, daß gleiche Werte der Rot-, Grün- und Blaukurve zusammen gerade Weiß geben. Beziffert man den Blauwert des Lichtes von $536 \mu\mu$ wie oben mit 2,786, dagegen den von $590 \mu\mu$ nach dem Befund an Farbenblinden nur mit 0,45, so berechnet sich z. B. für $563,5 \mu\mu$ der Überschufs an Blau in dem gemischten Gelbgrün über den Gehalt des monochromatischen zu 2,62. Nun beträgt bei $563,5 \mu\mu$ der Wert der KÖNIGSCHEN Rotkurve (KÖNIG-DIETERICI Tab. XVI) 7,301, derjenige der Grünkurve 12,717. Damit das gemischte Licht dem homogenen gleich aussehe, muß es natürlich die gleichen Mengen Rot und Grün enthalten. Von diesen Größen wird aber durch das in die Mischung eingehende Blau der ebengenannte Teilbetrag von 2,62 zu Weiß neutralisiert, d. h. von dem ganzen vorhandenen Rot werden 36 %, von dem vorhandenen Grün 21 % dazu verbraucht, die Sättigung der Mischfarbe zu verringern. Erlaubt man sich, die beiden Zahlen zusammenzuziehen, so kann man sagen: nach der KÖNIG-DIETERICISCHEN Erklärung sollen dem normalen Auge zwei Gelbgrün gleich erscheinen, von denen die Gesamtfarbigkeit des einen um 28 % geringer ist, als die des anderen. Für $555 \mu\mu$ findet man durch eine gleiche Rechnung gar eine Differenz von 30 %.

Leider haben die Autoren unterlassen, in dieser Beziehung eine thatsächliche Angabe zu machen und mitzuteilen, daß sie sich wenigstens schätzungsweise über eine solche Tragweite des von ihnen angezogenen Moments vergewissert haben. Man ist also einstweilen auf Vermutungen und Wahrscheinlichkeiten angewiesen, und da muß ich sagen, daß mir die Annahme einer so bedeutenden Unempfindlichkeit des Auges gegen Sättigungsunterschiede bedenklich erscheint; jedenfalls dürfte mit den genannten Zahlen die äußerste Grenze des Zulässigen erreicht sein. Nun hat aber die Erklärung noch einen kleinen, bisher weggelassenen Zusatz, durch den meine Bedenken geradezu unüberwindlich werden.

In einer der Formulierungen ihrer Auskunft¹ sagen KÖNIG und DIETERICI ausdrücklich, daß (in der Nachbarschaft des Gelb) eine beträchtliche Menge blauen Lichts auf einer beliebigen der beiden Seiten der Farbengleichungen beigemischt werden kann, ohne die Gleichheit zu stören. Sie haben also nicht nur dem homogenen Gelbgrün, sondern auch dem durch Mischung gewonnenen, dem, um die Theorie zu halten, schon 25—30% Sättigungsdifferenz gegen das andere zugeschrieben werden müssen, noch „beträchtliche“ Mengen Blau zumischen können, ohne daß ein Unterschied gegen das blauarme homogene Licht aufgefallen wäre. Die Sättigungsverschiedenheit der beiden Farben müßte dadurch unter Umständen wohl auf 40 und mehr Prozent gestiegen und doch der Empfindung nicht bemerklich geworden sein. Wäre das wirklich der Fall, nun, so könnte man die ganzen Gleichungen aus der Gegend des Gelb ruhig streichen und wieder von vorne anfangen. Sind sie bis zu solchem Grade ungenau, kann man ihnen Zusätze von solchem Betrage nach Bedarf machen oder auch nicht machen, so kann man natürlich alles Mögliche aus ihnen herauskonstruieren und eben damit nichts Bestimmtes. Um nur die drei Grundempfindungen zu retten, durchschneiden die Autoren den ganzen Ast, auf dem sie sitzen, und erwecken indirekt lieber Mißtrauen gegen ihre überaus mühevollen und dankenswerten experimentellen Forschungen, als daß sie einmal versuchen, vielmehr die Theorie nach jenen zurechtzubiegen.

Mir scheint die Voraussetzung einer so weit gehenden Ungenauigkeit der Versuche ungerechtfertigt. Sie machen mir im Gegenteil, ganz abgesehen von ihrer sicheren physikalischen Fundierung, durch ihr oft vortreffliches gegenseitiges Zusammenreffen durchaus den Eindruck der Zuverlässigkeit. Die mehrbesprochene und thatsächliche Unempfindlichkeit des Auges gegen Sättigungsunterschiede im Gelb und Gelbgrün wird freilich bei der Beurteilung der Gleichungen dieser Gegend in Betracht zu ziehen sein, aber sie kann entfernt nicht die Rolle spielen, die KÖNIG und DIETERICI ihr zuweisen möchten. Was hier eine Rolle spielt, ist vielmehr etwas ganz Anderes.

Lassen wir einmal jene Unempfindlichkeit gegen Sättigungs-

¹ A. a. O., S. 328.

differenzen in ihrer Beziehung zu etwaigen Folgen bei Seite und fassen sie hinsichtlich ihrer Ursachen ins Auge. Woran mag diese Eigentümlichkeit des Auges wohl liegen? Sie besteht nicht durchweg, sondern nur bei dem normalen Auge. Die Farbenblinden sind in dieser Beziehung bei weitem empfindlicher. Das geht mit genügender Sicherheit aus den KÖNIG-DIETERICISCHEN Mischungsgleichungen für Farbenblinde hervor. Außerdem auch aus der ausdrücklichen Bemerkung,¹ daß ein sog. Rotblinder in dem Intervall von 590 bis 550 $\mu\mu$ Sättigungsunterschiede wahrnahm, ohne daß es gelang, die zu ihrer Hervorbringung erforderlichen geringen Beträge Blau numerisch zu bestimmen. Nach der HELMHOLTZschen Theorie haben die Farbenblinden zu diesem Vorzug eigentlich keine Berechtigung. In dem farbentüchtigen Auge findet nach ihr durch Lichtstrahlen aus der Gegend von 590 $\mu\mu$ gleichzeitige Erregung eines Rotprozesses und eines Grünprozesses statt; nur sind die beiden Prozesse für verschiedene Wellenlängen von verschiedener relativer Stärke. In dem farbenblinden Auge findet ganz dasselbe statt; nur sind die beiden Prozesse für Licht jeder Wellenlänge von gleicher relativer Stärke. Kommt nun bei den Farbenblinden eine geringe Blauerregung hinzu, so bemerken sie ein Weißlichwerden der Farbe. Geschieht bei den Farbentüchtigen dasselbe, so bemerken sie nichts; erst bei erheblich stärkeren Blauzusätzen sehen sie eine Sättigungsverminderung. Woher dieser Unterschied?

Man könnte an den Einfluß der Übung denken. Durch die Bedürfnisse des praktischen Lebens wird der Farbenblinde zu einer schärferen Unterscheidung von Helligkeitsstufen und Sättigungsgraden erzogen und erwirbt so eine feinere Empfindlichkeit für diese Dinge, auch wenn es sich nicht gerade um praktisch Brauchbares handelt. Ich bin der Ansicht, daß diese Schärfung der Unterscheidungsfähigkeit durch das praktische Bedürfnis ganz überwiegend ein Phänomen der Aufmerksamkeit ist. Der Farbenblinde lernt auf gewisse schwer erkennbare Merkmale der Dinge besser achten, auf die der Normalsehende deshalb nicht zu achten braucht, weil er andere leicht erkennbare Merkmale hat, die jenem abgehen. Aber die größere Empfindlichkeit, die er dadurch erlangt, ist nicht

¹ A. a. O., S. 264.

sowohl eine solche des sinnlichen, als vielmehr überwiegend eine solche des geistigen Auges, des Gehirns. Veranlaßt man den Normalsehenden, seine Aufmerksamkeit zusammenzunehmen und einmal ausnahmsweise auch auf die Momente ordentlich zu achten, auf die der Farbenblinde gewohnheitsmäÙig achtet, so unterscheidet er, nach einem schnell durchlaufenen Prodromalstadium wachsender Sicherheit, bald, wenn auch vielleicht nicht ganz so scharf, so doch sehr annähernd so scharf, wie der Farbenblinde. Zum Beweise berufe ich mich auf vergleichende Beobachtungen, die A. KÖNIG und E. BRODHUN einmal über ihre Empfindlichkeit gegen Helligkeitsunterschiede im Spektrum angestellt haben.¹ Die Empfindlichkeit des Farbenblinden (B.) verhielt sich zu der des Farbentüchtigen (K.) etwa wie 11:10, d. h. sie war nicht nennenswert von dieser verschieden. In dem gegenwärtigen Falle der Sättigungsunterschiede verhalten sich die beiderseitigen Empfindlichkeiten, soviel ich mit einem summarischen Experiment einmal feststellen konnte, mindestens wie 3:1. Diese Verhältnisse gestatten also gar keinen Vergleich.

Auf die aufgeworfene Frage nach der Ursache unserer Unempfindlichkeit für Sättigungsdifferenzen im Gelb giebt es nur eine mögliche Antwort, die zugleich aus allen diesen Schwierigkeiten herausführt. Die Farbentüchtigen sind relativ unempfindlich für das Weißlichwerden der gelben Farbentöne, weil diese Farbentöne bei ihnen von Hause aus schon relativ weißlich sind. Und die Farbenblinden sind viel empfindlicher in dieser Beziehung, weil dieselben Farbentöne bei ihnen von Hause aus viel satter sind. Hier wie anderswo manifestiert sich die Änderung eines objektiven Reizvorganges für die Empfindung immer nur mit Rücksicht auf das schon vorhandene Quantum der gleichartigen Erregung. Ist dieses bereits bestehende Erregungsquantum groß, so muß auch die Änderung ihrem absoluten Betrage nach groß sein, um eine Änderung der Empfindung hervorzurufen; ist das Quantum klein, so wird auch eine kleine Änderung schon bemerkt. Und die Größe der Weißerregung, behaupte ich nun, ist für den Farben-

¹ A. KÖNIG und E. BRODHUN, Experimentelle Untersuchungen über die psychophysische Fundamentalformel in Bezug auf den Gesichtssinn. *Sitzungsber. d. Berliner Akad.* vom 26. Juli 1888.

tüchtigen und den Farbenblinden im Gelb und seiner Nachbarschaft erheblich verschieden.

Woher aber weiter diese Verschiedenheit? Hier steckt eben jenes „Andere“, auf das ich vorhin schon hinauskam. Ich will jetzt sagen, was es ist: nichts sonst als die HERINGSche Rotgrünsubstanz, allerdings mit etwas anderen als den ihr von HERING bisher zugeschriebenen Eigenschaften. Die beiden an ihr möglichen Prozesse, auf denen das Rotempfinden und das Grünempfinden beruht, summieren sich zum Teil und in einer eigentümlichen Weise in der Gegend des Gelb und bewirken Weißs. Nun hat der Farbentüchtige jene Substanz, der Farbenblinde hat sie nicht. Daher sieht jener weißliche Farben und ist relativ unempfindlich gegen Änderungen ihrer Weißlichkeit, wo dieser satte Farben sieht und sich gegen die gleichen Änderungen relativ empfindlich zeigt. Nicht gesucht von unseren Autoren und doch unverkennbar steckt hier also ein Glied der HERINGSchen Theorie den Kopf durch ihre Mischungsresultate hindurch und bringt die auf drei Grundfarben gerichteten Schlüsse in Verwirrung. Wir wollen es weiterhin ganz hervorholen und uns überzeugen, daß sich mit seiner Hülfe die Dinge völlig befriedigend gestalten lassen.

Einstweilen aber resümiere ich: Die Erscheinungen der Farbenmischung ließen sich für unsere ersten und gröberen Kenntnisse mit hinreichender Genauigkeit aus der Annahme von drei Grundelementen ableiten. Sie bildeten daher wie den Ausgangspunkt so auch die beste Stütze der YOUNG-HELMHOLTZschen Theorie. Nach genauerer Untersuchung dieser Phänomene, wie sie in den KÖNIG-DIETERICISchen Mischungsgleichungen vorliegt, ist eine solche Ableitung unmöglich geworden. In den Beobachtungsergebnissen macht sich unzweideutig ein fremdes Moment geltend, das nun auch hier, wie fast schon bei allen anderen Erscheinungen des Farbensehens, über jene drei Prinzipien hinausweist.

II. Die HERINGSche Theorie.

5. Das lichtschwache Spektrum. Auf dem Boden der HERINGSchen Theorie erklären sich die Erscheinungen, von denen wir ausgingen, in ihren allgemeinsten Zügen mit überraschender Einfachheit.

Die Substanz, auf deren Zersetzung die Weißempfindung beruht, wird in der Dunkelheit stark regeneriert, und mit ihrer Anhäufung wird natürlich auch die Leichtigkeit ihrer Zersetzung gesteigert. Auf die chromatischen Substanzen dagegen, die Rotgrün- und Blaugelbsubstanz, ist Dunkelheit ohne besonderen Einfluß; ihre Vermehrung sowohl wie Verminderung geschieht immer nur unter der Einwirkung bestimmten Lichtes. Wird also nach voraufgegangenem Dunkelaufenthalt das Auge irgend welchen schwachen Lichtstrahlen ausgesetzt, so verursachen diese eine relativ beträchtliche Zersetzung der Weißsubstanz, aber nur eine geringfügige Zersetzung (oder Wiederherstellung) der chromatischen Substanzen. Die Erregung der letzteren wird gleichsam übertönt durch die verhältnismäßig viel stärkere Erregung der ersteren, und bei genügender Schwäche der objektiven Reizung bleibt daher ihr chromatischer Effekt für das Bewußtsein überhaupt unter der Schwelle, er ist so gut wie nicht vorhanden, während ihr Weißeffekt, die „weiße Valenz“ des betreffenden Lichtes (d. h. eben seine Wirkung auf die Weißsubstanz), rein hervortritt. Das heißt mit anderen Worten zweierlei. Erstens: sehr lichtschwache Farben werden von dem normalen Auge nicht als farbig wahrgenommen, sondern nur als mehr oder minder helle Nuancen Grau. Zweitens: die Helligkeitsverhältnisse solcher lichtschwächster Farben sind für den Normalsehenden dieselben wie für den, dem die chromatischen Substanzen überhaupt fehlen, nämlich für den total Farbenblinden. Das Grauwerden des Dunkelspektrums und die Übereinstimmung seiner Helligkeitsverteilung mit dem Spektrum des total Farbenblinden sind damit erklärt.

Weiter. Die Lichtwirkung auf die chromatischen Substanzen ist entweder eine dissimilierende oder eine assimilierende. Nun ist Dissimilation ein Vorgang, der bei der Weißsubstanz verbunden ist mit der Empfindung von Helligkeit, Assimilation umgekehrt verbunden mit der Empfindung von Dunkelheit. Ganz ebenso ist es bei den chromatischen Substanzen und den durch sie vermittelten Farben. Die auf Dissimilationsvorgängen beruhenden Farben (Rot und Gelb) haben eben wegen dieser Fundierung auf Dissimilation an für sich etwas Helles, eine „spezifische Helligkeit“, die Assimilationsfarben (Grün und Blau) ganz entsprechend eine „spezifische

Dunkelheit“; beides ganz abgesehen von derjenigen Helligkeit, die da stets gleichzeitig noch durch die Einwirkung der betreffenden Lichtstrahlen auf die Weifssubstanz hervorgerufen wird. Man denke sich nun, ein sehr lichtschwaches Spektrum werde allmählich aufgehellt, was muß geschehen? Wenn die chromatischen Substanzen so stark affiziert werden, daß die Wirkung für das Bewußtsein merklich wird, so wird der anfänglich farblose Streifen allmählich gefärbt erscheinen. Wo nun z. B. Gelb auftritt, wird die auf Zersetzung der Weifssubstanz beruhende, an sich mäfsig grofse Helligkeit erheblich vermehrt werden durch die spezifische Helligkeit des Gelb, im Blau dagegen wird sie eine Verminderung erleiden durch dessen spezifische Dunkelheit. Das Rot wird, trotz der sehr geringen Weifswirkung der langwelligen Strahlen, doch noch den Eindruck einer gewissen Helligkeit bedingen als Dissimulationsfarbe, während im Grün die hier ursprünglich maximale Helligkeit wieder eine Herabsetzung erfahren muß wegen seines Assimilationscharakters. Alles dies um so mehr, je mehr durch Steigerung der Lichtintensität die zuerst relativ stärkere Erregbarkeit der Weifssubstanz zurücktritt. Das heifst also: nach der Konsequenz der HERINGSchen Vorstellungen müssen bei gleicher Zunahme der objektiven Lichtstärke die langwelligen Farben relativ heller, die kurzwelligen relativ dunkler werden, zugleich muß sich das Helligkeitsmaximum des Spektrums aus der Gegend des Grün nach Gelb verschieben; ganz wie es thatsächlich der Fall ist. Damit hat auch das sog. PURKINJESche Phänomen seine Erklärung gefunden.

Jedoch — auch hier giebt es leider ein jedoch. Die Dinge, die sich in den grofsen Zügen nach HERINGSchen Prinzipien so vortrefflich zurechtlegen, thun es nicht mehr in den kleinen Zügen. Sowie man sehr genau zusieht, zeigt sich bei genügend ausgiebiger Verminderung oder Vermehrung der objektiven Helligkeit der Farben eine Eigentümlichkeit, die der HERINGSchen Theorie eine grofse Schwierigkeit bereitet. Worin sie besteht, setze ich zunächst für den einfacheren Fall der Farbenblindheit auseinander.

6. Der Antagonismus der Gegenfarben. Man betrachte die Kurven der Figg. 1 und 2. Sie sind lediglich eine graphische Wiedergabe von Beobachtungsergebnissen, ohne

jede Einmischung einer Theorie. Sie stellen dar, wie einem sog. Grünblinden ein Gaslichtspektrum erscheint, und zwar indem sie zugleich erkennen lassen, wie die verschiedenen

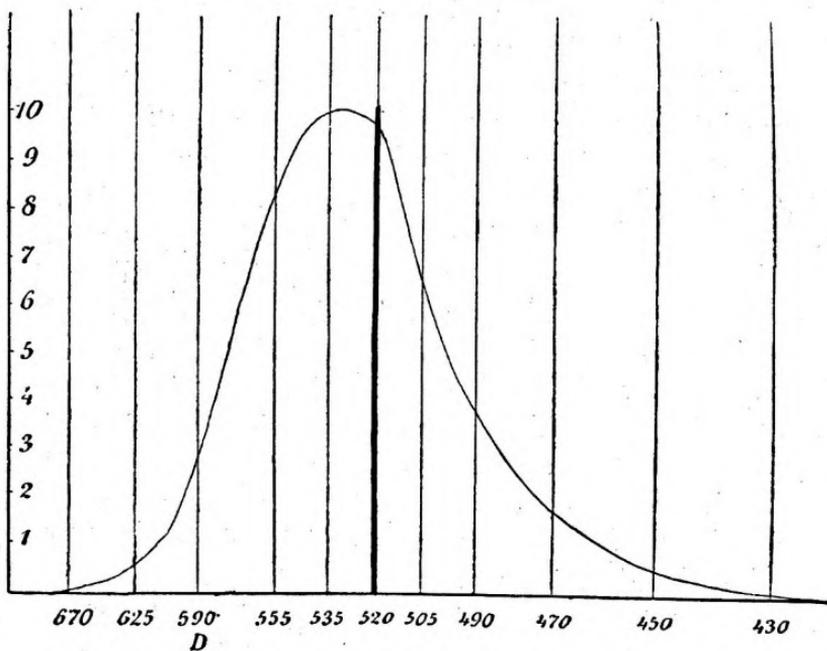


Fig. 1.

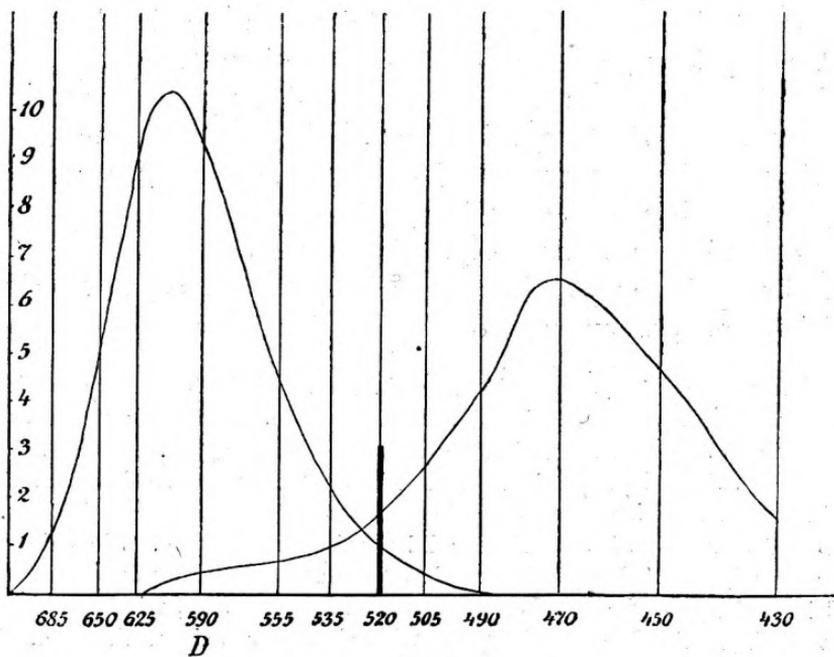


Fig. 2.

Farbennuancen dieses Spektrums für ihn durch Mischung auseinander gewonnen werden können.¹ Fig. 1 gilt für das Spektrum bei sehr geringer Lichtstärke. Es zeigt dann, wie öfters erwähnt, nur eine einzige Farbe, nämlich Weiß oder vielmehr Grau, die ihre größte Helligkeit etwa bei $535 \mu\mu$ hat. Man kann also durch passende Abschwächung des Lichtes dieser Stelle Gleichheit mit jeder beliebigen anderen Stelle erzielen, und auch umgekehrt durch passende Verstärkung des Lichtes jeder anderen Stelle oder durch passende Mischung des Lichtes mehrerer Stellen den Eindruck der Stelle $535 \mu\mu$ hervorrufen. Fig. 2 bezieht sich auf das Spektrum bei ziemlich starker Lichtintensität. Der Farbenblinde sieht dann zwei Farben; die eine in größter Reinheit am langwelligen Ende, Gelb, die andere am kurzwelligen Ende, Blau. In den mittleren Partien sieht er geringere Sättigungsgrade jener Farben, einerseits von Gelb, andererseits von Blau. Um die verschiedenen Farbtöne durch Mischung auseinander herzustellen, braucht er innerhalb jeder Endstrecke nur das Licht einer beliebigen ihr angehörigen Stelle passend abzuschwächen oder zu verstärken; für das mittlere Gebiet muß er einem gewissen Quantum Licht der einen Endstrecke ein passend gewähltes Quantum der anderen hinzufügen.

Nun existiert für den Farbenblinden auch in dem lichtstarken Spektrum stets eine Stelle, die ihm die Empfindung Weiß gibt, genauer: die Empfindung des unzerlegten Lichtes, von dem das Spektrum herrührt. Sie liegt in dem gegenwärtigen Falle (also für Gaslicht) bei rund $520 \mu\mu$; auf eine Ungenauigkeit von 5 oder $10 \mu\mu$ kommt es für das folgende durchaus nicht an. Aus Fig. 2 ist sofort ersichtlich, daß man den Eindruck, den das Licht dieser Stelle macht, durch Mischung erzielen kann, wenn man z. B. das Licht der Stellen $685 \mu\mu$

¹ Fig. 1 repräsentiert die von A. KÖNIG bei dem Farbenblinden BRODHUN beobachtete Helligkeitsverteilung des Dunkelspektrums. Die betreffenden Zahlen finden sich *Helmholtz-Festschrift*, S. 341 (Sep.-Ausg., S. 37) (Kol. A der Helligkeitswerte). Die Zahlen zu Fig. 2 sind der soeben erschienenen Arbeit von KÖNIG und DIETERICI entnommen (*Diese Zeitschr.* IV S. 275, Kolumne W_1 und K für Dispersions-Spektrum). Sie geben für denselben Farbenblinden die relative Verteilung der Empfindungen Gelb und Blau in dem lichtstarken Spektrum an und haben, wie ich nochmals hervorhebe, mit den spezifischen Theorien der beiden Autoren über Grundempfindungen absolut nichts zu thun.

und $432 \mu\mu$ vereinigt, oder auch, wenn man etwa $\frac{1}{8}$ des Lichtes aus der Gegend der Natriumlinie *D* nimmt und ein reichliches Viertel aus der Gegend von $470 \mu\mu$ hinzufügt. Aus Fig. 1 dagegen ist ganz ebenso ersichtlich, daß die Herstellung solcher Gleichungen für das stark verdunkelte Spektrum absolut unmöglich ist. Aus einer Vereinigung des Lichtes von 685 und $432 \mu\mu$ gewinnt man nur einen ganz geringen Bruchteil der Helligkeit von $520 \mu\mu$; das gesamte Licht der Stelle *D*, vermehrt um das gesamte der Stelle $470 \mu\mu$, giebt erst ungefähr die Hälfte des Lichtes von $520 \mu\mu$.

Mit anderen Worten heißt das folgendes: Schneidet ein Farbenblinder aus einem Spektrum einerseits die ihm weiß aussehende Stelle heraus und stellt andererseits durch Mischung aus entfernter gelegenen Stellen ein dem ersten völlig gleich aussehendes Weiß her, setzt er dann die objektive Helligkeit beider Felder in gleichem Maße und ziemlich stark herab, so wird das durch Mischung hergestellte weiße Feld sehr viel stärker dunkeln, als das mit homogenem Lichte erleuchtete. Gleich aussehendes Licht wird bei völlig gleicher Behandlung ganz und gar verschieden.

Damit diese Folgerung aus bisherigen Beobachtungen nicht eine bloße Folgerung sei, hatte der Farbenblinde von dem hier die Rede ist (Hr. E. BRODHUN) die Freundlichkeit, das Experiment für mich anzustellen. Das Resultat war frappant. Stellte er in der beschriebenen Weise bei starkem Lichte eine Gleichung her und verminderte dann die objektive Helligkeit beiderseits gleichmäßig, so verschwand das durch Mischung erleuchtete Feld bereits vollständig, während das monochromatische noch überaus deutlich sichtbar blieb, und zwar längst ehe jene Grade der Dunkelheit erreicht waren, an die man sich erst durch längeren Aufenthalt adaptieren muß. Wurde umgekehrt eine Gleichung zwischen den beiden Weiß bei schwacher Intensität hergestellt und das objektive Licht dann beiderseits gleichmäßig verstärkt, so wurde das gemischte Feld unvergleichlich viel heller, als das andere. Die Unterschiede waren so bedeutend, daß dagegen jede Möglichkeit einer Täuschung, etwa durch die Unsicherheit der Vergleichung bei schwachem Lichte, ganz und gar verschwand.

Mit der HERINGSchen Theorie steht dieses Verhalten durchaus in Widerspruch. Nach ihr ist die Empfindung Weiß stets

die ausschließliche Folge einer Wirkung auf die Weißsubstanz. Wird homogenes Licht weiß gesehen, wie von dem Farbenblinden an seiner neutralen Stelle des Spektrums, so rührt das daher, daß die betreffenden Lichtstrahlen von vornherein überhaupt nur die Weißsubstanz affizieren. Erzeugt man Weiß durch Mischung komplementären Lichtes, so bestehen zwar Tendenzen, auch die chromatischen Substanzen in Mitleidenschaft zu ziehen, allein die Dissimilations- und Assimilationsprozesse, die in ihnen ohne die Mischung zu stande kommen würden, paralysieren sich jetzt, und übrig bleibt wieder nur die Wirkung auf die Weißsubstanz. Gleichzeitig ist die Art und Weise, wie diese Weißsubstanz von den Strahlen verschiedener Wellenlänge erregt wird, annähernd dieselbe für schwaches Licht und für starkes Licht, denn das lichtschwache Spektrum des Normalsehenden und das lichtstarke Spektrum des total Farbenblinden stimmen ja überein.¹ So sieht HERING die Dinge an. Daraus folgt als notwendige Konsequenz: wenn man, ganz einerlei, in welcher physikalischen Zusammensetzung, zweimal Weiß mischt, und diese beiden Weiß für eine gewisse Lichtstärke gleich hell macht, dann sind sie auch für alle anderen Lichtstärken gleich hell. Denn die Helligkeit der beiden Weiß besteht in nichts anderem, als in der Summe der Weißwerte ihrer Komponenten (d. h. in der Summe ihrer Wirkungen auf die Weißsubstanz, die bei schwächstem Licht isoliert hervortreten). Sind aber zwei solcher Summen für irgend eine objektive Lichtstärke einander gleich, so bleiben sie es auch bei Änderungen dieser Lichtstärke. Und diese notwendige Konsequenz nun ist, wie wir sahen, für den Farbenblinden thatsächlich unrichtig.

Ganz Entsprechendes aber gilt auch für den Farben-tüchtigen. Man muß nur, um sich davon zu überzeugen, nicht etwa Kreiselgleichungen mit Pigmentpapieren benutzen. Diese enthalten physikalisch auf beiden Seiten überwiegend dieselben Lichtstrahlen oder sie sind gar physikalisch völlig identisch (wie z. B. Gleichungen aus blauem und gelbem Papier einer-

¹ Außerdem erwiesen sich auch die von dem total Farbenblinden HERINGS hergestellten Gleichungen als unabhängig von der absoluten Intensität der Lichter. HERING, Untersuchung u. s. w. *Pflügers Archiv* 49, S. 595.

seits und schwarzem und weißem andererseits). Dafs solche Gleichungen bei beliebigen Aenderungen der objektiven Helligkeit ganz oder fast ganz bestehen bleiben müssen, ist selbstverständlich. Vergleicht man aber zwei Grau mit einander, die eine physikalisch möglichst verschiedene Zusammensetzung haben, so ergibt sich für den Farbentüchtigen dem Wesen nach dasselbe Resultat, wie für den Farbenblinden.

An einem Farbenmischapparate des Herrn von HELMHOLTZ, dessen Benutzung mir bei dem Mangel eigener experimenteller Hilfsmittel bereitwilligst gestattet wurde, mischte ich einerseits Weiß aus dem äußersten Rot des Spektrums und dem zugehörigen Blaugrün, andererseits gleichfalls Weiß aus dem Gelb etwa der Natriumlinie und dem zugehörigen Blau. Beide Felder wurden auf gleiche Helligkeit gebracht und ihre objektive Lichtstärke dann gleichmäfsig für beide Seiten und sehr stark herabgesetzt. Das aus Rot und Grün gemischte Weiß wurde entschieden heller, als das aus Blau und Gelb bestehende. Die Felder wurden jetzt bei schwacher Beleuchtung wieder gleich hell gemacht und ihre objektive Lichtstärke erheblich gesteigert. Das aus Blau und Gelb gemischte Weiß hellte sich entschieden schneller auf, als das Rot und Grün enthaltende. Welches Feld man hier als das der zu untersuchenden Komplementärfarben betrachtet, welches als den Repräsentanten ihrer Weißwerte, ist natürlich gleichgültig. Worauf es ankommt, ist dies: Mischungen von Komplementärfarben, die bei sehr schwachem Lichte gleich hell sind, d. h. in der Terminologie HERINGS, deren weiße Valenzen dieselbe Summe haben, können doch bei gewöhnlichem Lichte ganz verschieden hell aussehen. Und umgekehrt, Mischungen von Komplementärfarben, die bei gewöhnlichem Lichte gleiche Helligkeit zeigen, können gleichwohl einen ganz verschiedenen Gesamtwert ihrer weißen Valenzen besitzen. Die gewöhnlich sogenannte Helligkeit eines Weiß oder Grau ist also **keineswegs allein bestimmt** durch die Weißwerte seiner Komponenten, d. h. in der Anschauung HERINGS, durch die von den Komponenten bewirkte Erregung der Weißsubstanz.

Ich sagte vorhin, bei geeignetem Verfahren ergebe die Aufhellung oder Verdunkelung von ursprünglich gleich hellen weißen Feldern dem

Wesen nach dasselbe Resultat für den Farbentüchtigen, wie für den Farbenblinden, daß sich nämlich ein Unterschied der Helligkeit zwischen beiden Feldern einstellt. Das sollte heißen, daß sich der Größe nach dieser Unterschied durch geeignete Wahl der Mischungskomponenten für das farbenblinde Auge viel drastischer machen läßt, als es für das normale Auge möglich ist. Der Grund hiervon ist leicht einzusehen. Der Farbenblinde hat ein spektral einfaches Weiß. Dieses ist bei gewöhnlichem Lichte nicht allzu hell im Verhältnis zu dem übrigen Spektrum, gewinnt aber bei schwächstem Lichte eine relativ sehr große Helligkeit (weiße Valenz). Gleichzeitig kann er Weiß durch Mischung gewinnen aus sehr entlegenen anderen Spektralfarben. Diese kann man ohne Schwierigkeit so wählen, daß, gerade umgekehrt wie bei dem homogenen Weiß, ihre Weißwerte ganz minimal, ihre Helligkeiten bei gewöhnlichem Lichte dagegen noch relativ beträchtlich sind. So kann man es erreichen, daß das Mischungsweiß, obschon bei starkem Lichte ebensohell wie das homogene, doch nur einen fast beliebig kleinen Bruchteil von dessen weißer Valenz besitzt. Für den Farbentüchtigen ist das anders. Für jedes Weiß braucht er mindestens zwei Komponenten, und für diese ist er an gewisse Entfernungen innerhalb des Spektrums gebunden. Wählt er nun z. B. für das eine Weiß eine Komponente von möglichst hohem Weißwerte (Grün), so muß er notwendig eine andere von sehr geringem Weißwerte dazunehmen (Rot oder Violett). Für das andere Paar stehen ihm dann, da es doch möglichst andere Wellenlängen enthalten soll, nur Farben mittleren Weißwertes zur Verfügung. Die Summe der beiderseitigen Weißwerte besteht so einerseits aus einem Maximum und einem Minimum, andererseits aus zwei mittelgroßen Werten, und es ist klar, daß man bei noch so geschickter Auswahl der beiden Farbenpaare hinsichtlich der außerdem zu erzielenden gleichen Helligkeit den Unterschied oder den Quotienten jener beiden Summen nicht über gewisse mäßige Beträge steigern kann. Genaueres in dieser Hinsicht lehrt die vergleichende Anschauung der Figg. 1, 2 und 5.

Als erste wesentliche Schwierigkeit gegen die HERINGSche Theorie ist somit zu konstatieren: Die Helligkeit eines aus Komplementärfarben gemischten Grau ist durch die weißen Valenzen seiner Komponenten (d. h. durch die Helligkeiten, welche die Komponenten isoliert bei Ausschluss ihrer chromatischen Wirkung haben) nicht vollkommen bestimmt. Mischungen vielmehr, deren Weißwerte gleich sind, zeigen im allgemeinen bei größeren Lichtintensitäten eine ganz verschiedene Helligkeit, natürlich nur, soweit sie nicht etwa physikalisch identisch sind. Wenn wir nun mit HERING an der Weißsubstanz als einem notwendigen Prinzip für die Erklärung des Farbensehens festhalten, so müssen wir doch hinzufügen: nicht sie ausschließlich

kann die Quelle sein, aus der die Helligkeit der grauen und weissen Farbennüancen stammt. Vielmehr muſs das, was auſser ihr noch vorhanden ist, nämlich die chromatischen Substanzen, auch bei der Mischung von Komplementärfarben zu der Helligkeit des resultierenden Grau in verschiedenem Maſse beitragen. Ein positive Entstehung von Weiss oder Grau aus gewissen gleichzeitigen chromatischen Prozessen — dieses Leitmotiv der YOUNG-HELMHOLTZschen Theorie — muſs in der That auch in die HERINGSche irgendwie wieder hineingenommen werden, wozu übrigens HERING durch seinen Begriff der „spezifischen Helligkeit“ einer Farbe (s. o. S. 167) bereits den Anknüpfungspunkt gegeben hat. Und wie oben (S. 166) gewisse Schwierigkeiten bei der Diskussion genauerer Beobachtungen von der HELMHOLTZschen Theorie hinüberwiesen auf einen Hauptgedanken der HERINGSchen, so weisen jetzt umgekehrt gewisse andere Schwierigkeiten von dieser wieder zurück auf jene. *Τὸ ἐν διαφερόμενον αὐτὸ αὐτῷ ξυμφέρεται.*

Natürlich kann unter solchen Umständen der von HERING angenommene Antagonismus der chromatischen Substanzen bei der Einwirkung komplementärer Lichter kein voller und absoluter sein. Sondern, obschon eine gewisse Wirkung der chromatischen Erregung, nämlich die Farbigkeit im engeren Sinne, die Buntheit, durch die gleichzeitige komplementäre Erregung zu Grunde geht, so muſs doch eine gewisse andere Wirkung erhalten bleiben, nämlich eben jener hier postulierte, verschieden groſse Beitrag zu der Helligkeit des Mischungsproduktes, der über die weissen Valenzen der Komponenten hinausgeht.

Behufs möglichst zwingender Entwicklung der vorstehenden wichtigen Folgerung war eine gewisse Breite nicht zu vermeiden; zwei weitere Schwierigkeiten lassen sich jetzt in gröfserer Kürze vorführen.

Vorher verweise ich noch beiläufig auf ein Resultat der KÖNIGSchen Untersuchungen, in dem jene Differenz zwischen den Helligkeiten und den weissen Valenzen von Farbmischungen gleichsam kumuliert für das ganze Spektrum zum Ausdruck kommt, welches aber zu seiner Interpretation eines Satzes bedarf, den ich hier nur behaupten und nicht beweisen kann. Es handelt sich wieder um den Farbenblinden. Die beiden Kurven der Fig. 3 stellen dar, wie in dem Gaslichtspektrum eines Grünblinden, ganz ohne Rücksicht auf Verschiedenheiten der Färbung,

die von ihm gesehenen Helligkeiten verteilt sind.¹ Die Kurve *i* gilt für das lichtschwache Spektrum und ist natürlich identisch mit der Kurve der obigen Fig. 1. Kurve *J* bezieht sich auf das lichtstarke Spektrum und vereinigt in einer bestimmten Weise die beiden Kurven der Fig. 2. Bei $520 \mu\mu$ ist wieder die ungefähre Stelle bezeichnet, an der der Farbenblinde in dem Spektrum die Farbe des unzerlegten Lichtes sieht. Der Anblick der Figur lehrt nun sofort, daß ein Ausschnitt von mäfsiger Breite in der Gegend von $520 \mu\mu$ aus der von der Kurve *i* umschlossenen Fläche ein im Verhältnis zu deren Gesamthalt sehr viel größeres Stück herausschneidet, als ein Ausschnitt von gleicher Breite aus der Fläche der Kurve *J*. Man wird schätzungsweise sagen

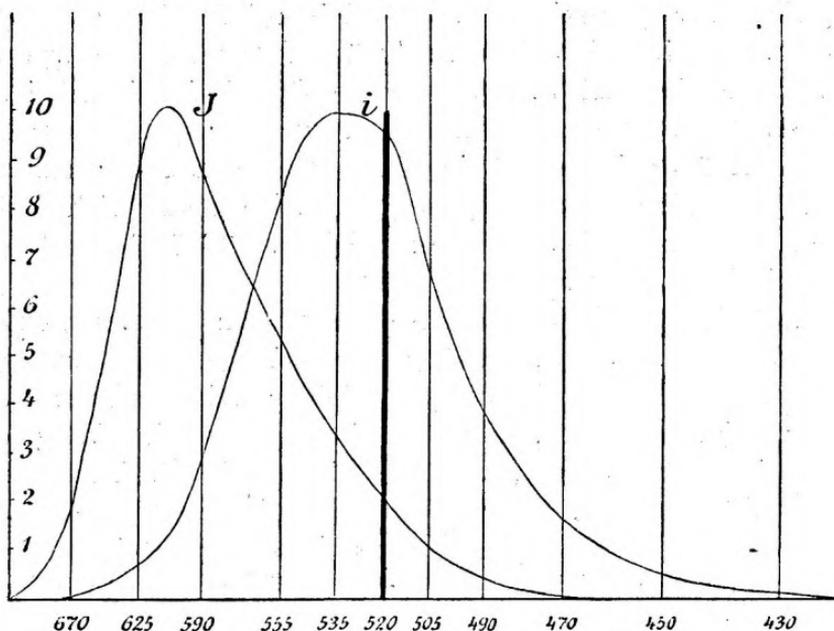


Fig. 3.

das Verhältnis der zu *i* gehörigen Ordinate für $520 \mu\mu$ zu der Gesamtfläche von *i* ist etwa das Vierfache von dem Verhältnis der ebendort gelegenen Ordinate von *J* zu der Gesamtfläche dieser Kurve. Mit anderen Worten heißt das: Für den Farbenblinden ist bei geringer Lichtintensität die Helligkeit der neutralen Stelle ein sehr viel größerer Bruchteil der Gesamthelligkeit des übrigen Spektrums, als bei starker Lichtintensität. Nun behaupte ich, und das ist eben der Satz, den ich hier nur behaupte und nicht beweise: wenn Komplementärfarben zu Weiß gemischt

¹ Die beiden Kurven sind eine graphische Darstellung der von A. KÖNIG (*Helmholtz-Festschrift*, S. 341, Sep.-Ausg., S. 37) für BRODHUN gegebenen Beobachtungsergebnisse. Natürlich haben die Ordinatenhöhen der einen Kurve gar keine Beziehung zu denen der anderen; es kommt nur auf ihre Größenverhältnisse innerhalb jeder Kurve für sich an.

werden, so ist die Helligkeit der Mischung (mindestens annähernd) gleich der Summe der Helligkeiten der Komponenten. Die Helligkeiten (und nicht, wie HERING will, die weissen Valenzen) von Komplementärfarben, die Helligkeiten bei eben der Lichtintensität, bei der die Mischung geschieht, sind das, was maßgebend ist für die Helligkeit des aus ihnen gemischten Grau; sie setzen sich einfach zusammen zu der Helligkeit der Mischung.¹ Ein befriedigender experimenteller Beweis dieses Satzes ist schwierig, weil die Feststellung der Helligkeit einer Farbe bei gewöhnlichem Lichte eine unsichere Sache ist.² Aber seien auch für solche, die den Satz nicht ohne Einschränkung zulassen möchten, von vornherein 10 oder gar 50% Verlust an Helligkeit bei dem Zusammentreten von Komplementärfarben zu Grau zugestanden, so wird das folgende deshalb doch noch nicht unrichtig. Man acceptiere also den Satz einstweilen und denke sich folgendes Experiment. Ein Farbenblinder schneidet aus einem sehr lichtschwachen Spektrum die neutrale Stelle in einer gewissen Breite heraus, vereinigt alle übrigen Strahlen in einem Felde von gleicher Breite und stellt irgendwie fest, welches Helligkeitsverhältnis zwischen den beiden resultierenden Grau besteht. Dann thut er dasselbe für ein lichtstarkes Spektrum. Da dessen sämtliche Strahlen, vermindert um die neutrale Stelle, wieder Weiss geben müssen, so hat er auch hier zwei weisse Felder; ferner ist die Helligkeit des durch Mischung erhaltenen Weiss annähernd gleich der Summe der Helligkeiten der unvereinigten Strahlen. Der Farbenblinde muß also finden, daß jetzt das Helligkeitsverhältnis der beiden Felder ein total anderes geworden ist; der Quotient: neutrale Stelle durch Gesamtspektrum, ist auf einen Bruchteil seines ursprünglichen Wertes gesunken (auf etwa $\frac{1}{4}$, wenn der angenommene Hülfsatz genau richtig ist).

Ich meine, das zeigt deutlich, wie die Erregung der chromatischen Substanzen, auch wenn ihre chromatischen Effekte im engeren Sinne (die Farben) durch komplementäre Erregung kompensiert werden, deshalb doch nicht wirkungslos bleibt für das Sehen. Sie liefern immer noch einen Beitrag zu der Helligkeit der Mischung; und Mischungen, in

¹ Soviel würde also übrig bleiben von dem bekannten GRASSMANN'schen Satz, daß die gesamte „Lichtintensität“ einer Mischung von Farben gleich ist der Summe der Intensitäten der Komponenten (*Pogg. Ann.* 89, S. 83). Für die Mischung kurzwelliger Farben untereinander oder langwelliger Farben untereinander ist der Satz falsch, nur für den bestimmten Fall der Komplementärfarben gilt er. Natürlich hängt das damit zusammen, daß rationellerweise die Helligkeit einer Farbe durch Beziehung auf etwas aus Komplementärfarben Zusammengesetztes (nämlich auf Grau) bestimmt wird, indes gehe ich darauf hier nicht weiter ein.

² Einige, den Satz bestätigende Versuche mit Pigmentpapieren liegen vor von ROOD, *Sillimanns Journ.* (3) XV, S. 81 (1878). Für das gleiche Material kann ich die Richtigkeit gleichfalls verbürgen, mit einer Genauigkeit von 5–8%. Allein auf solches Material ist nicht allzuviel zu geben.

denen sie relativ stark affiziert werden, werden daher auch beim Übergang von schwachem zu starkem Lichte relativ stärker aufgehellte, als solche, in denen sie wenig beteiligt sind. Wie sich diese Vorstellungen konkret gestalten lassen, wird sich weiterhin zeigen.

Nach den Anschauungen HERINGS dagegen ist das ganze Verhalten unverständlich. Überall, wo Weifs empfunden wird, haben wir nach ihm lediglich Zersetzung der Weifssubstanz. Die relative Stärke, mit der die einzelnen Lichtstrahlen auf diese Substanz wirken, ist ungefähr dieselbe für schwaches Licht, wie für starkes Licht; daher ja die Übereinstimmung zwischen dem Spektrum des total Farbenblinden und dem Dunkelspektrum des Farbentüchtigten. Das Verhältnis zwischen dem Weifs der neutralen Stelle zu dem gesamten, von dem übrigen Spektrum gelieferten Weifs muß also hier bei jeder Lichtstärke ungefähr dieselbe GröÙe haben. Da, wo die langwelligen Strahlen isoliert wirken, findet freilich eine Steigerung der von der Weifssubstanz gelieferten Helligkeit statt, aber dafür da, wo die kurzwelligen wirken, eine Verminderung, und wenn diese beiden Strahlengattungen aus dem ganzen Spektrum zusammen gemischt werden, heben sich Steigerung und Verminderung wieder gerade auf.

7. Dissimilierung und Assimilierung. Wie bereits erwähnt, steht die auseinandergesetzte Schwierigkeit gegen die Theorie der Gegenfarben in ihrer bisherigen Form nicht allein; andere Bedenken gesellen sich ihr hinzu. Das nächstwichtigste betrifft die Erregung der gegenfarbigen Prozesse durch spektrales Licht.

HERING denkt sich bekanntlich, daß die verschiedenen Strahlen des Spektrums auf jede der chromatischen Substanzen, soweit sie sie überhaupt affizieren, entweder nur die eine oder nur die andere der beiden an ihnen möglichen und antagonistischen Wirkungen ausüben. Auf die Blaugelbsubstanz z. B. wirken die langwelligen Strahlen nur dissimilierend, die kurzwelligen nur assimilierend, und ein schmales Bündel von Strahlen mittlerer Wellenlänge ist überhaupt wirkungslos. Bei der Rotgrünsubstanz entsteht Dissimilation und nur diese durch Strahlen aus den beiden Endstrecken des Spektrums, ausschließliche Assimilation durch solche aus dem mittleren Drittel; an zwei engbegrenzten Stellen zwischen diesen drei Strecken, nämlich da, wo reines Gelb und reines Blau gesehen wird, findet gar keine Einwirkung auf die Rotgrünsubstanz statt.¹ Bei der

¹ HERING, Zur Lehre vom Lichtsinn, S. 120. Auch z. B. neuerdings: Prüfung der sogenannten Farbendreiecke u. s. w., *Pflügers Arch.*, Bd. 47, S. 426. Anm. 1 (1890).

Identifizierung der chromatischen Prozesse mit Dissimilierung und Assimilierung gewisser Stoffe sind solche Vorstellungen auch ganz natürlich und notwendig. Denn man kann doch nicht wohl denselben Lichtstrahlen die Fähigkeit zuschreiben, wie dem Speer des Achilles, denselben Körper gleichzeitig zu zerstören und wiederaufzubauen.

Die Haltbarkeit dieser Auffassung war mir gleichwohl schon lange fraglich, aber aus einem nicht genügend zwingenden Grunde. Wie ich oben (S. 155) als Argument gegen eine Modifikation der HELMHOLTZschen Theorie bereits anführte, reduziert sich das Spektrum bei abnehmender Intensität des objektiven Lichtes eine Zeitlang auf drei unmittelbar nebeneinanderstehende Farben, Rot, Grün und Blauviolett, zwischen denen das Gelb und die übrigen Farbentöne verschwunden sind. Rot und Grün stoßen z. B. in der Gegend, wo gewöhnlich Gelbgrün gesehen wird, unmittelbar aneinander; bis hierher erstrecken sich also, nach HERINGScher Anschauung, einerseits die dissimilierenden, andererseits die assimilierenden Wirkungen des Lichtes schwacher Intensität auf die Rotgrünsubstanz. Nun findet man durchweg, wenn man die Intensität spektralen Lichtes, das irgend eine Wirkung auf eine Substanz ausübt, verstärkt, daß dann diese Wirkung sozusagen weiterfrisst, d. h. daß eine Wirkung, die bei schwachem Lichte bis zu einer gewissen Grenze geht, bei stärkerem diese Grenze überschreitet und auch schon von benachbarten Strahlen ausgeübt wird. Photographiert man z. B. ein Spektrum mit einer gewöhnlichen Chlorsilberplatte, so erstreckt sich die Zersetzung für gleiche Expositionszeiten bei einem lichtstarken Spektrum weiter nach dem Grün hinein, als bei einem lichtschwachen Spektrum. Man müßte demnach auch bei unserer Rotgrünsubstanz erwarten, daß die antagonistischen Wirkungen des Lichtes da, wo sie bei schwacher Intensität schon hart aneinanderstoßen, bei starker etwas über einander und wechselseitig ineinander hineingriffen. Nach HERING aber fände vielmehr das Gegenteil statt. Bei einer Aufhellung des Spektrums schiebt sich an der vormaligen Grenze zwischen Rot und Grün ein, wenn auch nur schmaler Streifen reinen Gelbs ein, der namentlich das Rot etwas zurückdrückt, nach dem langwelligen Ende des Spektrums zu. Innerhalb dieses Streifens soll nach HERING gar keine Wirkung auf die Rotgrünsubstanz bestehen. Es würde sich also die dissi-

milierende Kraft gewisser Lichtstrahlen, die bei schwachem Lichte schon bis zu einer gewissen Grenze ging, bei Verstärkung der Lichtintensität von dieser Grenze etwas zurückgezogen haben, statt vielmehr sie etwas zu überschreiten; ganz entgegengesetzt allem, was sonst bekannt ist.

Wie gleich von vornherein gesagt, meine ich damit nicht einen genugthuenden Beweis gegen die HERINGSche Vorstellung von dem gesonderten Nebeneinander der gegenfarbigen Prozesse im Spektrum zu geben; immerhin bildete die angeführte Thatsache bereits ein gewisses Indicium gegen sie. Die soeben veröffentlichten spektralen Farbmischungen von KÖNIG und DIETERICI gestatten jetzt eine sichere Entscheidung: eine Modifikation der Auffassung der Gegenfarben in diesem Punkte ist unvermeidlich geworden.

Man wolle sich die eingehende Diskussion, die ich oben (No. 4) von einigen der KÖNIG-DIETERICISchen Farbgleichungen gegeben habe, wieder vergegenwärtigen. Die Gleichungen IV, (S. 159 Anm.), das war das Resultat, können auf gar keine Weise anders erklärt werden, als durch die Annahme, daß das normale Auge im Gelbgrün relativ ungesättigte, weißliche Farben sieht, daß also die Strahlen dieser Gegend einen relativ hohen Weißwert haben. Woher diese Weißlichkeit im Sinne der HERINGSchen Theorie? Von der Weißsubstanz? Zum Teil gewiß; aber ebenso gewiß nur zum Teil, und nicht ausschließlic. Denn die Weißsubstanz hat das Maximum ihrer Erregbarkeit im Gaslichtspektrum etwa bei $535 \mu\mu$, und von da nach dem Gelb hin nimmt ihre Erregbarkeit allmählich ab. Jene Weißlichkeit der Farben aber nimmt umgekehrt laut Aussage der Gleichungen IV von $536 \mu\mu$ nach dem Gelb hin zunächst vielmehr etwas zu. Außerdem kann die Weißlichkeit dieser Farbentöne für das farbenblinde Auge bei weitem nicht in dem Maße bestehen, wie für das normale; denn dessen Empfindlichkeit gegen Sättigungsunterschiede ist hier erheblich größer. An der Weißsubstanz aber partizipiert der Farbenblinde so gut, wie der Farbentüchtige.

Der Unterschied zwischen dem Farbenblinden und dem Farbentüchtigen führt auf den richtigen Weg. Der Grund der relativ hohen Weißlichkeit der gelbgrünen Farbentöne bei dem letzteren kann nur an etwas liegen, was er hat und der Farbenblinde nicht hat. Das ist nach HERRING die Rotgrünsubstanz.

Aber freilich, die Fähigkeit, das Spektrum stellenweise weißlicher zu machen, kann diese nur besitzen, wenn man ihre Auffassung in zwei wesentlichen Punkten gegen die von HERING ausgebildete modifiziert. Die eine Modifikation haben wir vorhin schon vorgenommen (No. 6). Werden die beiden an der Rotgrünsubstanz möglichen antagonistischen Prozesse durch Mischung homogener Strahlen gleichzeitig hervorgerufen, so paralysieren sie sich in gewisser Weise: der farbige Charakter, den bei isolierter Erregung die hervorgerufenen Empfindungen zeigen, geht verloren. Aber in gewisser anderer Weise, wurden wir anzunehmen gedrängt, paralysieren sie sich nicht: die sonst mit dem chromatischen Charakter behafteten Empfindungen der Helligkeit bleiben — jetzt ohne diesen Charakter — bestehen und verstärken die ganz gleichartige Empfindung von ungetönter Helligkeit, d. h. Weiß, die stets durch Erregung der Weißsubstanz hervorgerufen wird.

Jetzt füge ich eine zweite Modifikation hinzu. Jene gleichzeitige Erregung der beiden antagonistischen Prozesse der Rotgrünsubstanz findet nicht nur statt, wenn verschiedene homogene Strahlengattungen gemischt werden, sondern sie kommt gewissen homogenen Strahlen ohne weiteres und an sich zu. Eben die Strahlen aus der Gegend von Orange bis Gelbgrün, in der das normale Auge gegen Sättigungsunterschiede ziemlich unempfindlich ist (s. o. S. 161), haben die Fähigkeit, die antagonistischen Prozesse der Rotgrünsubstanz in verschiedener relativer Stärke gleichzeitig hervorzurufen und dadurch das Spektrum in dieser Gegend relativ weißlich zu machen. Die antagonistischen Prozesse greifen hier partiell übereinander, und zwar um so mehr, je größer die objektive Helligkeit des Lichtes ist.

Damit muß natürlich die Identifizierung jener antagonistischen Prozesse mit Dissimilierung und Assimilierung eines gewissen Stoffes preisgegeben werden. Man kann doch nicht, wie schon gesagt, denselben Lichtstrahlen die Kraft beilegen, dieselbe Substanz gleichzeitig zu zersetzen und zu regenerieren. Es handelt sich also, nehme ich an, bei den eigentlichen chromatischen Prozessen gar nicht um Assimilationen, sondern lediglich um Dissimilationen, um Zersetzungsprozesse, und zwar um Zersetzungsprozesse von partiell antagonistischem Charakter. Über die Natur solcher Prozesse empfangen wir, wie sich bald

zeigen wird, durch das Auge selbst vollkommenste und ausreichendste Aufklärung. Dafs aber dieses Preisgeben der Assimilation in der ihr von HERING zugeschriebenen Bedeutung ein besonders unwillkommenes Opfer sei, wird man schwerlich finden, wenn man sich vergegenwärtigt, welchem Widerstreben gerade diese Vorstellung bei Physiologen begegnet ist, die im übrigen durchaus den HERINGSchen Anschauungen zuneigten.

8. Die beiden Typen der Farbenblindheit. Eine dritte Schwierigkeit ist schon öfter gegen HERING geltend gemacht worden; ich erwähne sie nur, weil nachher ihre Beseitigung zur Sprache kommen wird, ohne sie eingehender zu behandeln.

Die sogenannten Farbenblinden sondern sich, wie oben (S. 153 u. 156) bereits kurz bemerkt, in zwei typisch verschiedene Gruppen, sog. Rotblinde und sog. Grünblinde. Die Namen beruhen auf gewissen theoretischen (und, wenn diese Abhandlung richtig ist, unzutreffenden) Voraussetzungen; sie sind durchaus nicht eigentlich zu verstehen. Die Angehörigen beider Gruppen sind vielmehr zweifellos gleichzeitig rot- und grünblind, d. h. der Eindruck, den dem normalen Auge die Farben Rot und Grün machen, ist ihnen unbekannt. Sie sehen, abgesehen von den verschiedenen Schattierungen Grau, alles allein in die Farben Blau und Gelb gekleidet, verschieden ist nur die Art, wie ihnen in bestimmten Fällen die Helligkeits- und Sättigungsgrade dieser Farben erscheinen. Im Spektrum z. B. sehen die Grünblinden die grösste Helligkeit ungefähr da, wo auch das normale Auge; demzufolge sehen sie auch das rote Ende des Spektrums und überhaupt rote Farben relativ hell. Den Rotblinden dagegen ist die hellste Stelle des Spektrums nicht unerheblich nach dem Gelbgrün hin verschoben; zugleich machen ihnen die roten Spektral- und Pigmentfarben den Eindruck relativ dunkler Farbentöne. Auf dem Boden einer im grofsen und ganzen gleichartigen Abnormität stehen die Grünblinden sozusagen den Normalsehenden, die Rotblinden dagegen den total Farbenblinden etwas näher. Und dabei bilden diese Verschiedenheiten nicht etwa die extremen Glieder einer durch Zwischenstufen kontinuierlich verbundenen Reihe, sondern je genauer die Untersuchung der einzelnen Fälle

gewesen ist, desto sicherer hat sich gezeigt, daß die Zwischenstufen überhaupt fehlen und alle Farbenblinden entweder der einen oder der anderen Gruppe angehören.¹

Zur Erklärung dieser Eigentümlichkeit beruft sich HERING wesentlich auf die verschieden starke Pigmentierung des gelben Flecks in der menschlichen Netzhaut, die als solche jedenfalls thatsächlich vorhanden ist, auch bei normalsehenden Individuen. Ist die gelbe Färbung dieser Stelle relativ stark, so werden die blauen und blaugrünen Strahlen des Spektrums relativ stark absorbiert; das relative Schwergewicht fällt also auf die übrigbleibenden, die gelben und roten. Sogenannte Grünblindheit ist nach HERING identisch mit relativer Gelbsichtigkeit. Ist die Macula dagegen schwach pigmentiert, so gehen die kurzwelligen Strahlen relativ ungeschwächt durch, die langwelligen haben im Verhältnis zu ihnen ein geringeres Übergewicht und erscheinen also relativ dunkler. Sogenannte Rotblindheit ist identisch mit relativer Blausichtigkeit.

Diese Annahme war von vornherein nicht gerade wahrscheinlich. Es mußte seltsam erscheinen, daß die Natur in den Absorptionsverhältnissen des gelben Fleckes mit Vorliebe zwei extreme Stufen und nicht auch mit einiger Häufigkeit mittlere Grade verwirklicht haben sollte. Allein mit einem solchen Bedenken liefs sich natürlich nicht argumentieren. Kürzlich hat ein Assistent HERINGS, M. SACHS, die Sache dadurch zu klären gesucht, daß er an einer Anzahl von Netzhäuten direkt die thatsächliche Gröfse der macularen Lichtabsorption für verschiedene Wellenlängen ermittelte.² Wenigstens bezeichnet er ausdrücklich als seine Absicht, „die Gröfse der spezifischen Absorption der Macula und damit die Gröfse der durch diese Absorption veranlafsten individuellen Verschiedenheiten der Farbenempfindung festzustellen.“³ Leider aber konnte er hierbei die Netzhäute nicht unterschiedslos

¹ Unter den bisher am genauesten untersuchten 18 Fällen von DONDERS (*Gräfes Archiv* 30, 1, S. 71 ff.) und 4 von A. KÖNIG waren 12 Grünblinde und 10 Rotblinde. Übergangsformen fehlten. Frühere Beobachtungen von DONDERS, nach denen auch Übergänge vorkommen sollten, waren ungenauer gewesen.

² M. SACHS, Über die spezifische Lichtabsorption des gelben Fleckes der Netzhaut. *Pflügers Arch.*, Bd. 50, S. 574 (1891).

³ SACHS, a. a. O., S. 579.

benutzen, wie sie ihm zu Händen kamen, sondern nach einer mir von Hrn. HERING gemachten brieflichen Mitteilung konnte er nur „besser pigmentierte“ Maculae verwenden. Dadurch bleibt es unbestimmt, wieweit die nachweisbaren Verschiedenheiten in der Absorption verschiedener Maculae eigentlich gehen, und ein Ertrag der SACHSSchen Arbeit in der hier in Rede stehenden Richtung entfällt somit.

Etwa gleichzeitig mit SACHS hat nun aber A. KÖNIG die Frage in seiner mehrerwähnten Arbeit in der *Helmholtz-Festschrift* (S. 371—374) sozusagen von der anderen Seite angegriffen. Er zeigt hier zunächst, daß man bei jener Zurückführung der beiden Typen der Farbenblindheit auf die Tinguierung des gelben Flecks durch eine genauere Untersuchung des wirklichen Sehens der Farbenblinden zu äußerst unwahrscheinlichen Folgerungen gedrängt wird. Die Unterschiede der Macula-Absorption, die man bei verschiedenen Individuen voraussetzen müßte, erreichen eine kaum glaubliche Größe. Namentlich aber — und das erscheint mir als die gesicherteste Argumentation — weist er nach, daß die typischen Verschiedenheiten zwischen Rot- und Grünblinden bei starker Abschwächung der objektiven Helligkeit fast verschwinden. Beruhten sie auf der verschiedenen Lichtabsorption verschiedener Maculae, so wäre das nicht möglich, da die Absorptionskoeffizienten durch die Verdunkelung ja nicht geändert werden. Trotz des Aufhörens der Farbenempfindungen im engeren Sinne müßte eine erhebliche Verschiedenheit in der subjektiven Helligkeitsverteilung im Spektrum bestehen bleiben. Daß das nun nicht der Fall ist, scheint mir einen ausschlaggebenden Grund gegen die Zulässigkeit der HERINGSchen Erklärung zu bilden.

Drei Schwierigkeiten ergeben sich also, um zusammenzufassen, aus den neueren Arbeiten gegen die HERINGSche Theorie:

1) Der Antagonismus zwischen den die sogenannten Gegenfarben verursachenden Prozessen kann kein vollkommener und unbedingter sein, sondern, obwohl bei ihrer gleichzeitigen Erregung eine gewisse wechselseitige Aufhebung stattfindet, bleibt doch noch eine Wirkung auf die Nerven bestehen, die sich als verschieden große Verstärkung der schon von der Weißsubstanz herrührenden Helligkeitsempfindung äußert.

2) Von zwei zusammengehörigen gegenfarbigen Prozessen wird durch bestimmtes spektrales Licht nicht entweder blofs der eine oder blofs der andere erregt, sondern gewisse Wellenlängen vermögen die beiden antagonistischen Prozesse gleichzeitig hervorzurufen. Die Erregungskurven der Gegenfarben setzen sich im Spektrum nicht scharf gegeneinander ab, sondern greifen teilweise übereinander. Die Kategorien „Dissimilation“ und „Assimilation“ sind daher zur näheren Präzisierung jener antagonistischen Prozesse unzutreffend.

3) Es fehlt der Theorie an einer gesicherten Handhabe, um den wohlcharakterisierten Unterschied zwischen den beiden Gruppen der Farbenblinden begrifflich zu machen.¹

III. Der Sehpurpur.

9. Seine Eigenschaften. Soviel ich sehe, lassen sich die dargelegten Schwierigkeiten mit einer einzigen Annahme beseitigen, die sich zunächst als eine Art Ergänzung der HERINGSchen Theorie darstellt, aber dann sofort die erforderlich gewordenen Modifikationen dieser Theorie nach sich zieht. Sie leistet zugleich noch etwas anderes Wünschenswertes.

Anatomie der Netzhaut und Physiologie oder Psychologie des Farbensehens stehen bisher nebeneinander, wie zwei kleine

¹ Es würde an sich angemessen sein, nach so ausführlicher Berücksichtigung der HELMHOLTZschen und HERINGSchen Theorie auch der davon abweichenden Anschauungen PREYERS und WUNDTs etwas eingehender zu gedenken. Indes, da diese Theorien gröfsere Verbreitung und Zustimmung nicht gefunden haben, und da der negative Teil meiner Ausführungen ohnedies schon mit dem positiven kaum noch im Gleichgewichte steht, so nehme ich davon Abstand und beschränke mich auf zwei Worte betreffend WUNDT. In einem Punkte stimmt die WUNDTsche Auffassung überein mit der HERINGSchen und die meinige mit beiden, nämlich in der Sonderung eines Weissprozesses als eines selbständigen Vorganges von den chromatischen Prozessen; hierüber bedarf es also keiner Erörterung. Was sie von der HERINGSchen und zugleich der HELMHOLTZschen Theorie unterscheidet, ist die Behauptung, dafs uns die nötigen Anhaltspunkte mangeln, um die Zahl der chromatischen Prozesse auf einige wenige zu beschränken, dafs die Erscheinungen der Farbmischung sich vielmehr weit besser durch Annahme einer relativ grofsen Zahl von elementaren Farbenprozessen erklären lassen. So vermutet denn WUNDT in der Retina einen komplexen Stoff, in dem durch das Licht Spaltungen eingeleitet werden, die sich in kurzen Intervallen mit der Wellenlänge ändern und zahlreiche farbenerrregende Produkte erzeugen. Bei einer Mischung

Welten, die sich nichts angehen. In der einen giebt es Stäbchen und Zapfen, Sehpurpur und Pigmentepithel, in der anderen Grundfarben, Gegenfarben, Komplementärfarben, Farbenblindheit u. s. w. Niemand zweifelt vermutlich, daß diese Dinge irgendwie zusammengehören, aber niemand thut, als ob er je daran gedacht hätte, sie zusammenzubringen. Man wird sagen, dazu sind wir noch nicht weit genug; wenn unser Wissen mehr heranreift, kommt so etwas von selbst. Aber ich meine, so gar primitiv ist unser Wissen auf beiden Seiten nicht mehr, und ob die Beziehungen zwischen beiden sich sobald enthüllen, wenn man sie nicht sucht, und auf die Gefahr des Irrtums hin auch einmal einem plausiblen Scheine folgt, ist fraglich. Trifft man nicht gleich die ganze Wahrheit, so trifft man vielleicht die halbe, und der Streit um die andere Hälfte wird die Sache weiter bringen. Ich mache also einen Versuch in dieser Richtung.

Die von HERING aus den Eigentümlichkeiten des Sehens heraus postulierte Blaugelbsubstanz, nehme ich an, ist identisch mit dem in den Aufsengliedern

von Licht verschiedener Wellenlängen entstehen viele solcher Produkte gleichzeitig, und ihre Wirkungen auf die Nerven kombinieren oder kompensieren sich dann je nach Umständen. Ich kann dagegen nur sagen, daß nach meiner Auffassung, wenn man die Gesamtheit der hergehörigen Thatsachen in Betracht zieht, für menschliche Rückschlüsse nichts unzweideutiger ist, als das Vorhandensein einer ganz geringen Zahl von chromatischen Stoffen oder Prozessen. Wie so charakteristische Dinge, wie die wenigen Typen der Farbenblindheit, die Mischbarkeit aller Farben in dem Spektrum der gewöhnlichen Farbenblinden aus ihren beiden Endfarben, die Reduktion des lichtschwachen Spektrums auf drei und des lichtstärksten Spektrums auf zwei Farbentöne u. s. w. ohne den ärgsten Zwang aus „einer unbestimmt großen Zahl von der Wellenlänge abhängiger Spaltungsprodukte“ herauskommen sollen, ist mir durchaus rätselhaft. Die Erscheinungen der Farbmischung dagegen, die für WUNDT das Bestimmende sind (daß sich nämlich aus wenigen Spektralfarben nicht alle übrigen ohne Sättigungsverluste mischen lassen), machen für die Ansetzung weniger Sehstoffe gar keine Schwierigkeiten, wie sich unten zeigen wird (No. 16 u. Fig. 5). Alles Folgende ist daher gleichzeitig eine indirekte Polemik gegen diesen Teil der WUNDT'schen Theorie.

Übrigens möchte ich, daß man von dieser Polemik sowohl wie auch namentlich von der durchgehenden und direkten gegen v. HELMHOLTZ, HERING und KÖNIG den Eindruck hätte: *res hic, non homines inter se certant*. Den Personen, besonders den beiden zuletzt genannten, bin ich für sehr wesentliche Förderungen und positive Berichtigungen gerade zu dieser Arbeit zu großem Dank verpflichtet.

der Retinastäbchen sichtbar und greifbar vorhandenen Sehpurpur, und die an diesem Sehpurpur tatsächlich nachgewiesenen Eigentümlichkeiten sind als maßgebend zu betrachten für unsere Vorstellungen von den chromatischen Substanzen des Gesichtssinnes überhaupt.

Bei seiner Entdeckung vor etwa einem halben Menschenalter wurde der Sehpurpur mit überschwenglichen Hoffnungen begrüßt; er hat sich daher eine Zeitlang großen Ansehens zu erfreuen gehabt. Darnach ist er mit um so stärkerer Nichtachtung gestraft worden. Er hat das wesentlich dem Umstände zu verdanken, daß er an den für das Sehen des Menschen besonders wichtigen Zapfen der Retina nicht aufgefunden werden konnte. Daß sich dieses Verhalten unschwierig erklären läßt, werde ich weiterhin zeigen. Seiner Zeit wurde es nicht verstanden wegen der übertriebenen und irrigen Vorstellungen, die man sich von der Funktion des Sehpurpurs gemacht hatte, und als es daher erst sicher und von mehreren Seiten konstatiert war, machte es die Leute so stutzig, daß sie sich mit dem Ärger getäuschter Erwartungen ganz von dem Sehpurpur abwandten. Zum Glück hatte man während seiner Glanzzeit angefangen, ihn eingehend zu studieren, und namentlich durch KÜHNE, der die Untersuchungen auch nach dem Schwinden des allgemeineren Interesses noch einige jahrelang fortsetzte, sind wir über seine physikalisch-chemischen Eigenschaften sehr genau und sehr vielseitig unterrichtet.¹

Was ist also der Sehpurpur für ein Stoff?

Ich stelle eine Thatsache in den Vordergrund, die in den Beschreibungen etwas im Hintergrunde steht: er ist zunächst ein Stoff, der in zwei Modifikationen existiert. Die eine hat eine relativ rotore Purpurfarbe; an ihr sind die meisten Beobachtungen angestellt worden, da die physiologischen Versuchstiere Frosch und Kaninchen mit ihr ausgestattet sind. Die andere Modifikation ist relativ violetter von Farbe, sie ist für den Menschen von größerer Wichtigkeit, da sie bei ihm, wie

¹ Siehe zahlreiche Abhandlungen und Mitteilungen KÜHNES in den *Untersuchungen aus dem physiologischen Institute zu Heidelberg*, 4 Bde. Eine zusammenfassende Darstellung, gleichfalls von KÜHNE, in *Hermanns Handb. d. Physiol.*, Bd. III, Tl. 1, S. 235 ff., in die aber naturgemäß manche Einzelheiten, auf die es für das folgende ankommt, nicht übergegangen sind.

überhaupt bei den höheren Tieren, vorherrscht.¹ Purpurrot oder purpurviolett aussehen, heißt, Strahlen von den beiden Enden des Spektrums durchlassen und solche aus der Mitte mehr oder minder absorbieren. Das thut in der That der Sehpurpur. Sein Absorptionsspektrum reicht rund von der FRAUNHOFERSchen Linie *C* bis jenseits *F*, und zwar ist es bei dem violetten Purpur im ganzen mehr nach dem langwelligen Ende hin verschoben, als bei dem roten.² Das Maximum der Absorption liegt für die rottere Modifikation etwas vor *E*, nach *D* hin, und für die violetttere Modifikation etwas hinter *D*, nach *E* hin. Die beiden Absorptionsmaxima teilen die Entfernung *D—E* annähernd in drei gleiche Teile.³

¹ KÜHNE, *Hermanns Handb.* III, 1, S. 264 u. 269. Näheres über den violetten Sehpurpur findet man sonst nicht in der Darstellung in *Hermanns Handb.*, sondern nur in der Abhandlung von KÜHNE und SEWALL, *Zur Physiologie des Sehepithels.* II. *Der Sehpurpur von Abramis brama.* (*Unters.*, III, S. 263 ff.) Nach einer beiläufigen Bemerkung KÜHNES scheint es, als ob bei einer Tierspezies, die als Regel die eine Modifikation Sehpurpur besitzt, als Ausnahme auch wohl die andere vorkommt, was für das folgende von Wichtigkeit ist. Er sagt (*Unters.*, I, S. 168): Der Purpur nimmt die fast bläuliche, stark violette Nuance an, „die man an der Retina des Frosches seltener, oft an der des Aales und der Eule sieht.“

² Das Absorptionsspektrum des roten Sehpurpurs (sowie des Sehgelb) bei KÜHNE, *Unters.*, Bd. I, Taf. 7, auch in *Hermanns Handb.*, III, 1, S. 270. Das Absorptionsspektrum des violetten Purpurs, *Unters.* III, S. 266. In den KÜHNESchen Zeichnungen reichen die Absorptionsspektren der beiden Sehpurpurarten noch weit über *F* hinaus, bis jenseit *G*. Um daraus keinen Einwand gegen die Identifikation des Sehpurpurs mit der Gelbsubstanz zu entnehmen (deren Absorption sicher nicht soweit reicht) wolle man bedenken, daß der belichtete Sehpurpur keinen Moment stille hält, sondern unter dem Einfluß der von ihm absorbierten Lichtstrahlen sich sofort zu zersetzen beginnt. Er entwickelt also Sehgelb, und dieses hat sein Absorptionsmaximum gerade bei *G*. Außerdem ist dem Sehpurpur sehr wahrscheinlich jederzeit ein gewisses Quantum Sehgelb beigemischt (siehe unten S. 202), so daß eine scheinbare Verlängerung seines Absorptionsspektrums, selbst bei schnellster Beobachtung, gar nicht zu vermeiden ist.

³ Abgesehen von seinen ganz entsprechenden Zeichnungen sagt KÜHNE darüber, die schnellste Wirkung des Lichtes auf den violetten Sehpurpur falle an den Ort der stärksten Absorption, „nämlich nahe bei *D* in dasjenige Gelb, das gerade merklich zu Grün übergeht (also etwa doppelt soweit von *E* entfernt liegt, als das für den Sehpurpur des Frosches gefährlichste Licht.“ (*Unters.* III, S. 268.)

Wird der Sehpurpur von den Strahlen, die er absorbiert, belichtet, so verwandelt er sich und wird gelb; er *verschieft* ins Gelbe, wie man im gewöhnlichen Leben sagen würde. Soweit bekannt, ist dieses „*Sehgelb*“ identisch für beide Modifikationen des Sehpurpurs. Es absorbiert sämtliche Strahlen der kurzwelligen Hälfte des Spektrums, etwa von der Gegend zwischen *E* und *F* ab, und hat sein Absorptionsmaximum etwas vor *G*, nach *F* zu. In der Gegend von *F* greifen die Absorptionsspektren des Sehgelb und der beiden Arten Sehpurpur etwas übereinander.

Wird auch das Sehgelb den Strahlen ausgesetzt, die es assimilieren kann, so verwandelt es sich gleichfalls, und zwar in eine farblose Substanz. Das Licht übt auf dieses Endprodukt seiner Thätigkeit weiter keine Einwirkung aus, wohl aber bemächtigen sich seiner die in dem lebenden Auge thätigen organischen Kräfte. Mit ihrer Hülfe wird aus dem Endglied der photochemischen Umsetzungen ohne weiteres das Anfangsglied, nämlich der Sehpurpur wiederhergestellt, so daß dessen Verwandlungen einen vollständigen Kreisprozeß bilden.

Wirken Lichtstrahlen aller Wellenlängen auf das Auge, so spielen sich alle Phasen dieses Kreisprozesses an allen purpurhaltigen Stellen gleichzeitig ab. Sehpurpur wird zersetzt zu Sehgelb, vorwiegend vermöge der langwelligen Strahlen; Sehgelb wird zersetzt zu einer farblosen Substanz, vorwiegend vermöge der kurzwelligen Strahlen; und aus dem letzten Zersetzungsprodukt wird der Sehpurpur sofort wieder regeneriert, vermöge der aufbauenden Thätigkeit der organischen Kräfte. Bei besonders intensiver Belichtung, z. B. durch direktes Sonnenlicht, überwiegen allerdings die Zersetzungen merklich über die Rückbildungen, und es tritt dann eine allmähliche Bleichung der Netzhaut ein.¹

10. Beziehung zu dem Sehen der Farbenblinden. Was haben nun alle diese Dinge mit dem Sehen zu thun? mit den Eigentümlichkeiten unseres Farbenempfindens? Um das zu verstehen, müssen wir uns an den einfachsten Verhältnissen

¹ Übrigens hat gerade das lebende menschliche Auge sehr kräftige Regenerationsvorgänge, so daß es eine beträchtliche Belichtung verträgt, ohne des Sehpurpurs beraubt zu werden. Siehe KÜHNE, *Unters.* III S. 194. NETTLESHIP, *Journ. of Physiol.* II, S. 38—41.

orientieren, nämlich an den Farbenblinden. Diese sehen, wie bereits erwähnt (S. 182), das ganze Spektrum in nur zwei Farben, Gelb und Blau. Die Stelle grösster Helligkeit des Gelb und damit des ganzen Spektrums liegt ihnen (bei Sonnenlicht) zwischen *D* und *E*, und nur insofern besteht ein Unterschied, als bei den einen diese Stelle näher an *D* liegt, bei den anderen näher an *E*, ohne dass Übergangsformen vorkommen. Nun ist folgendes doch wohl in hohem Grade überraschend: Die Stellen, an denen die beiden Gruppen der Farbenblinden in dem Spektrum des Sonnenlichtes das hellste Gelb sehen, stimmen sehr annähernd überein mit den Stellen, an denen die beiden Modifikationen des Sehpurpurs die Lichtstrahlen am stärksten absorbieren, und weiter, die Stelle, an der

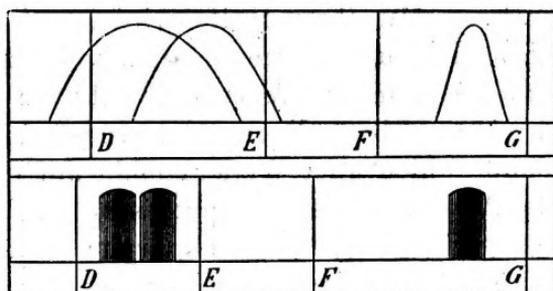


Fig. 4.

beide Gruppen von Farbenblinden übereinstimmend das hellste Blau sehen, fällt wieder sehr annähernd zusammen mit der Stelle, an der das Sehgelb sein Absorptionsmaximum hat. Fig. 4 veranschaulicht diese Verhältnisse. Die drei Kurvengipfel bezeichnen die Stellen, die nach den mehrerwähnten spektralen Farbmischungen von KÖNIG und DIETERICI¹ für die Farbenblinden (in dem Spektrum des Sonnenlichtes) den stärksten Gelbwert und den stärksten Blauwert besitzen, und die drei Schatten entsprechen nach den Untersuchungen von KÜHNE² den Stellen, wo die beiden Modifikationen des Sehpurpurs und das Sehgelb die Lichtstrahlen am stärksten absorbieren. Die relative Lage der

¹ KÖNIG und DIETERICI, *Sitzungsber. d. Berliner Akad.*, vom 29. Juli 1886, S. 811—813. Jetzt genauer in *dieser Zeitschr.*, Bd. IV, S. 256.

² KÜHNE, *Unters.* I, Taf. 7, und III, S. 266. Siehe auch oben S. 188 f.

einen und der anderen zu den FRAUNHOFERSCHEN Linien ist, wie man sieht, annähernd dieselbe.¹

Freilich lassen sich genau genommen die Intensitätskurven unserer Gesichtsempfindungen und die Absorptionsspektren chemischer Substanzen nicht ohne weiteres zu einander in Beziehung bringen. Die Empfindungskurve zeigt an, wie groß an den verschiedenen Stellen des Spektrums die von dem absorbierten Licht hervorgebrachte Erregung ist; sie giebt somit ein gewisses Maß für das absolute an jeder Stelle absorbierte Lichtquantum. Das Absorptionsspektrum dagegen will erkennen lassen, wieviel Licht an jeder Stelle absorbiert worden ist im Verhältnis zu dem dort überhaupt vorhandenen Quantum; seine Angaben sind gleichsam alle auf dieselbe Einheit reduciert. Das Absorptionsspektrum ändert sich daher nicht, wenn die relative Verteilung der Helligkeiten in dem benutzten Spektrum eine andere wird (z. B. wenn man Gaslicht statt Sonnenlicht verwendet), wohl aber die Erregungskurve. Um die beiden Dinge miteinander vergleichen zu können, muß man also genau genommen, die Angaben der Erregungskurven auch auf gleiche Einheiten

¹ Die Verschiedenheit der Entfernungen der FRAUNHOFERSCHEN Linien voneinander in den beiden Spektren beruht darauf, daß das obere ein Interferenz- und das untere ein Dispersions-Spektrum ist. Ich habe nicht eins auf das andere reduziert, um nicht den Anschein zu erwecken, als ob ich das vorliegende Material irgendwie modifizierte. Daß die Übereinstimmung in der relativen Lage der Kurvengipfel und der Absorptionsmaxima nur eine annähernde und keine absolute ist, darf natürlich nicht übersehen, aber auch nicht zu sehr betont werden. Die Sicherheit der zu Grunde liegenden Beobachtungen ist noch zu gering, als daß mehr erwartet werden könnte. Die beiden Intensitätskurven der Gelbempfindung beruhen je auf Beobachtungen an nur zwei Farbenblinden. Der Kurve der Blauempfindung liegen zwar Beobachtungen an vier Individuen zu Grunde, aber sie sind an einem Gaslichtspektrum gewonnen, und durch ihre Umrechnung auf Sonnenlicht werden an dem kurzwelligen Ende des Spektrums alle etwaigen Beobachtungsfehler stark vergrößert. Für die Absorptionsspektren des Sehpurpurs und Sehgelb andererseits liegen noch gar keine wiederholten und feineren Beobachtungen vor. Daher ist auch eine Vergleichung dieser Spektren mit den KÖNIG-DIETERICISCHEN Gelb- und Blaukurven in ihrer ganzen Ausdehnung unmöglich. Ein anderer Grund für diese Unmöglichkeit ist vorhin bereits erwähnt worden (S. 188 Anm. 2). Der Sehpurpur kann wegen seiner leichten Zersetzlichkeit niemals ganz ohne Sehgelb sein und vermutlich ist auch das Sehgelb, wenn man anfängt es zu untersuchen, noch nicht ganz frei von Sehpurpur. Die zur Beobachtung kommenden Absorptionsspektren beider Substanzen müssen daher in ihren einander zugewandten Hälften nothwendig weiter reichen als es bei völliger Reinheit der Stoffe der Fall sein würde. Eine Vergleichung mit den Empfindungskurven in ihrer ganzen Ausdehnung kann aber natürlich nur für Absorptionsspektren der reinen Sehstoffe Sinn haben.

bringen, d. h. man muß sie auf ein Spektrum mit gleicher Verteilung der Lichtenergie beziehen. Für den gegenwärtigen Zweck indes kann diese Umrechnung unterbleiben, wenn man, wie oben geschehen, die Empfindungskurven eines Sonnenlichtspektrums benutzt. Die Energieverteilung in einem solchen Spektrum ist freilich noch durchaus keine gleiche, vielmehr findet eine allmähliche und erhebliche Abnahme der Energie von dem langwelligen zu dem kurzwelligen Ende hin statt (s. LANGLEY, *Energy and Vision*, *Philos. Mag.* Jan. 1889 S. 1). Aber die Änderungen sind für kleine Strecken des Spektrums doch so gering, daß sie hier, wo nur die Lage der Empfindungsmaxima in Betracht gezogen wird, vernachlässigt werden können. Die Verschiebung dieser Maxima nach dem kurzwelligen Ende, die bei korrektem Verfahren hervorgebracht werden würde, wäre in dem Maßstab der Zeichnung kaum zu merken.

Sollte nun jene Beziehung der Empfindungsmaxima und der Absorptionsmaxima nichts sein, als die Tücke eines neckischen Zufalls? oder besteht hier ein innerer Zusammenhang? Natürlich läßt sich die erste Möglichkeit nicht schlechthin widerlegen, aber wenn man weiterhin gesehen haben wird, wie die Annahme einer sachlichen Zusammengehörigkeit nach allen Seiten hin Licht verbreitet und Schwierigkeiten beseitigt, wird man ihr weitaus die größere Wahrscheinlichkeit zugestehen. Ich sage also: Die Farbenblinden sehen deshalb in dem Spektrum Gelb und Blau in einer bestimmten relativen Verteilung und Mischung, weil sie in ihrer Retina teils die eine, teils die andere Modifikation Sehpurpur besitzen,¹ und weil durch diesen Sehpurpur nebst seinem Zersetzungsprodukte Sehgelb die Lichtstrahlen gerade in einer jener Verteilung entsprechenden Weise absorbiert und zur Einwirkung auf den Sehnerven gebracht werden.

Des näheren denke ich mir die Vorgänge folgendermaßen:

In dem Auge des Farbenblinden existieren zwei lichtempfindliche Substanzen, die Weißsubstanz, die am lichtempfindlichsten ist, und der Sehpurpur. Wird die erstere zersetzt, so wird, wie in der Regel bei Zersetzungen, Energie frei; diese wirkt auf die verzweigten Ausläufer der retinalen Ganglienzellen und veranlaßt weiterhin das Zustandekommen von Empfindungen der bloßen Helligkeit, Weiß und Grau. Die Abhängigkeit der Zersetzung von den Wellenlängen wird dargestellt durch die Kurve der Helligkeitsverteilung im Spektrum

¹ S. Seite 188, Anm. 1.

bei sehr geringer Lichtintensität oder auch durch die Helligkeitskurve der total Farbenblinden.

Wird dagegen der Sehpurpur zersetzt, so geschieht zweierlei: Erstens wird durch die Zersetzung gleichfalls Energie frei und übt eine Reizwirkung auf die nervösen Endorgane, zweitens geschieht diese Auslösung von Energie oder ihre Übertragung auf den Nerven in einer gewissen eigenartigen Weise. Worin die Eigenartigkeit besteht, läßt sich freilich einstweilen nicht näher angeben, da bestimmte Anhaltspunkte in dieser Richtung fehlen; es muß nur bei der Zersetzung des Sehpurpurs außer dem Freiwerden von Energie noch irgend eine spezifische Nebenwirkung vorhanden sein. Lediglich um von ihr zu sprechen und ohne damit die Vorstellungen in bestimmter Weise binden zu wollen, werde ich sie als eine *Tönung* oder *Rhythmisierung* der Reizung bezeichnen. Soweit nun also bei der Zersetzung des Sehpurpurs Energie frei wird, soweit hat die dadurch hervorgerufene Empfindung Helligkeit, ganz wie bei der Zersetzung der Weißsubstanz. Soweit aber die Auslösung in einer bestimmten Weise, etwa in einem bestimmten Rhythmus erfolgt, soweit manifestiert sich dies in der Empfindung als Farbe, und zwar in diesem Falle als Empfindung der Farbe Gelb.

Ist aus der Zersetzung, aus dem Verschießen des Sehpurpurs Sehgelb entstanden, und wird dieses weiter zersetzt, so geschieht ganz Analoges. Auch hier wird wieder einerseits Energie frei, die als Helligkeit der Empfindung zum Bewußtsein kommt, und die nur, wie ich annehme, bei dieser minder komplizierten Substanz quantitativ geringer ist, als zuvor bei dem Sehpurpur. Andererseits erfolgt die Übertragung der Energie wieder in einer gewissen, jetzt nur andersartigen Weise, als bei dem Sehpurpur, in einem anderen Rhythmus, worauf für das Bewußtsein der Eindruck Blau beruht. Man muß sich nun ferner denken, daß jene beiden die photochemische Umwandlung des Sehpurpurs und des Sehgelb begleitenden spezifischen Nebeneffekte etwas Antagonistisches und sich gegenseitig Aufhebendes haben; die beiden Rhythmen, um in der gewählten Metapher zu bleiben, stören sich gegenseitig. Werden also Sehpurpur und Sehgelb in einem gewissen Mengenverhältnisse gleichzeitig durch das Licht zersetzt, so müssen sich jene Nebenwirkungen völlig kompensieren, und der auf ihnen beruhende chroma-

tische Charakter der Empfindung fällt fort. Aber die ausgelöste Energie fällt nicht fort und es kommt dann lediglich, auf Grund der bei jenen Zersetzungen frei werdenden Energiemengen, zu einer ungetönten Empfindung von Helligkeit oder Weiss, welche sich der gleichzeitig durch Zersetzung der Weisssubstanz hervorgerufenen Weissempfindung verstärkend hinzugesellt.

Das farblose Zersetzungsprodukt des Sehgelb dient den regenerierenden Kräften, die im Auge walten, wie bereits oben gesagt, als Material, um daraus den Sehpurpur wiederherzustellen. Dabei müssen natürlich eben die Energiemengen wieder gebunden werden, die vorher, bei den Zersetzungen von Sehpurpur und Sehgelb, ausgelöst wurden und zur Nerven-erregung verbraucht worden sind. Woher mögen sie genommen werden? Zum Teil gewiss aus dem Organismus, aus dem Blut, Pigmentepithel u. s. w., zum Teil aber stammen sie, wie ich als möglich annehme, aus dem Lichte selbst, aus der lebendigen Kraft gewisser Ätherschwingungen. Natürlich können nicht gerade diejenigen Strahlen (die langwelligen nämlich), die besonders geeignet sind, das labile Gefüge des Sehpurpurs zu erschüttern, gleichzeitig mit der Fähigkeit ausgerüstet gedacht werden, seinen Wiederaufbau zu unterstützen. Aber den übrigen (den kurzwelligen also) scheint mir nichts im Wege zu stehen, eine solche Kraft zuzuschreiben. Sie bewirken die Regeneration nicht direkt aus sich heraus, aber, wenn sie durch das Spiel der organischen Kräfte eingeleitet wird, so befördern sie sie, indem sie einen Teil der dazu nötigen Energie liefern. Im ganzen genommen, verrichtet demnach das Licht des sichtbaren Spektrums im Auge des Farbenblinden folgende Arbeiten: Die langwelligen Strahlen wirken schwach auf die Weisssubstanz, dafür aber stark auf den Sehpurpur, und entwickeln aus diesem relativ grosse Energiemengen. Die mittelwelligen Strahlen wirken stark auf die Weisssubstanz, daneben schwach auf den Sehpurpur und das Sehgelb, und zwar auf beide gleichzeitig. Die kurzwelligen Strahlen endlich wirken wieder schwach auf die Weisssubstanz, dagegen stark auf das Sehgelb (aus dem sie aber nur relativ geringe Energiemengen befreien) und tragen ferner mit einem Teil der in ihnen enthaltenen Energie bei zum Wiederaufbau des Sehpurpurs.

Was noch diese Regenerationsvorgänge anbetrifft, so denke ich sie mir, hier wie anderswo im Organismus, für das Be-

wulstsein als bedeutungslos. In der Empfindung verraten sie sich nicht direkt, sondern nur indirekt, indem durch sie ein andauerndes Fortgehen der Zersetzungsprozesse und damit der direkten Empfindungsursachen ermöglicht wird. Für die Empfindung ist also auch derjenige Teil der Lichtenergie, der zur Förderung der Regeneration des Sehpurpurs verwandt wird, zunächst verloren. Daraus erklärt es sich wesentlich, daß in dem farbig gesehenen Spektrum die kurzwellige Hälfte erheblich dunkler erscheint, als die langwellige, während in dem farblos gesehenen die Helligkeitsverteilung eine annähernd symmetrische ist. Die angenommene geringere Energieentwicklung bei Zersetzung des Sehgelb, verglichen mit der bei Zersetzung des Sehpurpurs, wirkt in derselben Richtung.

Die Übereinstimmung der entwickelten Vorstellungen mit denen der HERINGSchen Theorie, aus der sie hervorgegangen sind, besteht im wesentlichen, wie man sieht, in zwei Punkten: einmal in der Festhaltung einer besonderen Weißsubstanz und ihrer Sonderung von den chromatischen Substanzen, sodann in der Annahme eines eigentümlichen Gegensatzes, eines Antagonismus zwischen den Prozessen, die unserem Gelb- und Blauempfinden (und weiterhin auch dem Rot- und Grünempfinden) zu Grunde liegen. In zwei anderen wichtigen Punkten dagegen weichen beide voneinander ab, und zwar eben in den Punkten, in denen nach den früheren Erörterungen (No. 6 u. 7) eine Modifikation der HERINGSchen Anschauungen erforderlich ist.¹

¹ Um Mißverständnisse zu verhüten, sei noch auf eine andere Abweichung aufmerksam gemacht, auf die es im Zusammenhang des Obigen zunächst nicht ankommt. Sie betrifft die Natur der Sehstoffe. HERING vindiziert diesen eine besondere psycho-physische Bedeutung, d. h. er nimmt an, daß die isolierte Dissimilation oder Assimilation jedes Stoffes für unser Farbenempfinden eine besondere Bedeutung habe, daß ihr je eine als einfach und fundamental empfundene Farbe entspreche. Er betrachtet demgemäß auch seine Sehstoffe als integrierende Bestandteile des nervösen Apparats des Sehorgans (im weitesten Sinne) und läßt dahingestellt, ob sie nur im Gehirn oder zugleich im Sehnerven und der Netzhaut zu suchen seien. Ich behaupte dagegen, die Stoffe, auf denen die wesentlichsten Eigentümlichkeiten unseres Farbensehens beruhen, sitzen in der Netzhaut. Sie gehören außerdem nicht zu den nervösen Partien dieses Organs, sondern sind den letzten Ausläufern oder den ersten Anfängen der nervösen Gebilde noch vorgelagert. Für den Charakter unserer Empfindungen haben sie daher auch nicht unmittelbar, sondern erst mittelbar ihre Bedeutung.

Erstens denke ich mir den Gegensatz zwischen den chromatischen Prozessen nicht mehr als einen solchen der Dissimilation und Assimilation, sondern auf Grund der Erfahrungen, die wir an dem im Auge nun einmal gegebenen Sehpurpur machen, denke ich mir den Gelbprozess (wenn der Ausdruck gestattet ist) ebensowohl wie den Blauprozess als Zersetzungsprozesse, und betrachte solche Dissimilationsprozesse überhaupt als die einzigen unmittelbaren Empfindungsursachen. Die Rückbildungen folgen ihnen zwar auf dem Fusse, aber ohne sich dem Bewußtsein direkt zu manifestieren. Worin der Antagonismus jener Prozesse nun eigentlich besteht, wird damit freilich dunkler, aber zahlreiches Andere wird um so heller, und zugleich wird der Anschluß an das thatsächlich Gegebene gewonnen.

Außerdem ist damit die Möglichkeit gegeben, den Antagonismus der chromatischen Prozesse weniger schroff zu fassen, als es bei HERING geschieht, und ich denke mir also zweitens, daß die gegenfarbigen Prozesse bei gleichzeitiger Erregung nebeneinander bestehen bleiben und sich in gewisser Hinsicht summieren, obwohl sie freilich zugleich etwas an sich haben, was sich dabei wechselseitig aufhebt. Wird eine der beiden chromatischen Substanzen (also Sehpurpur und Sehgelb) von den für sie brauchbaren Lichtstrahlen getroffen, so wird sie zersetzt. Dabei werden gewisse Mengen von Energie frei, die in einer gewissen spezifischen Weise zur Erregung des Nerven dienen; wir empfinden eine bestimmte Farbe, infolge des eigenartigen Charakters der nervösen Reizung, mit einer bestimmten Helligkeit, je nach der Größe der ausgelösten Energie. Werden nun beide Substanzen gleichzeitig von den zu ihrer Zersetzung geeigneten Strahlen getroffen, so werden sie auch gleichzeitig zersetzt. Die Zersetzungen stören sich ja an sich nicht; im Gegenteil, sie fördern einander, indem die eine für den Fortgang der anderen direkt oder indirekt neues Material schafft. Es ist auch gar nicht nötig, daß die gleichzeitige Zersetzung der beiden Substanzen durch eine Mischung von Licht verschiedener Wellenlängen bewirkt werde; auch physikalisch einfaches Licht kann dazu dienen. Die Absorptionsspektren der beiden Substanzen greifen teilweise übereinander; da, wo dies der Fall ist, hat also homogenes Licht die Fähigkeit,

beide Substanzen zugleich zu affizieren. Wo nun eine solche gleichzeitige Zersetzung geschieht, da stören sich die spezifischen Nebenwirkungen, mit denen die Erregung auf die Nerven übertragen wird, gegenseitig. Bei einem bestimmten Verhältnisse der Zersetzungsgrößen paralysieren sie sich vollständig, und der chromatische Charakter der Empfindung geht damit verloren. Die Größe der ausgelösten chemischen Energie kann aber hierdurch natürlich keine Änderung erfahren. Das den zersetzten Stoffmengen entsprechende Quantum von ihr wird entbunden und thut, bei gleichzeitiger Zersetzung so gut, wie bei isolierter, was seines Amtes ist, d. h., es übt eine Reizwirkung auf die nervösen Endorgane aus, nur jetzt nicht mehr spezifischer, sondern unspezifischer Art. Der Effekt für das Bewußtsein ist ganz derselbe, wie der aus Zersetzung der Weißsubstanz resultierende, nämlich die einfache ungetönte Empfindung von Helligkeit oder Weiß, die ja außerdem durch die stets vorhandene Nebenwirkung der betreffenden Lichtstrahlen auf die Weißsubstanz auch noch hervorgerufen wird.

Das, was wir die Helligkeit eines Grau oder Weiß nennen, stammt also (ganz, wie es nach HERING mit der Helligkeit einer Farbe im engeren Sinne der Fall ist, s. o. S. 167 f.) ursprünglich aus zwei Quellen: aus der Zersetzung der Weißsubstanz und aus der Zersetzung der in gewisser Hinsicht antagonistischen chromatischen Substanzen. Dafs für unser Bewußtsein die den beiden Quellen entstammenden Beiträge durchaus ununterscheidbar in den einen Eindruck der Helligkeit zusammengehen, liegt daran, dafs sie zunächst eine durchaus gleichartige Zwischenwirkung hervorbringen. Die beiden Quellen liefern freie chemische Energie in einer zur nervösen Erregung geeigneten Form. Soweit nun diese Erregung abhängig ist von der Größe der einwirkenden Energie, muß es für den Endeffekt (und das ist eben unsere Helligkeitsempfindung) einerlei sein, woher die molekularen Stöße stammen, die die nervösen Endorgane bekommen. Geradeso, wie es ja auch für den ausgeschnittenen Nerven gleichgültig ist, ob ihm die für eine bestimmte Muskelzuckung erforderliche Erregungsgröße durch einen Induktionsschlag oder durch einen mechanischen Stoß zugeführt wird.

Wie die beiden aus der Heranziehung des Sehpurpurs ganz naturgemäfs sich ergebenden Modifikationen der HERINGSchen

Theorie geeignet sind, den gegen diese bestehenden Schwierigkeiten abzuhelpfen, wird vermutlich bereits durchsichtig. Aber ehe ich dies im Zusammenhange darzustellen versuche, muß ich erst die komplizierteren Verhältnisse des normalen Farbensehens zu den bisherigen Auseinandersetzungen in Beziehung bringen.

11. Das normale Sehen. Das normale Auge sieht, besonders gut innerhalb eines centralen Bezirks, nicht nur Blau und Gelb, sondern auch Rot und Grün, sowie die Übergangsfarben zwischen diesen beiden Paaren. Gleichzeitig besitzt es nicht nur Stäbchen mit Sehpurpur in den Aufsengliedern, sondern auch Zapfen mit farblosen Aufsengliedern, die innerhalb eines centralen Bezirkes sogar ausschließlich vorhanden sind. Die Thatsache dieser farblosen Zapfen hat alle früheren Spekulationen über den Sehpurpur irregeführt; auch mit der ihm hier zugeschriebenen Funktion scheint sie sich nicht zu vertragen. Denn, wenn der Sehpurpur das Gelb- und Blausehen vermitteln soll, wie kann er in der centralen Zone fehlen, wo doch jedenfalls Gelb und Blau gesehen wird? Allein die Sache ist nicht so schwierig. Da in der centralen Zone nicht nur Gelb und Blau gesehen wird, sondern auch Rot und Grün, so muß hier noch eine andere chromatische Substanz vorhanden sein, d. h., eine Substanz mit anderer Lichtabsorption, und daher von anderer Farbe, als der Sehpurpur, die diesem irgendwie beigegeben ist und das Rot- und Grünsehen vermittelt. Allein dann, sollte man sagen, müßten die Zapfenaufsenglieder irgend eine Mischfarbe zeigen; sie sind aber direkt farblos. Ja, welche Farbe müßten sie denn wohl zeigen?

Man denke sich die postulierte Rotgrünsubstanz ganz nach Analogie der mit dem Sehpurpur identifizierten Blaugelbsubstanz. Sie ist dann also eine Substanz, die in ihrem ursprünglichen Zustande vorwiegend rote Lichtstrahlen absorbiert und zur Einwirkung auf die Nerven bringt; sie wird stark affiziert durch die langwelligen Strahlen des Spektrums und daneben schwach durch die Strahlen vom äußersten kurzwelligen Ende, aus der Gegend des Violett. Unter der Einwirkung des ihr zusagenden Lichtes wird sie zersetzt und verwandelt sich in eine zweite Substanz mit vorwiegender Absorptionsfähigkeit für grünes Licht. Die zwischen den Stellen stärkster Absorption

seitens der beiden Substanzen gelegenen (für die Empfindung gelben) Lichtstrahlen wirken auf beide gleichzeitig; ihre Absorptionsspektren greifen hier übereinander. Bei Bestrahlung durch das geeignete Licht wird auch die zweite Substanz zersetzt; aus ihren Zersetzungsprodukten wird dann durch die organischen Kräfte und vielleicht unter Assistenz von Lichtstrahlen mittlerer Wellenlänge die ursprüngliche Rotgrünsubstanz wieder regeneriert. Bei beiden Zersetzungen wird Energie frei, deren Einwirkung auf den Sehnerven sich in der Empfindung als Helligkeit manifestiert. Zugleich geschieht diese Übertragung der Energie auf den nervösen Apparat und dessen Erregung bei isolierter Zersetzung einer der beiden Substanzen in einer gewissen eigentümlichen Weise, die in der Empfindung als Farbigkeit zum Bewußtsein kommt. Bei Zersetzung der ersten Substanz gewinnt so die Helligkeit den Nebencharakter des Roten, bei Zersetzung der zweiten den Nebencharakter des Grünen. Werden beide Substanzen gleichzeitig zersetzt, so stören sich jene spezifischen Eigentümlichkeiten der Nerven-erregung; unter Umständen geht der farbige Charakter der Empfindung ganz verloren. Da aber die Größe der ausgelösten Energie dadurch nicht tangiert wird, so besteht die von dieser herrührende Empfindung der Helligkeit, jetzt ohne den chromatischen Nebencharakter, ungeändert fort.

Wenn nun die Zapfen der Netzhaut, um zu diesen zurückzukehren, aufser dem Sehpurpur noch eine Substanz enthalten, wie die eben beschriebene, welche Farbe müssen sie wohl haben? Vorwiegend rote Lichtstrahlen absorbieren heißt, grün aussehen; von Hause aus und an und für sich ist die Rotgrünsubstanz also grün von Farbe, d. h., annähernd komplementär gefärbt zu dem Sehpurpur. Nun sind diese beiden Sehstoffe jedenfalls als durchsichtige, halbflüssige Substanzen zu denken. Gebilde, in denen sie einfach durcheinandergemischt enthalten sind, müssen somit annähernd neutral aussehen, d. h., in dicker Schicht schwarz, in der mikroskopisch dünnen Schicht der Zapfen-aufsenglieder dagegen grau, vielleicht mit einem schwachen Stich ins Bläuliche. Dafs die Zapfen keine bestimmte Farbe erkennen lassen, ist also, wenn sie die Rotgrünsubstanz und den Sehpurpur in Mischung enthalten, vollkommen selbstverständlich. Es beweist nicht, wie man meist geschlossen hat, dafs der Sehpurpur für das Sehen keine rechte Bedeutung

besitzt, sondern es braucht zunächst nur zu beweisen, daß ihm für das centrale Sehen nicht eine so stark überwiegende Bedeutung zukommt, wie für das periphere, und daß er central durch etwas verdeckt wird, was außer ihm auch noch Bedeutung besitzt.

Möglicherweise sind die beiden Substanzen nicht einfach gemischt, sondern in einer lockeren chemischen Verbindung in den Zapfen enthalten, die erst durch das Licht gesprengt werden muß, um dem Sehen weitere Dienste zu leisten. Dann ist die Farblosigkeit der Zapfen zwar nicht direkt notwendig und selbstverständlich, aber das Gegenteil, das Vorhandensein einer bestimmten Farbe, doch auch nicht. Die Tatsache ist einfach als solche hinzunehmen. Außerdem ist zu bedenken, daß eine etwaige schwache Färbung jener Verbindung stets, infolge partieller Zersetzung in die beiden Sehstoffe, eine gewisse Beimischung von Grau erhalten würde.

Man möchte nun freilich wünschen, jene hypothetische Rotgrünsubstanz und die ihr zugeschriebenen Eigenschaften noch etwas besser fundiert zu sehen, als bloß dadurch, daß sich vielleicht aus ihrer Ansetzung allerlei thatsächliche Befunde richtig ableiten lassen. Kann man sie nicht einmal irgendwo zu sehen bekommen und sich durch den Augenschein von ihrem Dasein überzeugen? Auch das ist noch möglich, wenn man in Bezug auf den Ort dieser Beaugenscheinigung nicht gleich zu anspruchsvoll ist.

In der Retina des Frosches existieren in der That grüne Stäbchen. Sie sind viel weniger zahlreich, als die gewöhnlichen purpurhaltigen Stäbchen; namentlich und leider ist viel weniger über sie bekannt. Aber unter diesem Wenigen stimmt eine Beobachtung BOLLS so bemerkenswert zu den oben postulierten Eigenschaften einer Rotgrünsubstanz, daß sie, obwohl vom Autor „nur unter großer Reserve“ mitgeteilt, hier nicht übergangen werden kann.

BOLL exponiert lebende Frösche in bunten Glaskästen möglichst intensivem Licht, um den Einfluß verschiedenfarbiger Beleuchtung auf ihre Netzhäute zu untersuchen. Dabei erscheint ihm an Netzhäuten, die grünem und blauem Lichte ausgesetzt gewesen, die Anzahl der grünen Stäbchen, „verglichen mit denen der in der Dunkelheit und im roten und gelben Licht verweilten Retina nicht unerheblich vermehrt.“ In den beigegebenen Abbildungen beträgt die Vermehrung etwa das Dreifache¹. Was

¹ BOLL, *Monatsber. d. Berliner Akad.*, 15. Januar 1877, S. 4–6. Ähnlich Du Bois' *Archiv I*, S. 21 ff. (1877).

kann das heißen? Mir scheint, das heißt das oben hypothetisch Angenommene. Der Farbstoff der grünen Stäbchen wird durch rotes und gelbes Licht zersetzt und in einen Stoff verwandelt, der grünes Licht absorbiert, d. h. rot aussieht. Die grünen Stäbchen verschiefen ins Rote, ähnlich wie in sehr viel langsamerem Tempo die absterbenden Blätter des wilden Weines, oder ähnlich, wie der Sehpurpur und die gewöhnlichen Blätter ins Gelbe verschiefen. Werden die Netzhäute also eine Zeitlang langwelligem Lichte ausgesetzt, so nimmt die Anzahl der grünen Stäbchen allmählich ab; sie verwandeln sich teilweise in rote Stäbchen, die von den gewöhnlichen purpurhaltigen nicht ohne weiteres unterschieden werden können. Dafs sie nicht überhaupt ganz verschwinden, liegt daran, dafs die regenerierenden Kräfte des Organismus Widerstand leisten, wie es ja auch z. B. sehr schwer ist, den Sehpurpur des lebenden Auges völlig auszubleichen. In grünem und blauem Licht findet eine erhebliche Affektion der grünen Stäbchen nicht statt, da sie ja diese Lichtstrahlen durchlassen; dagegen werden solche Stäbchen, die etwa vorher schon rot geworden waren, jetzt weiter zersetzt und dann zu grünen regeneriert. Die Anzahl der letzteren mufs also allmählich wachsen, stärker noch, als selbst in der Dunkelheit, da dieser ja der positiv begünstigende Einflufs auf die Rückbildung abgeht.

Die Natur scheint also in der That einen Stoff, wie er zur Erklärung des Farbensehens vorausgesetzt werden mufs, stellenweise isoliert verwirklicht zu haben. Sein Vorhandensein auch im menschlichen Auge wird damit natürlich nicht irgendwie bewiesen, aber es wird doch sozusagen dem erfahrungsmäfsig Gegebenen näher gerückt, als es etwa mit den drei Faserarten oder den Dissimilations- und Assimilationsprozessen der bisherigen Annahmen jemals der Fall war.

12. Bedenken. Ich beseitige zunächst noch ein paar naheliegende Einwendungen gegen die bisherigen Ausführungen, die vielleicht schon insgeheim die Zustimmung zu ihnen beeinträchtigt haben.

1). Die Empfindung Blau wird vermittelt, wie ich annehmen wollte, durch eine Zersetzung von Sehgelb. Dieses Sehgelb seinerseits geht aus einer Zersetzung von Sehpurpur hervor, und dessen vorangegangene Zersetzung sollte von der Empfindung

Gelb begleitet sein. Ist nun das Auge sich selbst überlassen, so hat es zweifellos die Tendenz, den vorher etwa verbrauchten Sehpurpur aus den Zersetzungsprodukten des Sehgelb zu regenerieren, denn nach vorangegangenem Dunkelaufenthalt werden die Augen purpurreicher gefunden, als nach Einwirkung des Lichtes. Darnach könnte es scheinen, als ob zufolge meiner Theorie das Auge nach längerem Ruhezustande zunächst nur im stande wäre, die Empfindung Gelb zu haben. Blau kann es ja nur sehen, wenn Sehgelb da ist. Ist aber nach dem Ausruhen nur Sehpurpur vorhanden, so muß erst ein gewisses Quantum von diesem umgesetzt werden, ehe es zu dem Sehen von Blau kommen kann. Diese Umsetzung ist aber mit der Empfindung Gelb verbunden. Ähnlich in Bezug auf Rot und Grün.

Allein, man muß sich die Sehstoffe nicht gar zu starr und stabil denken, sondern nach Analogie dessen, was uns von zersetzlichen Stoffen sonst schon bekannt ist. Eine leichtzerstetliche Substanz ist nie ganz unzerstet. Je größer der Vorrat wird, der sich durch die Gunst der Umstände von ihr anhäuft, desto reichlicher bieten sich auch die Gelegenheiten zu sozusagen spontanen Zersetzungen, d. h. zu Zersetzungen der labilsten Molekeln ohne besondere äußere Ursachen, lediglich infolge der inneren Zusammenstöße und sonstigen Bewegungsvorgänge innerhalb der Substanz. Findet also in dem ruhenden Auge eine reichliche Bildung von Sehpurpur statt, so ist dadurch ohne weiteres eine mäfsige Bildung von Sehgelb mitbedingt. Relativ zu einander mögen die Mengen der beiden Stoffe sehr verschieden sein; dem absoluten Betrage nach kann deshalb doch das Quantum jenes Sehgelb groß genug sein, um jederzeit ohne weiteres das Zustandekommen einer intensiven Blauempfindung zu ermöglichen,

Dazu kommt folgendes. Wenn das Auge in den Ruhestand eintritt, ist in ihm jedenfalls im allgemeinen eine gewisse Menge Sehgelb als vorhanden zu denken. Zu einer Veränderung dieser Menge aber ist während des Ruhezustandes kein Anlaß vorhanden. Der Sehpurpur regeneriert sich nicht auf Kosten des Sehgelb, sondern auf Kosten seiner Zersetzungsprodukte; das Sehgelb selbst wird hierdurch nicht verringert. Ein Teil von ihm unterliegt gewiß den eben erwähnten spontanen Zersetzungen, aber man wird sich denken dürfen, daß dieser Verlust

gedeckt wird durch eine entsprechende Menge spontaner Zersetzungen des Sehpurpurs, noch ganz abgesehen von deren Steigerung infolge besonderer Anhäufung dieser Substanz. Die Blauempfindlichkeit des Auges wird also am Ende eines Ruhezustandes zunächst nicht geringer sein können, als am Anfang, weil die jeweilig vorhandene Menge Sehgelb während der Ruhe ungefähr erhalten bleibt. Aus dem vorhin erwähnten Grunde muß sie aber sogar etwas zunehmen, weil von dem besonders reichlich gebildeten Sehpurpur ein Teil des Überflusses abgegeben wird und infolge spontanen Zerfalles das schon vorhandene Sehgelb noch vermehrt. Dafs von dem Auge jederzeit, auch nach beliebig langer Ruhepause, sofort bei der ersten Belichtung alle Farben gesehen werden können, ist demnach mit meinen Annahmen durchaus verträglich.

2). Ein weiteres Bedenken könnte der Thatsache eines längeren Fortbestehens der Farbeindrücke entnommen werden. Fixiert man ein farbiges Feld längere Zeit hindurch, so stumpft sich die Färbung zwar ziemlich schnell ab, aber sie geht doch nicht ganz verloren, sondern bleibt eine geraume Weile immer noch mit Sicherheit erkennbar. Es könnte scheinen, als ob sich das aus den Beziehungen des Sehpurpurs zu dem Sehgelb und aus den analogen Beziehungen der beiden Formen der Rotgrünsubstanz zu einander nicht erklären liefse. Wird eine bestimmte Stelle der Retina z. B. von intensivem kurzwelligem Lichte getroffen, so wird vermutlich der hier befindliche Vorrat von Sehgelb in relativ kurzer Zeit erschöpft sein. Nun wird zwar aus den Zersetzungsprodukten sogleich Sehpurpur regeneriert, aber damit dieser neues Sehgelb liefere und also eine Fortdauer der Blauempfindung ermögliche, muß er erst selbst zersetzt werden. Dieser Vorgang ist von der Empfindung Gelb begleitet, und Blau und Gelb zusammen geben Weiß oder Grau. Ein in der Retina irgendwo eingeleiteter Blauprozess erschöpft sich also nach kurzer Zeit und kann nur insoweit in geringer Stärke etwa noch fort dauern, als ihm durch einen gleichzeitigen und gleich starken Gelbprozess neues Material zugeführt wird, wobei aber, wie es scheint, der chromatische Charakter der Empfindung verloren gehen muß.

Das Bedenken richtet sich auch schon gegen die HERINGSche Theorie in ihrer bisherigen Form, mit Dissimilation und Assimilation als gegenfarbigen Prozessen. Es ist aber auch von HERING bereits im wesentlichen beseitigt worden.

Jeder chromatische Reiz trifft die Retina immer nur auf einer relativ beschränkten Stelle; ihre Gesamtfläche ist in der Regel viel gröfser, als der jeweilig gereizte Bezirk. Nun ist die Retina aber nicht etwa nur eine Fläche, auf der sich allerlei Beliebiges nebeneinander ereignen kann, sondern vielmehr ein durchaus einheitliches und in allen seinen Teilen in reger Wechselwirkung stehendes Organ. Wird das von dem Organe an sich sozusagen erstrebte chemische Gleichgewicht der Sehstoffe an irgend einer Stelle gestört, so arbeiten alle übrigen Teile, nach dem Mafse ihrer engeren oder entfernteren Beziehungen zu jener Stelle, an der Ausgleichung der Störung. Welche bestimmten Vorgänge dabei in Frage kommen, ist unbekannt; man wird an Verschiedenes denken müssen. Die Zersetzungsprodukte des Sehgelb, um bei dem gewählten Beispiel zu bleiben, diffundieren ohne Zweifel in die Umgebung (teils direkt, teils durch Vermittelung der chorioidalen Blutcirculation) und werden hier regeneriert zu Sehpurpur. Dieser, jetzt in einem gewissen Übermafse vorhanden, zerfällt teilweise zu Sehgelb (daher die Kontrastfarbe Gelb in der Umgebung des durch Reizung hervorgebrachten Blau), und ein Teil dieses Sehgelb diffundiert nun wieder rückwärts an den Ort der Störung und unterhält hier den Blauprozefs. Außerdem entstehen zweifellos, wie überall in nervösen Gebilden elektrische Potentialdifferenzen zwischen der gereizten Stelle und ihrer Umgebung. Diese finden ihren Ausgleich in elektrischen Strömen, und deren elektrolytische und katarische Nebenwirkungen mögen die soeben erwähnten Prozesse unterstützen und namentlich bewirken, dafs gewisse Ausgleichungen fast schon momentan den Störungen folgen.¹ Kurz, dafs bei einer länger dauernden chromatischen Reizung auch längere Zeit hindurch der unverkennbare Eindruck einer bestimmten Farbe bestehen kann, ist bei den behaupteten Beziehungen zwischen den gegenfarbigen Sehstoffen ganz wohl verständlich. Es wird um so mehr der Fall sein, je kleiner der gereizte Bezirk im Verhältnis zu der übrigen Netzhaut ist.

¹ Bei ganz kurzer Belichtung, z. B. beim Lichte eines elektrischen Funkens oder bei Betrachtung durch einen photographischen Momentverschluss, machen sich doch schon starke Kontrastwirkungen geltend, was also eine grofse Schnelligkeit der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Teilen der Retina beweist.

Ist die Reizung eine sehr extensive, trifft sie z. B. soweit als möglich die ganze Ausdehnung der Retina, nun, dann ist es geradezu erstaunlich, wie rapide der Eindruck einer bestimmten Farbe schwindet. Man nehme ein großes farbiges Glas vor die Augen und blicke durch dieses nach oben gegen den hellen Himmel, aber so, daß man möglichst nur Himmel sieht und keine Gegenstände in das Gesichtsfeld hineinragen. Man wird überrascht sein, wie schnell sich der Eindruck der Färbung verliert, wie bald man lediglich Grau sieht, mit einer sehr schwachen und nicht recht definierbaren Tingierung in irgend einer Farbe. Daß eine solche Tingierung fortbesteht, erklärt sich daraus, daß es physisch unmöglich ist, die ganze Netzhaut gleichzeitig zu reizen. Wie man auch blicken möge, immer werden irgend welche Bezirke in der Nähe der Ora serrata dem Reize unzugänglich sein, und hier wird also immer eine gewisse Regeneration des jeweilig in Anspruch genommenen Sehstoffes stattfinden. Selbst wenn man die Augen im Kreise bewegt, um sozusagen das einwirkende Licht ordentlich die Ecken ausspülen zu lassen, kann man daran nichts ändern.

Wir wollen nun sehen, wie sich aus den dargelegten Voraussetzungen die hauptsächlichsten Thatsachen des Farbensehens verständlich machen lassen.

IV. Erklärung der Thatsachen.

13. Änderungen der objektiven Helligkeit. Für die Erscheinungen, von denen wir ausgingen, das Grauwerden des lichtschwachen Spektrums und die Änderung der Helligkeitsverteilung in ihm, bleibt die oben (No. 5) im Sinne der HERING'schen Theorie gegebene Erklärung im wesentlichen bestehen. Bei sehr geringer Lichtintensität werden die chromatischen Substanzen wegen geringerer Lichtempfindlichkeit relativ sehr viel weniger zersetzt, als die Weißsubstanz. Je schwächer die objektive Helligkeit ist, desto mehr wird also für das Sehen bloß das Absorptionsspektrum der Weißsubstanz maßgebend sein. Bei angeborener totaler Farbenblindheit ist bloß diese Substanz vorhanden, es besteht also die vielerwähnte Übereinstimmung zwischen dem lichtschwachen Spektrum des normalen und dem gewöhnlichen des total farbenblinden Auges.

Nimmt die objektive Helligkeit eines lichtschwachen Spektrums zu, so werden allmählich auch die chromatischen

Substanzen in Mitleidenschaft gezogen; je weiter die Helligkeit steigt, desto stärker machen sich ihre Absorptionsspektren vor dem der Weißsubstanz für die Nervenerregung geltend. Bei der photochemischen Zersetzung dieser Stoffe nun bestehen große Verschiedenheiten. Aus den beiden, die vorwiegend langwellige Strahlen absorbieren, der Rotgrünsubstanz in ihrem grünen Stadium und namentlich aus dem Sehpurpur, entwickelt das Licht relativ große Energiemengen; die betreffenden Farben, Rot und vor allem Gelb, haben eine große spezifische Helligkeit. In der kurzwelligen Spektralhälfte dagegen sind die Energiereste, die aus den bereits halb verschossenen Sehstoffen noch frei werden, an sich geringer; außerdem wird hier ein Teil der Lichtstrahlen verbraucht zur Regeneration der ursprünglichen Stoffe. Wird also das Spektrum mehr und mehr aufgehellt, so wird es natürlich zwar in allen seinen Teilen heller, aber von der gesamten vorhandenen Helligkeit entfällt relativ immer mehr auf die Gegend des Rot und Gelb, relativ immer weniger auf die des Grün und Blau. Zugleich verschiebt sich das Helligkeitsmaximum in die Gegend stärkster Zersetzung des Sehpurpurs.

Bei genauerer Betrachtung der mit der Aufhellung verbundenen Erscheinungen ergaben sich nun für die HERINGSche Theorie sowohl wie für die HELMHOLTZsche gewisse Schwierigkeiten. Diese fallen jetzt fort.

Gelb ist bei weitem die hellste Farbe. Diese seine größere Helligkeit macht sich nicht nur geltend, wenn es als Gelb empfunden wird, sondern auch, wenn es durch gleichzeitige komplementäre Erregung seinen chromatischen Charakter einbüßt, wenn nur unter den betreffenden Umständen eine relativ starke Wirkung auf den Sehpurpur stattfindet. Stellt man nun Gleichungen her zwischen Licht verschiedener Wellenlängen, in denen einerseits viel Gelb enthalten ist, andererseits wenig, oder richtiger ausgedrückt, deren Komponenten einerseits den Sehpurpur stärker affizieren, als andererseits, so können diese nicht für alle Lichtintensitäten richtig bleiben. Stimmen sie für schwaches Licht, so wird bei Aufhellung die viel Gelb enthaltende Mischung heller, als die wenig Gelb enthaltende. Die relative Beteiligung des Sehpurpurs an der Gesamtzersetzung nimmt zu mit der Lichtintensität; wo eine stärkere Einwirkung auf ihn stattfindet, muß sich also ein relativ

größerer Gewinn an Helligkeit ergeben. Stimmen umgekehrt die Gleichungen für starkes Licht, so wird die viel Gelb enthaltende Mischung bei Abschwächung der Lichtintensität dunkler, als die andere. Indem die relative Beteiligung des Sehpurpurs an der Gesamtzerlegung zurückgeht, muß auch da, wo er zu der Helligkeit einen größeren Beitrag lieferte, jetzt ein größerer Ausfall entstehen.

So erklärt sich die oben (S. 173) gegen HERING geltend gemachte Thatsache, daß zwei gleich helle weiße Felder, die einerseits aus homogenem Rot und Grün, andererseits aus homogenem Gelb und Blau gemischt sind, bei starken Veränderungen der Lichtintensität allemal in dem eben beschriebenen Sinne ungleich werden. Ganz ebenso erklären sich die für den Farbenblinden mitgeteilten Thatsachen. Das Licht aus der Gegend der neutralen Stelle eines Farbenblinden wirkt zwar noch zersetzend auf den Sehpurpur, aber relativ schwach. Bildet nun der Farbenblinde eine Gleichung zwischen dem Lichte dieser neutralen Stelle mit seiner schwachen Gelbvalenz einerseits und einem beliebigen Lichte von starker Gelbvalenz und dem zugehörigen Blau andererseits, so muß das gemischte Feld wegen seiner stärkeren Wirkung auf den Sehpurpur wieder bei Aufhellung mehr an Helligkeit gewinnen und bei Verdunkelung mehr daran verlieren, als das andere. Und aus denselben Gründen wird es begreiflich, daß jene Helligkeit der neutralen Stelle bei schwachem Lichte einen größeren Bruchteil der gesamten Helligkeit des Spektrums ausmachen kann, als bei starkem Lichte (s. o. S. 176).

Ferner. Man denke sich, daß die Rotgrünsubstanz etwas lichtempfindlicher, also leichter zersetzlich sei, als der Sehpurpur, daß der letztere aber sich in größeren Mengen im Auge befinde, als jene, dann wird bei allmählicher Aufhellung eines lichtschwachen Spektrums in der langwelligen Hälfte zuerst Rot und Grün auftreten, und zwar direkt nebeneinander, ohne daß das Gelb sich erheblich zwischen ihnen geltend machen kann. Am äußersten langwelligen Ende namentlich wird Rot schon als Farbe erkannt werden, unmittelbar, nachdem man überhaupt angefangen hat, hier etwas zu sehen, da für diese Strahlen die Zersetzlichkeit der Weißsubstanz eine sehr geringe ist. In der kurzwelligen Gegend des Spektrums findet keine so starke Konkurrenz der Rotgrünsubstanz statt, hier

wird also eine gewisse Zersetzung des Sehgelb schon bei mäßiger Lichtintensität zu stande kommen können. Das durch sie hervorgerufene Blau wird aber einen rötlichen Stich haben, weil die Rotgrünsubstanz für kürzeste Wellenlängen wieder etwas empfindlich ist und an Zersetzlichkeit bei schwachem Lichte eben das Sehgelb übertrifft. Für gewisse geringe Helligkeitsgrade wird sich also das Spektrum wesentlich auf die drei Farbtöne Rot, Grün und rötliches Blau reduzieren, ganz wie es thatsächlich der Fall ist (siehe oben S. 155). Nimmt die objektive Helligkeit weiter zu, so tritt mehr und mehr auch die stärkere Beteiligung der Blaugelbsubstanz an den Gesamtzersetzungen hervor. Zugleich beginnen die Absorptionsspektren der Rotsbstanz und der Grünsubstanz da, wo sie aneinanderstoßen, übereinanderzugreifen, wodurch Rot und Grün an ihren Berührungsstellen sich wechselseitig etwas schwächen. Aus beiden Gründen wird einerseits das Gelb breiter, andererseits das Blau reiner (d. h. weniger rötlich); gleichzeitig machen sich die Übergangsfarben, Orange, Gelbgrün u. s. w., geltend.

Bei noch stärkerer Steigerung der Lichtintensität greifen die Absorptionsspektren der gegenfarbigen Substanzen immer weiter übereinander. An den drei Stellen, wo dies der Fall ist, nämlich im Gelb (Rot- und Grünsubstanz), im Grün (Gelb- und Blausbstanz) und im Blau (Grün- und Rotsbstanz) werden die Spektralfarben nach beiden Seiten hin zunehmend weißlicher. Außerdem aber fängt die weniger reichlich vorhandene Rotgrünsubstanz jetzt an, sich zu erschöpfen. Die Regenerationen können den sehr starken, auf die Zersetzung gerichteten Einwirkungen nicht mehr schnell genug neues Material schaffen. Die Blaugelbsubstanz dagegen hält länger vor, einmal, weil sie weniger labil, außerdem, weil sie reichlicher vorhanden ist. Die Farben des Spektrums zeigen also jetzt die zunehmende Tendenz, sich auf Blau und Gelb zu beschränken und zugleich weißlicher zu werden.¹ Damit haben

¹ Dafs Weißlichwerden aller Farben sowohl bei stärksten, wie bei schwächsten Lichtintensitäten hat also ganz verschiedene Gründe. Bei schwachem Lichte beruht es auf der relativ starken Mitbeteiligung der Weißsubstanz, bei starkem auf dem relativ weiten Übereinandergreifen der gegenfarbigen Absorptionsspektren. Bei HERING und WUNDT muß beides aus der Weißsubstanz erklärt werden, die dadurch eine etwas unwahrscheinliche Doppelaufgabe zu lösen bekommt.

auch die oben (No. 3) der modifizierten Dreifarben- theorie entgegengesetzten Thatsachen ihre Erklärung gefunden.

Bei Änderungen der objektiven Lichtintensität sind aufer den besprochenen Helligkeitsverschiebungen auch Änderungen des Farbentons beobachtet worden, obwohl die Richtigkeit der Beobachtungen von Anderen auch wieder bestritten wird. Da zu der Frage binnen kurzem neues Material zu erwarten steht, so verschiebe ich ihre Erörterung von meinen Gesichtspunkten aus bis dahin.

14. Indirektes Sehen. Man findet vielfach die Darstellung, daß für die Farbenperzeption der normalen Netzhaut drei Zonen zu unterscheiden seien, eine normale in der Mitte des Gesichtsfeldes, eine total farbenblinde an der äußersten Peripherie und eine zwischen beiden gelegene mittlere Zone, innerhalb deren nur Blau und Gelb als Farben empfunden werden, wo unser Auge also ebenso sieht, wie das der gewöhnlichen partiell Farbenblinden auch in seinem centralen Bezirke. Diese Darstellung ist als erste schematisierende Übersicht und für die praktischen Zwecke, etwa der Klinik, ganz in Ordnung, genau genommen aber ist sie teilweise unrichtig. Eine mittlere Zone, in der das normale Auge völlig ebenso sieht, wie das farbenblinde, in der es also für die Empfindungen Rot und Grün schlechthin blind ist, existiert gar nicht. Alle Versuche, sie z. B. gegen die normale Centralzone abzugrenzen, sind mißlungen. Die Angaben haben höchstens Bedeutung für die landläufigen Perimeterproben, mit deren Hülfe sie gewonnen wurden; so wie man sattere oder objektiv intensivere Farben oder größere Farbenflächen nimmt, findet man auch andere Grenzen. Man kann nur sagen, daß das normale Auge auf einer gewissen mittleren Zone, die sich nicht allgemein, sondern nur für jeweilig bestimmte Umstände nach innen abgrenzen läßt, für Rot und Grün sehr schwachsichtig ist. Aber die allgemeine Möglichkeit, diese Eindrücke unter geeigneten Umständen hervorzurufen, erstreckt sich räumlich fast ebenso weit, wie die Empfindungsfähigkeit für Gelb und Blau. Die Reize müssen relativ intensiv und die einwirkenden farbigen Flächen relativ groß sein, und selbst dann dauern die Eindrücke Rot und Grün auf den entfernteren peripheren Partien immer nur einen Moment, um sogleich wieder zu verschwinden.¹

¹ Genaueres bei AUBERT, *Physiol. Optik* in GRAEFE-SAEMISCH, *Handb. der Augenheilk.* II, 2, S. 539 ff.

Man kann sich mit den minimalsten Mitteln hierüber einigermaßen orientieren. Man bedecke ein intensiv rotes Glas mit undurchsichtigem dunklen Papier, in das man ein Loch von 1—1½ cm Durchmesser geschlagen hat. Dann fixiere man mit einem Auge einen Punkt am hellen Himmel und bringe jenes Objekt am besten von der Nasenseite her langsam in das Gesichtsfeld. Das intensiv rote Feld auf dunklem Grunde erscheint zuerst rein grau, allmählich wird es gelb. So wie man ihm aber jetzt einmal eine kleine ruckweise Bewegung erteilt, blitzt es jedesmal rot auf, um sofort wieder gelb zu werden. Je näher man der Mitte des Gesichtsfeldes kommt, desto länger dauert jenes rote Stadium, aber abgesehen von der äußersten Zone völliger Farblosigkeit ändert sich das Verhalten des Feldes auf dem Wege von außen nach innen nirgends sprungweise.

Neuere pathologische Beobachtungen führen zu demselben Resultate. In einigen frischen Fällen traumatischer Hysterie fand C. S. FREUND¹ ganz im Gegensatz zu den gewöhnlich hiermit verbundenen Einengungen des chromatischen Gesichtsfeldes vielmehr eine auffallende Erweiterung der peripheren Farbengrenzen. Die Empfindungsfähigkeit für Rot und Grün reichte fast ebensoweit, wie die für Blau, und die Grenzen für alle drei Farben gingen bis hart heran an die in der Norm für Weiß bestehende Aufsehgrenze. Die Erscheinung ist aufzufassen als eine central (d. h. cerebral) bedingte Hyperästhesie, in Übereinstimmung damit, daß gleichzeitig auch akustische und taktile Hyperästhesien bestanden. Wenn aber durch pathologische Vorgänge im Gehirn auf gewissen Netzhautbezirken eine ungewöhnliche Schärfung der Empfindlichkeit für Rot und Grün stattfinden kann, dann muß natürlich auf denselben Bezirken die allgemeine Möglichkeit der Entstehung jener Eindrücke auch in der Norm schon vorhanden sein. Die periphere Netzhaut ist also bis etwa an die generellen Grenzen des Farbensehens auch noch irgendwie empfindlich für Rot und Grün, nur ist sie in der Norm sehr schwachzeitig für diese Farben.

Mit den oben den Stäbchen und Zapfen zugeschriebenen

¹ C. S. FREUND, Über cerebral bedingte optische Hyperästhesie. *Neurol. Centralbl.*, 1. Septbr. 1892, S. 530 ff.

Funktionen stimmen diese Thatsachen ausgezeichnet überein. Die relative Verteilung jener Gebilde, wie sie am eingehendsten von M. SCHULTZE beschrieben wird,¹ entspricht durchaus den eben dargelegten Eigentümlichkeiten des indirekten Sehens, wenn man annimmt, daß die Zapfen sämtliche Farbeempfindungen zu vermitteln vermögen, die Stäbchen aber nur die Empfindungen Blau und Gelb. Innerhalb des macularen Gebietes der Retina giebt es bekanntlich nur Zapfen. In der unmittelbaren Umgebung drängen sich Stäbchen zwischen sie, und zwar ist zunächst jeder Zapfen von seinen Nachbarn auf allen Seiten durch ein Stäbchen getrennt. Da die Stäbchen weniger Raum einnehmen, als die Zapfen, so kommen hierdurch etwa 6—8 Stäbchen auf einen Zapfen. Aber schon in geringer Entfernung von dieser Zone hat die relative Frequenz der Zapfen noch weiter abgenommen, so daß jetzt 3—4 Stäbchen, zwischen je zwei Zapfen vorhanden sind und ihrer etwa 25 auf jeden Zapfen kommen. Dieses Verhältnis bleibt ohne wesentliche Änderung bestehen bis einige Millimeter vor der Ora serrata, wo beide Elemente, nachdem sie vorher schon ihren typischen Charakter eingebüßt haben, verschwinden.

Trifft nun ein Lichtreiz die Retina, so ist klar, daß dessen Wirkung auf die Zapfen nur innerhalb des macularen Gebietes sich ungestört geltend machen kann. Schon in der nächsten Umgebung der Macula muß seine gleichzeitige Wirkung auf die zahlreicheren Stäbchen sich in den Vordergrund drängen. Noch weiter nach außen aber wird die Beteiligung der Zapfen an der Erregung gleichsam ertränkt werden müssen in der stärkeren Mitbeteiligung der massenhafteren Stäbchen. Die Erregungen der einzelnen Elemente werden ja gar nicht gesondert empfunden; wenigstens gewiß nicht in der Peripherie der Retina. Erstens sind die Stäbchen und Zapfen sehr viel zahlreicher, als die Fasern des Sehnerven, zweitens stehen sie mit diesen gar nicht durch anatomische Kontinuität in Verbindung. Sie ergießen die Effekte ihrer Erregung vielmehr zunächst gemeinsam über die Fortsätze der retinalen Ganglien-

¹ M. SCHULTZE, Zur Anatomie und Physiologie der Retina. *Archiv f. mikrosk. Anatomie*, II. (1868.) Die weiterhin folgenden Zahlenangaben beruhen auf den SCHULTZESCHEN Zeichnungen und haben also nur ungefähre Gültigkeit.

zellen, und dabei muß die Sonderbeteiligung der einzelnen Elemente innerhalb gewisser Grenzen verloren gehen. Die allein durch die Zapfen ermöglichten Eindrücke Rot und Grün vermögen sich also in der Peripherie der Retina gegen die von den Stäbchen herrührenden Gelb und Blau im allgemeinen gar nicht isoliert geltend zu machen; höchstens mögen sie diesen Eindrücken einen schwachen Stich ins Rötliche oder Grünliche erteilen. Nur unter besonderen Umständen wird sich das Vorhandensein der relativ wenigen Zapfen für das Bewußtsein noch irgendwie verraten können.

So z. B. unmittelbar nach dem ersten Auftreten eines Reizes. Wir wollten annehmen, daß die Blaugelbsubstanz etwas weniger labil, etwas träger sei, als die Rotgrünsubstanz (s. S. 207). Wird also die periphere Retina plötzlich von langwelligem Licht getroffen, so ist es begreiflich, daß die von den Zapfen herrührende Empfindung Rot einen Moment allein aufblitzt, ehe sie in dem durch die Stäbchen vermittelten, hinterherkommenden und stärkeren Gelb gleichsam untergeht.

So ferner bei großer Intensität des Reizes. Freilich nimmt durch dessen Steigerung die Wirkung auf die Stäbchen in gleichem Maße zu, wie diejenige auf die Zapfen. Aber bekanntlich ist es für das Bewußtsein nicht einerlei, ob ein an sich starker Lichtreiz noch verzehnfacht oder verhundertfacht wird oder ein an sich schwacher. Das WEBER-FECHNERSche Gesetz, das die Gleichheit des Bewußtseinseffektes in solchem Falle behauptet, ist für weit auseinanderliegende Reize unrichtig; es gilt nur annähernd innerhalb beliebiger kleinerer Gebiete. Thatsächlich gewinnt ein starker Eindruck durch eine bestimmte Steigerung des objektiven Reizes nicht mehr so sehr viel, während ein schwacher Eindruck durch eine proportionale Steigerung gerade in das Gebiet günstigster Unterscheidbarkeit gehoben werden kann. Es ist also wohl denkbar, daß ein von langwelligem Licht erleuchtetes und im indirekten Sehen etwa goldgelb erscheinendes Feld bei genügender Steigerung der objektiven Helligkeit rot wird, oder doch seine anfängliche Röte jetzt etwas länger beibehält, als vorher.

Ähnlich muß es sich endlich verhalten bei einer Vergrößerung der einwirkenden farbigen Fläche. Da die Erregungen der einzelnen Stab-Zapfenelemente nicht voneinander

getrennt bleiben, sondern, wie vorhin gesagt, bei ihrer Übertragung an die Ganglienzellen teilweise ineinanderfließen, so wirkt eine Vergrößerung der gereizten Fläche innerhalb gewisser Grenzen ähnlich, wie eine Verstärkung der Reizintensität. Sie begünstigt das Bewusstwerden des schwächeren Eindruckes relativ mehr, als des stärkeren.

15. Farbenblindheit. Die gewöhnliche partielle und totale Farbenblindheit hat uns so wiederholt beschäftigt, daß wir nicht eingehender auf sie zurückzukommen brauchen. Den partiell Farbenblinden fehlt die Rotgrünsubstanz; sie sehen daher von Farben nur Gelb und Blau. Der Sehpurpur aber, der ihnen diese Empfindungen vermittelt und der in ihrer ganzen Retina gleichmäßig vertreten sein wird, existiert bei ihnen in zwei Modifikationen. Die sog. Grünblinden haben den violetten Sehpurpur, der auch den Farbentüchtigen zukommt; sie nähern sich daher in Bezug auf Ausdehnung des Spektrums, Verteilung seiner Helligkeit u. a. dem normalen Auge. Die sog. Rotblinden dagegen besitzen den Sehpurpur in seiner roten Modifikation, die, beiläufig gesagt, vielleicht eine primitivere Stufe in der Entwicklung der Sehstoffe darstellt. Sie sehen daher das Spektrum am langwelligen Ende erheblich dunkler, und sein Helligkeitsmaximum mehr nach dem Grün hin liegend, als die Farbentüchtigen. Die total Farbenblinden endlich haben (wenn nicht alle, so doch, wie es scheint, in ihrer Mehrzahl) gar keinen chromatischen Sehstoff, sondern nur die Weißsubstanz. Das Spektrum erscheint ihnen daher jederzeit so, wie allen anderen Augen bei schwächsten Lichtintensitäten, weil dann hier die chromatischen Substanzen gleichfalls von der Miterregung ausgeschlossen bleiben.

Allein abgesehen von diesen relativ bekannteren Formen giebt es nun noch einige besondere Gestaltungen der Farbenblindheit, die allerdings wegen ihrer größeren Seltenheit bei weitem noch nicht so genau untersucht sind, wie jene ersten. Es liegt mir daran, zu zeigen, daß auch für ihre Eigentümlichkeiten, soweit sie eben bekannt sind, sich aus meinen Anschauungen ein zwangloses Verständnis gewinnen läßt.

1). Über die total Farbenblinden sprach ich soeben in einer gewissen Einschränkung. Das geschah mit Rücksicht auf einen oben (S. 147) schon kurz mitgeteilten Befund A. KÖNIGS. Dieser

fand in einzelnen Fällen von pathologisch entstandener totaler Farbenblindheit eine ganz andere Helligkeitsverteilung der Farben des Spektrums, als die oft erwähnte, in dem lichtschwächsten Spektrum des Normalsehenden zu beobachtende. Die relative Helligkeit der Farben schien vielmehr hier ganz übereinzustimmen mit der für das normale Auge bei gewöhnlicher Lichtintensität gültigen. Eine große Genauigkeit dieser Beobachtungen war nicht zu erreichen; die Sache bedarf also gewiß noch der näheren und genaueren Untersuchung. Immerhin sind zwei von KÖNIG selbst geprüfte Fälle so positiv, daß ein einfacher Zweifel gegenüber einem gewissenhaften und geübten Beobachter keine Berechtigung haben würde. Wie KÖNIG mit Genugthuung hervorhebt, bereiten die Fälle einer Erklärung aus der HERINGSchen Theorie große Schwierigkeiten, allein, wie ihm doch nicht verborgen bleibt, ist die HELMHOLTZsche Theorie ihnen gegenüber auch völlig ratlos. Beide Theorien lassen eben hier gänzlich im Stich.

Mit Hülfe der oben entwickelten Prinzipien wird man diese Fälle verständlich finden. Der chromatische Charakter unserer Helligkeitsempfindungen sollte darauf beruhen, daß die bei der Zersetzung der chromatischen Sehstoffe frei werdende Energie in einer gewissen spezifischen Weise, etwa in einer eigentümlichen Rhythmisierung, auf die nervösen Endorgane weiter übertragen wird. Ist dem so, dann kann naturgemäß ein Fortfallen jenes chromatischen Charakters, also ein Verlust der Farbenempfindungen im engeren Sinne, auf zwei ganz verschiedene Weisen eintreten. Einmal dadurch, daß die chromatischen Sehstoffe überhaupt fehlen. Das ist die soeben erwähnte und gewöhnliche totale Farbenblindheit, mit Helligkeitsmaximum im Grün des Spektrums. Außerdem aber auch offenbar dadurch, daß die chromatischen Substanzen zwar vorhanden sind und zersetzt werden, daß aber die von ihnen ausgehende spezifische Tönung der Erregung irgendwo auf dem Wege zum Gehirn durch einen pathologischen Prozeß eine Störung erleidet und wieder verloren geht. Eine solche Schädigung könnte an den verschiedensten Stellen eingreifen: schon gleich in den inneren Schichten der Retina, oder weiter centralwärts im Sehnerven (Sehnervenatrophie), oder endlich in den Centralorganen selbst (hysterische, apoplektische, hypnotische

Farbenblindheit). Natürlich kann die aus der Zersetzung der Sehstoffe entwickelte Energie durch eine solche centralwärts stattfindende Störung ihrer Rhythmisierung nicht geändert werden. Infolge davon bleibt auch die Helligkeit der Gesichtseindrücke, trotz jenes Fortfalles ihres chromatischen Charakters, ganz ungeändert, wofern nur die leitenden Teile des Sehapparates überhaupt noch im stande sind, die ihnen übertragenen Reizungen wenigstens der Größe nach einigermaßen weiterzugeben (d. h. wofern noch Weiß in verschiedenen Schattierungen gesehen und unterschieden werden kann). Derartig erkrankte Individuen sehen mithin alles nur Grau in Grau, ganz wie die aus Mangel der chromatischen Sehstoffe Farbenblinden, allein sie unterscheiden sich von diesen dadurch, daß für sie die relative Helligkeit der verschiedenen Stellen des Spektrums oder der äußeren Objekte ganz dieselbe ist, wie früher in ihrer Norm.

2). Eine weitere relativ seltene Form der Farbenblindheit ist die sog. Violettblindheit (oder Blaugelbblindheit). Ihre charakteristischen Eigentümlichkeiten scheinen diese zu sein:¹

a) Objektiv weißes Licht wird nicht als rein weiß empfunden, sondern hat einen gelblichen oder grünlich-gelben Charakter.

b) Objektiv dunkle Stellen des Gesichtsfeldes erscheinen dagegen unter Umständen schwach violett.

c) Das Spektrum ist am violetten Ende verkürzt.

d) Blaugrüne und blaue Farbtöne werden miteinander verwechselt und erscheinen wahrscheinlich grün.

e) Irgendwo in der Gegend des Gelb hat das Spektrum eine neutrale Stelle, d. h. monochromatisches Licht dieser Stelle ruft denselben Eindruck hervor, wie das gelblich empfundene unzerlegte Licht.

f) Zur Herstellung der Spektralfarben durch Mischung sind zwei Farben nicht hinreichend.

¹ Die Beobachtungen und Beschreibungen dieses Typus sind durchweg recht mangelhaft und inexakt. Einen anscheinend hierhergehörigen Fall hat kürzlich VINTSCHGAU zu untersuchen Gelegenheit gehabt (*Pflügers Arch.*, Bd. 48). Aber trotz ihrer Umständlichkeit liefert auch seine Beschreibung keine unzweideutige und genügend detaillierte Feststellung des Thatbestandes. Die obige Charakterisierung genügt daher keinen strengeren Ansprüchen, als das Material zur Zeit gestattet. Übrigens sind in sie, der Einfachheit halber, auch einige Züge der sehr ähnlichen Santoninblindheit aufgenommen.

Mit größerer Bestimmtheit wage ich mich über die mutmaßlichen Gründe dieser Anomalie einstweilen nicht auszudrücken; immerhin scheint mir folgendes beachtenswert:

Von den besonderen Eigentümlichkeiten, die KÜHNE an dem Sehpurpur und seinem Zersetzungsprodukt in selteneren Fällen und unter gewissen Umständen gefunden hat, erwähnt er nichts häufiger, als eine bisweilen zu bemerkende auffallende Indolenz des Sehgelb gegen das Licht. Er sagt z. B. einmal: „Manche Netzhäute werden am Lichte auffallend spät farblos, indem der Purpur zwar wie gewöhnlich schnell umschlägt, das rote und orange Stadium aber sehr verlängert wird und das letzte Gelb oft stundenlang zerstreutem guten Tageslichte standhält“.¹ Oder an anderer Stelle: „Viele Reagentien, die an sich den Purpur erst nach längerer Zeit oder gar nicht angreifen, ändern die Retina derart, daß Belichtung zwar noch Sehgelb in der normalen Zeit erzeugt, daß aber dieses nun äußerst langsam farblos wird“.² Anderswo noch: „Durch Licht fast unverwüsthlich scheint auch die gelbe Farbe zu sein, welche purpurne Netzhäute in Sublimat annehmen“.³ Man erwäge nun, welche Folgen es für das Sehen notwendig haben muß, wenn im Auge aus irgend einem Grunde bei der Zersetzung des Sehpurpurs nicht das gewöhnliche Sehgelb, sondern diese seine bisweilen vorkommende stabilere Modifikation gebildet wird.

Relativ geringe Zersetzlichkeit des Sehgelb ist gleichbedeutend mit erschwertem Vonstattengehen des Blauprozesses. Die Empfindung Blau kann also zwar noch hervorgerufen werden, überhaupt ist an der Gesamtheit der unter Umständen möglichen Empfindungen nichts geändert (f), nur ist das Blau jederzeit sehr schwach. Gemischtes Licht, das in der Norm weiß erscheint, wird infolgedes jetzt gelb aussehen (a). Licht, das sonst den Grünprozess und Blauprozess gleichzeitig hervorrief, erregt jetzt überwiegend nur jenen ersten, d. h. die blau-grünen und benachbarten Farben erscheinen übereinstimmend grün (d).

Durch seine geringere Zersetzlichkeit wird sich nun aber weiter das Sehgelb in relativ großer Menge anhäufen müssen.

¹ KÜHNE, *Hermanns Hdb.* III, 1, S. 278.

² KÜHNE, *Unters.* I, S. 432.

³ *Hermanns Hdb.* III, 1, S. 287.

Dadurch ist zweierlei bedingt. Erstens muß das aufgespeicherte Sehgelb, obwohl in der lichtempfindlichen Schicht der Retina selbst befindlich, dennoch ähnlich wirken, wie ein vor das Auge gehaltenes gelbes Glas, oder wie eine die ganze Retina einnehmende intensive Macula lutea. Es absorbiert die Strahlen kürzester Wellenlänge, und zwar wegen seiner stärkeren Anhäufung relativ viel stärker, als es seitens des gewöhnlichen Sehgelb geschieht. Dabei aber wird es jetzt durch diese Strahlen nur sehr langsam zersetzt. Sie gelangen also nur in geringem Maße zur Einwirkung auf die Nerven und sind überwiegend für das Sehen verloren, d. h. das Spektrum wird am violetten Ende stark abgeschwächt und damit verkürzt (c). Zweitens werden durch die stärkere Ansammlung des Sehgelb, trotz seiner größeren Stabilität, doch auch wieder spontane Zersetzungen begünstigt. Wo nun keine sonstige Reizung ihre stärkeren Effekte für das Bewußtsein geltend macht, also auf den dunklen Stellen des Gesichtsfeldes, da machen sich jene Zersetzungen bemerklich als eine schwache bläuliche Färbung (b).

Endlich aber wirkt jene Indolenz des Sehgelb gegen das Licht auch zurück auf den Sehpurpur, da die beiden Stoffe ja für ihre Entstehung aufeinander angewiesen sind. Wird das Sehgelb relativ langsam zersetzt, so wird der Sehpurpur relativ langsam regeneriert, weil zu diesen Regenerationen ja das Material fehlt. Er wird also jederzeit in geringerer Menge vorhanden sein und namentlich durch die entsprechende Belichtung schneller verbraucht werden, als unter normalen Verhältnissen. Dafs er nicht überhaupt gänzlich erschöpft werden kann, liegt an den eben erwähnten spontanen Zersetzungen des Sehgelb, infolgederen er in der ganzen Retina zwar in geringer Menge, aber doch stetig neu gebildet wird und der gereizten Stelle zuffießt. Auch wird man sich denken können, dafs seine Zersetzung immer noch mehr begünstigt bleibe, als die des Sehgelb, da das von ihm vorhandene Quantum wenigstens durch das Licht prompt umgewandelt wird, während das Sehgelb ziemlich lichtbeständig geworden ist. Immerhin aber wird für einen gegebenen Reiz die Zerstörung des Sehpurpurs, d. h. der Gelbprozefs, schwächer sein müssen, als in der Norm. Die Empfindung Gelb wird also nicht die Stärke erreichen können, wie gewöhnlich; die gelben Farbentöne im Spektrum erscheinen ungesättigter als sonst, denn das hier namentlich durch den

Rot- und Grünprozess hervorgerufene Weiss macht sich relativ stärker geltend. Ebendeshalb aber ist es auch möglich, zwischen diesem spektralen Gelb und dem gelblich aussehenden unzerlegten Weiss eine wirkliche Gleichung herzustellen (e).

Man darf also sagen: Die sämtlichen charakteristischen Erscheinungen der sogenannten Violettblindheit lassen sich ganz wohl verständlich machen im Zusammenhang mit den oben entwickelten Annahmen, und zwar nicht durch Zuziehung einer sonst in der Luft stehenden Hülfshypothese, sondern als notwendige Konsequenzen einer thatsächlich beobachteten Eigentümlichkeit der im Auge gegebenen Stoffe.

3). Die vorhin (S. 214) erwähnten Störungen der chromatischen Erregungen auf dem Wege von der Stab-Zapfenschicht zu den Centralorganen werden nicht notwendigerweise immer so stark sein, dass alle Farbenempfindung vollständig verloren geht. Man wird vielmehr annehmen müssen, dass unter Umständen, z. B. in den ersten Stadien eines allmählich fortschreitenden pathologischen Prozesses oder in den letzten Stadien einer allmählichen Rückkehr zur Norm, blofs partielle Störungen solcher Art bestehen. Die chromatischen Rhythmen werden dann bei ihrer Fortleitung zum Centrum an irgend einer erkrankten Stelle zwar abgeschwächt, aber nicht aufgehoben. Die Farben werden also, wenigstens wenn sie satter sind, noch erkannt, aber sie erscheinen wie verschleiert, weiflicher und matter, als in der Norm. In der That sind nun solche Zustände von Farbenschwäche, wie man sie nennt, geradezu charakteristisch für Sehnervenatrophie¹ und für leichtere cerebrale Affektionen des Farbensinnes. Dabei ist es offenbar wieder nicht notwendig, dass die partielle Beeinträchtigung alle vier chromatische Rhythmen ganz gleichmäfsig ergreife. Eine stärkere Beeinträchtigung des einen oder des anderen Rhythmus je nach der Natur der Störung hat an sich nichts weiter Unwahrscheinliches; ich möchte eher sagen, dass bei Störungen geringeren Grades eine absolut gleichmäfsige Abschwächung der vier Rhythmen vielmehr etwas Wunderbares haben würde. Sind nun die Unterschiede, die hier vielleicht immer stattfinden, gering, so verlieren sie sich in der allgemeinen Unbestimmtheit der Farbenempfindungen. Sind

¹ LEBER in *Gräfe-Sämisch, Handb. d. Augenheilkunde.* V, S. 1038.

sie dagegen erheblich, so können sie sehr merkwürdige Resultate zur Folge haben, ganz geeignet, die Theorie des Farbensehens zu verwirren und den Blick für ihre großen Gesetzmäßigkeiten durch anscheinende Ausnahmefälle zu trüben. Es kann dann nämlich vorkommen, daß von einem Paar durchaus zusammengehöriger und in der Peripherie des Sehapparates nur durcheinander zu stande kommender Gegenfarben die eine mehr oder weniger erhalten bleibt, während die andere nahezu oder vollständig verloren geht. Ich erwähne einige Fälle, in denen es sich thatsächlich so verhalten hat.

HERING¹ berichtete vor einiger Zeit über einen Fall von Farbenschwäche infolge von Sehnervenatrophie. „Alle benutzten Farben erschienen dem kranken Auge minder gesättigt, d. h. viel weißlicher, bezw. graulicher als dem gesunden.“ Diese Veränderung bestand aber nicht gleichmäßig für alle Farben, sondern: „in einem Spektrum von mäßiger Helligkeit sah die Patientin nur drei Farben, Gelb, Grün und Blau.“ Bei Steigerung der Helligkeit trat hiervon das Grün bis auf „einen grünen Schimmer“ zurück. Rot aber wurde eigentlich gar nicht empfunden, sondern erschien nur als eine rötliche Färbung des Gelb.

Einen ähnlichen Fall beschreibt HESS² in unmittelbarem Anschluß an den vorigen. Hier wurde Rot schlechterdings nicht mehr gesehen; es erschien stets als Gelb. Grün dagegen war noch erhalten und wurde als grünlich Grau oder grünlich Gelb empfunden. Blau und Gelb waren minder gesättigt als für das normale Auge.

Eine andere Kombination fand STEFFAN³ verwirklicht in einem Falle von apoplektischer Störung des Farbensinnes. Die Farben sehen dem Patienten aus wie früher „bei Dämmerlicht“, d. h. nahezu grau. Bei einer Untersuchung mit großen,

¹ HERING, Die Untersuchung einseitiger Störungen des Farbensinnes u. s. w., *Gräfes Archiv*, 36, 3, S. 14 u. 15.

² HESS, Untersuchung eines Falles von halbseitiger Farbensinnstörung u. s. w., *Gräfes Archiv* 36, 3, S. 24. Es ist keine korrekte Wiedergabe der von ihm selbst beschriebenen Thatsachen, wenn Hess den Rotgrünsinn der erkrankten Netzhauthälfte als „nahezu“ vollständig geschwunden bezeichnet. Die Rotempfindung war ganz und gar geschwunden und nur die Grünempfindung „nahezu“.

³ STEFFAN, Zur Pathologie des Farbensinnes. *Gräfes Archiv* 27, 2, S. 1. (1881.)

grell beleuchteten Bogen der sog. Heidelberger Farbenpapiere werden Rot, Gelb und Blau richtig erkannt, „auf Grün aber gelang in keiner Weise irgend eine Farbenreaktion“, auch nicht auf spektrales Grün.

Solche Fälle bilden demnach keine Gegeninstanzen gegen die Gliederung des Farbenreiches nach Gegenfarben, sondern sie bestätigen nur, wozu bereits andere Gründe drängen, daß zwischen zwei ganz verschiedenartigen Störungen des Farbensehens unterschieden werden muß. Die einen sitzen in der Stab-Zapfenschicht und betreffen die Erzeugung der gegenfarbigen Erregungen durch irgend eine Veränderung eines zusammengehörigen Paares von Sehstoffen. Die anderen haben ihren Sitz irgendwo centralwärts von da und beeinträchtigen die Fortleitung dessen, was hier provisorisch immer als Rhythmus der chromatischen Erregungen bezeichnet wurde. Sie sind nicht an die Zusammengehörigkeit der Gegenfarben gebunden, sondern können unter Umständen das eine Glied eines solchen Paares erheblich stärker treffen, als das andere.

Möglicherweise gehört hierher auch ein soeben von KIRSCHMANN beschriebener und etwas merkwürdig klingender Fall (*Philos. Studien*, VIII, S. 173, V. Fall, S. 196 ff.), in dem wesentlich nur Rot und Blau gesehen wurde. Leider aber ist auch diese Untersuchung, wie so viele andere, trotz der großen darauf verwandten Mühe, nicht genau und unzweideutig genug, um ordentlich erkennen zu lassen, was vorliegt. Eine alle bisherigen Vorstellungen so mit radikalem Umsturz bedrohende Angabe, wie die, daß die Gegend von ca. $580 \mu\mu$ „blafs-blau“ gesehen werde (d. h. also, daß eine Gegend des Spektrums geradezu in den Ton ihrer sonstigen Komplementärfarbe umgeschlagen sei), bedarf doch in der That einer anderen Fundierung, als sie durch unsichere Benennungen, Wollproben und dergleichen gegeben werden kann. Daß der Träger dieser Eigentümlichkeit auf dem einen Auge die Farben anscheinend normal sieht und überhaupt im Farbensehen sehr geübt ist, ändert daran nichts. Denn wenn er die Gegend von $580 \mu\mu$ blau nennen kann, so ist der normale Charakter seiner Benennungen unter allen Umständen verdächtig und bedarf dringend einer besonderen und sorgfältigen Untersuchung. Solange also dieser vielleicht sehr seltene Fall nicht durch eine Anzahl spektraler Farbengleichungen wesentlich besser definiert ist, als bisher, ist ein Urteil über ihn unmöglich.

16. Farbenmischung. Von den Farbenmischungen ist alles Theoretisieren über das Farbensehen ausgegangen, mit den Farbenmischungen komme das gegenwärtige zu seinem Ende. Über die Thatsachen dieses Gebietes sind wir seit

kurzem besonders genau unterrichtet durch die mehrerwähnten KÖNIG-DIETERICISCHEN Farbengleichungen; jede Theorie hat also hier jetzt eine besonders scharfe Probe zu bestehen. Wie die Dreifarbentheorie an dieser Probe versagt, und wie die HERINGSCHHE in ihrer bisherigen Form durch sie gleichfalls in Schwierigkeiten verwickelt wird, haben wir bereits gesehen (No. 4 u. 7). Es fragt sich also, ob die hier vorgeschlagene Auffassung der Dinge sich mit jenen Gleichungen verträgt, ob die bisher noch ziemlich allgemein gehaltenen theoretischen Vorstellungen sich so präzisieren lassen, daß jene bestimmten Beobachtungsergebnisse aus ihnen begreiflich werden.

Worauf es dabei ankommt, ist nach dem Früheren klar. Die sämtlichen Mischungsgleichungen müssen sich ableiten lassen aus der Annahme von fünf Sehstoffen. Die Erregungskurve eines dieser Stoffe (Weißsubstanz) muß übereinstimmen mit der Helligkeitsverteilung in einem sehr lichtschwachen Spektrum. Die Erregungskurven zweier anderen Stoffe (Gelbsubstanz und Blausubstanz) müssen identisch sein bei dem Normalsehenden und dem sog. Grünblinden (und zugleich auch eine Beziehung zu den Absorptionsspektren des Sehpurpurs und des Sehgelb erkennen lassen), während die beiden noch übrigen Stoffe (Rotsubstanz und Grünsbstanz) nur in dem normalen Auge anzunehmen sind. Endlich muß bei diesen Paaren chromatischer Substanzen ein partieller Antagonismus bestehen, so daß da, wo die Erregungskurven der Blausubstanz und Gelbsubstanz oder der Rotsbstanz und Grünsbstanz übereinandergreifen, der Effekt der Belichtung identisch ist mit der Wirkung des Lichtes auf die Weißsubstanz.

Lassen sich also aus einer bestimmten Gestaltung solcher Voraussetzungen die konkreten Mischungsthatfachen erklären? Nun, sie lassen sich so vortrefflich erklären, wie man nach der Beschaffenheit der KÖNIG-DIETERICISCHEN Mischungsgleichungen nur erwarten kann; und da mir diese Thatfachen erst bekannt wurden, nachdem ich mit den theoretischen Vorstellungen längst im Reinen war, darf ich in ihnen eine erste willkommene Bestätigung meiner Annahmen erblicken.

Allerdings ist hierbei die gemachte Einschränkung zu beachten, die ja aber im Grunde auch wieder selbstverständlich ist. Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtung ist so vortrefflich, wie man nach der Beschaffenheit der KÖNIG-DIETERICISCHEN Mischungsgleichungen nur erwarten kann, aber der Beschaffenheit dieser Gleichungen

mufs man dabei freilich Rechnung tragen. Nun sind diese zwar die genauesten Beobachtungen, die wir über die Erscheinungen der Farbmischung gegenwärtig besitzen, aber sie haben deshalb noch keineswegs die für genauere Prüfungen wünschenswerte und vermutlich auch erreichbare Genauigkeit. Vielmehr leiden sie zum Teil an einem bestimmten methodologischen Fehler, der sich vielleicht bei den gegebenen experimentellen Einrichtungen technisch schwer vermeiden liefs, der aber deshalb nicht weniger ihre Verwertbarkeit beeinträchtigt.

Angenommen, man habe es mit Augenmafsversuchen zu thun und suche eine Distanz für gewisse Umstände einer gegebenen Normaldistanz möglichst gleich zu machen. Der Apparat, dessen man sich zu bedienen habe, gestatte eine Verwirklichung dieser Gleichheit nur in einer bestimmten Weise, dadurch nämlich, dafs man kleinere Distanzen allmählich vergröfsert, bis sie gleich erscheinen und allenfalls noch etwas darüber. Man wird dann zunächst so verfahren, dafs man thut, was der Apparat zuläfst, dafs man nämlich wiederholt entschieden kleinere Distanzen allmählich wachsen läfst, bis sie der Norm eben gleich erscheinen, und aus einer Anzahl solcher Werte das Mittel nimmt. Wollte man sich aber bei diesem Mittelwerte beruhigen und ihn für den gesuchten ausgeben, so würde man einen grofsen Fehler machen. Wir empfinden Gleichheit nirgendwo in der Welt blofs bei der Einwirkung zweier ganz bestimmter objektiven Gröfsen, sondern überall mit einer gewissen Ungenauigkeit, innerhalb eines Intervalls von einer gewissen Breite, mit einem gewissen Unterschiedsschwellenwert. Wegen dieser Thatsache aber kann eine objektive Gröfse als subjektiv einer anderen möglichst gleich nicht schon dann gelten, wenn sie bei wiederholter Vergleichung im Durchschnitt aller Fälle den Eindruck der Gleichheit macht, sondern nur dann, wenn sie sich zugleich in Bezug auf die hier bestehenden Unterschiedsschwellen gleich verhält, d. h. wenn sie um deren Werte nach oben wie nach unten von der Ungleichheit entfernt ist. Gleichheit darf nicht durch einseitige Annäherung bestimmt werden, sondern, wenn überhaupt auf solche Weise, dann nur als Mittel aus den Annäherungen von zwei Seiten. Gestatten die Umstände eine solche symmetrische Bestimmung nicht, so mufs man sich irgendwie über die Gröfse der jeweiligen Unterschiedsschwellenwerte informieren; um deren ungefähren Betrag bleibt die einseitig gefundene Gleichheit von der eigentlich gewollten und Bedeutung habenden entfernt. In dem hier fingierten Falle z. B., wo eine Annäherung an die Gleichheit von oben unmöglich sein sollte, könnte man sich so helfen, dafs man die von unten gewonnene Gleichheit festhält und nun ermittelt, um wieviel man die Norm gegen diese verkleinern kann, ohne dafs der Eindruck der Gleichheit verloren geht. Diese Gröfse entspricht ungefähr dem doppelten Unterschiedsschwellenwert.

Nun sage ich, die KÖNIG-DIETERICISCHEN Farbgleichungen sind grofsenteils in Bezug auf Sättigungsverschiedenheiten nur durch einseitige Annäherung gewonnen. Sie sind also, obwohl dem Auge freilich die verglichenen Felder gleich erschienen, doch keine wahren Gleichungen, sondern um den Betrag (oder einen Teilbetrag) der

jeweiligen Unterschiedsschwellen für Sättigungsgrade ungenau. Aus den Mitteilungen der Autoren über ihr Verfahren geht das mit Sicherheit hervor. Bei der Auswahl der Komponenten ihrer Mischungen hatten sie zwei entgegengesetzten Übelständen Rechnung zu tragen. Nahmen sie die Komponenten zu nahe aneinander, so war eine sehr große Zahl von Mischungssätzen erforderlich und die aus deren Verknüpfung berechneten Werte wurden dann so ungenau, „dafs die schließlichen Resultate gar kein Vertrauen mehr verdienten“.¹ Nahmen sie aber die Komponenten zu weit auseinander, so traten Sättigungsverschiedenheiten auf zwischen der gemischten Farbe und der verglichenen homogenen, und um Gleichheit zu erzielen, mußte die letztere durch Zusatz komplementären Lichtes etwas weißlicher gemacht werden. Diese Sättigungsausgleichung aber brachte experimentell und rechnerisch wieder manche Unzuträglichkeiten mit sich, auf deren Detaillierung es hier nicht ankommt.² Die Autoren hatten also zwischen diesen beiden Übelständen irgendwie zu lavieren. Um möglichste Genauigkeit zu erzielen, benutzten sie in einer Anzahl von Mischungssätzen relativ entfernte Komponenten und nahmen die unbequeme Sättigungsausgleichung in den Kauf. Jedoch thaten sie dies „nicht ohne zwingende Notwendigkeit,“³ sondern in der Mehrzahl der Fälle wählten sie die Komponenten zwar immer noch so weit als möglich voneinander, aber doch so nahe zusammen, dafs Sättigungsdifferenzen gerade eben nicht mehr merkbar wurden. Das heißt nun eben, sie verwirklichten in allen diesen Fällen die Sättigungsgleichheit ihrer Gleichungen durch einseitige Annäherung. Sie gingen aus von zu wenig gesättigten Mischungen und verminderten dann deren Weißlichkeit durch Aneinanderrücken der Komponenten so weit, bis sich ein Unterschied von der homogenen Farbe eben nicht mehr bemerklich machte. Alle mit solchen Komponenten weiter gewonnenen Gleichungen sind, nach dem vorhin Gesagten, notwendig ungenau, ungenau (im Höchstbetrage) um den Wert der jeweiligen Unterschiedschwelle für Sättigungsdifferenzen. Die hergestellte Gleichheit kann noch durchaus keine symmetrische gewesen sein, d. h. von der Ungleichheit nach oben und nach unten gleich weit entfernt. Hätte man die Sättigung des gemischten Feldes allmählich wieder verringert, so wäre sehr bald ein Unterschied gegen das homogene wieder hervorgetreten. Dieses letztere dagegen hätte zweifellos eine sehr viel erheblichere Sättigungsverminderung vertragen, ehe es seinerseits weißlicher geworden wäre, als das gemischte Feld. Von dem hierzu erforderlichen Mehrzusatz der Komplementärfarbe aber gehört die Hälfte auf die homogene Seite der Gleichung, um sie zu einer genauen zu machen.

Wie hoch der Betrag dieser Ungenauigkeit bei den einzelnen Gleichungen veranschlagt werden muß, läßt sich natürlich ohne besonders darauf gerichtete Untersuchungen gar nicht sagen. Vorhanden ist sie

¹ KÖNIG und DIETERICI, Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen. *Diese Zeitschrift* IV., S. 294.

² A. a. O., S. 295.

³ A. a. O., S. 296.

notwendigerweise in allen den Fällen, in denen ein Sättigungsunterschied nicht bemerkt wurde und also auch keine Sättigungsausgleichung stattfand. In den Teilen des Spektrums, wo die Unterschiedsschwelle für Sättigungsdifferenzen relativ klein ist, ist natürlich auch jene Ungenauigkeit relativ klein; für die kurzwellige Hälfte des Spektrums wird sie also nicht nennenswert in Betracht kommen. Allein in der Gegend von Orange bis Gelbgrün ist, wie wir wissen (s. o. S. 161), das Auge gegen Sättigungsdifferenzen ziemlich unempfindlich; hier ist also die Unterschiedsschwelle relativ groß, und damit kann auch jene Ungenauigkeit nicht mehr vernachlässigt werden. Aus alledem folgt somit, daß eine Übereinstimmung zwischen der Theorie und den KÖNIG-DIETERICISCHEN Mischungsbeobachtungen von vornherein nur erwartet werden kann, wenn die das Gebiet von Orange bis Gelbgrün betreffenden Gleichungen ohne Sättigungsausgleichung eine gewisse Korrektur erfahren, deren genaue Größe einstweilen nicht zu bestimmen ist. Durch diese Notwendigkeit bekommt die ganze Herstellung der Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtung etwas Unsicheres und Provisorisches. Nichtsdestoweniger teile ich meine Resultate noch teilweise im einzelnen mit, weil ja erstens die Unsicherheit nur für einen Teil des Spektrums besteht, weil zweitens die erforderlichen Korrekturen, bis auf eine Ausnahme, nur unerheblich sind, und weil endlich die Anzahl und Mannigfaltigkeit der zu erfüllenden Bedingungen immer noch eine ungemein große ist. Die Möglichkeit einer im übrigen befriedigenden Ableitung der Beobachtungsergebnisse wird auch so noch als eine wertvolle Bestätigung der theoretischen Voraussetzungen betrachtet werden.

Fig. 5 veranschaulicht die auf Grund der Mischungsgleichungen für D(IETERICI)¹ konstruierten Erregungskurven der fünf Sehstoffe, bezogen auf das Dispersions-Spektrum des Gaslichtes. Tabelle III giebt in Spalte A die Ordinatenwerte dieser Kurven in Zahlen an; Spalte B enthält die Empfindungswerte derselben Ordinaten, d. h. einerseits die rein chromatischen Wirkungen der verschiedenen Lichter, soweit sie nach Abzug der gleichzeitigen gegenfarbigen Erregungen übrig bleiben, andererseits ihre Weißeffekte, die da teils auf der Weiß-

¹ Die Gleichungen für KÖNIG ergeben im wesentlichen ähnliche Kurven und hätten also ebensogut hier zu Grunde gelegt werden können. Nur zeigen diese Kurven sämtlich in der Gegend von ca. 510μ eine den glatten Verlauf störende Ausbuchtung nach unten, die sich auch schon bei den von KÖNIG und DIETERICI selbst konstruierten Kurven geltend macht und von ihnen, zweifellos richtig, auf eine relativ starke Pigmentierung der Macula lutea bei KÖNIG zurückgeführt wird. Wegen dieses rein zufälligen Umstandes wäre die Übereinstimmung namentlich der Blaukurve mit derjenigen der Farbenblinden weniger evident zu machen gewesen, und daher habe ich die Gleichungen für D. vorgezogen.

substanz, teils auf jenen gegenfarbigen Erregungen beruhen. Tabelle IV endlich reproduziert zur Erleichterung der Nachprüfung die sämtlichen für D. gefundenen Mischungsgleichungen der KÖNIG-DIETERICISCHEN Arbeit, unter gleichzeitiger Angabe der für sie erforderlich erachteten hypothetischen Korrekturen.

Zum Verständnis der Kurven ist folgendes zu beachten:

1). Gegenfarbige Kurven sind so gezeichnet, daß sie, bis zur Abscissenaxe verlängert, mit dieser gleiche Flächen einschließen. Die von der Blau- und Gelbkurve umzogenen Flächen sind also einander gleich und ebenso die von der Rot- und Grünkurve umzogenen, (dagegen haben die Flächen des einen Paares eine etwas andere Größe, als die des anderen). Durch diese Wahl der an sich willkürlichen Maßstäbe gewinnt man einen anschaulichen und bequemen Ausdruck für den komplementären Charakter der Gegenfarben. Es werden dann nämlich komplementäre Mengen von diesen gerade durch (linear oder numerisch) gleiche Größen repräsentiert.

2). Der Maßstab für die Weißkurve ist so gewählt, daß das aus der Vereinigung zweier gegenfarbigen Mengen resultierende Weiß gleich der Summe dieser (untereinander gleichen) Mengen gesetzt ist. Es ist also

$$\begin{aligned} 2 a W &= a Gc + a Bl \\ &= a R + a Gr \quad (\text{wo } a \text{ beliebig}). \end{aligned}$$

Die nach dieser Festsetzung aus den Mischungsgleichungen resultierende Weißkurve hat eine auffallend geringe Höhe, auffallend namentlich, wenn man daran denkt, daß HERING der Weißerregung ein viel größeres Gewicht vindiziert, als den chromatischen Erregungen. Die von ihr und der Abscissenaxe umschlossene Fläche beträgt knapp $\frac{1}{12}$ der Gesamtfläche der chromatischen Kurven. Ich bemerke daher ausdrücklich, daß ein wesentlich höherer Zug der Kurve nach den Mischungsgleichungen unmöglich ist; aber, wie ich gleich hinzufüge, um der etwaigen Frage zu begegnen, ob dann diese kleine Weißkurve nicht vielleicht ganz entbehrlich sei: ein wesentlich niedrigerer Zug ist auch unmöglich. Dann geht, abgesehen von allen anderen Schwierigkeiten, die Beziehung zu den Farbenblinden verloren.

Wird die objektive Helligkeit des Spektrums mehr und mehr verringert, so nimmt natürlich die relative Höhe der Weißkurve allmählich zu, bis sie zuletzt, bei den schwächsten Lichtintensitäten, allein vorhanden ist.

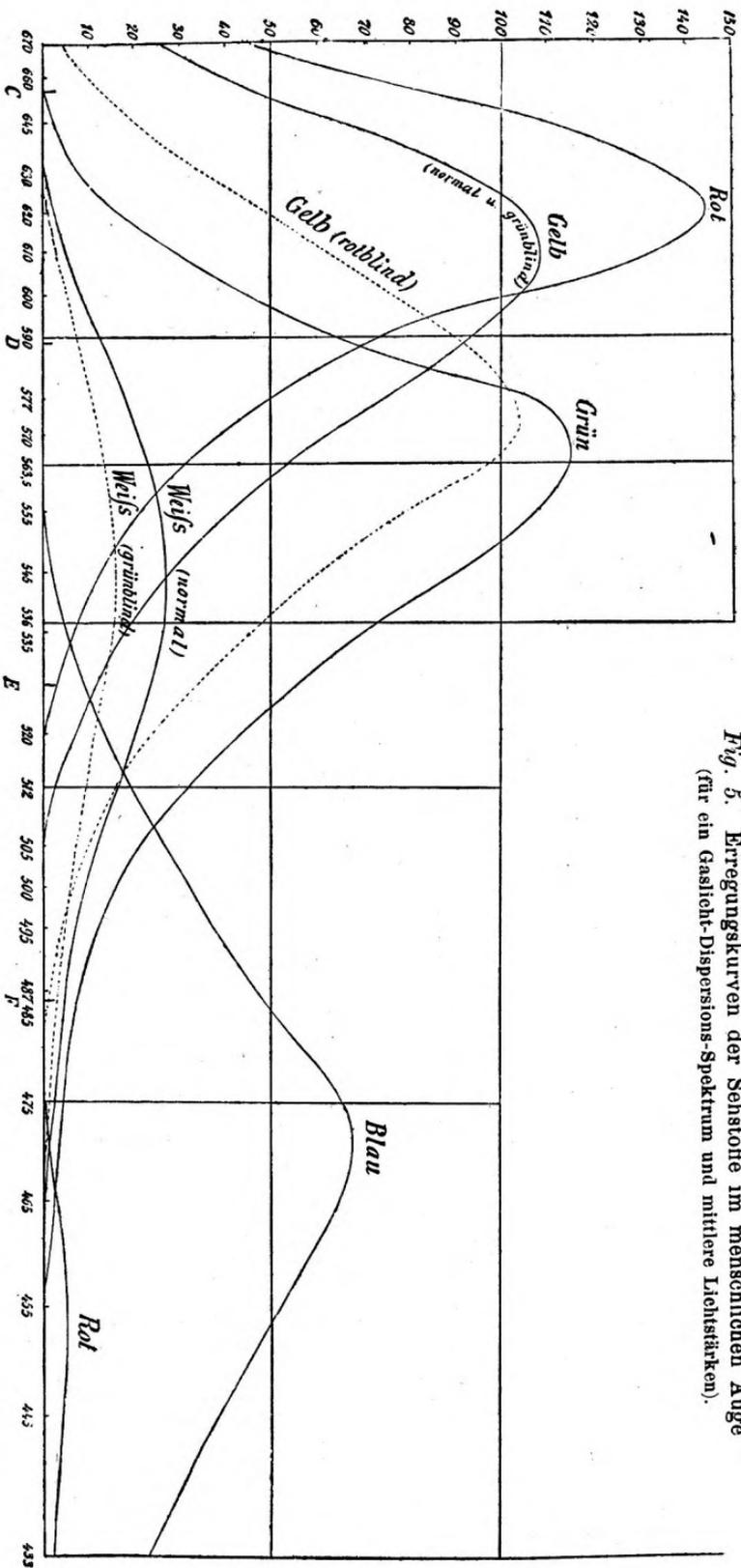


Fig. 5. Erregungskurven der Sehstoffe im menschlichen Auge (für ein Gaslicht-Dispersions-Spektrum und mittlere Lichtstärken).

Tabelle III.

Wellenlänge	A. Ordinaten der Erregungskurven.					B. Empfindungswerte nach Kompensation der gegenfarbigen Erregungen.				
	Rot	Grün	Gelb	Blau	Weiß	Rot	Grün	Gelb	Blau	Weiß
720 $\mu\mu$	5	—	2,7	—	—	5	—	2,7	—	—
700 "	13,8	—	7,8	—	—	13,8	—	7,8	—	—
685 "	26,1	—	14,5	—	—	26,1	—	14,5	—	—
670 "	43	—	24	—	—	43	—	24	—	—
661 "	61	—	34,5	—	—	61	—	34,5	—	—
660 "	64	—	36	—	—	64	—	36	—	—
650 "	94	1	51	—	—	93	—	51	—	2
645 "	105,3	2	61	—	—	103,3	—	61	—	4
630 "	133,5	7	89	—	0,2	126,5	—	89	—	14,2
628 "	137	8	93	—	0,5	129	—	93	—	16,5
620 "	144,4	14	104	—	1,8	130,4	—	104	—	29,8
610 "	134	26	108,5	—	4	108	—	108,5	—	56
606 "	126	32	108	—	5,4	94	—	108	—	69,4
600 "	106,5	43	103	—	7,3	63,5	—	103	—	93,3
590 "	74	61,5	93	—	11,3	12,5	—	93	—	132,3
577 "	51	103,8	74,5	—	17,3	—	52,8	74,5	—	119,3
563,5 "	31	114,9	53,5	—	22,6	—	83,9	53,5	—	84,6
555 "	22	107,7	41,2	—	25	—	85,7	41,2	—	69
545 "	13	92,5	28,5	1,6	26,7	—	79,5	26,9	—	55,9
536 "	7,8	73	19	4,2	26,4	—	65,2	14,8	—	50,4
535 "	7	71	18	4,7	26,2	—	64	13,3	—	49,6
512 "	—	31,3	2	19,5	15,8	—	31,3	—	17,5	19,8
505 "	—	21,8	—	25,5	11,7	—	21,8	—	25,5	11,7
495 "	—	11,7	—	36	6,8	—	11,7	—	36	6,8
485 "	—	6,7	—	49,2	3,9	—	6,7	—	49,2	3,9
478 "	—	4,4	—	60,8	2,4	—	4,4	—	60,8	2,4
475 "	—	3,8	—	65,2	2	—	3,8	—	65,2	2
471,5 "	—	3	—	66,5	1,2	—	3	—	66,5	1,2
465 "	2	1,5	—	64,3	0,4	0,5	—	—	64,3	3,4
464 "	2,4	1,3	—	63	0,2	1,1	—	—	63	2,8
463 "	2,7	1,1	—	62,3	—	1,6	—	—	62,3	2,2
455 "	4,2	—	—	52,5	—	4,2	—	—	52,5	—
445 "	3,5	—	—	39,2	—	3,5	—	—	39,2	—
433 "	2	—	—	24	—	2	—	—	24	—
420 "	1	—	—	10,5	—	1	—	—	10,5	—

Tabelle IV.

I. $L_\lambda = a L_{670}$				II. $L_\lambda = a L_{670} + L_{563.5} - c L_\lambda'$					
λ	α			λ	α	b	λ'	c	
720 $\mu\mu$	0.1173			670 $\mu\mu$	1.—	0.—	—	—	
700 "	0.3207			590 "	1.819	0.7907	478 $\mu\mu$	0.1055	
685 "	0.6077			577 "	0.7257	0.9938	471,5 "	0.0322	
670 "	1.000			563,5 "	0.—	1.—	—	—	
660 "	1.491			—	—	—	—	—	
III. $L_\lambda = a L_{670} + b L_{590}$				IV. $L_\lambda = a L_{590} + b L_{536}$					
λ	a	b	Hypothetischer Zusatz von L_{475} auf der monochromatischen Seite.	λ	a	b	Hypothetischer Zusatz von L_{475} auf der monochromatischen Seite.		
670 $\mu\mu$	1.—	0.—	—	590 $\mu\mu$	1.—	0.—	—		
645 "	2.392	0.0424	—	577 "	0.5619	0.9353	0.13		
630 "	2.898	0.1501	0.10	563,5 "	0.2402	1.337	0.19		
620 "	2.952	0.2800	0.11	555 "	0.1228	1.342	0.15		
610 "	2.358	0.5040	0.08	545 "	0.0281	1.228	0.07		
600 "	1.264	0.7615	0.04	536 "	0.—	1.—	—		
590 "	0.—	1.—	—	—	—	—	—		
V. $L_\lambda = a L_{590} + L_{512} - c L_\lambda'$									
λ	a	b	λ'	c	Hypothetisch geänderter Wert von c .				
	1.—	0.—	—	—	—				
77 "	0.6905	1.978	471.5 $\mu\mu$	0.9298	0.68 ¹				
563.5 "	0.4135	2.896	464 "	1.111	1.02				
512 "	0.—	1.—	—	—	—				
VI. $L_\lambda = a L_{536} + b L_{475} - c L_\lambda'$				VII. $L_\lambda = a L_{512} + b L_{475} - c L_\lambda'$					
λ	a	b	λ'	c	λ	a	b	λ'	c
536 $\mu\mu$	1.—	0.—	—	—	512 $\mu\mu$	1.—	0.—	—	—
512 "	0.3775	0.2822	661 $\mu\mu$	0.0922	505 "	0.6241	0.2315	650 $\mu\mu$	0.0013
475 "	0.—	1.—	—	—	495 "	0.2849	0.4319	628 "	0.0013
—	—	—	—	—	485 "	0.1160	0.6324	606 "	0.0007
—	—	—	—	—	475 "	0.—	1.—	—	—
VIII. $L_\lambda = a L_{485} + b L_{463}$				IX. $L_\lambda = a L_{475} + b L_{433}$					
λ	a	b		λ	a	b			
485 $\mu\mu$	1.—	0.—		475 $\mu\mu$	1.—	0.—			
475 "	0.4300	0.7406		465 "	0.4994	1.327			
463 "	0.—	1.—		455 "	0.1878	1.664			
—	—	—		445 "	0.0445	1.520			
—	—	—		433 "	0.—	1.—			

¹ Siehe Note auf der folgenden Seite.

Tabelle IV.

(Fortsetzung.)

Außerdem kommt in Betracht:

X. Die Tabelle der Komplementärfarben (KÖNIG-DIETERICI, Tab. IX, S. 288 und 289). An Stellen des Spektrums, deren Licht sich zu Weiß ergänzt, müssen die erregten Gegenfarben in gleichem Verhältnis zu einander stehen. Ich reproduziere aus der Tabelle (und der zugehörigen Figur) folgende Paare:

1. L_{512} ist (für D.) komplementär zu allem Licht von größerer Wellenlänge, als $665 \mu\mu$.

2. L_{588} ist komplementär zu dem Licht etwa von 485 bis $470 \mu\mu$.

3. L_{610} ist komplementär etwa zu L_{507} .

XI. Eine Mischung von $1,674 L_{670} + L_{535}$ ist (für D.) im Farbenton gleich L_{590} , d. h. das Verhältnis der farbigen Erregungen zu einander ist in der Mischung dasselbe, wie in dem monochromatischen Licht; auch ist die Helligkeit beiderseits gleich, nur die Sättigung ist verschieden. (KÖNIG-DIETERICI, Tab. XI, S. 292).

¹ Diese ziemlich beträchtliche hypothetische Änderung ist durch die Auseinandersetzungen S. 221—224 nicht motiviert (da bei den Gleichungen V ja eine Sättigungsausgleichung stattgefunden hat); sie wird also auf Bedenken stoßen. Dazu ist folgendes zu bemerken. Die an sich notwendigen, aber ihrer wahren Größe nach unbekanntem Korrekturen der Gleichungen III und IV sind so gewählt, daß die Gleichungen jetzt nicht nur für die Farbentüchtigen, sondern auch für die Farbenblinden, und zwar speziell für die beiden von KÖNIG und DIETERICI untersuchten Grünblinden, gültig sind. Dies ist bei KÖNIG-DIETERICI nicht der Fall, muß aber notwendig gefordert werden, da ja die Mischungsgleichungen der Farbentüchtigen von den Farbenblinden anerkannt werden. Nun stimmt die oben geänderte Gleichung V in ihrer Originalgestalt wieder auf keine Weise zu den von KÖNIG-DIETERICI selbst bestimmten Empfindungskurven der Grünblinden. Da nun aber einmal die übrigen Korrekturen so getroffen sind, daß die geänderten Gleichungen gleichzeitig für die Farbentüchtigen und die Grünblinden gelten, muß diese Übereinstimmung auch für die Gleichungen V hergestellt werden, und das bedingt nun in diesem einen Falle eine etwas größere Änderung. Jedenfalls steckt hier irgendwo eine Unregelmäßigkeit. Ob gerade bei der obigen Gleichung oder vielleicht bei den betreffenden Gleichungen der Grünblinden, bedarf der Untersuchung.

3). Durch die gemeinsame Beziehung auf die Weisserregung wird auch für die Flächen der Rot- und Grünkurve einerseits und der Gelb- und Blaukurve andererseits ein bestimmtes Verhältnis zu einander vorgeschrieben. Leider sind zur genaueren Bestimmung dieses Verhältnisses keine hinreichend zwingenden Anhaltspunkte gegeben. Eine der hauptsächlich in Betracht kommenden Gleichungen z. B. (Tab. IV, No. XI) ist nur eine Farbentongleichung und also unbestimmt. Das Höhenverhältnis der Rot- und Grünkurve einerseits zu der Blau- und Gelbkurve andererseits könnte also innerhalb einer gewissen Breite auch anders gewählt werden, ohne daß die Übereinstimmung mit den Mischungsgleichungen verloren ginge. Das flach verlaufende Stückchen der Rotkurve am kurzwelligen Ende macht außerdem auf Genauigkeit keinen Anspruch, sondern soll nur eine Andeutung sein, daß hier noch eine Roterregung stattfindet.¹

4). Es folgt aus dem Gesagten, daß die einzelnen Kurven nicht als etwas für sich Bestehendes betrachtet und etwa isoliert mit den Mischungsgleichungen verglichen werden dürfen. Sondern da, wo gegenfarbige Erregungskurven übereinandergreifen, hängt der Verlauf jeder Kurve zugleich ab von dem der gegenfarbigen Kurve, dadurch von dem Verlaufe der Weißkurve und dadurch weiter sogar von dem Verlaufe des anderen gegenfarbigen Kurvenpaares. Wegen dieser allseitigen Verflechtung war begreiflicherweise die Konstruktion der Kurven in der mittleren Hälfte des Spektrums eine äußerst mühsame und zeitraubende Aufgabe. Daß es gleichwohl möglich war, diese zu lösen und somit die Mischungsthaten und die theoretischen Voraussetzungen unter erschwerenden Umständen als zu einander stimmend nachzuweisen, scheint mir, trotz der erforderlichlich gewesenen mäfsigen Korrekturen der Mischungsgleichungen, als ein kräftiges Argument zu Gunsten der Theorie in Betracht zu kommen.

¹ Die vielleicht manchem auffallenden großen Verschiedenheiten in Höhe und Gestalt der einzelnen Kurven liegen wesentlich an ihrer Beziehung auf das Dispersionsspektrum mit seiner ungleichen Verteilung der Dichtigkeit der Wellenlängen. Werden sie auf das Interferenzspektrum als Abscissenaxe bezogen, so werden die Rot- und Grünkurve fast symmetrisch zu einander, außerdem tritt eine gewisse Ähnlichkeit der Rotkurve mit der Gelbkurve und der Grünkurve mit der Blaukurve besser hervor.

Denn in der That werden nun die oben (S. 221) aufgestellten Forderungen durch diese Kurven erfüllt. Die Gelb- und Blaukurve sind konstruiert nach den von KÖNIG und DIETERICI für ihre beiden Grünblinden gefundenen Mischungsgleichungen (a. a. O., Tab. V und VI). Sie gelten also gleichzeitig für das normale Auge und für diese Grünblinden, soweit überhaupt einzelne Kurven mehreren voneinander immer etwas differierenden Individuen gleichzeitig gerecht werden können. Die Weißkurve stimmt überein mit der Helligkeitsverteilung in einem sehr lichtschwachen Spektrum oder in dem Spektrum des total Farbenblinden. Dafs sie für das grünblinde Auge etwas tiefer verläuft, als für das farhentüchtige, liegt wesentlich an der gewählten Darstellungsweise. Die gesamte chromatische Wirkung des Lichtes auf die Retina des Grünblinden ist dargestellt durch zwei Flächen, eben die von der Gelb- und Blaukurve umschlossenen. Bei dem Farhentüchtigen entfallen auf die Darstellung derselben Wirkung vier Flächen, nämlich aufer den beiden eben genannten noch die etwas gröfseren, von der Rot- und Grünkurve umgrenzten. Hat nun, wie doch einigermafsen wahrscheinlich, die Weißerregung in dem ersten Fall ungefähr dasselbe quantitative Verhältniß zu der chromatischen Erregung wie in dem zweiten, so muß sie auch dort durch eine kleinere Fläche repräsentiert werden, als hier.

Endlich greifen, wie theoretisch gefordert, die Erregungskurven der Gegenfarben teilweise übereinander. Namentlich bei der Rot- und Grünkurve ist dies sehr stark der Fall, und daraus erklärt es sich, dafs die Farben von Orange bis Gelbgrün relativ weißlich sind und infolgedes das normale Auge sich hier als ziemlich unempfindlich gegen Sättigungsunterschiede erweist.

Zur Vergleichung ist noch die Gelbkurve des sogenannten Rotblinden eingezeichnet, konstruiert nach den KÖNIG-DIETERICISCHEN Mischungsgleichungen für Sakaki (a. a. O., Tab VII). Die zugehörige Weißkurve würde noch etwas tiefer verlaufen, als die für das grünblinde Auge gültige, ist aber der Übersichtlichkeit halber fortgelassen; die Blaukurve stimmt ungefähr überein mit der normalen. Jene Gelbkurve stellt sich dar als eine etwas nach dem kurzwelligen Ende des Spektrums verschobene normale Gelbkurve. Sie verläuft infolge der Verschiebung

einigermaßen parallel zu der normalen Grünkurve, hat aber einen anderen Typus als diese.¹

Bekanntlich werden die Farbgleichungen des normalen Auges auch von den partiell Farbenblinden anerkannt. Für die Grünblinden ist dies sofort verständlich. Damit eine Gleichung für den Farbentüchtigen gültig sei, muß sie unter anderem für die in seiner Retina stattfindende Gelb- und Blauerregung gültig sein. Diese bestehen bei dem Grünblinden in ganz derselben relativen Verteilung, die Gleichung muß also auch für ihn gelten. Daß sie auch für den Rotblinden stimmt, ist dagegen als halber Zufall zu bezeichnen. Seine Gelbkurve verläuft als eine Art Mittelding zwischen der Gelb- und Grünkurve des normalen Auges. Mischungen, die für diese beiden richtig sind, können daher in zahlreichen Fällen auch für jene annähernd stimmen. Ich möchte aber vermuten, daß sich bei genauestem Zusehen solche Übereinstimmungen als nicht so durchgängig und nicht so genau herausstellen werden, wie diejenigen zwischen Norm und Grünblindheit.

Für den total Farbenblinden gelten die Gleichungen des normalen Auges in keiner Weise. Nach der HERINGSchen Theorie ist das schwer verständlich. Der Farbentüchtige und der total Farbenblinde haben dieselbe Weißsubstanz mit derselben Art der Erregbarkeit. Außerdem spielt diese Substanz bei dem Farbentüchtigen nicht etwa eine untergeordnete Rolle, sondern ihr Gewicht soll im allgemeinen bei jeder Erregung viel bedeutender sein, als das der farbigen Substanzen. Stellt nun aber der Farbentüchtige eine Gleichung her, die doch, um richtig zu sein, auch für seine Weißerregung stimmen muß,

¹ Hoffentlich wird niemand dadurch in die Irre geführt, daß die Gipfel der beiden Gelbkurven und der Blaukurve sich in Fig. 5 an anderen Stellen befinden, als in der früheren Fig. 4. Dort handelte es sich um ein Sonnenlichtspektrum, hier um ein Gaslichtspektrum. Oben mußte ich jenes wählen, um die Beziehung zu den KÜHNESchen Originalbeobachtungen aufzudecken; hier bin ich an dieses gewiesen, um die Beziehung zu den KÖNIG-DIETERICISchen Originalgleichungen nicht zu verlieren. Wird das Gaslichtspektrum in ein Sonnenlichtspektrum umgerechnet, so bekommt alles wieder die in Fig. 4 gezeichnete Lage. Daß die Gelb- und Blaukurve in Fig. 5 nicht in der Gegend von *F* übereinandergreifen (wie die Absorptionsspektren des Sehpurpurs und Sehgelb), sondern in der Gegend von *E*, hat ganz denselben Grund.

dann wird sie von dem total Farbenblinden mit seiner gleichartigen Weißerregung nicht anerkannt.

Für die hier entwickelte Theorie ist die Sache einfach genug. Die Weißempfindung beruht in der Norm nicht nur auf Zersetzung der Weißsubstanz, sondern außerdem auch auf einer gleichzeitigen Zersetzung gegenfarbiger Substanzen. Diese findet im Spektrum an mehreren Stellen statt, besonders stark von Orange bis Gelbgrün. Dadurch wird die relative Verteilung des Weiß im Spektrum für das normale Auge eine ganz andere, als für das total farbenblinde. Das Maximum der Weißempfindung z. B. liegt für dieses in der Gegend von *E*, für jenes in der Nähe von *D* (s. Tab. III, B), und natürlich können also für beide nicht dieselben Mischungsgleichungen Gültigkeit haben.

Alle Erscheinungen des Farbensehens, die bei den gewöhnlichen mittleren Helligkeitsgraden zu beobachten sind, lassen sich aus meinen Kurven herauslesen und an ihnen anschaulich erläutern. So z. B. die von HESS gefundene Thatsache, daß bei zunehmend excentrischer Betrachtung nur drei Farben des Spektrums ihren Farbenton nicht ändern. Die betreffenden Stellen des Spektrums entsprechen den drei Schnittpunkten der Rot- und Grünkurve (im Gelb), der Gelb- und Blaukurve (im Grün) und der Grün- und Rotkurve (im Blau). Ferner die Verteilung der Unterschiedsempfindlichkeit für Änderungen der Wellenlänge im Spektrum. Man wird naturgemäß zufolge des FECHNERSchen Gesetzes diese Empfindlichkeit da als relativ groß erwarten müssen, wo einerseits die einzelnen Kurven relativ steil verlaufen, wo aber gleichzeitig ihre Ordinatenhöhen relativ klein sind, also ungefähr da, wo (abgesehen von sehr kleinen Ordinaten) der Ausdruck

$$\left(\frac{dy_1/d\lambda}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{dy_2/d\lambda}{y_2}\right)^2 + \left(\frac{dy_3/d\lambda}{y_3}\right)^2 + \dots$$

(worin *y* die Kurvenordinaten und λ die Wellenlängen bezeichnet) ein Maximum ist. Bestimmt man nach ungefährender Schätzung solche Stellen in Fig. 5, so kommt man ziemlich genau auf die durch direkte Beobachtung gefundenen Punkte

größter Empfindlichkeit,¹ während z. B. die von KÖNIG und DIETERICI konstruierten drei Kurven in dieser Beziehung teilweise im Stich lassen.

Ich nehme aber Abstand von der eingehenderen Erörterung von Einzelheiten, die mit der vorgetragenen Theorie nicht in direktem Zusammenhang stehen. Denn, wie ich nochmals hervorhebe, die ganze Kurvenkonstruktion kann nicht absolut genaue, sondern nur provisorische Bedeutung beanspruchen, solange gewisse, an sich durchaus notwendige Korrekturen der zu Grunde liegenden Mischungsgleichungen ihrem genauen Betrage nach nicht bekannt sind.²

Dafür versuche ich, die Hauptpunkte meiner Theorie noch einmal kurz zusammenzufassen.

17. Zusammenfassung. Das normale Farbsehen wird vermittelt durch drei lichtempfindliche Substanzen in den äußersten Schichten der Retina, von verschiedener Verbreitung, verschiedener Absorptionsfähigkeit für das Licht und verschiedener Zersetzlichkeit.

Die eine von diesen, die Weißsubstanz, ist über die ganze Netzhaut verbreitet und zugleich am lichtempfindlichsten. Sie absorbiert die Lichtstrahlen fast des ganzen sichtbaren Spektrums, vorwiegend diejenigen mittlerer Wellenlänge. Das von ihr absorbierte Licht dient dazu, sie zu zersetzen. Dabei wird Energie frei in einer zur Nervenregung geeigneten Form, und das Resultat dieser Reizung manifestiert sich unserem Bewußtsein als Empfindung der Helligkeit (Weiß oder Grau). Die Substanz wird unablässig zersetzt (durch äußere oder innere Reize) und zugleich seitens des Organismus unablässig neugebildet, wobei nicht nur die gereizte Stelle, sondern auch

¹ Näheres u. a. bei BRODHUN, Über die Empfindlichkeit des grünblinden und des normalen Auges gegen Farbenänderung im Spektrum. *Diese Zeitschr.* III, S. 97 ff.

² Wegen nicht hinreichender Sicherheit des vorliegenden Materials enthalte ich mich auch einer Besprechung der sogenannten „anormalen Trichromaten“. Soweit ich ein unverbindliches Urteil wagen darf, möchte ich sagen, daß sie eine Art Übergangsstufe zwischen den Grünblinden und den Farbentüchtigten darstellen. Ihre Rot- und Grünsubstanz scheint noch weniger differenziert zu sein, als bei den Normalsehenden. Sie verhalten sich also zu diesen ähnlich, wie auf dem Boden der zweidimensionalen Farbensysteme die Rotblinden zu den Grünblinden.

deren Umgebung, ja in gewisser Weise die ganze Netzhaut sich beteiligt. Für das Bewußtsein indes machen sich, hier sowohl wie bei den anderen Sehstoffen, nur die Zersetzungsvorgänge, nicht auch die Regenerationen bemerklich.

Eine zweite Substanz ist in den Aufsengliedern der sog. Sehzellen (Stäbchen und Zapfen) enthalten. Sie reicht also nicht ganz bis an die äußerste Peripherie der Netzhaut, ist auch nicht so lichtempfindlich wie die Weißsubstanz, aber dafür in sehr reichlicher Menge vorhanden. Diese Substanz ist identisch mit dem Sehpurpur; ihr Verhalten gegen das Licht kann also ganz unabhängig von allen hypothetischen Konstruktionen untersucht werden und ist bereits untersucht worden. In ihrem ursprünglichen Zustande ist sie purpurfarben, und zwar existiert sie in einer roteren und einer violetteren Modifikation. Sie absorbiert vorwiegend die (für die Empfindung) gelbroten bis grünen Strahlen; die Absorptionsmaxima ihrer beiden Modifikationen liegen zwischen D und E. Durch geeignete Belichtung wird auch diese Substanz zersetzt, aber nicht sofort in ihre letzten Spaltungsprodukte, sondern mit einer Zwischenstufe. Sie verschieft zunächst ins Gelbe, und dieses Sehgelb wird dann durch die Strahlen von Grün bis Violett weiter zersetzt. (Die grünen Lichtstrahlen wirken also gleichzeitig auf beide Substanzen). Die Produkte der letzten Zersetzung werden von dem Organismus verwertet, um daraus die ursprüngliche Substanz, den Sehpurpur, wiederherzustellen, wobei möglicherweise kurzweiliges Licht unterstützend mitwirkt, übrigens auch wieder die ganze Netzhaut beteiligt ist.

Die Wirkungen dieser Prozesse auf das Sehorgan manifestieren sich nun, wie ich annehme, für das Bewußtsein in doppelter Weise. Zunächst wird bei den Zersetzungen des Sehpurpurs und des Sehgelb, ganz wie bei denen der Weißsubstanz, Energie frei (naturgemäß aus dem Sehgelb in geringerer Menge als aus dem höher zusammengesetzten Sehpurpur). Diese bewirkt Reizung des Nerven, und deren Effekte werden uns schließlichsch bewußt, ganz wie vorhin, als Empfindungen der Helligkeit. Die aus der jederzeitigen Zersetzung der Weißsubstanz stammende gleichartige Empfindung wird hierdurch lediglich verstärkt, da der Nerv ja keine Unterscheidungsfähigkeit dafür besitzt, woher die ihn erregende Energie stammt. Zugleich aber erhält in diesem Falle die nervöse

Erregung einen eigentümlichen, seinem Wesen nach unbekanntem Nebencharakter, der provisorisch als Rhythmisierung der Reizung oder der Erregung bezeichnet wurde. Die infolge der Zersetzungsprozesse hervorgerufenen Helligkeitsempfindungen erhalten dadurch eine eigenartige Tönung, und zwar bei Zersetzung des Sehpurpurs eine Tönung ins Gelbe, bei Zersetzung des Sehgelb eine Tönung ins Blaue. Zusammen vertragen die beiden Erregungsrhythmen sich nicht; sie haben etwas Antagonistisches und stören sich gegenseitig. Werden also Sehpurpur und Sehgelb gleichzeitig zersetzt (d. h. sehen wir gelbes und blaues Licht gemischt), so schwächt eine farbige Tönung die andere ab. Blau und Gelb sind Gegenfarben. Bei einem bestimmten Mengenverhältnis beider Erregungen fällt der chromatische Charakter der Empfindung völlig fort. Die bei jenen Zersetzungen frei werdende Energie wird aber davon nicht berührt, die in dem Gelb und Blau enthaltenen Helligkeitsempfindungen bleiben also ungestört bestehen. D. h. wir sehen bei geeigneter Mischung der beiden Gegenfarben lediglich die Summe ihrer Helligkeiten (die zum Teil aus Zersetzung der Weißsubstanz stammen) als Weiß oder Grau.

Eine dritte Substanz (Rotgrünsubstanz) ist beim Menschen bloß in den Aufsengliedern der Zapfen vorhanden. Sie hat also die beschränkste Verbreitung, ist aber etwas leichter zersetzlich, als der Sehpurpur. Von Hause aus ist sie grün gefärbt und existiert möglicherweise isoliert in den grünen Stäbchen der Froschretina. Da ihre Farbe beinahe komplementär ist zu der des Sehpurpurs, so neutralisieren die beiden Substanzen da, wo sie zusammen vorkommen, ihre Färbung gegenseitig, und die Aufsenglieder der Zapfen erscheinen deshalb farblos. Die physikalischen Eigenschaften dieser Rotgrünsubstanz und ihre Bedeutung für das Sehen sind ganz analog zu denken den Eigenschaften und der Bedeutung des Sehpurpurs. Bei geeigneter Belichtung (durch Strahlen längster und kürzester Wellenlänge) verschiebt die ursprünglich grüne Substanz zunächst in ein rotes Zwischenprodukt, ähnlich also wie die absterbenden Blätter des wilden Weins. Dieses wird durch Strahlen mittlerer Wellenlänge weiter zersetzt, und aus den letzten Spaltungsprodukten wird dann durch die Kräfte des Organismus die grüne Ausgangssubstanz regeneriert. Von

Orange bis Gelbgrün greifen die Absorptionsspektren der beiden Substanzen übereinander.

Bei jenen beiden Zersetzungen nun wird Energie frei, deren Einwirkung auf den nervösen Apparat wieder als Helligkeit zum Bewußtsein kommt. Bei beiden überträgt sich die Erregung auf den Nerven mit einem spezifischen Nebencharakter, in einem besonderen Rhythmus, durch den die Helligkeitsempfindung eine chromatische Tönung erhält. Die Zersetzung der ursprünglichen Substanz empfinden wir auf diese Weise als Rot, die ihres roten Zwischenproduktes als Grün. Beide spezifische Rhythmen endlich haben auch hier wieder etwas Antagonistisches, sich Störendes, so daß bei einer geeigneten Mischung von Rot und Grün die chromatischen Charaktere beider Empfindungen sich neutralisieren, und wir nur die Summe ihrer Helligkeiten als Weiß empfinden.

So in Bezug auf das normale Sehen. Was die hauptsächlichsten pathologischen Modifikationen betrifft, so sind die gewöhnlichen Farbenblinden Individuen, denen die Rotgrünsubstanz abgeht, die infolgedes von Farben im engeren Sinne nur Gelb und Blau empfinden. Die Art und Weise, wie sie diese im Spektrum verteilt sehen, wird durchaus bedingt durch die Absorptionsspektren des Sehpurpurs und des Sehgelb. Die bei ihnen beobachtete Verschiedenheit ferner von sog. Rotblindheit und Grünblindheit beruht auf dem Vorkommen des Sehpurpurs in zwei Modifikationen.

Bei den Zuständen sogenannter Farbenschwäche oder bei ungleichmäßigen Beeinträchtigungen von Gegenfarben bestehen Störungen irgendwo centralwärts von der Stabzapfenschicht, durch welche die Erregungsrhythmen bei ihrer Übertragung auf das Centralorgan in mehr oder minder kapriciöser Weise alteriert werden. Derartige Schädigungen liegen auch vor bei den cerebralen Affektionen des Farbensehens, infolge von Hysterie, Apoplexie u. s. w.

Bei totaler Farbenblindheit endlich fehlen entweder die beiden chromatischen Substanzen gänzlich, oder es werden die von ihnen herrührenden chromatischen Rhythmen durch centralwärts bestehende Störungen gänzlich aufgehoben, während eine Fortleitung des bloßen Erregungsquantums noch möglich ist.

Inhaltsübersicht.

I. Die HELMHOLTZsche Theorie.

	Seite
1. Das lichtschwache Spektrum.....	146
2. Erklärungsversuch.....	150
3. Neue Schwierigkeiten.....	153
4. Die Farbmischungen.....	156

II. Die HERINGSche Theorie.

5. Das lichtschwache Spektrum.....	166
6. Der Antagonismus der Gegenfarben.....	168
7. Dissimilierung und Assimilierung.....	178
8. Die beiden Typen der Farbenblindheit.....	182

III. Der Sehpurpur.

9. Seine Eigenschaften.....	185
10. Beziehung zu dem Sehen der Farbenblinden.....	189
11. Das normale Sehen.....	198
12. Bedenken.....	201

IV. Erklärung der Thatsachen.

13. Änderungen der objektiven Helligkeit.....	205
14. Indirektes Sehen.....	209
15. Farbenblindheit.....	213
16. Farbmischung.....	220
17. Zusammenfassung.....	234
