

ZWEITER THEIL.

DIE LEHRE VON DER LICHTEMPFindUNG.

VON

PROF. DR. A. FICK IN WÜRZBURG.

EINLEITUNG.

Die Strahlen, deren Gang durch die brechenden Medien des Auges wir im vorigen Abschnitte verfolgt haben, fallen zuletzt auf die im Hintergrunde des Auges ausgebreiteten Sehnervenenden, und bilden deren adäquaten Reiz. Es ist bekannt, dass auf die eigentliche Nervensubstanz strahlend fortgepflanzte Aetherschwingungen gar nicht oder nur dann reizend wirken, wenn sie dieselben in solcher Intensität treffen, dass dadurch eine für das Nervengewebe fast tödtliche Erwärmung hervorgebracht wird. Das Auge wird dagegen, wie die tägliche Erfahrung lehrt, von äusserst schwachen Strahlungen sehr merklich erregt. Solche aber, wie sie z. B. von einer durch schwachen Mondschein beleuchteten Fläche ausgesandt werden, können ganz sicher ein eigentliches Nervenelement, sei es Faser oder Zelle, nicht reizen. Man muss daher nothwendig annehmen, dass an den Enden der Sehnervenfasern besondere Apparate angebracht sind. Sie können nicht aus eigentlicher Nervensubstanz bestehen, deren molekulares Gleichgewicht durch so schwache Anstösse eben noch nicht in dem zum Entstehen einer Erregungswelle erforderlichen Grade gestört wird. Sie müssen vielmehr aus einem Stoffe bestehen, welcher wie etwa die photochemisch empfindlichen Substanzen die Eigenschaft haben, dass sie treffende Aetherschwingungen darin chemische Kräfte auslösen, welche eine weit grössere Arbeit zu leisten vermögen als die auslösenden Aetherschwingungen. Diese grössere Arbeit kann dann zur Erregung der mit diesen Apparaten zusammenhängenden Nervenenden verwandt werden. Nur auf diese Art kann die Erregung der verhältnissmässig trägen Nervensubstanz durch so märchenhaft ge-

ringförmige Arbeit, wie sie der schwächste noch sichtbare Lichtstrahl zu leisten im Stande ist, erklärt werden. Beiläufig bemerkt, giebt die enorme Reizbarkeit anderer Sinnesapparate zu analogen Folgerungen Anlass.

Es entsteht nun die Frage, welches von den zahlreichen unter dem Mikroskope unterscheidbaren Gewebeelementen der Netzhaut mit der grössten Wahrscheinlichkeit als dasjenige zu betrachten ist, in welchem jene Auslösung anderer Kräfte durch die Arbeit der Aetheroscillationen stattfindet. Um sie entscheiden zu können, müssen wir uns den anatomischen Bau der Netzhaut genau vorstellen.

ERSTES CAPITEL.

Bau der Netzhaut.

Nachdem der Sehnerv die Sklera und Chorioidea durchbohrt hat, breiten sich seine Faserbündel nach allen Seiten in der tunica retina aus, die daher zusammengesetzt ist aus den Fasern dieses Nerven, ihren Anhangsgebilden und einem bindegewebigen Stroma, in welches die eigentlich nervösen Elemente eingelagert sind. Da die Ausbreitung der Sehnervenfasern auf der inneren Seite der Netzhaut liegt und die übrigen Elemente nach aussen davon, so müssen diese Elemente natürlich an der Durchtrittsstelle des Sehnerven selbst fehlen, der die übrigen Schichten der Netzhaut gewissermaassen auch durchbohrt. Indem an dieser Stelle die Nervenfasern hervorquellen, entsteht daselbst eine Hervorragung nach innen, die sogenannte papilla nervi optici, welche ungefähr in der Mitte eine kleine trichterförmige Einsenkung zeigt, entsprechend dem allseitigen Auseinanderbiegen der Faserbündel. Hier treten auch die vasa centralia retinae an die innere Oberfläche der Netzhaut. Die Verzweigungen der Gefässe schliessen sich einzelnen Faserzügen der Sehnervenausbreitung an.

Die verschiedenartigen Gewebeelemente der Netzhaut sind im allgemeinen in Schichten geordnet, deren sich auf einem zur Flächenausbreitung senkrechten Schnitte 10 deutlich unterscheiden lassen.

In Fig. 35 ist ein solcher Schnitt schematisch dargestellt und die einzelnen Schichten durch Zahlen bezeichnet. Die Reihenfolge der Zahlen von unten nach oben fortschreitend, entspricht der Fort-

schreitung von innen nach aussen, d. h. von der Glaskörperseite zur Chorioidealseite, so dass man unten den Glaskörper, oben die Chorioidea sich zu denken hat. Die übliche Benennung der Schichten ist folgende:

1. Membrana limitans interna.
2. Nervenfaserschicht.
3. Ganglienzellenschicht.
4. Innere granulirte oder molekuläre Schicht.
5. Innere Körnerschicht.
6. Aeussere granulirte oder Zwischenkörnerschicht.
7. Aeussere Körnerschicht.
8. Membrana limitans externa.
9. Stäbchen- und Zapfenschicht.
10. Pigmentepithel.

Wie in der Zeichnung zu sehen, ist die ganze Dicke der Netzhaut von zahlreichen radialen Fasern durchzogen. Diese nach ihrem Entdecker MÜLLER'sche genannten Fasern hält man gegenwärtig zum grossen Theil für Elemente der stützenden Binde substanz, zu welcher ausserdem unzweifelhaft die Membrana limitans externa und interna gehört. Die limitans interna stellt sich bei genauerer Betrachtung dar als gebildet durch trichterförmige Ausbreitung radialer Fasern (wie auch in der Figur angedeutet ist), die an den Rändern miteinander verschmelzen. Die limitans interna wäre demnach keine ununterbrochene Schicht, sondern eher einem filigranartigen Gitterwerk zu vergleichen. Ein ebensolches Gitterwerk stellt auch die limitans externa dar, durch dessen Lücken die weiter unten zu beschreibenden Stäbchen und Zapfen durchtreten.

Die ganze stützende Binde substanz der Netzhaut kann man ansehen als ein schwammartiges Gewebe, in dessen Lücken die nervösen Elemente eingelagert sind. In der Faser-, Zellen- inneren und äusseren Körnerschicht sind die Lücken verhältnissmässig gross und

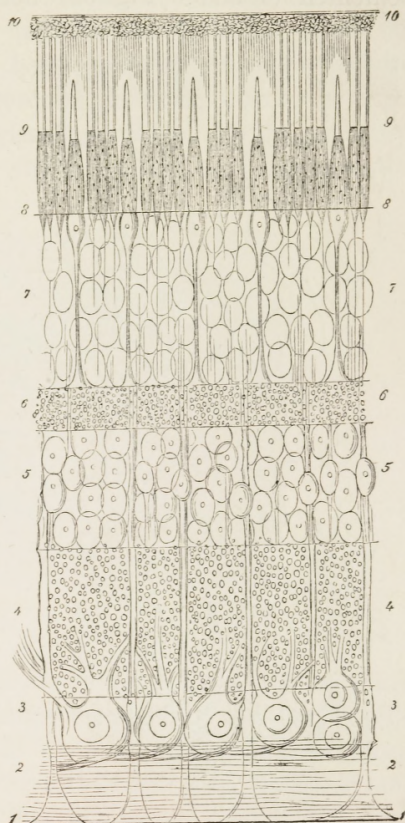


Fig. 35.

die Substanz reducirt sich auf einzelne radial gestellte Bälkchen — eben die schon erwähnten Radialfasern. In den beiden granulirten Schichten (4 und 6 Fig. 35) herrscht die Binde- substanz mehr vor,

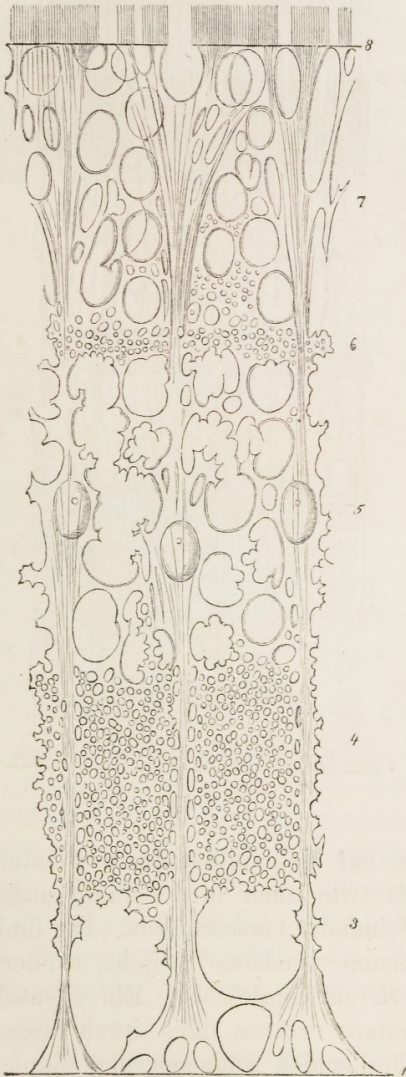


Fig. 36.

die Lücken sind kleiner. Von diesem ganzen in zwei Schichten dichteren, in den übrigen spärlicheren und mehr groblöcherigen Schwammgewebe wäre demnach die *membrana limitans interna* die innere, die *limitans externa* die äussere Grenze. Ueber die letztere hinaus erstrecken sich jedoch noch radiale Fortsätze der Binde- substanz zwischen die Elemente der äussersten Netzhautschicht. Eine Vorstellung von dieser Auf- fassung der Binde- substanz der Netzhaut, die von M. SCHULTZE aus- gebildet ist, kann Fig. 36 geben, wo die verschiedenen Schichten mit denselben Zahlen wie in Fig. 35 bezeichnet sind. Die beiden äussersten (9 u. 10) Schichten fehlen auf dieser Figur. Gewisse Körner der inneren Körnerschicht (5 Fig. 35 und 36) hält M. SCHULTZE für Kerne der radialen Bindegewebs- fasern und sind solche daher in das Schema der Binde- substanz (Fig. 36) aufgenommen, die übrigen Körner dieser Schicht aber hält er für nervöse Elemente.

Die unzweifelhaft nervösen oder wenigstens allgemein für nervös gehaltenen Elemente, welche in dem beschriebenen Binde- substanzlager eingebettet liegen, sind folgende. Die Opticusfasern

ziehen der Fläche parallel in der zweiten Schicht dicht unter der *limitans interna*. Es sind marklose Nervenfasern von grosser Feinheit. Sie gehen im Allgemeinen in Bündel gesondert strahlenartig von der

Eintrittsstelle des Sehnerven nach allen Seiten. Eine besondere Form aber haben die Faserzüge um den gelben Fleck herum, d. h. um die ausgezeichnete Stelle der Netzhaut, welche dem Hornhautscheitel ziemlich diametral gegenüber liegt und die schon früher (s. S. 66) als die Stelle des schärfsten Sehens bezeichnet ist. Diese Stelle wird von den Opticusfaserzügen umgangen, so dass sie nicht von einer Faserschicht bedeckt ist. Eine Anschauung von dem Gang der Faserzüge kann Fig. 37 geben, wo die Opticuspapille das Centrum der

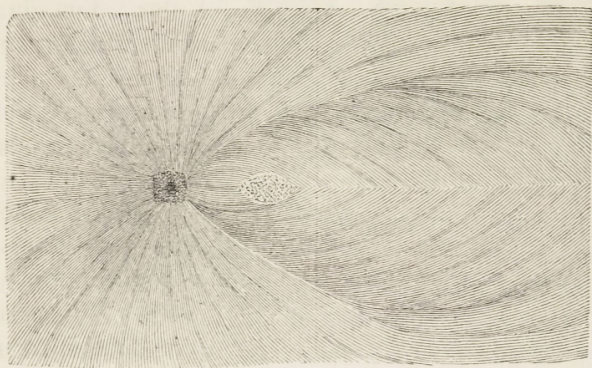


Fig. 37.

Ausstrahlung bildet und etwas rechts davon der gelbe Fleck zu sehen ist. Die Mächtigkeit der Sehnervenfaserschicht ist an der Papille am grössten, wo mehrere Fasern in der Dicke übereinanderliegen, und nimmt von da nach der ora serrata stetig ab. Schon 8 mm. von der Papille liegen die Fasern blos in einfacher Schicht, jedoch noch gedrängt. Noch weiter nach vorn ist die Faserschicht nicht mehr vollständig geschlossen.

Manche Forscher wollen Verzweigungen der Opticusfasern gesehen haben, doch wird dies von andern für eine Verwechslung gehalten und sind solche Verzweigungen in der That sehr unwahrscheinlich.

Die Ganglienzellen, welche die Hauptmasse der 3. Netzhautschicht ausmachen, gleichen in jeder Beziehung den multipolaren Ganglienzellen anderer Theile des Cerebrospinalorganes wie Fig. 38 zeigt, welche einige Ganglienzellen aus der Netzhaut des Kalbes in der für solche Objekte üblichen Vergrösserung darstellt. Unter den Fortsätzen jeder Ganglienzelle ist einer besonders ausgezeichnet durch seine Stärke und sein glänzendes Aussehen. Er bleibt ungetheilt und geht in eine Opticusfaser über, die andern Fortsätze gehen nach aussen und thei-

len sich alsbald in verschwindend feine Fädchen, welche sich in die granulirte Schicht verlieren. Ob die Ausläufer benachbarter Ganglienzellen sich untereinander verbinden ist nicht ausgemacht, jedoch wollen es manche Forscher beobachtet haben.

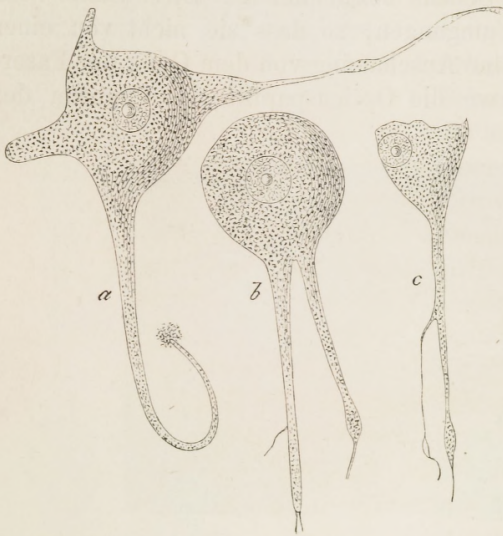


Fig. 38.

Die Ganglienzellenschicht ist im gelben Fleck am mächtigsten. Hier liegen in der Dicke 8—10 Zellen übereinander. Von da an nimmt die Mächtigkeit nach allen Seiten ab, so dass in einiger Entfernung die Zellen nur noch in einfacher Schicht aber dicht gedrängt neben einander liegen. Noch weiter gegen die ora serrata ist die Zellschicht nicht mehr ununterbrochen, sondern man findet nur vereinzelte durch mehr oder

weniger grosse Zwischenräume getrennte Zellen.

Die nervösen Elemente der inneren granulirten Schicht sind nicht vollkommen deutlich zu unterscheiden. Am wahrscheinlichsten sind es äusserst feine Fädchen, welche mit den äusseren Fortsätzen der Ganglienzellen zusammenhängen. Diese Fädchen scheinen einen verworrenen Filz zu bilden, der in das Lückensystem des hier reichlichen schwammigen Bindegewebes eingebettet ist.

Die Mehrzahl der Körner der inneren Körnerschicht hält man für nervöse Gebilde, da sie in ihrem Ansehen und in allen chemischen Reaktionen kleinen Ganglienzellen gleichen. Jedes solche Korn besitzt zwei Ausläufer deren einer nach innen einer nach aussen gerichtet ist. Der erstere dürfte in Zusammenhang stehen mit Fädchen der inneren granulirten Schicht der andere mit solchen der äusseren granulirten Schicht. In dieser letzteren scheint wie in der inneren granulirten Schicht ein Filz von nervösen Fäden vorhanden zu sein, die wahrscheinlich wie soeben ausgesprochen wurde mit den äusseren Ausläufern der Zellen der inneren Körnerschicht zusammenhängen. Von SCHWALBE wird übrigens dieser Zusammenhang in Abrede gestellt. Er behauptet, dass die äusseren Ausläufer der inneren Kör-

ner die äussere granulirte Schicht einfach durchsetzen ohne sich mit dem Faserfilz derselben zu verbinden. Dieser würde alsdann wohl für gar nicht nervös anzusehen sein. Es finden sich in der äusseren granulirten Schicht ausserdem zahlreiche sternförmige platte Zellen, denen die nervöse Natur von den besten Beobachtern aber abgesprochen wird.

In der äusseren Körnerschicht herrschen wieder die unzweifelhaft nervösen Elemente über die bindegewebigen sehr entschieden vor. Jedes Korn dieser Schicht hängt durch eine radiale Faser deutlich zusammen mit einem Elemente der Stäbchenschicht. Den zweierlei Elementen dieser letzteren entsprechend kann man daher Stäbchenkörner und Zapfenkörner unterscheiden, die auch im Bau, Grösse und Lage verschieden sind. Die Zapfenkörner sind nämlich grösser und liegen an der äusseren Seite der äusseren Körnerschicht, so dass sie eigentlich ohne Zwischenfaser unmittelbar mit den Zapfen zusammenhängen nur durch eine im Niveau der limitans externa befindliche Einschnürung vom Zapfen abgesetzt. Die Stäbchenkörner sind kleiner und durch einen mehr oder weniger langen radialen Faden mit ihren Stäbchen verbunden. Ferner zeigt jedes Stäbchenkorn ein Paar Querstreifen, die den Zapfenkörnern fehlen. Gegenüber dem mit einem Stäbchen oder Zapfen in Verbindung stehenden Ende sendet jedes Korn der in Rede stehenden Schicht einen radicalen Ausläufer nach innen, welcher in der äusseren granulirten Schicht untertaucht und hier nach der einen Auffassung in den Faserfilz eingeht oder sie durchsetzt um direkt in einen Ausläufer eines Kornes der inneren Körnerschicht überzugehen.

Die Schicht der Stäbchen und Zapfen besteht aus dichtgedrängten nervösen Elementen von zweierlei Art. Gemeinsam ist beiderlei Elementen die vorwiegende Ausdehnung in der radialen Richtung und die Zusammensetzung aus zwei deutlich unterscheidbaren Theilen dem sogenannten Innenglied und Aussenglied. In Fig. 35 ist deutlich zu sehen, wó das dunkler schattirte und punktirte Innenglied sich von dem hell gezeichneten ganz cylindrischen Aussenglied absetzt. Die Grenzen liegen gerade in der Linie, welche die beiderseits stehenden Zahlen 9 verbindet. Das Innenglied der Stäbchen sowohl als der Zapfen zeigt unter dem Mikroskop ganz das Ansehen einer Protoplasmamasse. Man sieht daran oft eine Längsstreifung, welche von einigen Autoren erklärt wird durch die Anwesenheit feiner Fäserchen, welche von der limitans externa zwischen die Elemente der Stäbchenschicht hineinragen.

Die Aussenglieder der Stäbchen und Zapfen zeichnen sich unter

dem Mikroskope durch starken Glanz aus. Sie scheinen aus einer sehr stark lichtbrechenden Substanz zu bestehen. Oefters ist auch an den Aussengliedern eine Längsstreifung wahrgenommen, welche von einigen auf das Vorhandensein einer Faser in der Axe derselben bezogen wird. Besonderes Gewicht haben manche neuere Autoren besonders M. SCHULTZE auf den Umstand gelegt, dass die Aussenglieder leicht der Länge nach in äusserst dünne Plättchen von grosser Regelmässigkeit zerfallen.

Bei dieser grossen Uebereinstimmung im Bau darf wohl angenommen werden, dass die Stäbchen und Zapfen nicht wesentlich verschiedene Gebilde sind. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Zapfen etwas dicker sind namentlich das Innenglied. Das Aussenglied des Zapfens ist dagegen ein wenig kürzer als das des Stäbchens und läuft nach aussen spitz zu.

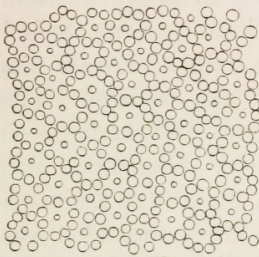


Fig. 39.

Die Vertheilung der beiderlei Elemente ist in verschiedenen Theilen der Netzhaut verschieden. Im gelben Fleck sind bloss Zapfen vorhanden. In der Nähe des gelben Fleckes ist jeder Zapfen von einem einfachen Kranze von Stäbchen umgeben, wie Fig. 39 zu sehen ist. Gegen die Ora serrata hin werden die Zapfen immer seltener, so dass die Stäbchenschicht senkrecht auf ihre Flächenausbreitung betrachtet den Anblick der Fig. 40 darbietet.

Mit den Aussengliedern der Stäbchen und Zapfen in engstem Zusammenhange stehen die Zellen des Pigmentepithels der Netzhaut.

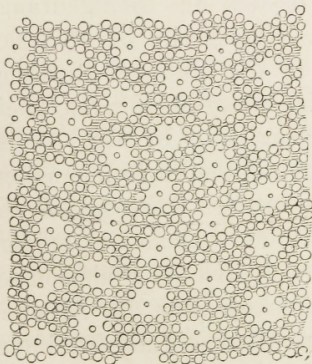


Fig. 40.

Es bildet ein regelmässiges Mosaik von platten sechseckigen Zellen, welche aber pigmentirte Fortsätze zwischen die Aussenglieder der Stäbchen und Zapfen hin-einerstrecken. Diese sind davon scheidentartig umgeben. In Fig. 41 sieht man unter *a* das Mosaik der Pigmentzellen in seiner Ausbreitung unter *b* sind zwei Zellen mit ihren Fortsätzen von der Seite zu sehen; unter *c* sieht man noch einige Stäbchenaussenglieder in den Pigmentzelle festhängen. Ueber die Schichten der Netzhaut ist endlich noch zu sagen,

dass die äussere Körnerschicht und was von ihr nach aussen liegt, vollständig gefässlos ist.

Der muthmaassliche Zusammenhang der sämmtlichen nervösen Elemente der Netzhaut ist in Fig. 42 übersichtlich dargestellt. Es wird allgemein angenommen, dass die Sehnervenfasern durch Vermitt-

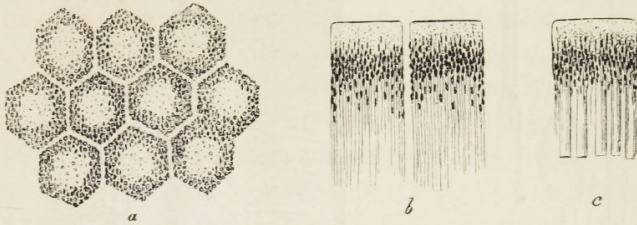


Fig. 41.

lung der Ganglienzellen und radialer Fasern, in welche Körner der inneren und äusseren Körnerschicht eingelagert sind, mit Stäbchen und Zapfen zusammenhängen. Streitig ist das Verhalten der radialen Nervenfasern in der inneren und äusseren granulirten Schicht indem einige Autoren (namentlich SCHULTZE) annehmen, dass hier die radialen Fasern in einen Faserfilz eingehen, andere (SCHWALBE) geneigt sind zu glauben, dass sie diesen Faserfilz ohne damit zusammenzuhängen durchsetzen.

In Fig. 43 ist endlich noch eine Darstellung eines senkrechten Schnittes durch die Gegend des gelben Fleckes, der physiologisch besonders ausgezeichnet ist. Die Schichten sind mit denselben Zahlen wie in Fig. 35 bezeichnet.

ZWEITES CAPITEL.

Ort der Reizung durch Lichtschwingungen.

I. Anatomische Betrachtungen.

Die Antwort auf die Frage, welche Elemente der Netzhaut durch Lichtstrahlen reizbar sind, lässt sich erstens in rein anatomischen Erwägungen suchen. Man muss offenbar annehmen, dass die reizbaren Vorrichtungen sich am äussersten peripherischen Ende der Verkettung nervöser Elemente finden, denn eine weitere Fortsetzung dieser Verkettung über den reizbaren Punkt hinaus hätte offenbar keinen Sinn. Nun sind, wie in den vorigen Paragraphen gezeigt ist, nach

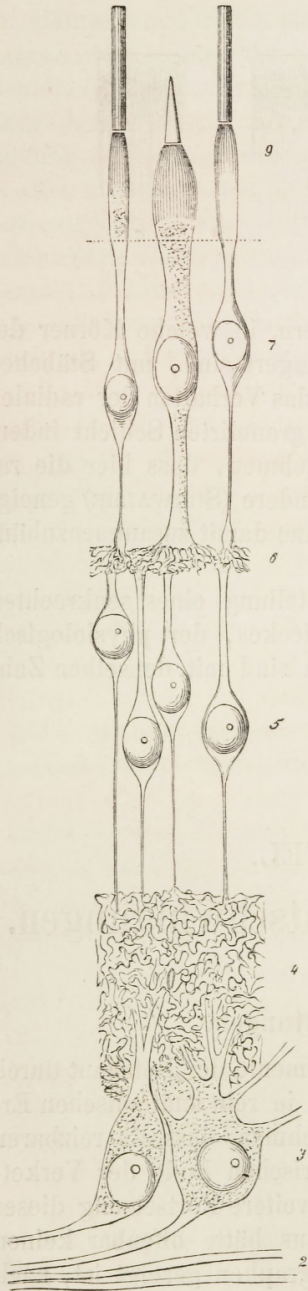


Fig. 42.

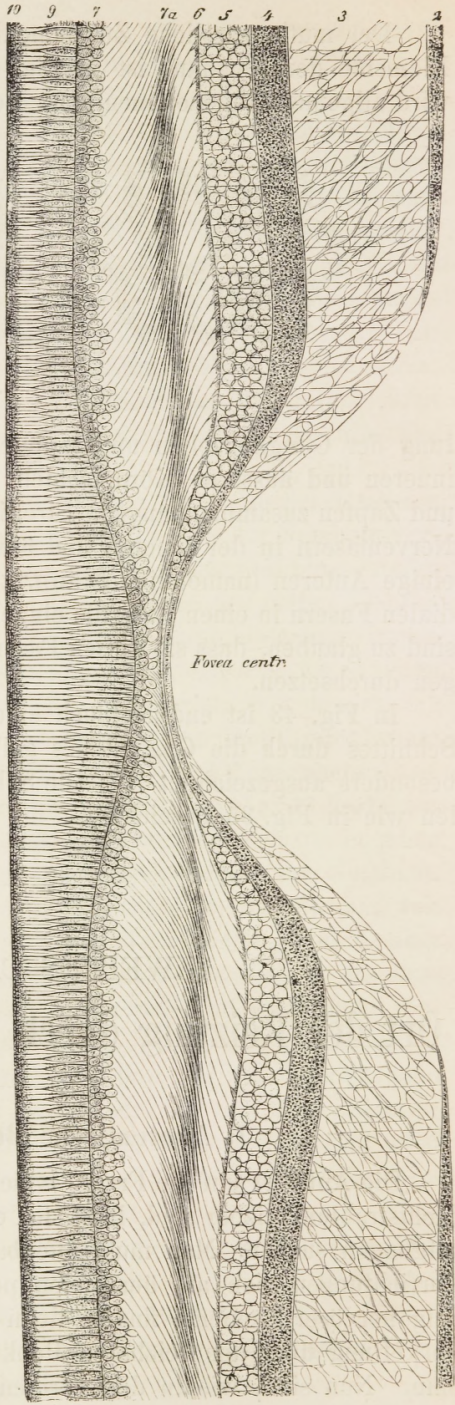


Fig. 43.

den bestbegründeten Annahmen der Anatomen die letzten peripherischen Glieder jener Verkettung nervöser Elemente in der Netzhaut die Stäbchen und Zapfen.

Zu demselben Ergebnisse führt aber die physiologische Ueberlegung. Die Thatsache, dass eine Gruppe dicht beieinanderliegender leuchtender Punkte als solche erkannt werden kann, d. h. dass jeder Punkt derselben gesondert gesehen wird, sobald ein optisches Bild dieser Gruppe auf die Retina fällt, zieht die Folgerung nach sich, dass die Schicht der Netzhaut, in welcher die Strahlungen zur Nervenreizung Anlass werden, einen mosaikartigen Bau besitzen muss. D. h. es muss jedes Element dieser Schicht in keiner zur betreffenden Netzhautstelle tangentialen Richtung eine ansehnliche Ausdehnung besitzen und es dürfen in der zur Netzhautfläche normalen Richtung nicht mehrere Elemente übereinanderliegen. Nur so ist es denkbar, dass jedes auf einen Punkt concentrirte Strahlenbündel eine und nur eine Empfindung bewirkt. Dieser mosaikartige Bau kommt aber nur der Schicht der Stäbchen und Zapfen zu. Wären z. B. die Sehnervenfasern selbst durch Lichtstrahlen reizbar, so würde eine längs eines Meridianes zum Rande der Netzhaut ziehende Faser nicht nur durch ein von einem leuchtenden Punkte ausgehendes Strahlenbündel gereizt werden, sondern von allen denen, welche ihre Vereinigungspunkte in den Punkten dieses Meridianes fänden und man könnte also alle die äusseren Punkte, deren Bilder auf diesem Meridian liegen, nicht unterscheiden, da ihre Strahlungen dasselbe nervöse Element reizten, also zusammen nur eine Empfindung hervorbrächten. Ueberdies liegen in der Nervenfaserschicht stellenweise mehrere Elemente gleicher Art hintereinander und würde also noch dazu jedes einzelne Strahlenbündel mehrere Elemente reizen, wenn sie reizbar wären. Das letztere gilt auch von den weiter nach aussen gelegenen Schichten der Ganglienzellen und der Körner und lässt also auch diese als ungeeignet erscheinen für die Angriffsstelle des Lichtreizes zu gelten.

II. Der blinde Fleck.

Ob die Sehnervenfasern in der That entschieden nicht durch Licht reizbar sind, lässt sich ganz direkt experimentell prüfen. Die Eintrittsstelle des Sehnerven in die Netzhaut enthält nämlich ausser Sehnervenfasern gar keine nervösen Elemente, weder Ganglienzellen noch Körner, Stäbchen oder Zapfen. Lässt man nun auf diese Stelle das Bild eines hellen Objectes fallen, so muss sich zeigen, ob die Sehnervenfasern reizbar sind oder nicht, denn wenn sie nicht reizbar

sind, so darf in diesem Falle gar keine Lichtempfindung entstehen. Dass dem wirklich so sei, lehrt der berühmte MARIOTT'sche Versuch. Er ist am einfachsten folgendermaassen anzustellen. Man bringe auf dunklem Grunde zwei kleine helle Marken in etwa 10 cm. Abstand von einander an, z. B. zwei weisse Oblaten auf schwarzem Papier. Fixirt man jetzt die rechts gelegene mit dem linken Auge aus etwa 35 cm. Entfernung, so wird die links gelegene unsichtbar. Ebenso wird die rechts gelegene unsichtbar, wenn man die links gelegene mit dem rechten Auge fixirt. Um die richtige Entfernung des Auges nicht zu verfehlen, geht man am besten aus bedeutend grösserer Entfernung an das gewählte Fixations-Zeichen allmählich heran und bemerkt dann bald, wann das andere Zeichen verschwindet und wann es bei noch weiterer Annäherung wieder auftaucht. Das nicht benutzte Auge muss bei dem Versuche geschlossen werden. Man kann übrigens auch schwarze Marken auf hellem Grunde zum Versuche benutzen, denn wenn eine Stelle der Netzhaut unerregbar durch Licht ist, so kann eben nicht unterschieden werden, ob Licht von einem Punkte des hellen Hintergrundes oder kein Licht von der dunkeln Marke darauf fällt. Ein schwarzer Punkt auf hellem Grunde verschwindet also auch, wenn sein Bild auf die fragliche unempfindliche Stelle der Netzhaut fällt.

Da aus den beschriebenen Thatsachen hervorgeht, dass die unsichtbaren Punkte des Gesichtsfeldes schläfenwärts vom fixirten Punkte liegen, so muss die unempfindliche Stelle der Netzhaut nasenwärts vom Pole derselben liegen.

Bei genauerer Zergliederung findet sich ferner meist die Mitte des unsichtbaren Fleckes etwas unterhalb des wagrechten Meridianes der Mittelpunkt der unempfindlichen Netzhautparthie liegt demnach meist etwas oberhalb dieses Meridianes, was für die Eintrittsstelle des Sehnerven bekanntlich zutrifft. Dass nun wirklich diese ganze Stelle und nicht etwa — wie manche behauptet haben — blos die Eintrittsstelle der vasa centralia retinae durch Licht nicht reizbar ist, geht aus der genaueren Untersuchung der Grösse und Gestalt des unsichtbaren Theiles des Gesichtsfeldes mit Sicherheit hervor. Bei einiger Uebung im Fixiren und Beobachten seitlich gelegener Objekte kann man den unsichtbaren Theil eines Papierblattes sehr leicht genau umschreiben. Man fixirt nämlich einen bezeichneten Punkt des Blattes und bringt die dunkle Spitze eines sonst hellfarbigen schreibenden Stiftes zunächst ins Innere des ungesehenen Raumes, schiebt ihn dann in irgend einer Richtung langsam vor bis die Spitze eben sichtbar wird, hier macht man ein Zeichen auf das Blatt und

verfährt gerade so in möglichst vielen verschiedenen Richtungen, dann erhält man ebensoviele Punkte von der Umgrenzung des unsichtbaren Theiles des Blattes. HELMHOLTZ zeichnete nach diesem von ihm angegebenen Verfahren den für sein rechtes Auge unsichtbaren Theil eines Papierblattes, wie es in Fig. 44 durch den schwarzen Fleck angegeben ist. Das Kreuzchen bei *a* ist der fixirte Punkt und die Linie *AB* der dritte Theil der zugehörigen Entfernung des Auges vom Papierblatte. Man sieht, dass die Form und Grösse des schwarzen Fleckes ganz wohl der papilla nervi optici entspricht. Denn sein Bild auf der Netzhaut in einem um $3AB$ abstehenden Auge würde einen Durchmesser von etwa 2 mm. haben, also den Durchmesser der vasa centralia retinae bei weitem übertreffen. Man sieht übrigens in der Figur, dass die Stellen wo die vasa centralia aus der Papille austreten auch noch in den Bereich der unempfindlichen Stelle gehören.

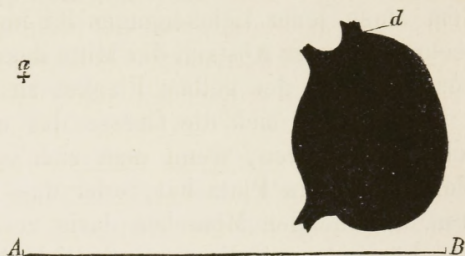


Fig. 44.

Der Winkel zwischen der Fixationsrichtung und dem Richtungsstrahl zum nächstbenachbarten Punkte des unsichtbaren Raumes beträgt nach LISTING $12^{\circ} 37'$, nach HELMHOLTZ $12^{\circ} 25'$, nach TH. YOUNG $12^{\circ} 56'$; der Winkel zwischen dem Richtungsstrahl zum äussersten Punkte des unsichtbaren Raumes und der Fixationsrichtung beträgt nach LISTING $18^{\circ} 33'$, nach HELMHOLTZ $18^{\circ} 55'$, nach TH. YOUNG $16^{\circ} 1'$. Der wagrechte Durchmesser des unsichtbaren Fleckes umspannt einen Gesichtswinkel von $3^{\circ} 39'$ bis $9^{\circ} 47'$, nach Messungen von HANNOVER und THOMSEN an 22 verschiedenen Augen. Das Mittel aus allen diesen Messungen beträgt $6^{\circ} 10'$. LISTING fand für diese Grösse den Werth $5^{\circ} 56'$, GRIFFIN in maximo $7^{\circ} 31'$, HELMHOLTZ $6^{\circ} 56'$, TH. YOUNG $3^{\circ} 5'$. HELMHOLTZ zweifelt jedoch an der Zuverlässigkeit dieser letzteren auffallend kleinen Angabe, weil YOUNG eine ungeeignete Methode angewandt habe. Aus den mitgetheilten Angaben lässt sich der Durchmesser der unempfindlichen Netzhautstelle berechnen, wenn man über die Entfernung des Knotenpunktes von der Netzhaut eine bestimmte Annahme macht. Setzt man sie = 15 mm., so ergibt sich für LISTING'S Auge 1,55 mm., für HELMHOLTZ'S Auge 1,81 mm. und als Mittel für die von HANNOVER und THOMSEN beobachteten Augen 1,61 mm. E. H. WEBER fand bei zwei

Leichenaugen den wagrechten Durchmesser der Eintrittsstelle des Sehnerven = 2,1 mm. und = 1,72 mm. was mit den soeben gefundenen Werthen des Durchmessers nahezu übereinstimmt, dagegen war der grösste Durchmesser des Stranges der vasa centralia nach den Messungen von WEBER nur 0,31 resp. 0,28 mm. Der Abstand der Mitte des gelben Fleckes von der Mitte der Sehnervenpapille betrug bei dem einen jener Leichenaugen 3,8 mm. und in LISTING'S Auge berechnet sich der Abstand der Mitte des unempfindlichen Netzhauttheils von der Mitte des gelben Fleckes zu 4,05 mm.

Man kann sich die Grösse des unsichtbaren Raumes recht anschaulich machen, wenn man sich vorstellt, dass etwa 11 mal der Vollmond darin Platz hat, oder dass das Gesicht eines etwas über 2 m. abstehenden Menschen darin verschwinden kann.

Lässt man auf die unempfindliche Netzhautstelle sehr starke Lichtstrahlen fallen, z. B. das Bildchen der Sonne, so erfüllt sich das ganze Gesichtsfeld mit einem Lichtschimmer aber offenbar nur darum, weil von den stark durchleuchteten Sehnervenfasern diffuses Licht auf der ganzen Netzhaut verbreitet wird und nicht etwa weil die starke Strahlung die Nervenfasern selbst reizt.

III. Seshärfe.

Es lassen sich durch Prüfung des Ortsinnes der Netzhaut noch weitere Gründe für die Annahme beibringen, dass gerade die Stäbchen und Zapfen die reizbaren Elemente der Netzhaut sind und dass wenigstens in gewissen Theilen dieses Organes jedes einzelne Element der äussersten reizbaren Schicht in isolirter Verbindung mit der Gegend des Nervensystems steht, deren molekulare Bewegungen für die äussere Anschauung eines Anderen das sind, was für die innere Anschauung des Subjektes selbst bewusstes Empfinden ist. Wenn nämlich dies der Fall ist, so ist es denkbar und es ist nur in diesem Falle denkbar, dass wenn zwei benachbarte Zapfen oder Stäbchen von zwei verschiedenen Lichtreizen getroffen werden, dadurch zwei unterscheidbare Empfindungen entstehen, und dass zwei Lichtempfindungen dann auf räumlich getrennte Objekte als Ursachen bezogen werden, wenn die gereizten Stellen nur um die Breite eines jener Elemente auf der Netzhaut von einander entfernt sind.

Ueber die Entfernung, in welcher sich zwei leuchtende Objekte von einander befinden müssen, um durch den Gesichtssinn als räumlich getrennt wahrgenommen zu werden, sind von verschiedenen Forschern Versuche angestellt. So erscheinen nach HOOKE zwei Sterne

nicht mehr als getrennt, wenn ihr Abstand einen Gesichtswinkel von weniger als $60''$ umspannt. Das schärfste von E. H. WEBER untersuchte Auge konnte zwei weisse Striche erst dann getrennt wahrnehmen, wenn die Entfernung derselben einen Gesichtswinkel von mindestens $73''$ umspannte. HELMHOLTZ konnte noch bei einer Entfernung, welche $64''$ spannt, die Striche getrennt sehen. Der Abstand zweier Netzhautpunkte aber, deren Richtungsstrahlen Winkel von $60''$, $64''$, $73''$ miteinander bilden, beträgt beziehlich $0,00438$ mm., $0,00464$ und $0,00526$ mm. Andererseits beträgt die Dicke eines Zapfens im gelben Fleck nach KÖLLIKER's Bestimmungen $0,0045$ bis $0,0055$ mm. Man sieht hiernach, dass die Thatsachen des Sehens ganz wohl zu der Annahme stimmen, dass jeder Zapfen des gelben Fleckes bei seiner Erregung eine besondere, von jeder anderen unterscheidbare Lichtempfindung vermitteln kann.

Auffallend kann nur erscheinen, dass die durch den anatomischen Bau der Netzhaut gegebene Grenze der Genauigkeit des Sehens auch wirklich nahezu erreicht wird, obgleich doch, wie im ersten Abschnitte gezeigt wurde, die optischen Bilder auf der Netzhaut, selbst bei möglichst vollkommener Einstellung des dioptrischen Apparates, mit grossen Fehlern behaftet sind. So sind die Zerstreuungskreise in Folge der Farbenabweichung bei 4 mm. weiter Pupille in weisser Beleuchtung mindestens $0,04$ mm. breit und es müssen also diese Zerstreuungskreise von zwei Punkten, die einen Winkelabstand von nur $70''$ am Kreuzungspunkte umspannen, schon weit übereinandergreifen. Dies Uebereinandergreifen der Zerstreuungskreise macht aber die Trennung der beiden Punkte im Bewusstsein nicht unmöglich, denn es kann ein Zapfen zwischen den beiden wahren Bildpunkten eine merklich verschiedene Beleuchtung haben von denen, welche diese Bildpunkte aufnehmen, weil, wie früher gezeigt wurde, die Lichtvertheilung in den Zerstreuungskreisen wegen der Farbenabweichung vom Centrum nach der Peripherie rasch abnimmt.

Wenn man parallele weisse Striche mit schwarzen Zwischenräumen aus solcher Entfernung betrachtet, dass die Breite des Zwischenraumes nahezu unter jenem Grenzwinkel erscheint, dann zeigt sich ehe das völlige Verschwinden der Striche ineinander eintritt, eine eigenthümliche Erscheinung. Die einzelnen Striche erscheinen nämlich stellenweise knotig angeschwollen oder geknickt, wie es in Fig. 45 unter *A* angedeutet ist. Bisweilen erscheint auch die ganze Figur mehr schachbrettartig gemustert. BERGMANN, der diese Erscheinung zuerst beschrieben hat, giebt derselben die Deutung, welche in Fig. 45 durch die Zeichnung unter *B* erläutert wird. Die Sechsecke sollen

das Zapfenmosaik andeuten und man sieht, dass wenn ein Streifenbild darauf entworfen wird, bei der gehörigen Kleinheit ein schwarzer Streif bald auf einen Zapfen beschränkt bleibt, bald sich auf zwei vertheilt, wo dies letztere der Fall ist, wird der Streif breiter erscheinen. Wenn gar benachbarte Zapfen von zwei benachbarten schwarzen Streifen theilweise bedeckt werden, so müssen hier die benachbarten Streifen zusammenzufließen scheinen, was, wenn es häufig vorkommt, den schachbrettartigen Anblick hervorbringen kann.

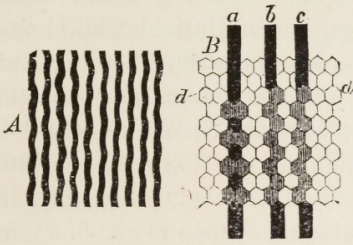


Fig. 45.

Auf den Seitentheilen der Netzhaut müssen zwei Bilder viel weiter auseinanderliegen als auf dem gelben Fleck, wenn sie als getrennt wahrgenommen werden sollen. Die ersten eingehenden Untersuchungen über diesen Gegenstand sind von AUBERT und FÖRSTER angestellt. Sie rückten ein aus zwei schwarzen Punkten auf hellem Grunde bestehendes Objekt so lange vom fixirten Punkte weiter weg, bis die beiden Punkte nicht mehr als getrennt wahrgenommen werden konnten und zwar führten sie solche Prüfungen in verschiedenen Meridianrichtungen aus. Für zwei Punkte von je 2,5 mm. Durchmesser deren Mittelpunkte sich in 14,5 mm. Abstand voneinander befinden, stellt Fig. 46 das Ergebniss der Messung graphisch dar.

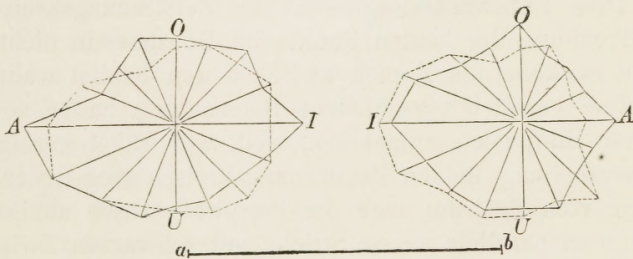


Fig. 46.

Die Linie *ab* giebt den Maassstab insofern sie den senkrechten Abstand des Auges von der Tafel bedeutet, auf welcher das aus jenen beiden Punkten bestehende Objekt verschoben wurde. Im wirklichen Versuche betrug dieser Abstand (das Fünffache von *ab*) 200 mm. und es wurde stets derselbe und zwar der am Auge nächste Punkt der Tafel fixirt. Die sternförmig auseinander laufenden Linien bedeuten die Schnittlinien der verschiedenen Meridianebenen des Auges mit der Ebene der Tafel, ihr gemeinsamer Schnittpunkt ist also der fixirte

Punkt. Die Länge eines Strahles bis zur Umfangslinie misst in $\frac{1}{5}$ der natürlichen Grösse wie weit die der betreffenden Meridianrichtung das Objekt vom fixirten Punkte verschoben werden musste, damit die beiden Punkte nicht mehr als getrennte wahrnehmbar waren. Die beiden ausgezogenen Umfangslinien beziehen sich auf AUBERT's, die beiden punktirten auf FORSTER's rechtes und linkes Auge. Die Buchstaben an der wagrechten Linie *I* und *A* bezeichnen die Innen- oder Nasenseite und die Aussen- oder Schläfenseite, *O* und *U* bedeuten oben und unten. Die eingeschlossenen Figuren sind also geradezu Theile des Gesichtsfeldes innerhalb dessen genau genug gesehen wird, um in etwa 200 mm. Abstand zwei 14,5 mm. voneinander entfernte Punkte als getrennte wahrzunehmen. Man sieht dass dieser Theil des Gesichtsfeldes im wagrechten Meridian weiter ausgedehnt ist als im senkrechten.

Nachstehende Tabelle giebt die Resultate noch einiger Versuche mit anderen ähnlichen Objekten, welche auf einer Tafel in derselben Entfernung betrachtet wurden. Die erste Spalte giebt die Entfernung der das Objekt bildenden Punkte von einander, die zweite den Durchmesser des einzelnen Punktes. In der dritten Spalte ist angegeben, wie weit das Objekt unter den durch die Zahlen der beiden ersten Spalten gegebenen Bedingungen vom Fixationspunkt weggertickt werden musste, um nicht mehr als aus zwei getrennten Punkten bestehend erkannt zu werden. Jede Zahl dieser letzten Spalte ist aber das Mittel aus allen den Messungen, welche in 8 verschiedenen Meridianrichtungen gemacht sind.

Entfernung der beiden Punkte von einander.	Durchmesser der Punkte.	Entfernung des Objektes vom fixirten Punkte.
3,25 mm.	1,25 mm.	31 mm.
6,5 „	2,5 „	50 „
9,5 „	3,75 „	55 „
12 „	1,25 „	60 „
14,5 „	2,5 „	65 „
20,5 „	3,75 „	77 „

Bei diesen Versuchen bemerkten AUBERT und FÖRSTER öfters blinde Stellen auf ihren Netzhäuten und zwar in ganz bestimmter Lage, so dass die Objekte jedesmal wieder verschwanden, so wie ihre Bilder wieder auf diese Stellen fielen. Ausserdem verschwanden die Objekte allerdings auch öfters nur zeitweise hier oder dort in Folge von momentaner Blendung.

Die beiden genannten Forscher haben über die Feinheit des

Ortsinnes der Netzhaut noch Versuche angestellt, die zwar nicht so unmittelbar eine Vorstellung von der Grösse der empfindenden Einheiten geben, aber doch auch von grossem Interesse sind. Sie betrachteten nämlich bei momentanér Beleuchtung durch den elektrischen Funken Tafeln auf denen Buchstaben und Zahlen in einer dem Beobachter völlig unbekanntén Anordnung geschrieben standen, und notirten wie viele davon auf einen Blick, also ohne Aenderung der Fixationsrichtung erkannt werden konnten.¹

Es zeigte sich bei diesen Versuchen wie zu erwarten war, dass, je grösser der Gesichtswinkel, unter welchem je eine Zahl erschien — je grösser also das Netzhautbild derselben war, um so weiter seitwärts vom gelben Fleck konnte sie noch erkannt werden. Doch hatte merkwürdigerweise auch die absolute Entfernung der Prüfungsobjekte einen Einfluss. Wurde nämlich aus gewisser Entfernung eine Zahl von bestimmter Grösse in einem gewissen Winkelabstande vom fixirten Punkte noch eben erkannt, so hätte man erwarten sollen, dass eine doppelt so grosse Zahl in doppelter Entfernung bei demselben Winkelabstand vom fixirten Punkte zu erkennen gewesen wäre, da ja ihr Netzhautbild jetzt ebensogross war und auf derselben Netzhautstelle lag, wie vorhin das der halb so grossen Zahl. Dies war aber nicht der Fall. Die doppelt so grosse und doppelt entfernte Zahl musste von dem fixirten Punkte auf der Objektebene einen viel kleineren als den doppelten Abstand haben um erkannt zu werden, oder der Winkel zwischen der Fixationsrichtung und dem Richtungsstrahl zum Mittelpunkte der Zahl musste bedeutend kleiner sein. Durch Versuche mit einfacheren Objekten hat später AUBERT dieses bemerkenswerthe Ergebniss noch bestätigt und es kann kaum daran gedacht werden, dass es auf Täuschung oder Beobachtungsfehlern beruht. Eine Erklärung für diese räthselhafte Erscheinung ist bis jetzt nicht versucht worden.

Die Bestimmung der Sehschärfe oder der Fähigkeit der Netzhaut benachbarte Punkte zu unterscheiden, ist eine wichtige Aufgabe des praktischen Augenarztes der zu diesem Zwecke bequemer Methoden und einer verabredeten Maasseinheit bedarf, um die Sehschärfe verschiedener Individuen und verschiedener Zonen derselben Netzhaut numerisch auszudrücken. Als praktische Methode wird heutzutage allgemein das Vorlegen von Schriftproben in verschiedener Grösse und Entfernung angewandt. Die Schriftproben bestehen aus Buchstaben deren Dicke $\frac{1}{3}$ ihrer Höhe beträgt. Als Einheit der

¹ AUBERT, Beiträge zur Kenntniss des indirekten Sehens. Molesch. Unters. IV. 1858.

Sehschärfe ist diejenige angenommen, bei welcher solche Buchstaben erkannt werden, wenn ihre Höhe unter einem Gesichtswinkel von 5' erscheint. Als Maass jeder beliebigen Sehschärfe dient dann der Quotient

$$V = \frac{d}{D}$$

wenn d der Abstand ist, bei welchem das geprüfte Individuum die betreffende Schrift lesen kann und D der Abstand, bei welchem ihre Buchstabenhöhe eben unter einem Gesichtswinkel von 5' erscheinen würde. Vorausgesetzt wird dabei, dass das geprüfte Auge für den Abstand d genau eingestellt ist, nöthigenfalls mit Hilfe einer Linse. Die bequeme Ausführung dieser Bestimmungen, die mit der Sehweitebestimmung Hand in Hand gehen, findet man beschrieben in den Darstellungen der praktischen Augenheilkunde.¹

Die sämtlichen vorstehend beschriebenen Thatsachen zeigen, dass die Netzhauttheile, deren Reizung je eine und von jeder andern unterscheidbare Empfindung verursacht — die sogenannten Empfindungskreise — um so grösser werden, je weiter man sich von der fovea centralis entfernt. Diese Thatsache haben manche Autoren dahin gedeutet, dass nicht alle Elemente der äussersten Netzhautschicht durch Licht reizbar seien, sondern bloss die sogenannten Zapfen, die in der That im gelben Fleck dicht gedrängt stehen, während sie gegen den Rand der Netzhaut immer spärlicher zwischen den Stäbchen vertheilt sind. Es käme somit allerdings je ein empfindliches Element auf ein immer grösseres Flächenstück, je weiter es vom gelben Fleck abliegt. Nun sind aber die Zapfen in den Seitentheilen der Netzhaut so spärlich vertheilt und zwischen ihnen sind so grosse bloss mit Stäbchen besetzte Strecken, dass unzählige Male Bilder kleiner Objekte bei kleinen Bewegungen bald auf Zapfen bald auf zapfenfreie, also unerregbare Flächenstücke fallen, also bald auftauchen, bald verschwinden müssten. Diese Erscheinung beobachtet man, wie schon erwähnt, bisweilen aber doch bei weitem nicht so häufig, wie es bei dem anatomischen Bau der äusseren Netzhautschicht unter der in Rede stehenden Annahme zu erwarten wäre.

Man hat daher neuerdings meistens der Annahme den Vorzug gegeben, wonach auch die Stäbchen durch Lichtstrahlen reizbar sind. Die grössere Ausdehnung der Empfindungskreise auf den Seitentheilen der Netzhaut hätte man alsdann dadurch zu erklären, dass man annimmt, dass immer nur eine ganze Gruppe von reizbaren Elementen

¹ Siehe z. B. Handbuch der gesammten Augenheilkunde III. 1. Theil. Leipzig 1874. Eidometrie von SNELLEN & LANDOLT.

nur mit je einem Elemente des Nervensystems in Verbindung steht, dessen Erregungszustand in der inneren Anschauung als individuelle von anderen unterschiedbare Empfindung auftritt. Man könnte etwa daran denken, dass immer je ein Zapfen mit der ihn umgebenden Stäbchengruppe mit je einem empfindenden Elemente verbunden ist, einen Empfindungskreis bildet. Das Bewusstsein könnte alsdann nicht unterscheiden, ob diese oder jene oder ob alle Elemente dieser Gruppe gereizt sind.

Die vorstehend entwickelte Annahme, dass die äusserste Schicht der Netzhaut die reizbaren Elemente führt, hat vom teleologischen Gesichtspunkte aus etwas widerstrebendes, wenn man bedenkt, dass die Lichtstrahlen erst eine Reihe von Schichten nervöser Elemente durchsetzen müssen, ehe sie die beabsichtigte Wirkung hervorbringen. Die Gründe für die Annahme sind aber so zwingender Art, dass man den scheinbaren Widerspruch gegen die sonst allgemein vorausgesetzte Zweckmässigkeit hinnehmen muss.)

Gewichtiger dürfte ein anderes Bedenken gegen die Annahme sein, dass die eigentlichen Stäbchen und Zapfen im engeren Sinne des Wortes die reizbaren Elemente sind, das sich gleichfalls vom teleologischen Standpunkte aus machen lässt. Die Körper der Stäbchen und Zapfen, insbesondere deren Aussenglieder die neuere Histologen besonders gern als die Angriffspunkte des Reizes ansehen, stehen an Durchsichtigkeit kaum hinter den übrigen Theilen der Netzhaut zurück. Von einer durch Licht reizbaren Substanz muss man aber offenbar einen gewissen Grad von Undurchsichtigkeit verlangen. In der That, wenn an einer Stelle eines Mediums ein Zug von Aetherwellen eine chemische oder thermische Wirkung ausüben soll, so muss diese Stelle so beschaffen sein, dass nicht die gesammte kinetische Energie der ankommenden Oscillationen auf die angrenzende Schicht als solche übertragen wird, d. h. die Stelle muss etwas von dem auffallenden Lichte absorbiren. Wenn neuerdings der Plättchenstruktur¹ der Aussenglieder von Stäbchen und Zapfen die Aufgabe zugeschrieben ist durch Interferenz auffallender und reflektirter Strahlen dies Zurückhalten von Oscillationsenergie zu bewirken, so dürfte dies auf ein Missverständniss der Interferenz hinauslaufen. Das was man in der physikalischen Lehre von den Strahlungen Absorption nennt, ist zur Erklärung von Wirkungen auf die ponderablen Stoffe gar nicht zu umgehen.

Nun kann man freilich daran erinnern, dass es sich hier nur

¹ Siehe Seite 146.

um die Arbeit handelt, welche zum Auslösen stärkerer (chemischer) Kräfte erforderlich ist, die ihrerseits hernach unvergleichlich mehr Arbeit leisten als zu ihrer Auslösung gehörte. Dazu könne vielleicht schon der 100. Theil der Energie der auffallenden Strahlung genügen, während $\frac{99}{100}$ als solche weiter fortgepflanzt würden. Hiergegen lässt sich aber einmal einwenden, dass die von den Strahlen in der reizbaren Netzhautschicht zu leistende Arbeit denn doch nicht eine so einfache Auslösungsarbeit sein kann, wie etwa das Ausheben des Sperrhakens aus einem Uhrwerke, da die von den ausgelösten Kräften geleistete Erregungsarbeit der auslösenden Reizarbeit innerhalb weiter Grenzen ziemlich genau proportional ist. Andererseits ist schon früher hervorgehoben, welchen ungeheuer kleinen Werth die ganze Energie einer Strahlung zu besitzen braucht, um eine sehr merkliche Wirkung hervorzubringen. Wenn wir in dichtem Waldesschatten bei mässigem Mondschein ein gelbes Blatt am Boden sehen, sollen wir da wirklich annehmen, dass nur ein ganz kleiner Bruchtheil von der Energie der Strahlung dieses Blattes, der von der reizbaren Schicht eben absorbiert wird genügt, die Erregungsarbeit auszulösen, während vielleicht $\frac{99}{100}$ der Strahlung unbenutzt weiter gehen, um erst im todtten Pigmente absorbiert zu werden?

Das Paradoxe aller dieser Consequenzen zugebend könnte man einwenden: Die photographisch empfindlichen Stoffe sind ja auch meist durchsichtig und es genügt auch bei ihnen der ganz kleine absorbierte Bruchtheil der Strahlung, die chemische Arbeit zu leisten. Dieser Einwand trifft aber die Sache nur scheinbar, die photographisch empfindlichen Substanzen reagiren ja in der That auf das stark sichtbare Licht vom Roth bis zum Blau, das sie fast ungeschwächt durchlassen, nur sehr schwach und stark auf die ultravioletten Strahlen, die vielleicht vollständig von ihnen absorbiert werden. Die reizbare Substanz der Netzhaut dagegen reagirt am stärksten auf das sichtbare Licht, das eben hierdurch zum sichtbaren wird und dieses muss also am meisten von ihr absorbiert werden, oder wenigstens hat die etwaige Absorption unsichtbarer Strahlen für die Erregung keine Bedeutung.

Nach Allem diesem muss es höchst auffällig erscheinen, dass die allgemein als die durch Licht reizbare angesprochene Substanz durchsichtig ist. Ganz so durchsichtig, wie man früher anzunehmen pflegte sind zwar keineswegs die reizbaren Schichten der Netzhaut, denn sie erscheinen im durchfallenden Lichte oft purpurroth, absorbiren also in der That einen sehr merklichen Bruchtheil des bekanntlich gerade sehr stark reizend wirkenden grünen und gelben Lichtes.

Mir scheint aber selbst diese Absorption noch nicht genügend, um die Reizbarkeit durch die schwächsten Strahlungen erklärlich zu finden und ich würde mich nicht wundern, wenn über kurz oder lang nachgewiesen würde, dass die stark pigmentirten und daher stark absorbirenden Anhangsgebilde der Stäbchen und Zapfen die eigentlichen Angriffspunkte des Lichtreizes sind. Eine Stütze dieser Vermuthung finde ich in der von Alters her bei den Zoologen bestehenden Neigung stark pigmentirte mit Nervenenden versehene Flecken an der Oberfläche niederer Thiere ohne Weiteres für Licht percipirende Organe zu erklären.

DRITTES CAPITEL.

Qualität der Lichtempfindungen.

I. Allgemeine Betrachtungen.

Die Physiologie als Naturwissenschaft sollte eigentlich lediglich auf dem Standpunkte der äusseren Anschauung stehen d. h. sich mit den Vorgängen am Organismus beschäftigen sofern sie einem fremden Beobachter erscheinen. Diesem können sie aber nur erscheinen als Bewegungen der materiellen Theilchen verursacht durch die Kräfte, mit welchen dieselben auf einander wirken oder mit welchen andere materielle Theilchen auf jene einwirken. So sind wir denn auch bis jetzt im Grossen und Ganzen verfahren indem wir die Aetherscillationen nach den Grundsätzen der Mechanik in den durchsichtigen Medien des Auges verfolgten und schliesslich wahrscheinlich zu machen suchten, dass diese Oscillationen in der hintersten Netzhautschicht Bewegungen oder Umlagerungen der ponderabelen Theilchen verursachten. Wollten wir nun auf diesem Wege weiter gehen, so wäre zu untersuchen, wie sich von den zunächst chemisch — das ist doch immer im weiteren Sinne des Wortes mechanisch — in Bewegung gesetzten Körper ein weiterer Bewegungsvorgang nämlich der nervöse Erregungsprocess längs gewisser Leitungsbahnen fortpflanzt. Wir müssten diesen Leitungsbahnen ins Nervencentralorgan folgen und würden etwa finden wie sich da dem in Rede stehenden Prozesse labyrinthisch verschlungene Bahnen eröffneten, wie er hier bleibende Veränderungen hervorruft, wie er vielleicht dort erlischt unter

dem Einflusse von Widerständen, wie er nach anderen Orten vielleicht noch unterstützt durch ähnliche von anderen Seiten kommende Prozesse kräftig weiter schreitet und zuletzt auf einer motorischen Bahn zu einer Muskelgruppe gelangt, in welcher er wieder neue Molekularkräfte auslöst deren Wirkung eine äussere Arbeit ist.

Diese eigentlich naturwissenschaftliche Zergliederung der weiteren Wirkungen der Lichtstrahlen im Organismus kann aber bei dem heutigen Stande unserer Kenntnisse vom Wesen der Nervenerregung und vom anatomischen Zusammenhange der nervösen Elemente gar nicht einmal versucht werden. Wir müssen daher, wenn wir den Wirkungen des Lichtes überhaupt noch weiter nachgehen wollen, als bisher geschehen ist, nothwendig den Standpunkt der äusseren Anschauung verlassen, und uns auf den Standpunkt des Subjektes stellen, dessen Auge von den Lichtstrahlen getroffen wird. Dies gilt nicht nur beim Gesichtssinne, sondern auf allen Sinnesgebieten. So wie die Zergliederung der Erscheinungen über das allererste, was bis zur und bei der Reizung der Nervenenden objektiv zu beobachten ist, hinausgehen soll, so muss man sich auf den subjektiven oder auf den Standpunkt der inneren Anschauung stellen, und hat dies auch stets gethan, so lange eine wissenschaftliche Untersuchung der Sinne getrieben wird.

In dem Bewusstsein des Subjektes, dessen Sinnesnervenenden gereizt werden, tritt der Zustand ein, den wir eine „Empfindung“ nennen. Es kann nicht genug eingeschärft werden, dass Empfindung wie Bewusstsein überhaupt lediglich Gegenstände der inneren Anschauung sind. In einem von aussen angeschauten Naturkörper ist Bewusstsein oder ein bestimmter Empfindungszustand desselben gar nie wahrzunehmen und sei dieser Naturkörper auch ein lebender menschlicher Körper. Je genauer man die Vorstellung von einem solchen äusseren Körper wissenschaftlich ausbildet, um so mehr löst sie sich auf in die eines Aggregates von materiellen Theilchen, welche rein mechanisch auf einander wirken. Die Annahme, ein fremder Naturkörper könne oder müsse die Erscheinungsform eines dem unsrigen ähnlichen Bewusstseins sein, beruht lediglich auf der Bemerkung, dass die gesehenen Bewegungen des fremden Körpers grosse Aehnlichkeit haben mit den uns ebenfalls auch objektiv erscheinenden Bewegungen des eigenen Körpers, welche unsere Empfindungen begleiten.

Durchmustern wir nun unsere Empfindungen wie sie sich uns im Verlaufe der Zeit auf den verschiedenen Sinnesgebieten in unendlicher Mannigfaltigkeit darbieten, so lässt sich vor Allem bemerken,

dass diese mehr jene weniger die Aufmerksamkeit an sich zieht und andere von derselben ausschliesst. Dies mehr oder weniger giebt der Empfindung den Charakter der mathematischen Grösse. Ja es lässt sich behaupten, dass die Empfindung oder genauer gesagt die Intensität, mit welcher sie sich im Bewusstsein geltend macht, das eigentliche Vorbild der mathematischen Grösse ist. Beruht doch die Grössenschätzung in allen Erfahrungsgebieten auf der Vergleichung von Empfindungsintensitäten. Hiervon ist die Schätzung räumlicher Ausdehnungen nicht auszunehmen, da sie höchst wahrscheinlich in der Vergleichung von Empfindungen beruht, welche die Muskelbewegungen begleiten. Bloss die Vorstellung von der Grösse einer Anzahl dürfte auf einem anderen Grunde ruhen nämlich auf der Fähigkeit zu verschiedenen Zeiten auftretende Empfindungen von einander in der Erinnerung schlechthin als individuell verschieden zu erkennen.

Bei weiterer Zergliederung unserer Empfindungen gewahren wir aber, dass solche auch noch dann möglicherweise unterschieden werden können, wenn sie an Intensität einander völlig gleich sind. Z. B. unterscheiden wir eine Schallempfindung von einer Lichtempfindung. Es giebt also ausser der quantitativen noch eine wesentlich andere Art der Unterscheidung von Empfindungen, die man etwa als eine „qualitative“ bezeichnen könnte, wenn auch mit diesem Ausdrucke nichts über das Wesen der Sache ausgesagt ist. Nach den jetzt — und wohl mit Recht — herrschenden Anschauungen vom Zusammenhange der Bewusstseinszustände mit Vorgängen im Nervensysteme wird man mit apodiktischer Gewissheit den Satz aussprechen können, dass zwei Empfindungen nur dann qualitativ unterscheidbar sind, wenn individuell verschiedene Elemente des Nervensystems erregt sind. Mit andern Worten die wiederholte Erregung desselben Nervelementes kann nur eine Wiederholung desselben Zustandes des Bewusstseins zur Folge haben an dem lediglich verschiedene Grade unterscheidbar sind. Eine andere als eine rein quantitative Unterscheidung der Empfindungen kann bei wiederholter Reizung desselben Nervelementes nie stattfinden. Werden dagegen gleichzeitig oder nacheinander verschiedene Elemente gereizt, so macht sich eben jener ganz anders geartete Unterschied der Empfindungen im Bewusstsein geltend, der gar keine Analogie mit einem Unterschiede des Grades hat. Gehören die beiden Nervelemente einem Sinnesgebiete an, bei welchem es durch Bewegung des Organes leicht möglich ist bald dies bald jenes Element demselben Reize darzubieten, so tritt der in Rede stehende nicht quantitative Unterschied im Bewusstsein auf als Vorstellung einer verschiedenen Oertlichkeit im Raume. Dies gilt

in ganz ausgezeichnete Weise bekanntlich vom Tastsinne und vom Gesichtssinne.

Wesentlich anders gestaltet sich die Sache bei einem Sinnesorgane, wo wir es nicht in der Gewalt haben durch Bewegungen bald den einen bald den anderen Theil der Nervenperipherie dem Reize darzubieten. Hier ist keine Gelegenheit, die einzelnen unterscheidbaren Empfindungen, welche den Reizungen der verschiedenen Elemente entsprechen, verknüpfen zu lernen mit Ortsvorstellungen, welche mit Hilfe von Bewegungsempfindungen in die Raumschauung hineinkonstruirt sind. Die Erregung der individuell verschiedenen Nerven-elemente eines solchen Sinnesgebietes kann daher nicht mit der Vorstellung einer verschiedenen Oertlichkeit verbunden sein, obwohl die gereizten Nerven-elemente objektiv betrachtet wirklich an verschiedenen Orten liegen. Davon kann aber aus dem angeführten Grunde das subjektive Bewusstsein keine Kenntniss haben. Hier bedingt vielmehr die individuelle Verschiedenheit der erregten Elemente einen rein qualitativen Unterschied des Empfindens im Gegensatze zum lokalen. Welche Elemente einer so gelagerten Sinnesnervenperipherie im einzelnen Falle gereizt werden, das wird nun nicht abhängen von der Richtung, aus welcher der reizende Vorgang herkommt, sondern nur etwa noch von der besonderen Beschaffenheit desselben, indem die verschiedenen Nervenenden mit verschieden gearteten Gebilden in Zusammenhang stehen, von denen die einen durch diesen die andern durch jenen Vorgang vorzugsweise in Thätigkeit gesetzt werden.

Organe der beschriebenen Art sind sehr wahrscheinlich das Gehör- und das Geruchsorgan. Was das erstere betrifft, so ist bekanntlich eine von HELMHOLTZ fein ausgebildete Theorie seiner Funktion in weiten Kreisen anerkannt, mit welcher die soeben entwickelten Grundsätze in vollem Einklang sind. Aehnlich wird man beim Geruchsorgan anzunehmen haben, dass je nachdem der eine oder der andere Riechstoff mit der Riechschleimhaut in Berührung kommt, bald mehr die einen bald mehr die anderen Nervenfasern erregt werden, dass aber gleichwohl nur qualitativ und nicht lokal verschiedene Empfindungen entstehen, weil jedem Reiz an sich die ganze Nervenperipherie zugänglich ist, und wir es durchaus nicht in der Gewalt haben, bald den einen bald den anderen Theil derselben dem Reize auszusetzen.

Zwischen diesen Sinnen und den geometrischen Sinnen steht das Geschmacksorgan, wo der Reiz durch willkürliche Bewegungen lokalisiert werden kann, wo aber ausserdem noch Vorrichtungen gegeben zu sein scheinen, vermöge deren je nach der Natur des Reizes bald

diese bald jene räumlich nahe benachbarte Elemente vorzugsweise angesprochen werden. Hier unterscheiden wir auch in der That sowohl lokal als auch im engeren Sinne des Wortes qualitativ.

Die Mannigfaltigkeit qualitativer Unterschiede zwischen den Empfindungen eines Sinnesgebietes wird nun noch weit über die blossе Anzahl der individuellen Nerven-elemente hinaus gesteigert durch die Combination verschiedener Elementarempfindungen zu Gruppen, welche im Bewusstsein zu mehr oder weniger unauflöslichen Einheiten zusammengefasst werden. Die beste Erläuterung dieses Satzes bietet der Tastsinn. Wir wollen zwei Elemente desselben betrachten und annehmen, die Reizung jedes Einzelnen davon führe zu Empfindungen, die, abgesehen vom qualitativen und lokalen, keinen weiteren Unterschied erkennen liessen. Nun fassen wir aber den Zustand des Bewusstseins (die Doppelpempfindung) ins Auge, welche entsteht, wenn beide Elemente gleichzeitig gereizt werden, dann eröffnet sich, abgesehen vom quantitativen Werthe und der begleitenden Ortsvorstellung die Aussicht auf eine unendliche Mannigfaltigkeit dieser Doppelpempfindung indem denkbar ist, dass sich jeder Grad der einen Elementarempfindung mit jedem Grade der anderen kombiniren lässt. Noch grösser wird die Mannigfaltigkeit, wenn wir Gruppen aus mehr als zwei Elementen bilden, wie sie bei wirklichen Reizungen des Tastsinnes meist gegeben sind. So haben wir z. B. in der That ganz verschiedene geartete Empfindungen, wenn wir dieselbe Fingerspitze das eine Mal an eine glatte das andere Mal an eine raube Oberfläche anlegen, offenbar weil im ersteren Falle alle beteiligten Elemente ziemlich gleich stark erregt sind im anderen Falle aber zwischen stark erregten Elementen schwach erregte in gewisser Weise vertheilt sind. Dass auch die Unterscheidung der sogenannten Wärme- und Kälteempfindung auf dasselbe hinausläuft, nämlich auf den Charakter der Gruppierung zahlreicher an sich übereinstimmender Empfindungselemente, habe ich vor vielen Jahren bereits experimentell erwiesen. Das wesentliche der Beweisführung besteht darin, dass, wenn man nur möglichst wenige Hautnervenfasern reizt, so dass kein Charakter der Gruppierung verschieden starker Empfindungen mehr erkennbar ist, auch nicht mehr unterschieden werden kann, ob die Reizung durch Wärmestrahlung oder durch Berührung geschah. An eine principiell andere Erklärung des Unterschiedes zwischen Temperaturempfindungen und der Druck- oder Berührungsempfindungen kann wohl kaum gedacht werden, denn dass durch leise Berührung und durch Temperaturänderung der obersten Hautschichten ganz dieselben Nervenenden angesprochen werden, kann schwerlich in Zweifel gezogen

werden. Es geht dies namentlich aus der Thatsache hervor, dass breite Hautnarben des Temperaturgefühls und des Berührungsgefühles entbehren, wohl aber noch Empfindlichkeit für stärkere Druckgrade besitzen, die offenbar auch auf tiefer im Gewebe sitzende Nervenenden wirken.

Der ganzen vorstehenden Erörterung liegt — und dies mag noch einmal ausdrücklich hervorgehoben werden — die Vorstellung zu Grunde, dass die Unterscheidbarkeit gleich starker durch verschiedene Nervenindividuen vermittelter Empfindungen nicht etwa bedingt ist durch die verschiedene chemische Beschaffenheit der beiden Nervenindividuen sondern auf der blossen numerischen Verschiedenheit derselben, womit jeder Erklärungsversuch ohne weiteres ausgeschlossen ist. Um diesen Gedanken noch deutlicher hervortreten zu lassen, wollen wir uns vorstellen zwei lebende menschliche Körper stimmten in einem Augenblicke Atom für Atom überein nicht nur was die gegenseitige Lage, sondern auch was Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit betrifft. Hier würden wir es ohne Zweifel doch noch mit zwei numerisch verschiedenen Personen zu thun haben, deren jede ihr eigenes Bewusstsein hätte. Auf dasselbe Princip gründen wir die Unterscheidbarkeit der Bewusstseinszustände, wenn zwei numerisch verschiedene Nervenindividuen — mögen sie verschiedenartig oder gleichartig sein — gereizt sind. Es ist dies — wie mir scheint — der konsequent durchgeführte Gedanke der „specifiche Energieen“, welcher seit J. MÜLLER ein Grundpfeiler der Physiologie der Sinne geworden ist.

Wir hätten somit eigentlich jedem individuellen Nervenelemente eine besondere specifiche Energie zuzuschreiben. Nun zeigt sich aber thatsächlich der Unterschied zwischen zwei Bewusstseinszuständen nicht immer gleich gross, wenn zwei Nervenelemente erregt werden. Es ist vielmehr nach allgemeiner Meinung der Unterschied in der Empfindungsqualität bedeutend grösser, wenn zwei Nervenelemente erregt sind, von denen eines dem acusticus und eines dem opticus angehört als wenn die beiden Nervenelemente solche des opticus sind. Die gegenwärtig herrschende Ansicht über diesen wichtigen Punkt der Sinnesphysiologie hat sehr klar HELMHOLTZ¹ ausgesprochen indem er sagt:

„Zwischen den Sinnesempfindungen verschiedener Art kommen „zwei verschiedene Grade des Unterschiedes vor. Der am tiefsten „eingreifende ist der Unterschied zwischen Empfindungen, die ver-

1 HELMHOLTZ, Die Thatsachen in der Wahrnehmung. S. 8 u. 9. Berlin 1879.

„schiedenen Sinnen angehören, wie zwischen blau, süß, hochtönend, „ich habe mir erlaubt diesen als Unterschied in der „Modalität“ „der Empfindung zu bezeichnen. Er ist so eingreifend, dass er jeden „Uebergang vom einen zum anderen, jedes Verhältniss grösserer oder „geringerer Aehnlichkeit ausschliesst. Ob z. B. süß dem Blau oder „Roth ähnlicher sei, kann man gar nicht fragen. Die zweite Art des „Unterschiedes die minder eingreifende, ist die zwischen verschiede- „nen Empfindungen desselben Sinnes. Ich beschränke auf ihn die „Bezeichnung des Unterschiedes der Qualität. J. G. FICHTE fasst „diese Qualitäten je eines Sinnes zusammen als Qualitätenkreise und „bezeichnet, was ich eben Unterschied der „Qualität“ nannte als „Unterschied der Qualitätenkreise. Innerhalb jedes solchen Kreises „ist Uebergang und Vergleichung möglich. Von Blau können wir „durch Violett, Carminroth in Scharlachroth übergehen und z. B. aus- „sagen, dass Gelb dem Orangeroth ähnlicher sei als dem Blau.“

Die hier als unmittelbar im Bewusstsein gegeben angenommenen Thatsachen kann ich nicht als solche anerkennen. Es giebt unzweifelhaft Fälle, wo zwischen Empfindungen verschiedener Sinnesgebiete ebenso stetige Uebergänge möglich sind wie zwischen Blau und Roth durch Violett und Purpur. Die brennende Empfindung z. B. welche der Pfeffer auf der Zunge erzeugt gehört bekanntlich entschieden dem Tastsinne an, während die Empfindung, welche Kochsalzlösung daselbst hervorbringt eine Geschmacksempfindung ist. Nun wird aber Niemand zweifeln, dass man einen vollkommen stetigen Uebergang zwischen diesen beiden zweien Sinnesgebieten angehörigen Empfindungen (denen nach HELMHOLTZ's Bezeichnungsweise verschiedene Modalität zukommt) herstellen könnte, wenn man eine Reihe von Gemengen aus Pfefferextrakt und Kochsalzlösung nacheinander auf die Zunge brächte, in denen der Gehalt am einen Bestandtheil von 0 bis 1 variirte. Auch würden ohne Zweifel unter den verschiedenen so erzeugten Gesammtempfindungen einige mehr andere weniger von einander verschieden erscheinen.

Die allerdings nicht wegzuleugnende Thatsache des Bewusstseins, dass im Allgemeinen die Empfindungen desselben Sinnesgebietes einen gemeinsamen Charakter zeigen, ist hiernach vielleicht doch nicht ebenso ursprünglich und geheimnissvoll wie die Thatsache dass die Erregung zweier individuell verschiedener Nerven-elemente überhaupt zu unterscheidbaren Empfindungen führt. Das Gemeinsame der Empfindungen desselben Sinnes könnte vielmehr erst das Resultat der Gewöhnung im Lebenslaufe des Einzelnen oder der Species sein, die Empfindungen eines Sinnes in verschiedenen Intensitätsgraden sehr

oft gleichzeitig erregt zu finden. In der That sahen wir ja, dass einzelne Empfindungen eines Sinnes sich durch solche Gewöhnung dem Qualitätenkreise eines anderen im Bewusstsein einordnen können, wie z. B. die Gefühlsempfindungen der Zunge den Geschmacksempfindungen. Eine quantitative Vergleichung der Aehnlichkeit verschiedener Empfindungen ist vielleicht überhaupt nur möglich wenn die verglichenen Empfindungen Gemische mehrerer Elementarempfindungen sind, und die Aehnlichkeit eben darauf beruht, dass gemeinsame Elemente vorhanden sind. Sei dem nun, wie ihm wolle, die Wahrheit muss vor allem klar ins Auge gefasst werden, dass am allerwenigsten daran gedacht werden kann, die Verschiedenheit des Charakters der Empfindung aus der Verschiedenheit der normalen adäquaten Reizungsart der verschiedenen Sinne zu erklären. Am deutlichsten zeigt sich die Unhaltbarkeit dieser so zu sagen naiven Anschauung gerade auf dem Gebiete des Gesichtssinnes. Hier nämlich ist es leicht durch mechanischen Druck oder durch elektrische Ströme Sinnesnervenelemente zu reizen und es soll von diesen Reizungen in einem späteren Abschnitte ausführlicher gehandelt werden. Reizt man auf solche nicht adäquate Weise Theile des Sehnervenapparates so kommen bekanntlich stets Lichtempfindungen zu Stande, die sich in ihrem Charakter und Wesen durchaus nicht von solchen unterscheiden, welche durch Strahlung hervorgerufen werden, ein Beweis, dass die Natur der Lichtempfindung mit der Strahlung in keinem nothwendigen ursächlichen Zusammenhange steht, sondern nur dadurch bedingt wird, dass eben Elemente des Gesichtssinnes erregt sind.

II. Die homogenen Farben.

Nachdem durrh die vorstehenden allgemeinen Betrachtungen der Gesichtspunkt festgestellt ist, unter welchem wir die nicht quantitative Unterscheidung von Empfindungen betrachten, wollen wir uns mit der Unterscheidung der Lichtempfindungen und ihrem Zusammenhange mit der verschiedenen Reizungsart der Sehnervenenden beschäftigen. Es fällt vor Allem auf, dass je nachdem diese oder jene Gegend der Netzhaut gereizt wird, die Lichtempfindung einen verschiedenen lokalen Charakter bekommt, d. h. vom Bewusstsein die angenommene Ursache der Empfindung in diese oder jene Gegend des Raumes versetzt wird. Eine weitere Verfolgung der lokalen Unterscheidung der Lichtempfindungen soll hier aber nicht unternommen werden, da dieselbe den Gegenstand eines besonderen Abschnittes dieses Werkes ausmacht, der von der Bildung der Ge-

sichtsvorstellungen handelt. Wenn aber dieselbe Gegend der Netzhaut verschiedene Male gereizt wird, so kann immer noch das Bewusstsein in wesentlich verschiedene Zustände des Lichtempfindens kommen, obwohl die Ursache am selben Orte vorgestellt wird, gerade so wie eine verschiedene Tastempfindung trotz lokaler Uebereinstimmung entsteht, wenn wir mit derselben Fingerspitze einmal einen rauhen einmal einen glatten Körper berühren.

Die so noch qualitativ unterscheidbaren Lichtempfindungen pflegt man schon in der Sprache des gemeinen Lebens durch die Farbenamen zu unterscheiden. Wir wollen zuerst die Mannigfaltigkeit der Farbenempfindungen durchmustern, welche uns bei Reizung der dem Pole benachbarten Netzhauttheile dargeboten wird. Die erste Thatsache, welche sich uns hier schon in der blossen Phantasie darbietet ist, dass diese Mannigfaltigkeit ganz abgesehen von der quantitativen eine unendliche ist, denn zwischen jede zwei verschiedene Farbenempfindungen, z. B. roth und blau kann man ohne die Intensität zu ändern, in stetiger Reihenfolge unendlich viele Zwischenstufen einschalten. Es ist für das Verständniss dieses Satzes, sowie für die weiteren Folgerungen wichtig sich vollkommen darüber klar zu werden, dass die Intensität verschiedener Farbenempfindungen ebensowohl quantitativ vergleichbar ist als die Intensität gleichartiger, und dass es namentlich immer möglich ist z. B. einer Blauempfindung von bestimmter Intensität eine Rothempfindung von genau gleicher Intensität oder „Helligkeit“ an die Seite zu stellen. Dies faktisch auszuführen hat freilich oft grosse Schwierigkeit, weil das Urtheil über das Verhältniss der Intensitäten verschiedenartiger Farbenempfindungen sehr unsicher ist. Uebrigens ist diese Unsicherheit wohl kaum grösser als die der Beurtheilung, welcher von zwei verschiedenen Tönen lauter gehört wird, und doch steht niemand einen Augenblick an, solche Urtheile über die Intensität verschiedener Tonempfindungen täglich hunderte von Malen auszusprechen. Ganz ebenso fällt der unbefangene Mensch derartige Urtheile über die Helligkeit verschiedener Farben, oft sogar mit numerischer Bestimmung des Verhältnisses, indem er z. B. sagt, dies Roth ist wenigstens 10 mal so hell als jenes Blau. Mögen auch solche numerische Angaben in der Regel irrhümlich sein, so liegt doch in ihnen die Anerkennung des in Rede stehenden Principes. Um gar keinen Zweifel mehr übrig zu lassen, stellen wir folgende Ueberlegung an. Wir legen neben ein weisses ein rothes Blatt Papier in gleiche mässige Schattenbeleuchtung; hier wird kein normal sehender Mensch im Zweifel sein, dass das Auge von dem Lichte des weissen Papiere

stärker afficirt ist, oder dass die Weisempfindung stärker ist als die Rothempfindung. Legt man jetzt das rothe Papierblatt in den Sonnenschein während das weisse liegen bleibt, so wird ebensowenig ein Zweifel darüber aufkommen können, dass nunmehr die Rothempfindung stärker ist. Da aber vom zweiten stärkeren Intensitätsgrade der Rothempfindung zu dem ersteren schwächeren ein stetiger Uebergang durch alle Zwischenwerthe möglich ist, so muss es nothwendig darunter einen Grad der Rothempfindung geben, welcher jenem Grade des Weisempfindens genau gleich ist. Wir haben demnach ganz entschieden die Berechtigung uns alle denkbaren Farbenempfindungen in gleicher Intensität vorzustellen und die Mannigfaltigkeit der Qualität ganz für sich ohne alle Einmischung der quantitativen Unterschiede zu betrachten.

Es wird vor Allem zu untersuchen sein, ob vielleicht ähnlich wie auf dem Gebiete des Gehörsinnes bei normaler Reizungsart und normaler Erregbarkeit des Nervenapparates im Allgemeinen jede besondere Farbenempfindung einer besonderen physikalischen Beschaffenheit des Reizes entspricht. Zu diesem Ende ist es gut zunächst den adäquaten Reiz in seinen einfachsten Formen auf das Auge wirken zu lassen und zu sehen, wie geartete Lichtempfindungen alsdann entstehen. In diesen einfachsten Formen bietet uns aber die Natur jenen Reiz nur ausnahmsweise dar. Bei den von leuchtenden oder beleuchteten Naturkörpern ausgehenden Strahlen ist im Gegentheil jeder einzelne Strahl in der Regel ein Gewirre von Aetheroscillationen der verschiedensten Schwingungszahlen und es bedarf daher künstlicher Vorrichtungen um eine Netzhautstelle mit einer Strahlung zu reizen, die einem möglichst einfachen pendelartigen Schwingungszustand entspricht. Einen Strahl aber auf dem sich nur ein einfacher pendelartiger Schwingungszustand fortpflanzt, nennt man bekanntlich in der Physik einen homogenen Lichtstrahl. Dahingegen nennt man einen gemischten Lichtstrahl einen solchen, längs dessen sich gleichzeitig mehrere pendelartige Schwingungen fortpflanzen, deren Schwingungszahlen in der Zeiteinheit verschieden sind. So ist z. B. ein Sonnenstrahl bekanntlich ein sehr gemischter unter dessen Componenten fast alle Schwingungszahlen vertreten sind, die grösser als 370 Billionen und kleiner als 900 Billionen in der Sekunde sind. Die Physik liefert uns nun verschiedene Mittel einen beliebig gemischten Strahl in seine einfachen Componenten fächerartig auszubreiten, so dass sich in verschiedenen Richtungen lauter homogene Strahlen fortpflanzen. Das einfachste und darum gebräuchlichste Mittel zu diesem Zwecke ist die Brechung in einem Prisma aus einer stark

zerstreuenden Substanz. Bei der grossen Wichtigkeit, welche die Herstellung möglichst vollständig reines homogenes Lichtes für die physiologische Optik hat, möge hier kurz das Verfahren, ein sogenanntes reines prismatisches Spektrum zu erzeugen, in Erinnerung gebracht werden.

Man verschafft sich eine feine leuchtende Linie, indem man einen feinen Spalt in der senkrechten Wand eines sonst ganz dunklen Raumes durch eine hinlänglich helle und hinlänglich ausgedehnte Lichtquelle, z. B. durch ein Spiegelbild der Sonne beleuchtet, so dass durch jeden Punkt des Spaltes von den verschiedenen Punkten der Lichtquelle ein Strahl geht und man also hinter dem Spalt ein Strahlensystem hat, welches genau so beschaffen ist, als ob der Spalt aus selbstleuchtenden Punkten bestände. In diese Strahlung stellt man nun in einiger Entfernung in gleicher Höhe mit dem Spalte ein

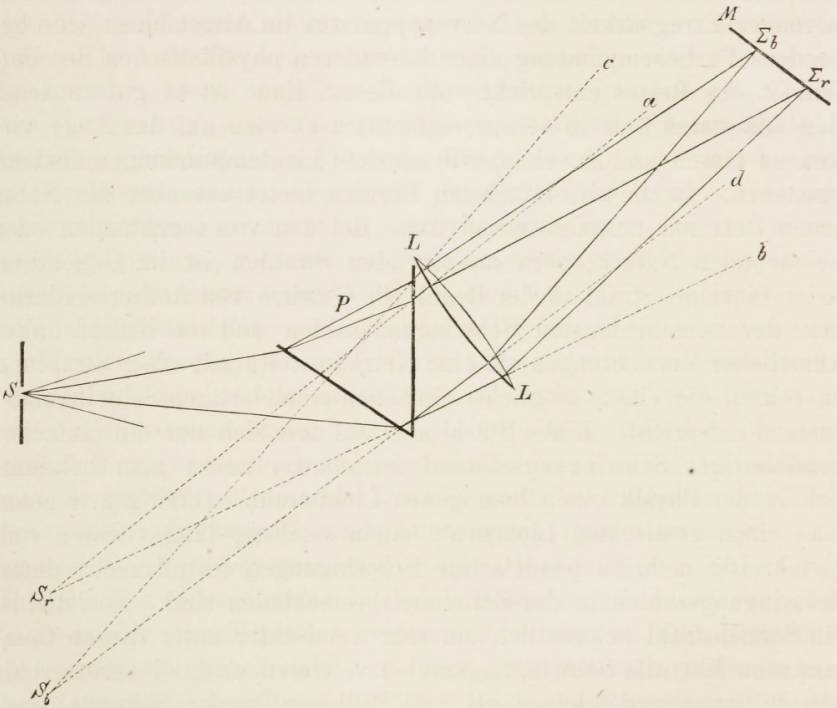


Fig. 47.

Prisma aus stark zerstreuem Stoffe die brechende Kante senkrecht wie es in Fig. 47 im Grundriss dargestellt ist. Fassen wir nun eines der Strahlenbündel, welches vom Punkte S des Spaltes ausgeht ins Auge. Jeder Strahl desselben besteht, wenn es ein Son-

nenstrahl ist aus unzähligen, denselben Weg verfolgenden Strahlen von verschiedener Schwingungszahl. Da aber diesen verschiedene Brechungsindices zukommen, so werden ebensoviele Strahlenbündel aus dem Prisma ausfahren, als verschiedene Schwingungszahlen vertreten sind. Eines z. B. dessen Strahlen die Schwingungszahl 450 Billionen in der Sekunde zukommt, wird wenig abgelenkt und so weiter gehen, als wären seine Strahlen sämmtlich ungefähr vom Punkte S_r ausgegangen. $S_r a$ und $S_r b$ wären also die Richtungen der beiden äussersten Strahlen dieses Bündels. Diese beiden Linien sind aber nur zwischen Prisma und Linse ausgezogen, weil sie nur hier als physische Strahlen bestehen. Ein anderes mit der Schwingungszahl 700 Billionen wird stärker gebrochen und sich so vom Prisma aus fortpflanzen als wäre es vom Punkte S_b ausgegangen. Die Richtungen der beiden äussersten Strahlen dieses Bündels sind $S_b c$ und $S_b d$ in Fig. 47. Die virtuellen Ausgangspunkte der Strahlenbündel von zwischenliegender Schwingungszahl liegen natürlich zwischen den Punkten S_r und S_b in stetiger Reihenfolge. Stellt man jetzt hinter das Prisma eine Linse L , so bringt dieselbe, wenn ihr Abstand von den Punkten S_r und S_b grösser als ihre Brennweite ist, die einzelnen von diesen Punkten aus divergirenden Strahlenbündel zur Convergenz und zwar wenn die Linse eine achromatische ist, alle in ziemlich derselben Entfernung. Stellt man in dieser Entfernung einen Schirm auf, so entstehen also auf demselben ebenso viele Bilder des Punktes S nebeneinander als Strahlenarten verschiedener Schwingungszahl in der Strahlung von S vertreten sind. Ein Bild Σ_b welches den Strahlen von grosser Schwingungszahl entspricht, liegt weiter ab von der verlängerten Richtung SP als ein Bild Σ_r , welches einer Strahlenart von kleinerer Schwingungszahl entspricht. Denn Σ_b ist das Bild des scheinbaren Objektpunktes S_b und Σ_r das des Objektpunktes S_r . Ebenso wie der Punkt S werden sich aber auch die darüber und darunter liegenden Punkte des Spaltes verhalten. Auf dem Schirm M wird also eine senkrechte Linie, welche bei Σ_r die Ebene der Zeichnung schneidet, ausschliesslich von Strahlen beschienen sein, die der Schwingungszahl 450 Billionen entsprechen. Streng genommen beschränkt sich diese Beleuchtung mit der betreffenden homogenen Strahlenart nicht auf eine mathematische Linie, da auch der Spalt nicht eine mathematische Linie ist, die aus bloss übereinander liegenden leuchtenden Punkten besteht. Vielmehr wird ein senkrechtcs Streifchen bei Σ_r von dieser homogenen Beleuchtung beschienen sein, doch kann man die Breite dieses Streifchens vernachlässigen, wenn die Breite des Spaltes sehr klein ist. Im Ganzen

wird also auf dem Schirme ein rechteckiges Stück beleuchtet sein und zwar wird jeder senkrechte Strich dieses Rechteckes fast nur von einer homogenen Strahlenart beschienen sein. Besteht der Schirm aus einem nicht fluorescirenden Stoffe dessen Oberfläche alle Lichtarten gleich gut diffus zurückstrahlt, so wird also ein diesen Schirm betrachtendes Auge von allen demselben senkrechten Striche des beleuchteten Rechteckes angehörigen Punkten gleichartige homogene Strahlenbündel zugesandt erhalten. Diesem Auge bietet sich dann das unter Name des prismatischen Sonnenspektrums bekannte Schauspiel dar.

Man kann sich diesen Anblick übrigens auch verschaffen, indem man die Netzhaut selbst als ersten bildauffangenden Schirm benutzt. Am einfachsten kann dies dadurch geschehen, dass das Auge unmittelbar hinter das Prisma gesetzt wird statt der Linse L , deren Funktion der brechende Apparat des Auges übernehmen kann, während die Netzhaut an die Stelle des Schirmes M tritt. Hierbei ist nothwendig, dass das Auge für die Entfernung des Spaltes S eingestellt ist. Auf diese Art erhält man natürlich ein sehr kleines Spektrum auf der Netzhaut, dessen kleine Einzelheiten nicht zu erkennen sind. Man kann aber auch das vielfache physische Bild des Spaltes in der Luft zu Stande kommen lassen und dasselbe aus der Richtung, wohin die Strahlen weiter gehen durch ein Okular betrachten. Dies ist die Anordnung der gebräuchlichen Fernrohrspektroskope. Hier kann man ein sehr vergrößertes Bild des Spektrums erhalten, das oft nicht auf einmal im Okularfeld des Fernrohrs zu übersehen ist. Aus technisch dioptrischen Gründen lässt man dabei meist nicht das Licht vom Spalt direkt auf das Prisma fallen, sondern lässt es zunächst durch eine vor das Prisma gestellte sogenannte Collimatorlinse gehen, welche vom Spalt ein unendlich entferntes virtuelles Bild entwirft, das als eigentliches Objekt anzusehen ist.

Der Anblick des Sonnenspektrums lehrt ohne Weiteres, dass die Reizung einer unermüdeten Netzhautstelle mit homogenen Lichtstrahlen im Allgemeinen einen sehr gesättigten Farbeindruck macht, d. h. eine Empfindung, welche der bekannten Empfindung des Weiss sehr unähnlich ist. Es lehrt ferner, dass dieser Farbeindruck ein verschiedener ist, je nachdem die Oscillationszahl¹ der wirkenden

¹ Eigentlich ist es logisch richtiger einen Lichtstrahl durch seine Schwingungszahl zu charakterisiren, da diese von dem Medium, in welchem er sich gerade fortpflanzt, unabhängig ist. Gleichwohl sollen im Folgenden, wo öfters numerische Bestimmungen vorkommen, die Strahlen auch durch ihre Wellenlängen in der Luft charakterisirt werden, weil deren Werth genauer bekannt ist, und in physikalischen Abhandlungen meist zur Charakteristik benutzt wird.

Strahlen eine verschiedene ist. Um sich bequem im Spektrum zu orientiren und angeben zu können, welche Werthe der Schwingungszahl die durch die Farbennamen bezeichneten Eindrücke hervorbringen, kann man sehr zweckmässig die FRAUNHOFER'schen Linien des Sonnenspektrums verwenden. Bekanntlich sind nämlich im Sonnenlicht gewisse Werthe der Schwingungszahlen nur durch sehr schwache Strahlen vertreten und da also, wo diese Strahlenarten im Spektrum zu suchen sind, zeigt sich ein dunkler Strich. Besonders 7 solcher Striche sind sehr auffällig und werden schon in einem mässig ausgebreiteten Spektrum leicht erkannt, es sind die allgemein mit den grossen lateinischen Buchstaben *B*, *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *H* bezeichneten FRAUNHOFER'schen Linien. Nachstehende Tabelle zeigt welche Schwingungszahlen und welche Wellenlängen (in Luft) diesen FRAUNHOFER'schen Linien entsprechen.

Bezeichnung der Linie.	Schwingungszahl.	Wellenlänge in Luft.
<i>B</i>	450 Billionen	0,0006878 mm.
<i>C</i>	472 ..	0,0006564 ..
<i>D</i>	526 ..	0,0005888 ..
<i>E</i>	589 ..	0,0005260 ..
<i>F</i>	640 ..	0,0004843 ..
<i>G</i>	722 ..	0,0004291 ..
<i>H</i>	790 ..	0,0003925 ..

Die Betrachtung des Spektrums ergibt, dass dasselbe etwas jenseits der Linie *B* beginnt und von dieser Grenze an bis etwa zur Linie *C* hin roth aussieht. D. h. also Strahlen, deren Schwingungszahl weniger als 470 Billionen in der Sekunde beträgt, sofern sie überall die Netzhaut reizen, den Eindruck hervorbringen, den man mit „Roth“ bezeichnet und zwar ist die Beschaffenheit der Empfindung nicht sehr wesentlich verschieden, je nachdem die Schwingungszahl 440, 450 oder 460 Billionen beträgt. Erst wenn die Schwingungszahl über 470 Billionen wächst, ändert sich die Qualität der Empfindung sehr rasch, sie geht über in Orangegelb und schon bei 526 Billionen Schwingungen der Linie *D* entsprechend ist der Farbeindruck ein ganz anderer, nämlich der des Gelb geworden. Der Theil des Spektrums um die Linie *E* sieht grün aus und von *D* bis *E* zeigen sich alle Uebergänge von Gelb zu Grün jedoch nur durch sehr schmale Zonen vertreten. Bei *F* beginnt das reine Blau, mit welchem Worte also der Eindruck bezeichnet wird, den Strahlen von etwa 640 Billionen Schwingungen in der Sekunde hervorbringen. Von *F* bis *G* finden sich die Farben, welche den Uebergang von

Blau zu Violett vermitteln, welchen letzteren Eindruck Strahlen hervorbringen, deren Schwingungszahl in der Sekunde 722 Billionen übersteigt. Eine Mittelstufe zwischen Blau und Violett pflegt man in der Kunstsprache der physikalischen und physiologischen Optik noch unter dem besonderen Namen des Indigoblau herauszuheben. Doch ist hierzu eigentlich keinerlei Bedürfniss vorhanden. Weit eher noch liesse es sich rechtfertigen, etwa zwischen Grün und Blau unter dem Namen Meergrün eine Mittelstufe besonders zu bezeichnen, da der Unterschied zwischen Blau und Grün ganz offenbar ein bedeutend grösserer ist, als der zwischen Blau und Violett. In der That ist auch die besondere Hervorhebung des Indigo aus der stetigen Reihe der Farbenempfindungen eine ganz unberechtigte historische Zufälligkeit. NEWTON hatte nämlich den Einfall, in der Farbenscala gerade 7 Punkte willkürlich festzustellen, weil in der Tonscala im Intervall einer Oktave durch die hergebrachte diatonische Durtonleiter 7 Punkte willkürlich fest gelegt waren. Im Sprachgebrauch fand er nur die 6 Bezeichnungen Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Violett als brauchbar vor. Dass er nun gerade seinen 7ten Farbenton zwischen Blau und Violett und nicht zwischen Grün und Blau legte, hat wohl nur darin seinen Grund, dass im Sonnenspektrum die blaue und violette Zone viel ausgedehnter sind als die, welche die Uebergänge zwischen Grün und Blau enthält. Dies kann aber vom hier allein maassgebenden physiologischen Gesichtspunkte aus nur als ganz bedeutungslos bezeichnet werden, denn die Unterschiede der Farbenqualitäten sind keineswegs proportional den räumlichen Zwischenräumen, durch welche die entsprechenden Strahlungen im Sonnenspektrum getrennt sind.

Ueber die Grenzen der Fähigkeit des Auges den Farbenton zu unterscheiden, wenn es durch Strahlen von verschiedener Wellenlänge gereizt wird, liegt eine sehr sorgfältige Untersuchung von MANDELSTAMM¹ und DOBROWOLSKY vor, deren Ergebnisse in nachstehender Tabelle verzeichnet sind

<i>B</i>	$1/115$
<i>C</i>	$1/167$
<i>C—D</i>	$1/331$
<i>D</i>	$1/772$
<i>D—E</i>	$1/246$
<i>E</i>	$1/340$
<i>E—F</i>	$1/615$
<i>F</i>	$1/740$
<i>G</i>	$1/272$
<i>H</i>	$1/146$

1 Arch. f. Ophthalmologie XIII. (2) S. 399; XVIII. (1) S. 66.

Die grossen lateinischen Buchstaben der ersten Spalte bedeuten die FRAUNHOFER'schen Linien des Spektrums, in deren Gegend die Unterscheidungsfähigkeit gemessen ist. Die Zahlen der zweiten Spalte geben an, um wieviel sich die Wellenlänge einer Strahlung aus der betreffenden Gegend des Spektrums ändern muss, um einen merklich verschiedenen Farbeindruck zu machen.

Zum Theil auf dieser verschiedenen Empfindlichkeit des Auges für Differenzen der Wellenlänge in verschiedenen Gegenden des Spektrums beruht die vorhin schon erwähnte Thatsache, dass sich der Farbenton im grünen und gelben Theil am raschesten ändert.

Es fällt bei Betrachtung des Sonnenspektrums ferner auf, dass abgesehen vom qualitativen Unterschiede, der Eindruck des Grünlichgelb bei weitem der stärkste ist, oder dass die Stelle zwischen den Linien *D* und *E* und zwar unmittelbar an *D* bei weitem am hellsten erscheint. Von da nimmt die Helligkeit gegen das rothe und violette Ende anfangs schnell, dann langsamer und zuletzt wieder schneller ab. Dies hat keineswegs seinen Grund in der objektiven Beschaffenheit des Sonnenspektrums, sondern wesentlich in der Beschaffenheit der Netzhaut. Keineswegs nämlich ist die Gegend zwischen *D* und *E* diejenige des Spektrums, wo die grösste Quantität von Energie auf die Flächeneinheit concentrirt ist. Um zu prüfen, wie die Energie der Strahlung sich im Spektrum vertheilt, muss man es auffangen mit einem möglichst vollkommen schwarzen Schirm, der möglichst wenig von der Energie der Strahlung sich vorwärts oder rückwärts fortpflanzen lässt, sondern dieselbe, wie man sich auszudrücken pflegt, „absorbirt“. Hier wird also die ganze Energie verwendet werden müssen zur Erzeugung von molekularen Bewegungen der Theilchen des Schirmes selbst. Nach dem gegenwärtigen Stande unseres Wissens kann die Wirkung der Strahlung hier nur in einer Erwärmung des Schirmes bestehen, wenn er aus einer chemisch gegen Licht indifferenten Substanz gebildet ist. In der auf der Flächeneinheit des Schirmes entwickelten Wärmemenge hat man also ein Maass von der auf sie verwandten Energie der Strahlung. Nach diesem Maasse gemessen zeigt aber die den rothen Theil des Spektrums beleuchtende Strahlung eine viel grössere Energie als die, welche irgend einen anderen gleich grossen Theil desselben beleuchtet. Wir müssen daher annehmen, dass die Netzhaut ganz besonders stark reizbar ist durch die Strahlen von etwa 550 Billionen Schwingungen in der Sekunde. Jede andere Erklärung der in Rede stehenden Thatsache lässt sich, wie aus dem Folgenden hervorgehen wird, widerlegen oder wenigstens als unzureichend nachweisen. Ein ge-

naueres Bild von dem Verhalten der Netzhaut zu den verschiedenen Strahlenarten erhält man durch die Fig. 48. Die Abscissenlinie stellt die Grundlinie eines prismatischen Sonnenspektrums dar und sind

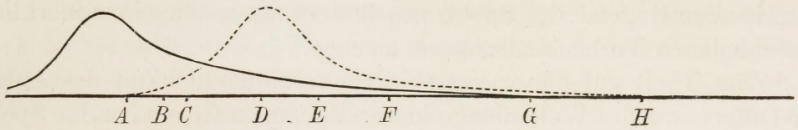


Fig. 48.

darin die Stellen der FRAUNHOFER'schen Linien durch die üblichen Buchstaben angedeutet. Die Ordinaten der stark ausgezogenen Curve messen die Dichtigkeit der Energie der Strahlung, welche die durch ihre Fusspunkte bezeichneten Stellen des Spektrums trifft, d. h. die Wärmemenge, welche bei vollständiger Absorption hier auf der Flächeneinheit in der Zeiteinheit entwickelt wird, oder noch richtiger ausgedrückt die Temperaturerhöhung, welche die hier auftreffende Strahlung in der Zeiteinheit bewirken kann.

Die Ordinaten der punktirten Curve geben für die einzelnen Stellen des Spektrums ungefähr die gesehenen Helligkeiten. Die Ordinate dieser Curve dividirt durch die entsprechende Ordinate der ausgezogenen Curve kann man also ansehen als ein Maass der gesammten physiologischen Reizwirkung, welche eine Arbeitseinheit von der durch den Fusspunkt der Ordinate charakterisirten Strahlenart im Netzhautapparate hervorbringt. Dieser Quotient ist zwischen der Linie *D* und *E* am grössten und nimmt von da nach dem rothen Ende sehr rasch, nach dem violetten Ende langsamer ab. Das heisst also mit anderen Worten, überall gleiche Energie vorausgesetzt machen Strahlen von etwa 550 Billionen Schwingungen in der Sekunde — welche den Eindruck „Grün“ hervorbringen — den stärksten Reizeffekt, viel schwächer wirken Strahlen, wenn die Schwingungszahl unter 500 Billionen herabgeht, in welchem Falle der Eindruck den Charakter des „Roth“ annimmt und gleichfalls schwächer aber nicht so viel schwächer ist der blaue und violette Eindruck, welcher durch die Energieeinheit von Strahlen grösserer Schwingungszahl entsteht.

Noch genauer als die punktirte Curve Fig. 48 giebt die nachstehende Tabelle Rechenschaft von dem physiologischen Effekte gleicher Flächenräume in verschiedenen Gegenden des Sonnenspektrums oder von der gesehenen Helligkeit der verschiedenen Spektralzonen. In der ersten Spalte ist die Zone des Spektrums durch Farbenton und FRAUNHOFER'sche Linie bezeichnet, in der zweiten und dritten Spalte

das Maass der gesehenen Helligkeit nach FRAUNHOFER und nach VIERORDT.

	FRAUNHOFER.	VIERORDT.
Roth <i>B</i>	32	22
Orange <i>C</i>	94	128
Röthlichgelb <i>D</i>	640	780
Gelb <i>D—E</i>	1000	1000
Grün <i>E</i>	480	370
Blaugrün <i>F</i>	170	128
Blau <i>G</i>	31	8
Violett <i>H</i>	5,6	0,7

Man sieht, dass diese beiden Zahlenreihen ziemlich gut übereinstimmen, obwohl sie nach ganz verschiedenen Methoden gefunden sind. FRAUNHOFER hat die Helligkeit einfach nach photometrischen Methoden geschätzt. VIERORDT¹ schätzte die Helligkeit einer Spektralzone nach der Menge weisses Lichtes, welche beigemischt werden musste, um ein eben merkliches Abblässen der Farbe zu bewirken.

Sowie hiernach die Reizbarkeit der Netzhaut für verschiedene Strahlenarten verschieden ist, so ist auch je nach der Natur der Strahlung die Fähigkeit des Gesichtssinnes eine verschiedene, kleine Unterschiede der Intensität zu bemerken. Nach den Untersuchungen von LAMANSKY² genügt für die Strahlen des Spektrums, welche den Eindruck von Gelb und Grün machen, schon eine Aenderung der Intensität um $\frac{1}{256}$ ihres Werthes um einen merklichen Unterschied der Empfindungsstärke hervorzubringen für Blau $\frac{1}{212}$, für Violett muss die Aenderung $\frac{1}{106}$ betragen, für Orange $\frac{1}{78}$ und für Roth $\frac{1}{70}$. DOBROWOLSKY fand nach einer andern Methode die Unterscheidungsfähigkeit überall kleiner, er fand dieselbe am grössten für den indigofarbigem Theil des Spektrums.

Es mögen gleich hier vorgreifend Angaben Platz finden über die Feinheit der Unterscheidung von Intensitäten solcher Strahlungen, die den Eindruck des Weiss machen. Solche Angaben liegen zum Theil schon aus älterer Zeit vor, die umfangreichsten Untersuchungen sind in neuerer Zeit von AUBERT³ angestellt. Ich entnehme denselben nachstehende Versuchsreihe mit Kerzenlicht

1 VIERORDT, Die Anwendung des Spektralapparates u. s. w. Tübingen 1871.

2 LAMANSKY, Arch. f. Ophthalmologie XVII. (1) S. 123.

3 Siehe dessen Physiologie der Netzhaut.

Absolute Helligkeit	Unterschiedsempfindlichkeit
710	$\frac{1}{164}$
173	$\frac{1}{140}$
100	$\frac{1}{123}$
44	$\frac{1}{106}$
25	$\frac{1}{104}$
16	$\frac{1}{94}$
7	$\frac{1}{90}$
4	$\frac{1}{67}$
1	$\frac{1}{35}$

Der Bruch in der zweiten Spalte giebt an, um den wievielten Theil der kleineren Intensität sich zwei Strahlungen unterscheiden müssen, wenn sie als verschieden hell erkannt werden sollen. Man sieht, dass dieser Bruchtheil um so kleiner sein darf je intensiver die Strahlungen sind. Im Bereich der grösseren Intensitätswerthe der vorstehenden Tabelle nimmt aber der zur Unterscheidung erforderliche Bruchtheil der gesammten Intensität nur sehr wenig mit wachsendem Werthe dieser letzteren ab. Es widersprechen daher diese Versuche nicht den Ergebnissen älterer von WEBER, FECHNER und anderen angestellten Versuchen, wonach für ein beträchtliches Intervall der Reizskala zwei Lichtreize sich immer um denselben Bruchtheil unterscheiden müssen um Empfindungen hervorzurufen, deren Unterschied eben merklich sein soll.

Hält man die Versuche über weiss aussehendes Licht zusammen mit den soeben erwähnten Versuchen von LAMANSKY über farbiges, so ergiebt sich, dass die Fähigkeit des Auges, Intensitätsunterschiede zu erkennen, bei weissem Lichte nicht so weit geht als bei blauem und grünem, aber weiter als bei orangefarbenem, rothem und violettem.

III. Die unsichtbaren Strahlen.

Der Anblick der Fig. 48 lehrt uns noch eine höchst merkwürdige Thatsache, dass nämlich ein Stück über die Linie *A* hinaus, wo vom Auge keine Spur von Beleuchtung wahrgenommen wird, der das Spektrum aufnehmende Schirm von Strahlen getroffen wird, deren Schwingungszahl kleiner ist, 400 Billionen in der Sekunde. Die Energie dieser wenigst brechbaren Strahlen des Sonnenlichtes ist sogar grösser als die Energie der Strahlen von irgend welcher höheren Brechbarkeitsstufe. Dass diese Strahlen auf die Netzhaut nicht reizend wirken, könnte möglicherweise darauf beruhen, dass dieselben die brechenden Medien des Auges nicht zu durchdringen vermögen und also gar nicht zur Netzhaut gelangen. Diese Erklärung ist aber nicht zulässig. Es ist allerdings durch besondere Ver-

suche bewiesen, dass Strahlen jener geringen Brechbarkeit beim Durchgang durch die brechenden Medien des Auges eine bedeutende Schwächung erleiden. Wenn wir uns also die Energiekurve eines auf der Netzhaut entworfenen Sonnenspektrums korrekt vorstellen wollten, so würden wir die Ordinaten des links von der Linie *A* gelegenen Theiles bedeutend kleiner zu denken haben als sie in Fig. 48 erscheinen. Auch die Strahlen, welche etwas rechts von *A* im Spektrum eintreffen, werden in wässrigen Flüssigkeiten, die ja in sehr dicken Schichten grünblau aussehen, etwas stärker absorbiert. Es wären also auch die Ordinaten zunächst rechts an *A* wohl noch etwas zu verkleinern. Die Versuche geben uns aber, wie mir scheint, kein Recht anzunehmen, dass jene Strahlen die Augenmedien absolut gar nicht zu durchdringen vermögen, was auch gegen jede Analogie wäre. Man erhält aber selbst dann keine Lichtempfindung, wenn man Strahlen von kleinerer Schwingungszahl als 400 Billionen in der Sekunde, mit ganz ausserordentlicher Intensität ins Auge fallen lässt. Zum Beweise hierfür kann ein schöner von TYN-DALL zuerst ausgeführter Versuch dienen. Lässt man das von den glühenden Kohlenspitzen der elektrischen Lampe ausgesandte und durch einen Hohlspiegel konvergent gemachte Strahlenbündel durch eine Schicht von Schwefelkohlenstoff, in welchem Jod gelöst ist, hindurchgehen, so werden darin alle Strahlen von grösserer Schwingungszahl als 450 Billionen in der Sekunde absorbiert und es gehen nur die Strahlen von geringerer Schwingungszahl durch. Diese Strahlung hat aber noch solche Energie, dass in ihrem Vereinigungspunkt eine Hitze entsteht, welche ein mit Platinrohr überzogenes Platinblech sofort glühend macht. Bringt man nun das Auge in den von diesem Punkte ausgesandten Strahlenkegel, so entsteht trotz der bedeutenden Schwächung, welche diese Strahlen in den brechenden Medien des Auges erleiden, auf der Netzhaut ein gewiss noch sehr intensiv bestrahlter Fleck, da in diesem Versuche eben die ursprüngliche Intensität der Strahlung so überaus stark ist. Gleichwohl hat man nicht die mindeste Lichtempfindung. Am intensivsten ist offenbar die Bestrahlung der Netzhautstelle, wenn das Auge so gestellt wird, dass der Fokus um die Sehweite vom Auge entfernt ist, so dass ein deutliches Bild desselben auf der Netzhaut entsteht. Es beruht auf einem Irrthum, wenn TYN-DALL um den Versuch recht beweisend zu machen seine Retina an den Ort des Fokus selbst setzte. Er brachte dabei seine Hornhaut in die Gefahr einer schädlichen Erwärmung, ohne die Beweiskraft im mindesten zu erhöhen, denn das jetzt konvergent auf die Hornhaut fallende Strahlenbündel

wurde durch die Brechung an den Trennungsflächen des Auges schon in der vorderen Augenkammer zur Vereinigung gebracht und auf der Netzhaut über ein so grosses Flächenstück ausgebreitet, dass hier die Intensität sicher nicht grösser sein wird, als wenn man den vom Fokus ausgehenden Strahlenkegel aus der Akkommodationsferne in das Auge fallen lässt. So oder so angestellt, beweist dieser Versuch über allen Zweifel, dass Strahlen von weniger als 400 Billionen Schwingungen in der Sekunde, wenn sie in noch so grosser Intensität die Netzhaut treffen, ihre Elemente nicht zu reizen vermögen.

Die Physik lehrt ferner, dass in der Sonnenstrahlung wie sie an der Erdoberfläche ankommt und mehr noch in der Strahlung des elektrischen Lichtes auch Strahlen vorhanden sind, deren Schwingungszahl in der Sekunde weit grösser ist als 790 Billionen — die sogenannten ultravioletten Strahlen. Die Energie dieser Strahlen, welche auf die Flächeneinheit des Spektrums jenseits der Linie *H* trifft, gemessen durch die entwickelte Wärme, ist freilich sehr gering, aber doch ist sie gross genug um gewisse andere sehr merkliche Wirkungen auszuüben. Z. B. wird ein mit Chlorsilber behandeltes Papierblatt im Sonnenspektrum weit über die Linie *H* hinaus sehr entschieden geschwärzt, wo es für das Auge vollkommen dunkel erscheint. Besonders augenfällig kann man das Vorhandensein der ultravioletten Strahlen im Sonnenschein machen, wenn man das Spektrum auf der Oberfläche einer fluorescirenden Substanz auffängt. So nennt man bekanntlich Stoffe, welche von ultravioletten Strahlen getroffen nun ihrerseits Strahlen von geringerer Schwingungszahl aussenden und diese wirken dann verhältnissmässig stark auf das Auge. Fängt man z. B. das Sonnenspektrum oder noch besser das Spektrum des elektrischen Lichtes mit einem Schirme auf, der aus einem mit Aesculinlösung getränkten Papier angefertigt ist, so sieht man noch weit über die Linie *H* hinaus sich einen bläulichen Schimmer erstrecken. Besonders weit erstreckt sich derselbe, wenn man zur Er-

weit besser durchlässt als Glas. Es ist für die ultravioletten Strahlen dieselbe Frage aufzuwerfen wie für die ultrarothenen, ob nämlich die Unsichtbarkeit des von ihnen beschienenen Theiles des Spektrums dadurch zu erklären ist, dass diese Strahlen die Augenmedien nicht durchdringen und folglich gar nicht zur Netzhaut gelangen oder dadurch, dass auch für sie die Netzhaut nicht erregbar ist. Es ist nun durch Versuche nachgewiesen, dass die ultravioletten Strahlen die Augenmedien wohl durchsetzen können, wenn auch besonders in

der Linsen- und Hornhautsubstanz eine recht merkliche Absorption derselben stattfindet. Die Unsichtbarkeit des ultravioletten Theiles des Sonnenspektrums muss also ebenso wie die des ultrarothten Theiles auf die mangelnde Erregbarkeit der Netzhaut für diese Strahlen bezogen werden. Uebrigens ist für sie die Netzhaut nicht wie für die ultrarothten absolut unerregbar, sondern nur sehr wenig erregbar. In der That kann der ultraviolette Theil des Spektrums ganz direkt gesehen werden, wenn man für Ablendung des im gewöhnlichen Sinne sichtbaren Theiles sowie überhaupt alles anderen Lichtes sorgt. Wie ausserordentlich gering aber die Intensität der Erregung durch ultraviolette Strahlen ist, gewahrt man, wenn man solche ganz ausschliesslich theilweise auf einen fluorescirenden, theilweise auf einen nicht fluorescirenden Schirm wirft. Die Helligkeit des fluorescirenden Schirmes erscheint alsdann nach HELMHOLTZ's Schätzung 1200 mal so gross als die der nicht fluorescirenden. Da man nun keinen Grund zu der Annahme hat, dass in fluorescirenden Körpern durch ultraviolette Strahlen Kräfte ausgelöst werden, sie vielmehr sicher nur die Schwingungszahl jener Strahlen ändern ohne der Energie etwas zuzufügen, so muss man schliessen, dass dieselbe Energie in Form von ultravioletten Strahlen in einem gegebenen Flächenstück der Netzhaut eine 1200 mal schwächere Erregung hervorbringt als in Form von weniger brechbaren Strahlen. Man kann demnach wohl sagen, dass für den praktischen Gebrauch des Auges die Reizbarkeit der Netzhaut durch ultraviolette Strahlen nicht in Betracht kommt.

Zu der durch ultraviolette Strahlen erzeugten Lichtempfindung tragen in geringem Maasse wahrscheinlich Strahlen von niederer Brechbarkeit bei, welche durch eigene Fluorescenz erst in den Retinaelementen selbst unter dem Einflusse ultravioletter Strahlen entstehen. Man sieht nämlich die Netzhaut eines Leichenauges in ultravioletter Beleuchtung etwas fluoresciren und zwar in grünlich-weisser Farbe, da nun direkte Einwirkung der ultravioletten Strahlen einen mehr bläulich-weissen Eindruck macht, so kann man aus den später zu entwickelnden Lehren von der Farbmischung schliessen, dass die Reizung durch diese Strahlen selbst einen mehr violetten Eindruck macht, der durch das grünliche Fluorescenzlicht zu bläulich-weiss modificirt wird. Kürzlich haben W. v. BEZOLD und ENGELHARDT¹ die Fluorescenz der Netzhaut auch am lebenden Auge nachgewiesen. Sie sahen nämlich, wenn ein Netzhautstück durch homogenes violettes oder ultraviolettes Licht beleuchtet war, ophthalmoskopisch die

¹ ENGELHARDT, Sitzungsber. d. bayr. Acad. 1877. 7. Juli.

Gefässe desselben in natürlicher Blutfarbe, was nur durch Fluorescenz der dahinter liegenden Netzhautelemente erklärt werden kann.

Die Unfähigkeit der Netzhaut durch ultraviolette und ultraroth Strahlen erregt zu werden, ist für den Sehakt von der allergrössten Wichtigkeit. Wäre die Netzhaut durch die ultraroth Strahlen auch nur im mindesten reizbar, so würde offenbar ein Sehen äusserer Objekte gar nicht stattfinden können. Solche Strahlen nämlich werden bekanntlich auch von Körpern niederer Temperatur selbständig ausgesandt. Es ist wohl kaum zu bezweifeln, dass die Energie der ultraroth Strahlung, welche ein Netzhautstäbchen allein schon von den vor ihm gelegenen, doch immerhin 37° warmen anderen Netzhautelementen erhält, so gering sie auch sein mag grösser ist als die Energie der sämtlichen Strahlen hoher Brechbarkeit, welche dies Stäbchen von einem schwach beleuchteten Objekte erhält. Wäre nun das Stäbchen durch jene Strahlen reizbar, so käme es gar nie zur Ruhe und in dem beständig hellen Gesichtsfelde könnten sich schwach beleuchtete Bilder äusserer Objekte gar nicht auszeichnen.

Eine Reizbarkeit durch ultraviolette Strahlen würde allerdings nicht so principiell unverträglich mit dem Sehen sein, da von den Theilen des Auges selbst keine solchen ausgesandt werden, jedesfalls würde aber eine starke Reizung durch jene Strahlen die Deutlichkeit des Sehens bedeutend beeinträchtigen. Im Bereiche der ultravioletten Strahlung nimmt nämlich der Brechungsindex sehr rasch mit der Schwingungszahl zu. Kämen sie also beim Sehakt stark zur Geltung, so würde die Deutlichkeit der Bilder durch die chromatische Abweichung des brechenden Apparates sicher merklich gestört werden.¹ In dieser Beziehung ist es offenbar von Bedeutung, dass schon die violetten Strahlen meist wenig wirken.

VI. Symbolische Darstellung der Farbentöne.

Die Unterschiede der Empfindungsqualitäten, welche durch die verschiedenen homogenen Strahlungen des Spektrums veranlasst werden, sind allgemein anerkannt als mathematische Grössen, denn es

1 Obwohl ich schon vor 4 Jahren (FICK, Compendium der Physiologie. 2. Aufl. S. 181—182) auf die Zweckmässigkeit der Unerregbarkeit der Netzhaut durch ultraroth und ultraviolette Strahlen aufmerksam gemacht habe, scheint dieselbe doch immer noch von manchen für eine Unvollkommenheit des Auges angesehen zu werden. So sagt TYNDALL (in seinen Vorlesungen über das Licht. (Deutsche Ausgabe 1876. S. 177) mit Bezug darauf: Wollten wir uns erlauben, für einen Augenblick den Begriff des allmählichen Wachsens, Verbesserns und Aufsteigens anzueignen, der im Worte Evolution liegt, so könnten wir ruhig schliessen, dass noch grosse Vorräthe von sichtbaren Eindrücken den Menschen erwarten, weit grössere als diejenigen die er jetzt besitzt.

nimmt Niemand Anstoss an quantitativen Schätzungen dieser Unterschiede. Ja die von den meisten Menschen gemachten Schätzungen der Art stimmen sehr wohl überein. Z. B. wird gewiss kein Widerspruch erhoben werden gegen den Satz, dass die Empfindung Roth der Empfindung Orange mehr ähnlich sei als der Empfindung Grün. Es ist ferner eine Thatsache der unmittelbaren Anschauung, dass diese Farbenempfindungsunterschiede stetig veränderliche Grössen sind, so dass der eine „Farbenton“ — mit diesem Ausdruck soll der bestimmte Charakter einer durch homogene Strahlung verursachten Lichtempfindung bezeichnet werden — durch unendlich kleine Abstufungen in einen andern Farbenton übergehen kann. Es entspricht ferner einem unendlich kleinen Unterschiede zweier Farbenempfindungen ein unendlich kleiner Unterschied der Schwingungszahlen der beiden homogenen Strahlungen, durch welche die beiden Farbenempfindungen hervorgerufen werden. Gleich grossen endlichen Unterschieden der Schwingungszahl homogener Strahlen entsprechen aber keineswegs gleich grosse Unterschiede im Farbenton. So ist namentlich nach dem übereinstimmenden Zeugniß aller normal sehenden Menschen der Farbenton Violett dem Roth entschieden ähnlicher als der Farbenton Blau, obwohl die Schwingungszahl, die dem Violett entspricht, 790 Billionen weiter von der die Empfindung Roth veranlassenden nämlich 450 Billionen differirt als die dem Blau entsprechende nämlich etwa 700 Billionen.

Man kann hiernach das stetige Fortschreiten von einem Farbenton zum andern füglich symbolisch darstellen durch das Fortschreiten von einem Punkte zum andern längs eines Linienzuges. Zum Maasse des Unterschiedes zweier Farbentöne muss bei dieser Darstellung eine Grösse gemacht werden, welche von der gegenseitigen Lage der die Farbentöne bezeichnenden Punkte dergestalt abhängt, dass sie unendlich klein wird, wenn die beiden Punkte einander unendlich nahe liegen. Eine solche Darstellung wird den bereits ausgesprochenen Thatsachen der inneren Anschauung gerecht, wenn man dem Linienzug eine Gestalt giebt, wie die der stark ausgezogenen Curve Fig. 49, an welcher die Namen der Farben angeschrieben sind, und wenn man festsetzt zum Maasse des Unterschiedes zweier Farbentöne soll der hohle Winkel dienen, den die zwei Fahrstrahlen miteinander machen, welche man von einem auf der concaven Seite der Curve gelegenen Pol (*W* Fig. 49) zu den zwei die Farbentöne darstellenden Punkten ziehen kann. Nur so kann die Darstellung vergegenwärtigen, dass der Unterschied von Roth und Violett kleiner ist als z. B. der von Roth und Grün, sofern eben dieser Unterschied

durch den grösseren Winkel RWG , jener durch den kleineren Winkel RWH^1 gemessen wird.

Im Uebrigen hätte der Verlauf der Curve und die Lage des

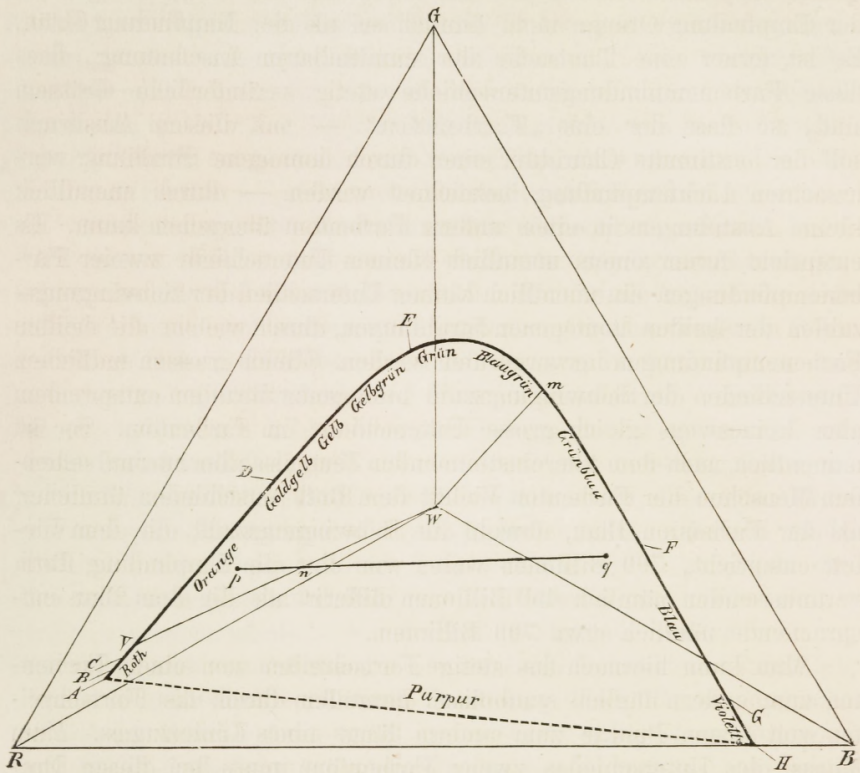


Fig. 49.

Poles W innerhalb weiter Grenzen verschieden gewählt werden können, wenn blos die bisher ausgesprochenen Beziehungen der homogenen Farbentöne dargestellt werden sollten. Die besondere Wahl der Form und der Lage des Poles in der Figur ist schon mit Rücksicht auf die folgenden Sätze getroffen.

1 Die Seite WH dieses Winkels ist in der Figur nicht ausgezogen.

VIERTES CAPITEL.

Die gemischten Farben.

I. Zusammenwirken von zwei homogenen Strahlungen.

Es soll jetzt weiter untersucht werden, welchen Charakter die Lichtempfindungen haben wenn mehrere homogene Strahlungen zugleich dieselben Netzhautelemente reizen. Um mit dem einfachsten Falle zu beginnen, wollen wir zunächst nur immer je zwei homogene Strahlenarten auf dieselbe Netzhautstelle wirken lassen. Zu diesem Zwecke kann man sich folgender Methode bedienen. Auf einem Schirm S , Fig. 50 erzeugt das Prisma P nebst der Linse L , in der



Fig. 50.

Weise wie in Fig. 47 auf S. 170 ein reines Spektrum indem wie dort Sonnenstrahlen durch einen feinen senkrechten Spalt (der in der Figur 50 nicht gezeichnet ist) aus den Richtungen α_1 und α_2 auf die vordere Prismenfläche fallen. Zwischen die Linse L und den Schirm S , stellt man nahe an L , noch einen Schirm D mit einer rechteckigen Oeffnung ε , ε_2 , welche bloss den noch unzerstreuten Theil des von L , ausgehenden Strahlensystemes durchlässt. Diese Oeffnung bildet also gleichsam ein weisses Objekt, denn ein auf sie gelegtes Blatt Papier würde einen stark beleuchteten weissen Fleck zeigen, und wenn man dicht hinter S , eine zweite achromatische Linse stellt, so wird dieselbe, wenn S , weggenommen wird in der zu DL_2 , konjugirten Vereinigungsweite L_2, S_2 , ein ebenfalls weisses Bild entwerfen, das auf einem bei S_2 , aufgestellten Blatt Papier dargestellt werden kann. Das aus der Oeffnung ε , ε_2 , nach rechts hervorgehende Strahlensystem hat aber eine ganz besondere Beschaffenheit. Nämlich von jedem Punkte dieser Oeffnung geht ein Strahlenbündel aus das aus lauter homogenen Strahlen besteht die sich zu verschiedenen Punkten des Schirmes S , begeben. Der Strahl von grösster Brech-

barkeit geht zum Punkte γ , der von geringster geht zum Punkte γ'' , und die übrigen von mittlerer Brechbarkeit zu zwischenliegenden Punkten. Als Beispiel sind die beiden Strahlen von stärkster Brechbarkeit, welche durch die beiden Endpunkte ε , und ε'' , gegangen sind durch gestrichelte Linien angedeutet und ebenso durch punktirte Linien die beiden Strahlen von kleinster Brechbarkeit, welche von eben diesen Endpunkten ε , und ε'' , ausgehen. Wird also vor die Linse L'' , der vorhin erwähnte Schirm S , aufgestellt und befindet sich in demselben etwa bei γ , ein schmaler Spalt, so kann nunmehr das Bild δ, δ'' , der rechteckigen Oeffnung $\varepsilon, \varepsilon''$, nur von Strahlen höchster Brechbarkeit erleuchtet werden und erscheint in seiner ganzen Ausdehnung gleichmässig im gesättigten Farbenton, der dieser Strahlenart entspricht. Wird dagegen nur ein Spalt bei γ'' , eröffnet, so erscheint das Bild S, S'' , im Farbenton der wenigst brechbaren Strahlen. Und im Farbenton einer bestimmten Strahlenart mittlerer Brechbarkeit erscheint das Bild wenn ein Spalt zwischen γ , und γ'' , im Schirm offen ist. Durch Verschieben eines Spaltes in der Ebene S , kann man also dem Bilde δ, δ'' , nacheinander die Farbentöne aller homogener Strahlenarten geben die im Sonnenlichte enthalten sind. Wenn man im Schirme S , zwei Spalten öffnet, so wird mithin das Bild δ, δ'' , von 2 homogenen Strahlenarten beleuchtet sein und indem man es betrachtet, wird man den Lichteindruck haben, welchen zwei homogene Strahlenarten zusammen hervorbringen, wenn sie gleichzeitig eine Netzhautstelle treffen. Man kann auf diese Art jede homogene Strahlenart mit jeder andern kombiniren, denn man kann durch verschiedene Stellung der Spalten auf S , zwei beliebige Stellen des Spektrum kombiniren, wie verlangt wurde. Durch Oeffnen von 3 Spalten in S , können natürlich auch 3 homogene Strahlenarten auf δ, δ'' , kombinirt werden. Die nach dieser Methode angestellten Versuche über homogene Farben und Mischfarben gehören zu den schönsten optischen Demonstrationen die man sehen kann.

Die beschriebene Methode erfordert selbstverständlich zu ihrer Ausführung direktes Sonnenlicht, man kann aber genau dieselben Erscheinungen auch im diffusen Tageslicht subjektiv beobachten. Die Methode beruht auf demselben Princip und ist folgende. S , sei ein in Fig. 51 von diffusem Tageslicht beleuchteter Spalt, P ein Prisma und L eine achromatische Linse. Die Anordnung sei so, dass auf einem Schirme M ein reines Spektrum entsteht. Befindet sich nun in diesem Schirme ein Spalt σ der Stelle entsprechend wo z. B. die Strahlen von 600 Bill. Schwingungen eintreffen, so wird ein hinter diesem Spalt befindliches Auge dessen Sehweite gleich seiner Entfer-

nung vom Prisma ist die Prismenfläche deutlich sehen und zwar ganz gleichmässig in der Farbe, welche der gewählten Schwingungszahl entspricht. Befindet sich bei S_2 ein zweiter Spalt mit Tages-

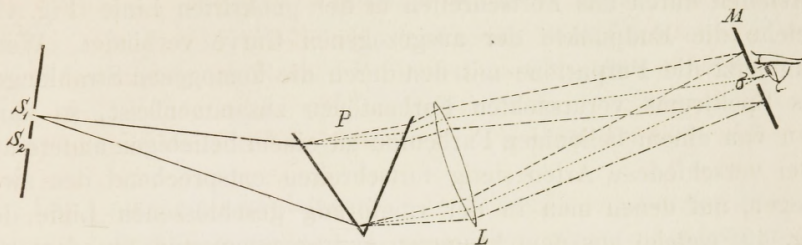


Fig. 51.

licht beleuchtet, so wird ein zweites Spektrum auf M gebildet von diesem aber treffen andere Strahlen von geringerer Brechbarkeit auf den Spalt σ und das Auge hinter σ wird jetzt von jedem Punkte der Prismenfläche zweierlei Strahlen erhalten also dieselbe in der Mischfarbe sehen.

Prüft man nach einer dieser Methoden alle möglichen Paare homogener Strahlenarten durch, so erhält man für jedes Paar entsprechend den unendlich vielen Werthen, welche das Verhältniss der Intensitäten beider Strahlenarten annehmen kann, unendlich viele verschiedene Lichtempfindungen von verschiedener Qualität die durch ihre unmerklichen Abstufungen von der Farbe der einen Strahlenart zur Farbe der andern einen stetigen Uebergang bilden. Die gesammten so erhaltenen neuen Eindrücke sind zwar alle verschieden von den durch homogene Strahlungen erzeugten, aber sie sind nicht mehr alle unter einander verschieden, so dass schon bei der blossen Zusammensetzung zweier homogener Strahlen in allen möglichen Verhältnissen der Intensität die Mannigfaltigkeit der Empfindungsqualitäten hinter der Mannigfaltigkeit der als Reize dienenden physikalischen Vorgänge weit zurückbleibt. Heben wir zunächst einzelne Beispiele hervor. Lässt man Strahlen von 450 Billionen Schwingungen (die den Eindruck roth machen) mit solchen von 790 Billionen Schwingungen zusammen wirken, so erhält man durch Variiren des Verhältnisses der Intensitäten der beiden Strahlenarten eine neue Reihe von Lichteindrücken, deren Farbenton mit keinem der spektralen Farbentöne genau übereinstimmt. Diese ganz neuen Farbentöne die wir als Purpurtöne bezeichnen wollen, sind dem Roth und dem Violett mehr oder weniger ähnlich je nachdem die Strahlen von 450 Billionen oder die von 790 Billionen Schwingungen mehr oder weniger stark in der Mischung vertreten sind. Durch stetiges Aendern dieses

Intensitätsverhältnisses von ∞ zu Null erhält man einen stetigen Uebergang von Roth zu Violett durch die verschiedenen Purpurtöne. Man kann demnach dieses Fortschreiten von Roth zu Violett symbolisch darstellen durch das Fortschreiten in der punktirten Linie (Fig. 49), welche die Endpunkte der ausgezogenen Curve verbindet. Wenn man jetzt die Purpurtöne mit den durch die homogenen Strahlungen des Spektrums verursachten Farbentönen zusammenfasst, so kann man von einem beliebigen Farbenton zu einem beliebigen andern auf zwei verschiedene Arten stetig fortschreiten entsprechend den zwei Wegen, auf denen man in der ringförmig geschlossenen Linie der Fig. 49, welche aus dem krummen ausgezogenen und aus dem geraden punktirten Stücke besteht, von jedem Punkte zu jedem andern gelangen kann. So kann man z. B. vom Farbenton Gelb zum Farbenton Blau fortschreiten entweder durch Grünlichgelb, Grün, Blaugrün oder durch Orange, Roth, Purpur Violett.

Eine ganz besondere Erscheinung tritt hervor wenn man gewisse homogene Strahlenpaare des Spektrums zusammenwirken lässt, welche man komplementäre nennt. Bringt man z. B. mit Strahlen von der Wellenlänge 0,0006559 (die für sich den Eindruck Roth machen) in einem gewissen Intensitätsverhältnisse Strahlen von der Wellenlänge 0,0004875 (die den Eindruck Blaugrün machen) auf der Netzhaut zusammen, so entsteht ein Lichteindruck, welcher im Farbenton weder an Roth noch an Blaugrün noch an irgend einen andern (Purpur eingeschlossen) im mindesten erinnert. Es ist der im gemeinen Sprachgebrauch mit „Weiss“ bezeichnete Lichteindruck.

Ausser dem soeben bezeichneten giebt es nun noch unzählige andere komplementäre Strahlenpaare, die in bestimmtem Intensitätsverhältnisse zusammenwirkend den Eindruck des Weiss hervorbringen. Nach J. J. MÜLLER'S Bestimmungen die für sein linkes und rechtes Auge ein wenig von einander abweichen (denen auch das vorige Beispiel entnommen war) sind folgende Farbentöne komplementär.

Farbe.	Wellenlänge.	Komplementäre Farbe.	Wellenlänge	
			linkes Auge.	rechtes Auge.
Roth	0,0006559	Blaugrün	0,0004875	0,0004865
Violett	0,0004225	Gelb	0,0005591	0,0005608

Etwas abweichend sind Bestimmungen von HELMHOLTZ die in Hundertmilliontheilen ¹ des Pariser Zolles die Wellenlängen geben.

¹ In HELMHOLTZ'S physiologischer Optik steht wahrscheinlich durch einen

Farbe.	Wellenlänge.	Komplementäre Farbe.	Wellenlänge.	Verhältniss der Wellenlänge.
Roth	2425	Grünblau	1818	1,334
Orange	2244	Blau	1809	1,240
Goldgelb	2162	Blau	1793	1,206
Goldgelb	2120	Blau	1781	1,190
Gelb	2095	Indigblau	1716	1,221
Gelb	2085	Indigblau	1706	1,222
Grüngelb	2082	Violett	von 1600 ab	1,301

Lässt man ein komplementäres Strahlenpaar zusammenwirken in anderem Intensitätsverhältniss als in welchem sie weiss geben, so erhält man einen Lichteindruck, welcher an den Farbenton der vorherrschenden Strahlenart erinnert aber mit dem Weiss Aehnlichkeit hat und zwar um so mehr je mehr sich das Intensitätsverhältniss der Strahlen dem nähert, in welchem zusammenwirkend sie weiss geben. Solche Farbeneindrücke nennt man blasse, weissliche oder auch wohl im gemeinen Leben sehr uneigentlich „helle“ Farben. Die Abweichung eines Farbeneindruckes — sei er nun durch homogene Strahlung oder durch Zusammenwirken mehrerer homogener Strahlen hervorgebracht — vom Weiss kann füglich im Anschluss an den gemeinen Sprachgebrauch als Grad der Sättigung der Farbe bezeichnet werden. Dieser Grad ist eine mathematische Grösse.

Höchst bemerkenswerth ist die Thatsache, dass zu den homogenen Strahlen, welche den Eindruck des Grün machen (also etwa den Wellenlängen zwischen 0,0005636 und 0,0004921 mm. entsprechend) keine komplementäre homogene Strahlenart im Spektrum zu finden ist.

Wir untersuchen endlich die Beschaffenheit der Lichteindrücke, welche durch Zusammenwirken zweier homogener Strahlungen entstehen, die nicht komplementär sind und schliessen auch das schon behandelte Paar von homogenen Strahlenarten an den beiden äussersten Enden des Spektrums aus. Die Hauptsätze hierüber sind nach Untersuchungen von J. J. MÜLLER in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Zu ihrem Verständniss sind einige Bemerkungen nöthig. Die homogene Strahlenart ist immer nur durch den Namen des von ihr hervorgebrachten Farbeneindruckes bezeichnet, weil es hier nicht auf sehr genaue Bestimmung der Wellenlänge ankommt. Wo in der Rubrik Mischfarbe mehrere Farbennamen durch „oder“ ver-

Druckfehler in „Milliontheilen“. Ich habe in der Tabelle die Originalzahlen von HELMHOLTZ gegeben, sie können durch Multiplikation mit 27,07 auf Millimetermaass reducirt werden.

bunden stehen, kommt der eine oder der andere Farbeindruck zu Stande je nachdem die erste oder zweite homogene Componente an Intensität vorherrscht. Das Wort spektral in der Rubrik Sättigungsgrad soll bedeuten, dass der Eindruck der gemischten Strahlung merklich ebenso gesättigt ist wie der Eindruck den eine homogene Strahlung von dem entsprechenden Farbenton hervorruft.

Componenten.	Ton der Mischfarbe.	Sättigungsgrad.
Roth — Gelb.	Orange.	Spektral.
Orange — Gelbgrün.	Gelb.	Spektral.
Gelb — Grün.	Gelbgrün.	Weisslich.
Gelbgrün — Blaugrün.	Grün.	Sehr weisslich.
Grün — Cyanblau.	Blaugrün.	Weisslich.
Blaugrün — Indigo.	Cyanblau.	Spektral.
Cyanblau — Violett.	Indigo.	Spektral.
Roth — Gelbgrün.	Orange oder Gelb.	Spektral.
Roth — Grün.	{ Orange oder Gelb oder Gelbgrün. }	Weisslich.
Violett — Blaugrün.	{ Indigo oder Cyanblau. }	Spektral.
Violett — Grün.	{ Indigo oder Cyanblau oder Blaugrün. }	Weisslich.
Violett — Orange.	Roth.	Weisslich.
Roth — Cyanblau.	Indigo oder Violett.	Weisslich.
Roth — Indigo.	Violett.	Wenig weisslich.

Unter den Eindrücken, welche nach dieser Tabelle durch Zusammenwirken nicht komplementärer Strahlungen erzeugt werden, giebt es viele, die ganz genau ebenso auch durch Zusammenwirken eines anderen Strahlenpaares hervorgebracht werden können, z. B. der weisslich-orange Farbeindruck den rothe und grüne Strahlen hervorbringen, kann auch erzeugt werden durch Zusammenwirken von Strahlen der Wellenlänge 0,00002244 Par. Z., die den Eindruck orange machen und von den komplementären¹ Strahlen der Wellenlänge 0,00001809 Par. Z., die den Eindruck Blau machen, wenn die Intensität der ersteren stark vorwiegt. Solcher Beispiele liessen sich noch unzählige geben, oder man kann sagen: Jeder bestimmte Farbeindruck der durch ein Paar homogener Strahlen erzeugt wird, lässt sich auch noch durch unendlich viele verschiedene homogene Strahlenpaare hervorbringen.

¹ Siehe Tabelle S. 159.

II. Symbolische Darstellung der gemischten Farben.

Diese ganze unendliche Mannigfaltigkeit der durch Paare homogener Strahlen erzeugbaren Farbeneindrücke lässt sich bezüglich der Stetigkeit des Ueberganges von einem zum andern und bezüglich ihrer Aehnlichkeit untereinander symbolisch darstellen durch das System aller Punkte des ebenen Flächenstückes, welches von der schon mehrfach gebrauchten Kurve Fig. 49 eingeschlossen ist. Die ganz eigenartige Empfindung weiss muss offenbar durch den Punkt dargestellt sein, welcher oben schon als Pol gewählt wurde, von welchem die Fahrstrahlen ausgehen, deren Winkeldistanz die Unterschiede des Farbentones der Spektralfarben misst. Die Punkte der Fahrstrahlen selbst stellen die verschiedenen blassen Farbtöne derart dar, dass der Abstand eines Punktes vom Pol den Grad der Sättigung andeutet, welcher sein Maximum erreicht wenn die Entfernung vom Pol die ganze Länge des betreffenden Fahrstrahles bis an die spektrale Grenzkurve ausmacht. Auf dem Fahrstrahl Wm also beispielsweise stellen sich alle Empfindungen dar, welchen man einen bestimmten blaugrünen Farbenton zuschreibt, von weiss an durch das blasseste Blaugrün mit steigender Sättigung bis zum spektralen Blaugrün. Auf dem Fahrstrahl WV stellen sich ebenso alle Empfindungen von einem gewissen rothen Farbentone dar, von weiss an durch die blassesten rothen Nuancen bis zum gesättigten Roth des Spektrums u. s. w.

Es ist gut zu bemerken, dass es ganz und gar der Natur der Sache entspricht, wenn man das Fortschreiten von Ton zu Ton durch Drehung einer Richtung um einen Punkt das Fortschreiten von bläseren Nuancen eines Tones zu gesättigteren aber durch Fortschreiten auf einer geraden Linie darstellt. Beim Fortschreiten von Ton zu Ton verlangt nämlich die innere Anschauung, dass man, ohne die schon durchlaufenen Töne zum zweiten Male zu passieren zum ursprünglichen Farbenton zurückkommt, z. B. von Gelb durch Grün, Blaugrün, Blau, Violett, Purpur, Roth, Orange wieder zu Gelb. Beim Fortschreiten von weiss durch blassere Nuancen zu immer gesättigteren desselben Tones verlangt die innere Anschauung nie, dass wir zu Eindrücken kommen könnten, welche dem ursprünglichen wieder ähnlicher werden.

Lässt man mehr als zwei homogene Strahlenarten in beliebiger Zusammenstellung auf dieselbe Netzhautstelle einwirken, so entsteht niemals ein Farbeneindruck, der nicht auch schon durch Zu-

sammenwirken zweier homogener Strahlenarten hervorgebracht werden könnte, d. h. ein Eindruck der einen bestimmten einer Stelle des Spektrum entsprechenden Farbenton aufweist und dessen Sättigung jedesfalls geringer ist als die der betreffenden Spektralstelle. Mit der symbolischen Darstellung der durch Paare homogener Strahlen erzeugbaren Farben oder Lichteindrücke in Form eines begrenzten ebenen Flächenstückes ist also die ganze Mannigfaltigkeit der möglichen Farbeneindrücke von den Intensitätsunterschieden abgesehen erschöpft. Es stellt sich somit die ganze Mannigfaltigkeit der überhaupt möglichen Farbeneindrücke als eine zweifach unendliche dar. Dies heisst mit andern Worten: Es ist erstens möglich eine stetige Reihe von Elementen der Mannigfaltigkeit zu durchlaufen und auf das erste Element zurückzukommen ohne dass man ein Element zweimal nimmt — hierdurch ist die unendliche Mannigfaltigkeit als eine mehr als einfache charakterisirt. Zweitens sind durch eine solche stetige Reihe von Elementen die sämtlichen Elemente derart in zwei Gruppen geschieden, dass es nun nicht mehr möglich ist, von einem Elemente der einen zu einem Elemente der anderen Gruppe einen stetigen Uebergang zu machen ohne dass darin ein Element der zuerst gebildeten Reihe vorkommt, hierdurch ist die Mannigfaltigkeit als eine nicht mehr als zweifache charakterisirt. Dass diese beiden Eigenschaften dem System aller möglichen auf gleiche Intensität gebrachten Farbenempfindungen zukommt wird keines besonderen Beweises mehr bedürfen.

Es mag an dieser Stelle ausdrücklich hervorgehoben werden, dass keine Lichtempfindung sei sie weiss oder habe sie einen beliebigen Farbenton und einen beliebigen Sättigungsgrad sich im Bewusstsein als etwas zusammengesetztes ankündigt. Jede erscheint vielmehr als ein durchaus Einfaches und selbst dem aufmerksamsten Beobachter wird es nie gelingen eine solche Empfindung in Componenten zerlegt zum Bewusstsein zu bringen. Der Sprachgebrauch gewisse Farbenempfindungen durch zusammengesetzte Worte wie etwa Blaugrün zu bezeichnen, scheint manche zu der Annahme verführt zu haben, dass doch etwas Zusammengesetztes an der Wahrnehmung sei. Diese Annahme kann indessen nicht entschieden genug zurückgewiesen werden. Die Sprache bezeichnet durch die Zusammensetzung von zwei Farbennamen offenbar nur die gleichzeitige Aehnlichkeit mit zwei verschiedenen Farben. Wo ein Bedürfniss vorhanden war, hat daher die Sprache auch einfache Bezeichnungen für Farben eingeführt die ebensowohl durch zusammengesetzte Worte hätten bezeichnet werden können, z. B. Gelb. Dies könnte ganz passend durch

grünlichroth bezeichnet werden, denn die Aehnlichkeit des Gelb und Roth einerseits und des Gelb und Grün andererseits ist gewiss ebenso gross wie die Aehnlichkeit des Blaugrün und Grün einer- und des Blaugrün und Blau andererseits. Dass gleichwohl für die gelbe Farbe ein besonderer Name in Gebrauch kam, hat offenbar darin seinen Grund, dass bei der besonderen Reizbarkeit der Netzhaut für die Strahlenarten, welche eben diesen Eindruck machen, derselbe sich dem sprachbildenden Bewusstsein besonders häufig und mächtig aufdrängte.

Wenn nun auch jede Farbenempfindung in der inneren Anschauung als eine unauflösliche Einheit auftritt, so ist damit keineswegs erwiesen, dass sie in Wahrheit eine einfache Empfindung ist. Es treten ja niemals im Bewusstsein die elementaren Empfindungen selbst auf, sondern stets nur Vorstellungen, welche aus dem Empfindungsmaterial gebildet sind und es bedarf auf allen Sinnesgebieten besonderer Hülfen der Aufmerksamkeit, um den Empfindungselementen auf die Spur zu kommen. Sich ihrer als solcher wirklich bewusst zu werden, gelingt vielleicht überhaupt gar nie. Am weitesten geht wohl die Fähigkeit des Ohres die in einer Gesamtempfindung enthaltenen Elemente einzeln wahrzunehmen, weil es hier eben möglich ist, sie auch einigermaassen isolirt hervorzurufen. Anders dagegen auf dem Gebiete des Tastsinnes. Der Charakter einer Wärmeempfindung im Gegensatze zu dem einer Druckempfindung wird ohne Zweifel nur bedingt durch den verschiedenen Charakter der Gruppierung mehrerer Elementarempfindungen, aber wir sind nicht im Stande uns dieser Elementarempfindungen gesondert bewusst zu werden.

Die symbolische Darstellung der qualitativen Mannigfaltigkeit aller möglichen Lichtempfindungen durch die Mannigfaltigkeit der Punkte eines begrenzten ebenen Flächenstückes kann erfahrungsgemäss in einer sehr bemerkenswerthen Weise bewerkstelligt werden. Giebt man nämlich der Begrenzungslinie eine gewisse Gestalt und dem Pol eine gewisse Lage darin, so lässt sich, wenn die beiden Punkte, welche die durch zwei Strahlungen (einfache oder beliebig zusammengesetzte) für sich hervorgebrachten Empfindungen bedeuten und das Intensitätsverhältniss der beiden Strahlungen gegeben sind, nach einer einfachen Regel der Punkt finden, welcher die durch das Zusammenwirken dieser beiden Strahlungen auf dieselbe Netzhautstelle hervorgebrachte Empfindung bedeutet. Die Regel lautet so: Man denke sich an die beiden gegebenen Punkte Massen gesetzt, deren Verhältniss das der Intensitäten der beiden Strahlungen ist und kon-

struire den Schwerpunkt dieses Massensystemes, er ist der gesuchte Punkt. Es sei z. B. p Fig. 49 der eine und q der andere gegebene Punkt, das heisst wir denken uns eine Strahlung, welche den Eindruck eines nicht ganz gesättigten Orange macht und eine zweite, welche den Eindruck eines ebenfalls nicht ganz gesättigten etwas zum Grün neigenden Blau macht. Die eine sowohl als die andere dieser Strahlungen könnte immer noch in sehr verschiedener Weise aus homogenen Strahlen bestehen, worauf gar nichts ankommt. Lassen wir nun zwei solche Strahlungen zusammenwirken, so können erstens nur Eindrücke zu Stande kommen, welche auf der geraden Linie pq ihre Darstellung finden, da nur hier der Schwerpunkt der beiden hypothetisch zu setzenden Massen liegen kann. Es können also nur Eindrücke von weisslich orange weisslich roth weisslich purpur weisslich violett weisslich blau entstehen und ob der eine oder andere dieser Eindrücke entsteht, hängt vom Intensitätsverhältnisse der beiden Strahlungen ab. Wäre z. B. die orange Strahlung viermal so stark als die blaue, so wäre r der gesuchte Punkt und wir hätten den Eindruck eines ziemlich blassen Roth, denn der Punkt r liegt auf dem Fahrstrahl WV dessen Punkte nach dem dargelegten Princip die Eindrücke darstellen, welche von einem gewissen spektralen roth den Uebergang zu weiss bilden. Es versteht sich von selbst, dass die soeben entwickelte Regel auch auf die Konstruktion des Farbeindrucks, den beliebig viele verschiedene homogene oder selbst schon gemischte Strahlungen zusammenwirkend hervorbringen, denn man kann zuerst für zwei den Schwerpunkt konstruiren und dann zu dem Resultat die dritte Strahlung hinzunehmen u. s. f.

III. Young's Theorie der Farbenempfindung.

Da es bei der Konstruktion des gemischten Farbeindrucks gar nicht ankommt auf die physikalische Beschaffenheit der Strahlungen, welche in die Mischung eingehen, sondern lediglich auf die Farbeindrücke, welche sie hervorbringen, so muss man schliessen, dass es sich dabei eben um das Zusammensein von physiologischen Zuständen der Netzhaut handelt gleichgültig, durch welche äussere Ursache dieselben bewirkt sind. Es kann daher kaum eine Hypothese sondern nur ein Ausdruck der Thatfachen genannt werden, wenn man überhaupt die verschiedenen Lichteindrücke als Zusammensein einiger weniger einfacher ansieht. Wie viele solche „Grundfarben“ man wähle und welche Farbtöne man ihnen beilegen will, bleibt allerdings in weiten Grenzen der Willkühr überlassen,

nur eine Bedingung muss erfüllt sein. Es müssen nämlich die den Grundfarben in unserer symbolischen Darstellung anzuweisenden Plätze die Eckpunkte eines Polygons bilden, das die von der ausgezogenen Curve und der punktirten Geraden begrenzte Fläche vollständig einschliesst, denn nur unter dieser Bedingung kann jeder Punkt dieses Flächenstückes Schwerpunkt eines in jenen Eckpunkten vertheilten Massensystemes sein, d. h. kann jede wirkliche Farbenempfindung als Zusammensein jener hypothetischen Grundempfindungen in bestimmtem Intensitätsverhältniss aufgefasst werden. Diese Bedingung schliesst wegen der unvermeidlichen Krümmung der das Spektrum darstellenden Linie den Satz ein, dass mindestens eine der Grundfarben vom Pol weiter abliegt, als die im Ton entsprechende Spektralfarbe d. h. gesättigter ist, als irgend ein durch wirkliche Strahlung in der unermüdeten Netzhaut hervorzubringender Farbeindruck desselben Tones.

Wollen wir nun den Boden des rein Thatsächlichen verlassen, so können wir nach einer bestimmten möglichst wahrscheinlichen Annahme bezüglich der Zahl und des Tones der einfachen Farbeindrücke suchen. Was zunächst die Zahl betrifft, so empfiehlt es sich natürlich sie auf die kleinste überhaupt genügende nämlich auf 3 zu beschränken. Hierin besteht die berühmte von THOMAS YOUNG aufgestellte Hypothese zur Erklärung der Farbenempfindung, welche neuerdings von HELMHOLTZ und MAXWELL weiter ausgebildet ist. Um den Ton der drei Grundfarben zu wählen, gehen wir davon aus, dass offenbar der grüne Farbenton eine besondere ausgezeichnete Stellung einnimmt schon dadurch, dass er im Spektrum keinen komplementären hat. Wenn man nun Grün als den Ton der einen Grundfarbe gewählt hat, so scheint mir die Wahl der beiden andern nur auf Roth und Blau fallen zu können, ich kann mich wenigstens nicht entschliessen mit YOUNG und HELMHOLTZ neben Grün und Roth Violett als dritte Grundfarbe gelten zu lassen, und zwar aus folgendem Grunde. Die drei Grundfarben sollten nämlich, wie mir scheint, so gewählt sein, dass die drei Unterschiede zwischen je einem derselben möglichst gleich gross sind. Nun wird aber Niemand zweifelhaft sein, dass der Unterschied zwischen Roth und Violett viel kleiner ist als der zwischen Roth und Grün und als der zwischen Grün und Violett. Nimmt man dagegen als dritte Grundfarbe Blau und zwar genauer gesprochen einen der als Indigo gemeinlich bezeichneten Töne, so tritt dieser Missstand nicht in dem Maasse hervor. Zwischen Roth und Blau ist wohl nach dem allgemeinen Urtheil der Unterschied ebenso gross wie zwischen Blau und Grün. Dagegen dürften

manche den Unterschied zwischen Roth und Grün grösser schätzen, was aber vielleicht nur dem weiter oben schon berührten Umstand zuzuschreiben ist, dass sich wegen der besonderen Reizbarkeit der Netzhaut durch die betreffenden Strahlenarten die gelben Farbentöne der Aufmerksamkeit besonders häufig und stark aufdrängen. Als rothen Grundton möchte ich nicht sowohl den des äussersten spektralen Roth, das immerhin schon etwas zum Gelb (resp. Grün) hinneigt annehmen, sondern einen Farbenton der etwas mehr Aehnlichkeit mit Carminroth hat.

Hiernach wären den Grundempfindungen auf unserer Farbenscheibe Plätze anzuweisen in den Eckpunkten RGB eines gleichseitigen Dreieckes, welches das von der Spektralkurve und der Purpurlinie begrenzte Flächenstück vollständig einschliesst. Wie weit von W entfernt man die Punkte B , G und R auf ihren Fahrstrahlen setzen will, das bleibt freilich immer noch der Willkür überlassen, ohne dass man einen Widerspruch gegen Thatsachen zu befürchten hätte. Es empfiehlt sich also die einfachste Annahme, d. h. die Punkte nur so weit hinauszurücken, dass das Dreieck GRB gerade eben die Fläche der wirklichen Farben vollständig einschliesst. Es verdient noch ausdrücklich erwähnt zu werden, dass die Repräsentation die drei Grundempfindungen durch drei Punkte (R, G, B) die von W gleich weit abstehen soviel heisst als annehmen, dass der Eindruck weiss dann entsteht, wenn die drei Grundempfindungen in gleicher Stärke vorhanden sind, denn der Schwerpunkt dreier Massen in R, G und B liegt alsdann in W nur, wenn die drei Massen gleich sind.

Der soeben entwickelten Hypothese hat schon YOUNG selbst eine weitere anatomisch physiologische Bedeutung gegeben, die mit den oben ausgesprochenen Grundsätzen der allgemeinen Empfindungslehre im Einklang steht. Er nimmt nämlich an, dass in jedem Netzhauttheil, der aller Farbenempfindungen fähig ist, drei getrennte Nerven-elemente vorhanden sind, die als ebensoviele Individuen gesondert empfinden und zwar in qualitativ verschiedener Weise, wie das eben für individuell verschiedene Nerven-elemente und nur für solche möglich ist. Der einen Elementenart käme eben die spezifische Energie des Grünempfindens zu, der andern die des Roth- und der dritten die des Blauempfindens. Es mag übrigens hier noch einmal ausdrücklich bemerkt sein, dass die drei Empfindungen, welche bei ausschliesslicher Reizung nur je einer Fasergattung zu Stande kommen würden, uns eigentlich unbekannt sind, da faktisch jede Strahlung, sei sie homogen, sei sie gemischt, keine der Fasergattungen ganz uner-

regt lässt. Wir bezeichnen die unbekanntenen hypothetischen Grundempfindungen nur mit den Namen der bekannten Farben, welchen sie im Sinne der Hypothese am ähnlichsten sein müssen. Bei dem sehr verwickelten Bau der kleinsten Netzhautpartien wird die anatomische Möglichkeit der YOUNG'schen Annahme kaum bestritten werden können. Andererseits kann es auch keinen Einwand gegen diese Hypothese begründen, dass wir die totale Farbenempfindung einer Netzhautstelle nicht im Stande sind im Bewusstsein zu zergliedern, in ein räumliches Nebeneinander einer Grün-, einer Roth-, einer Blauempfindung, was doch die totale Farbenempfindung nach YOUNG's Hypothese in Wirklichkeit wäre. Die Möglichkeit einer solchen Zergliederung im Bewusstsein könnten wir nur dann erwarten, wenn es ausführbar wäre die drei specifisch verschieden empfindenden Elemente eines Netzhauttheiles von merklich verschiedenen Orten her zu erregen, resp. durch Bewegungen des Organes abwechselnd das eine oder das andere dieser Elemente demselben Reize darzubieten. Da dies aber wegen der Kleinheit des Abstandes zwischen den drei Elementen jedes Netzhauttheiles unausführbar ist, so tritt der Complex der drei Grundempfindungen stets als unauflöbliche Einheit ins Bewusstsein, deren Qualität einer zweifach unendlichen Mannigfaltigkeit fähig ist, da sie von zwei stetig veränderlichen Grössen abhängt, nämlich den beiden Intensitätsverhältnissen der einen Grundempfindung zu den beiden andern.

Um den ganzen in der symbolischen Darstellung Fig. 49 niedergelegten Thatbestand der Lehre von den Farbenempfindungen aus der YOUNG'schen Theorie zu erklären, hat man noch folgende Annahme zu machen. Jede der drei Fasergattungen hat ihre eigenthümlichen Endapparate, deren Reizbarkeit durch Strahlungen eine verschiedene ist, derart dass die rothempfindenden Fasern besonders stark durch die Strahlen des Spektrums von geringer Brechbarkeit gereizt werden. Die grünempfindenden Fasern werden am stärksten erregt durch Strahlen mittlerer Brechbarkeit, die blauempfindenden am stärksten durch die stark brechbaren Strahlen.

Hat man eine Farbentafel nach dem Schema der Fig. 49 konstruirt, an welcher Alles lediglich Ausdruck von Thatsachen ist bis auf die drei Grundempfindungspunkte B, R, G , so kann man sofort drei Curven konstruiren, deren Abscissen die Schwingungszahlen der homogenen Strahlen bedeuten und deren Ordinaten die Stärke des Empfindens bedeuten, welche durch die verschiedenen Strahlen, wenn sie mit der Intensität 1 wirken, in den drei Fasergattungen erregt wird. Die Intensität 1 ist dabei so zu verstehen, dass dieselbe eine Gesamt-

empfindung von der Intensität 1 hervorrufft. So sind in der Fig. 52 die Curven RR , GG , BB ¹ nach den Maassen der Farbentafel Fig. 49

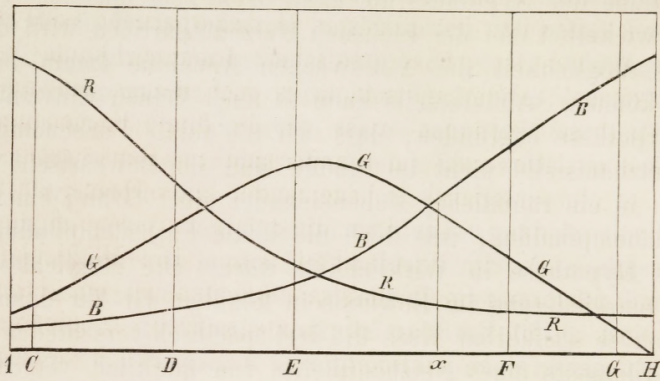


Fig. 52.

entworfen. Um ihre Richtigkeit auf die Probe zu stellen, sehen wir zu ob sie die Beziehungen der Complementärfarben erklären. Wir wissen dass die der FRAUNHOFER'schen Linie C entsprechende Strahlung complementär ist zu der Strahlung, welche einer gewissen zwischen der Linie E und F entspricht. Es müssen also die drei Ordinaten über C in gleichem Verhältniss verkleinert addirt zu den entsprechenden Ordinaten über einem gewissen Punkte zwischen E und F (es mag etwa der Punkt x sein) drei gleiche Summen ergeben, da ja nach den gemachten Feststellungen der Eindruck weiss nichts anderes bedeutet als gleiche Erregung der drei Fasergattungen. Dass man die Ordinaten über C in einem gewissen Verhältniss verkleinern muss, entspricht der Thatsache, dass zur Empfindung Blaugrün mit der Intensität 1 complementär ist, die Empfindung Roth nicht in der Intensität 1, sondern in viel kleinerer. Nun zeigen die drei Ordinaten über C mit $\frac{9}{22}$ multiplicirt die Längen der drei Linien $r_1 r_2$ $g_1 g_2$ $b_1 b_2$ (Fig. 53) und die Ordinaten über x sind in ihrer ganzen Länge gleich Rr_1 Gg_1 Bb_1 die Summen Rr_2 Gg_2 Bb_2 sind daher untereinander gleich, wie es die Beziehung des Complementärseins der den Punkten C und x der Abscissenaxe entsprechenden Strahlungen verlangt.

¹ Die hier gegebenen Kurven für die Reizbarkeit der drei hypothetischen Arten von Faserenden weichen wesentlich ab von denen, welche MAXWELL und HELMHOLTZ (Physiol. Optik. Fig. 119. S. 291) gegeben haben und welche vielfach reproducirt sind. Der Unterschied ist aber nicht bedingt durch einen principielen Unterschied der Auffassung, sondern dadurch, dass MAXWELL und HELMHOLTZ gleiches Maass der physikalischen Strahlungsenergie voraussetzen, ich dagegen gleichen physiologischen Gesamteffekt.

Für das Verständniss der in den letzten Paragraphen entwickelten Theorie ist es gut noch einen Satz ausdrücklich auszusprechen, von dem in den Entwicklungen eigentlich schon stillschweigend Gebrauch gemacht ist. Er lautet so: der Erregungszustand in jeder Fasergattung ist unabhängig von dem in den beiden andern und wenn ein zusammengesetzter Reiz die Netzhaut trifft, so ist die Erregung jeder Faserart die Summe der Erregungen, welche die Componenten des Reizes für sich darin hervorbringen würden.

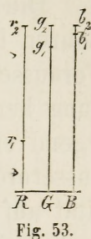


Fig. 53.

Wir haben gesehen dass die bis hierher zur Sprache gebrachten Thatsachen der Farbenempfindung sämmtlich aus der Theorie YOUNG's erklärt werden. Sie ist aber im Stande auch noch eine Fülle anderer Erscheinungen zu erklären, von denen im weiteren Verlaufe der Darstellung zu handeln sein wird. Ueberhaupt ist mir nur eine einzige Thatsache dieses Gebietes bekannt, welche nicht auf das Ungezwungenste aus der YOUNG'schen Theorie gefolgert werden könnte. Sie besteht darin, dass jede Strahlung die einen noch so gesättigten Farbeindruck macht, sowie sie eine einigermaassen ausgedehnte polare Netzhautpartie trifft, einen weisslichen Eindruck hervorbringt, in welchem oft gar kein Farbenton mehr zu erkennen ist, wenn ihre Wirkung auf eine sehr kleine Netzhautpartie beschränkt wird. So giebt es bekanntlich viele Sterne deren Strahlung der spektroskopischen Untersuchung zufolge einen sehr entschieden farbigen Eindruck machen sollte, und dennoch sehen dieselben wie weisslich glänzende Punkte aus, an denen der Farbenton kaum erkennbar ist. An farbigen terrestrischen Objekten hat namentlich AUBERT¹ planmässige Versuche gemacht, die zeigen, dass, sowie der Gesichtswinkel, unter welchem sie erscheinen, unter eine gewisse Grenze sinkt, kein Farbenton mehr erkennbar ist. Dass hiervon die Theorie YOUNG's so unmittelbar wenigstens nicht Rechenschaft giebt, bedarf keines besonderen Beweises. Ebenso wenig kann YOUNG's Theorie die hierhergehörige Beobachtung E. FICK's² erklären, dass an mehreren getrennt nebeneinander gesehenen sehr kleinen farbigen Objekten der Farbenton oft noch erkannt wird, wenn er an einem einzigen unter demselben Gesichtswinkel erscheinenden Objekte nicht mehr erkannt werden kann.

1 AUBERT, Physiologie der Netzhaut. 2. Abschn. 1. Cap. Breslau 1864.

2 E. FICK, Arch. f. d. ges. Physiol. XVII. S. 152.

IV. Farbenton abhängig von der Stärke des Reizes.

Die sämtlichen in den vorstehenden Paragraphen dargestellten Lehren haben nur unter der noch nicht ausdrücklich ausgesprochenen Voraussetzung Geltung, dass die Strahlung, welche die Lichtempfindung hervorruft, einen mittleren Intensitätsgrad besitzt. Lässt man irgend eine Strahlung, sei sie homogen oder gemischt entweder in ausserordentlich geringer oder in enorm grosser (blendender) Intensität auf die Netzhaut wirken, so entsteht eine Lichtempfindung ohne bestimmbareren Farbenton, d. h. die Empfindung weiss, die man bei geringem Intensitätsgrade bekanntlich grau nennt. Was die Richtigkeit des Satzes bezüglich der minimalen Intensitätsgrade betrifft, so wird sie schon durch das alte Sprichwort „bei Nacht sind alle Katzen grau“ bewährt. Doch ist es von Interesse zu untersuchen, welche Farbentöne bei abnehmender Intensität zuerst aufhören erkennbar zu sein. Ausgedehnte Versuchsreihen hat hierüber AUBERT¹ mit Pigmentfarben angestellt, von deren Ergebnissen besonders das hervorzuheben ist, dass am Zinnoberroth bei geringerer Beleuchtungsstärke schon ein Farbenton erkennbar ist als am Ultramarinblau, dass aber dies letztere heller erscheint als jenes, obwohl bei mittlerer Tageshelligkeit das Zinnoberroth entschieden den helleren Eindruck macht.

Lässt man eine homogene Strahlung in ausserordentlicher Helligkeit wirken, so geht am leichtesten Violett in weiss über. Die anderen Farbentöne gehen bei Steigerung der Helligkeit meist mit Aenderung ihres Tones ebenfalls in weiss über und zwar nimmt merkwürdigerweise diese Aenderung des Tones bei verschiedenen eine entgegengesetzte Richtung. Blau nämlich geht durch blass violett in weiss über, Grün durch gelblichgrün. Der rothe Farbenton wird blassgelblich und es gelingt nach HELMHOLTZ selbst bei der blendendsten Helligkeit nicht ihn vollständig in weiss überzuführen.

Diese sämtlichen Erscheinungen sind ohne allen Zwang mit der YOUNG'schen Theorie zu vereinigen. Man braucht nur die durchaus plausible Annahme zu machen, dass bei äusserst geringen und äusserst hohen Intensitätsgraden der Strahlen die Erregbarkeitskurven der drei Fasergattungen nicht mehr den Fig. 52 gezeichneten Gang einhalten, sondern nahe zusammenfallen. Noch genauer könnte man den Thatbestand graphisch darstellen, wenn man für jede Strahlenart drei Kurven konstruirte den drei Fasergattungen entsprechend deren Abscissen die Intensität der Strahlenart repräsentiren und deren

1 AUBERT, *Physiologie der Netzhaut*. 2. Abschn. 2. Cap.

Ordinaten die durch die Strahlenart bei ihren verschiedenen Intensitätsgraden in den einzelnen Fasergattungen hervorgebrachte Erregungsstärke darstellen. In Fig. 54 ist eine solche Darstellung ver-

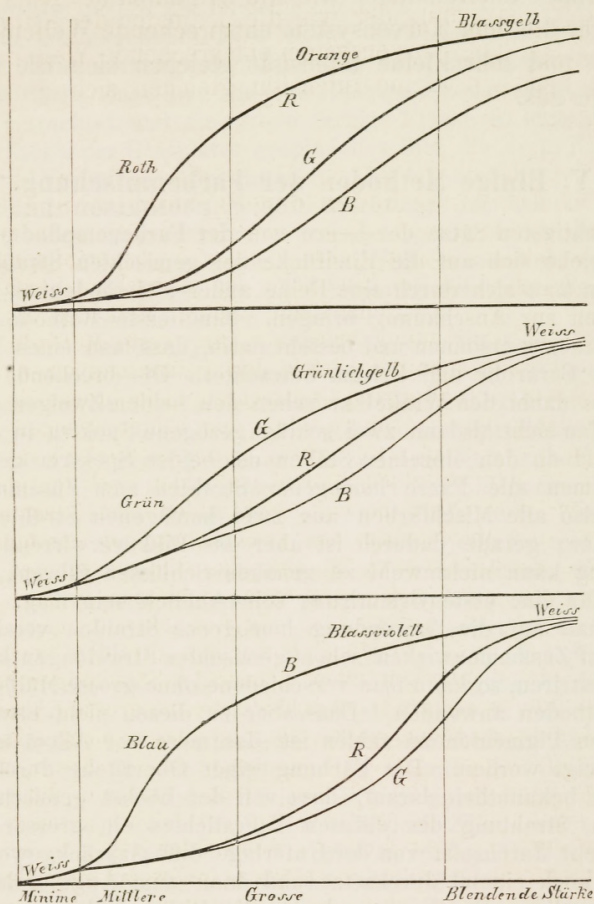


Fig. 54.

sucht. Das Kurvensystem *RGB* über der ersten Abscissenaxe stellt die Erregbarkeit der Roth, Grün und Blau empfindenden Fasergattung dar als Funktion der Stärke einer Strahlung die in mittlerer Stärke den Eindruck Roth macht also etwa der Strahlung, welche der FRAUNHOFER'schen Linie *C* entspricht. Das Kurvensystem über der zweiten Abscissenaxe bezieht sich ebenso auf eine Strahlung die bei mittlerer Stärke den Eindruck Grün macht, die also etwa dem Theile des Spektrums zwischen *E* und *F* entspricht. Das dritte Kurvensystem gilt ebenso für Strahlen die bei mittlerer Stärke den

Eindruck blau machen, etwa entsprechend der Linie G des Spektrums. Die 3 Ordinaten jedes Kurvensystems stehen in dem Intervalle, welches unten als mittlere Stärke bezeichnet ist, in demselben Verhältnisse untereinander wie die Ordinaten der Kurven R, G, B in Fig. 52 für die dem Kurvensystem entsprechende Wellenlänge. Für sehr grosse und sehr kleine Intensität gleichen sich die Ordinatenunterschiede aus.

V. Einige Methoden der Farbenmischung.

Die wichtigsten Sätze der Lehre von der Farbenempfindung namentlich die, welche sich auf die Eindrücke der gemischten Strahlungen beziehen, kann man sich durch eine Reihe anderer Methoden als der bisher beschriebenen zur Anschauung bringen. Eine erste Methode dieser Art ist von HELMHOLTZ ersonnen und besteht darin, dass man einen V-förmigen Spalt durch Fernrohr und Prisma betrachtet. Die brechende Kante des Prismas muss dabei den Winkel zwischen den beiden Zweigen des Spaltes halbiren. Man sieht alsdann zwei schräg gezogene Spektren in theilweiser Deckung und an den einzelnen Stellen des beiden Spektren gemeinsamen Feldes kommen alle Paare homogener Strahlen zum Zusammenwirken. Man sieht also alle Mischfarben aus zwei homogenen Strahlen zugleich nebeneinander; gerade dadurch ist aber das Bild verwirrend und seine Zergliederung kann nicht wohl zu genauen Schlüssen führen, so belehrend auch für eine erste Orientirung sein Anblick sein mag.

Will man auf die Anwendung homogener Strahlen verzichten und bloss die auf Zusammenwirken schon gemischter Strahlungen bezüglichen Sätze demonstriren, so kann man verschiedene ohne grosse Hilfsmittel ausführbare Methoden anwenden. Dass aber zu diesen nicht etwa die Vermengung von Pigmenten zu zählen ist, das muss vor Allem mit einigen Worten gezeigt werden. Die Färbung einer Oberfläche durch ein Pigment beruht bekanntlich darauf, dass von der höchst gemischten (weiss aussehenden) Strahlung des diffusen Tageslichtes ein grosser Theil die Pigmentschicht durchsetzt von der Unterlage diffus zurückgeworfen wird, die Schicht noch einmal durchsetzt und dann zum Auge gelangt. Bei diesem zweimaligen Durchgange durch die Pigmentschicht werden nun Strahlen von gewissen Brechbarkeitsstufen besonders absorbirt und der Rest wird also einen mehr oder weniger gesättigten Farbeindruck machen. Mengt man noch ein zweites Pigment dem ersteren bei, so hat das Licht beide zu durchsetzen und es werden der Strahlung, welche bei der Absorption im ersten übrig bleibt, noch weitere Antheile durch die Absorption im zweiten entzogen. Dies ist also nicht ein Weg, auf welchem man über das Zusammenwirken verschiedener Strahlenarten etwas erfahren kann. Es erscheint auch ein Gemenge zweier Pigmente stets dunkler als jedes Einzelne. Dem Vertrauen auf die Ergebnisse der Pigmentmischung verdankt der früher weit verbreitete Irrthum seine Entstehung, dass Gelb aussehendes und Blau aussehendes Licht zusammenwirkend den Eindruck Grün machten. Es trifft sich nämlich zufällig, dass

sowohl die gelben als die blauen Pigmente meist sehr erhebliche Mengen grün aussehendes Lichtes durchlassen, dass also dieses gerade übrig bleibt, wenn man Weiss aussehendes Licht gleichzeitig der Sichtung durch das gelbe und das blaue Pigment unterwirft.

Eine ebenso artige als einfache Methode um zwei Strahlungen auf der Netzhaut zusammenwirken zu lassen, die von verschiedenen gefärbten Oberflächen diffus zurückgeworfen werden, ist von HELMHOLTZ angegeben und besteht darin, dass man die eine farbige Fläche schräg durch eine Glasplatte betrachtet und die zweite farbige Fläche so legt, dass ihr von der Vorderfläche der Glasplatte gespiegeltes Bild die erste Fläche deckt. Verschiedene Verhältnisse der Intensität beider Strahlungen kann man entweder durch verschieden helle Beleuchtung der beiden Flächen erzielen oder, indem man mehr oder weniger schräg durch die Glasplatte hindurchschaut. Die Vergrösserung des Winkels nämlich zwischen der Blickrichtung mit der Normale zur Glasplatte verstärkt die reflektirten und schwächt die durchfallenden Strahlen.

Bei weitem die vorzüglichste Methode zur Mischung von Pigmentfarben ist aber die rotirende Scheibe mit verschieden farbigen Sektoren. Da sie allein im Stande ist, genaue numerische Ergebnisse zu liefern. Sie gründet sich auf folgenden erst später zu beweisenden merkwürdigen Satz der Physiologie der Netzhaut. Wenn eine Netzhautstelle in regelmässiger periodischer Aufeinanderfolge von verschiedenen Strahlungen getroffen wird und die Dauer der ganzen Periode unter einer gewissen Grenze (etwa $\frac{1}{25}$ Sekunde) liegt, so kommt qualitativ und quantitativ die Empfindung zu Stande, welche auch zu Staude käme, wenn die verschiedenen Strahlenarten andauernd zusammenwirkten und zwar jede mit einer Intensität, welche sich misst durch den Quotienten ihrer jedesmaligen Dauer dividirt durch die Dauer der ganzen Periode.

Bewerkstelligt man also den periodischen Vorgang in der Art, dass man verschiedene Sektoren einer mehr als 25 mal in der Sekunde umlaufenden Scheibe mit verschiedenen Pigmenten bedeckt, so ist als Intensität einer Strahlung in Rechnung zu bringen der Centriwinkel des diese Strahlung aussendenden Sektors dividirt durch 360° . Natürlich ist dieser Quotient noch zu multipliciren mit einer Zahl, welche die spezifische Helligkeit des Sektors im Verhältniss zu den Helligkeiten der anderen in derselben Versuchsreihe gebrauchten Sektoren ausdrückt.

Um auf der rotirenden Scheibe zwei verschiedene Gemische zu vergleichen steckt man auf dieselbe Axe eine grössere und eine kleinere Scheibe jede aus verschiedenen Sektoren gebildet, dann sieht man auf der Randzone das eine, in der Mitte, soweit die kleinere Scheibe reicht, das andere Gemisch, und kann eine sehr genaue Vergleichung anstellen.

Um die Winkel der Sektoren leicht beliebig verändern zu können nimmt man von jeder Farbe eine ganze Scheibe aus dünnem Pappdeckel, die aber längs eines Radius aufgeschlitzt ist. Man kann dann zwei oder mehrere so ineinander stecken, dass sie im Ganzen zusammenfallen, aber von den verschiedenen Scheiben auf der Vorderseite Sektoren sichtbar werden, deren Verhältniss durch Verdrehen beliebig verändert werden kann. Zur Vervollständigung gehören noch weisse und schwarze Scheiben. Die letzteren dienen dazu den gesammten Lichteindruck der durch

die ganze Periode hervorgebracht wird, zu schwächen, sofern man annimmt — was freilich nur annähernd richtig ist — dass ein schwarzer Sektor gar keine Strahlung aussendet.

Hat man die verschiedenfarbigen Sektoren der grösseren Scheiben so vertheilt, dass die Mischung den Eindruck weiss giebt, und will dies mit dem Weiss vergleichen, welches die von einem Papierblatte ausgesandte Strahlung hervorbringt, so darf man die kleinere Scheibe nicht ganz weiss lassen, denn alle farbige Papiere senden bei gleicher Beleuchtung viel schwächere Strahlungen im ganzen aus als weisses Papier und die weisse Mischfarbe der Randzone z. B. aus roth grün und blau wird viel schwächer leuchtend erscheinen als das weisse Papier in der Mitte. Schwächeres Weiss nennt man aber neben hellem weiss „grau“. Um das Weiss der kleineren Vergleichsscheibe auf dieselbe Stufe der Helligkeit abzudämpfen wie das Mischweiss der Randzone, muss man daher, wenn sie aus weissem Papier besteht, einen mehr oder weniger grossen Sektor derselben mit schwarz zudecken. Sie zeigt dann beim Drehen auch ein „grau“, welches nach einigem Probiren mit verschiedenen Verhältnissen des schwarzen und weissen Sektors leicht dem Mischgrau der Randzone völlig gleich gemacht werden kann.

Dieser Umstand hat vielfach Bedenken gegen die Beweiskraft der Versuche mit der Drehscheibe veranlasst. Namentlich ist der Spott berühmt geworden, welchen GOETHE nicht müde wurde an dem „abscheulichen Grau“ auszulassen, welches die Physiker für weiss ausgäben. Um solchen Missverständnissen zu begegnen, kann man eine sehr artige Demonstration machen. Es kommt eben nur darauf an, die gedrehte Farbenscheibe mit einer weiss gebenden Mischung auf eine für den Zuschauer unsichtbare Weise zu beleuchten und daneben ein von ihm für weiss anerkanntes Papierblatt in schwächere Beleuchtung zu bringen. Man kann dies sehr leicht auf folgende Weise veranstalten, so dass es einer beliebigen Zuschauerzahl zugleich sichtbar ist. Auf die wagrechte Axe wird nur eine Scheibe gesteckt mit zwei oder drei farbigen Sektoren, welche weiss geben. Nahe davor stellt man senkrecht also parallel mit der Farbenscheibe ein Blatt von weissem Pappdeckel mit einem Loch, durch welches ein Theil der Farbenscheibe zu sehen ist, jedoch darf weder die Axe noch der Rand sichtbar werden. Die Hinterseite des Pappdeckels bildet nun ein Spiegel, welcher auf die Farbenscheibe starkes z. B. Sonnenlicht reflektirt, während die Vorderseite des weissen Pappdeckels schwächer beleuchtet ist. Wird jetzt die Scheibe gedreht, so kann man bei geeigneten Beleuchtungsverhältnissen das durch das Loch gesehene Mischweiss dem Weiss des Pappdeckels gleich oder auch noch viel heller erscheinen lassen. Diese Demonstration dürfte sich namentlich für akademische und andere Vorträge empfehlen.

Ausführliche Anweisung zur Konstruktion der Farbenempfindungen in Form einer Tafel nach Art der Fig. 49 auf Grund von Versuchen mit der Drehscheibe findet man bei HELMHOLTZ und MAXWELL.

VI. Hering's Theorie der Farbenempfindung.

In neuerer Zeit ist versucht worden die YOUNG'sche Theorie von der Mannigfaltigkeit der Farbenempfindungen durch eine andere¹ zu ersetzen. Wenn ich auch diesen Versuch durchaus nicht für gelungen halte, so kann er doch hier nicht ganz mit Stillschweigen übergangen werden, da er eine zu namhafte Autorität auf dem Gebiete der physiologischen Optik nämlich HERING zum Urheber hat und wie es scheint in weiten Kreisen Beifall findet. Eine Darstellung geschweige denn eine Widerlegung dieser Theorie bin ich nicht im Stande zu versuchen, da ich offen bekennen muss, dass ich dieselbe nicht verstehe. Jede Theorie der Farbenempfindung muss nämlich offenbar von gewissen Thatsachen der inneren Anschauung ausgehen, die von Jedem mit normalem Gesichtsinne begabten Menschen ohne Weiteres anerkannt werden. Schon dies trifft nun wenigstens für mich bei HERING's Theorie nicht zu. Er behauptet nämlich die Veränderung des Empfindens von Weiss durch Grau zu Schwarz — wie es also beispielsweise stattfinden würde bei allmählicher Abminderung der Beleuchtung eines betrachteten weissen Papierblattes bis zu Null — sei eine qualitative Aenderung analog derjenigen, welche eintritt, wenn ich eine Fläche an dem Auge vorübergehen lasse, deren Theile mit verschiedenen allmählich in einander übergehenden Farbentönen gemalt ist.² Ich kann dies nicht zugeben. Ich finde in meinem Bewusstsein nur eine quantitative Aenderung ein und derselben Empfindung, wenn ich die Beleuchtung eines weissen Papierblattes im Gesichtsfelde allmählich vermindere bis es zuletzt schwarz erscheint, oder auf sonst eine Art alle Schattirungen des Grau bis zum Schwarz aufeinanderfolgen lasse. Ich finde diesen Vorgang durchaus demjenigen analog, wo ein bestimmter Klang mit abnehmender Intensität gehört wird bis er zuletzt in vollständiger Stille verschwindet. Dass das Wort Schwarz die Abwesenheit jeder Lichtempfindung und nicht eine Empfindung von bestimmter Qualität und variabler Intensität bezeichnet geht auch daraus hervor, dass man von jeder beliebigen Lichtempfindung z. B. einer rothen oder grünen genau ebenso durch stetiges Abmindern ihrer Intensität zu schwarz gelangen kann wie von einer weissen.

Ganz direkt und thatsächlich muss ich aber HERING widersprechen wenn er³ behauptet: „Gleichwohl ist es eine Thatsache der alltäglichen Erfahrung, welche ich jedoch nirgends besonders betont gefunden habe, dass die eigentlich schwarze Empfindung erst unter dem Einflusse des äusseren Lichtreizes zu Stande kommt“. „Man lege — fährt er zum Zwecke des Beweises fort — auf einen beliebigen Tisch ein Stück schwarzen Sammets und stelle sich so davor, dass es nicht glänzend erscheint, dann wird man ein ziemlich tiefes Schwarz sehen. Nun schliesse und verdecke man die Augen und vergleiche die Farbe des Gesichtsfeldes mit dem soeben gesehenen Schwarz: man wird zugeben müssen, dass die allerdings

1 E. HERING, Zur Lehre vom Lichtsinne. 6 Mittheilungen. Sitzgsber. d. Wiener Acad. 1872. Juni 1873. Dec. 1874. März. April. Mai.

2 Ibidem 1874. März. Seite 4 des Separatabdruckes.

3 Ibidem 1874. März. Seite 13 des Sonderabdruckes.

auch dunkle Farbe des Gesichtsfeldes dem Schwarz des Sammets nicht nahe kommt, möge man die Augen auch noch so lange geschlossen halten“. Dies ist es eben, was ich durchaus bestreiten muss. Ich finde nämlich unter den angegebenen Umständen, dass auf der Netzhautstelle, welche dem Bilde des schwarzen Sammets entspricht, bei Verdeckung der Augen genau derselbe Empfindungszustand nämlich der fast völlige Mangel jeder Lichtempfindung einfach fortbesteht. Mir scheint zugleich in dieser thatsächlich irrigen Behauptung der Schlüssel dafür zu liegen, wie HERING zu der seltsamen Einreihung des Schwarz unter die positiven Farbenempfindungen verführt wurde. Während er sich sehr entschieden verwahrt gegen den Fehler, den er anderen Darstellern der Farbenempfindungslehre — meines Erachtens mit Unrecht — vorwirft, sie vermengten die Farbenempfindung mit den physikalischen Vorgängen, durch die sie hervorgerufen werden, verfällt er in den Fehler, die Farbenempfindung zu vermengen mit der Vorstellung eines farbigen Objektes, welche an die Farbenempfindung vom Verstande angeknüpft wird. Nur so ist es zu verstehen, dass dem Schwarz die rein negative Bedeutung abgesprochen wird. In der That entsteht die positive Vorstellung von einem schwarzen Objekte nur dann, wenn neben empfindungsleeren Netzhautstellen andere mit Farbenempfindungen erfüllt sind, und nicht wenn die Augen geschlossen und verdeckt sind. Wenn man sich klar macht mit welcher Gewalt namentlich gerade auf dem Gebiete des Gesichtssinnes der seelische Mechanismus wirkt, welcher aus dem Empfindungsmaterial sofort die Vorstellungen äusserer Objekte aufbaut, so ist es begreiflich wie schwer dieser Fehler zu vermeiden ist.

VII. Farbenblindheit.

Die in den vorigen Paragraphen erörterte Mannigfaltigkeit der Farbenempfindungen besteht nur, wenn es sich um Reizung von Netzhautelementen in der Polarzone handelt. Sowie das gereizte Element nur einige Millimeter von der Fovea centralis entfernt liegt, so ist es im Allgemeinen einer solchen Mannigfaltigkeit verschiedener Empfindungen nicht fähig. Es sind nur noch zwei Farbentöne nämlich gelb und blau zu unterscheiden, und die Mannigfaltigkeit aller möglichen Lichtempfindungen reducirt sich auf die Schattirungen des Gelb von mehr gesättigtem durch die blasseren bis weiss und von da durch blasse Schattirungen des Blau bis zu mehr gesättigtem Blau, und auf dem Gebiete dieser Mannigfaltigkeit ist, — was besonders betont werden muss — absolut kein stetiger Uebergang von einer gelben zu einer blauen Schattirung ausführbar, der nicht durch weiss hindurchginge. Die Mannigfaltigkeit ist also eine einfach unendliche und wäre graphisch darzustellen durch eine Linienstrecke ohne Ausdehnung in der zweiten Dimension.

Alle Strahlungen seien sie homogen oder gemischt, die am Pol

den Eindruck des Roth, des Gelb oder des Grün hervorbringen, machen auf der in Rede stehenden Zone den Eindruck des Gelb und zwar um so blasser, je grüner der Eindruck auf der Polarzone ist. Alle Strahlungen welche auf dieser den Eindruck des Blau und Violett hervorbringen, machen auf jener äusseren Zone den Eindruck des Blau und zwar ebenfalls um so blasser, je näher der Eindruck auf der Polarzone dem Grün kommt. Strahlungen die auf der Polarzone den Eindruck Blaugrün machen, sehen auf der äusseren weiss aus.

Noch weiter seitwärts gelegene Netzhautstellen bieten gar keine qualitativen Verschiedenheiten der Lichteindrücke dar. Jede Reizung derselben führt zur Empfindung weiss und es sind nur noch quantitative Unterschiede derselben möglich.

Die Grenzen dieser drei Netzhautzonen sind nicht ganz scharf, vielmehr schrumpft die zweifach unendliche Farbenmannigfaltigkeit der Polarzone allmählich aber ziemlich rasch zu der einfach unendlichen der mittleren und diese allmählich zur Unterschiedslosigkeit der Randzone zusammen. Sehr merkwürdig ist noch die Thatsache, dass die Ausdehnung der Zonen von verschiedenem Farbenunterscheidungsvermögen abhängig ist, von der Grösse des Netzhautbildes des farbigen Objectes. Die Farben werden nämlich um so weiter seitwärts noch vollständig oder theilweise erkannt, je grösser das Netzhautbild des farbigen Objectes ist. Bei überaus kleinem Netzhautbilde wird, wie schon oben (S. 199) erwähnt wurde, selbst mit der Polarzone der Netzhaut keine Farbe mehr unterschieden. Wenn man diese Schwierigkeit einstweilen bei Seite lässt, kann auch von dem mangelhaften Farbensinne der Seitentheile der Netzhaut die YOUNG'sche Theorie sehr leicht Rechenschaft geben.

Es dürfte zu diesem Zwecke am natürlichsten folgende Hypothese¹ zu machen sein. Die drei specifisch verschieden empfindenden Fasergattungen sind auf der ganzen Netzhaut gleichmässig vertheilt, aber ihre Endapparate ändern ihre Reizbarkeit für verschiedene Strahlungen, wenn man von der Fovea centralis nach dem Rande geht, und zwar in dem Sinne, dass die Erregbarkeitsunterschiede die eine Gattung von Endapparaten für verschiedenartige Strahlungen zeigt, sich mehr und mehr ausgleichen, und dass auch die Unterschiede der Erregbarkeit der drei Gattungen von Endapparaten für dieselbe Strahlenart immer kleiner werden. Diese letzteren Unterschiede, so müssen wir insbesondere annehmen, sind für die End-

¹ FICK, Zur Theorie der Farbenblindheit. Arbeiten aus dem physiologischen Laboratorium der Würzburger Hochschule. IV. Lieferung, S. 213. Würzburg 1878. Sep.-Abdr. aus den Verhandlungen der phys.-med. Gesellschaft.

apparate der roth- und grünempfindenden Strahlen schon in der mittleren Zone vollständig verschwunden.

Die drei Erregbarkeitskurven für homogene Strahlen nach der Weise entworfen, wie sie in Fig. 55 für die Polarzone gezeichnet sind, würden demnach für die mittlere Zone etwa die Gestalt der drei Curven *R G B* Fig. 55 zeigen. Die Curven *R* und *G* fallen eigentlich genau zusammen und es ist nur der Deutlichkeit wegen eine

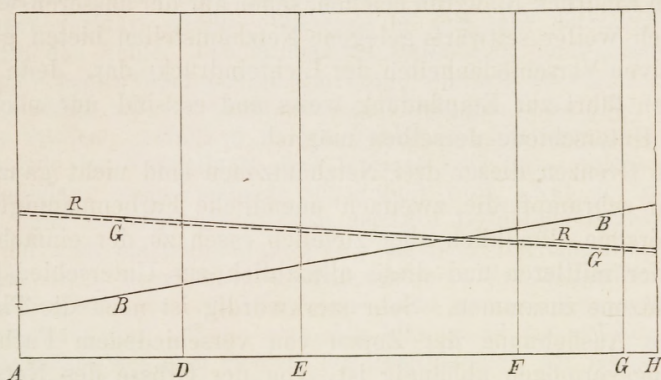


Fig. 55.

punktirte Linie neben eine ausgezogene gezeichnet. Für die Randzone fallen alle drei Curven in eine zur Abscissenaxe parallele Gerade zusammen. Es wird gut sein hier noch einmal ausdrücklich hervorzuheben, dass bei Construction der Curven immer die verschiedenen Strahlungen auf solche Intensitäten gebracht zu denken sind, dass der totale physiologische Eindruck gleiche Intensität hat. Die objektive Energie muss also bei den wenigst brechbaren und bei den stärkst brechbaren Strahlungen sehr viel grösser gedacht werden, als bei den Strahlungen von mittlerer Brechbarkeit.

Es ist bemerkenswerth, dass die Reizbarkeit durch Licht überhaupt keineswegs auf den Seitentheilen der Netzhaut geringer ist als im gelben Fleck, wie man vielleicht nach den sonstigen Unvollkommenheiten der Seitentheile vermuthen könnte. Sie scheinen bezüglich der Reizbarkeit dem gelben Fleck eher überlegen zu sein. Es ist dies schon früher öfter behauptet worden und kürzlich durch exakte Versuche von SCHADOW¹ über allen Zweifel erhoben. Er fand, dass 30° seitwärts von der Fixationsrichtung ein Objekt bei geringerer Lichtstärke sichtbar ist als in derselben. Ein 60° seitwärts davon gelegenes Objekt muss allerdings stärker leuchten um wahrnehmbar zu sein als wenn es in der Fixationsrichtung liegt. Es wäre indessen denkbar, dass selbst auf dieser weit aussen gelegenen Zone die Reizbarkeit der Netzhaut noch ebenso gross oder grösser als im gelben Fleck ist und dass die Unsichtbarkeit gleich stark

¹ SCHADOW, Arch. f. d. ges. Physiol. XIX. S. 499.

leuchtender Objekte die ihre Bilder dahin werfen nur daher rührt, dass diese Bilder selbst schwächer beleuchtet sind, weil die zu ihren Punkten gehenden Strahlenbündel wegen des schrägen Durchganges durch die Pupille weniger Oeffnung haben.

Bei einem namhaften Bruchtheil aller Menschen (wohl mehr als $\frac{1}{20}$), ist auch die Polarzone der Netzhaut nicht im Besitze der oben als normal geschilderten Mannigfaltigkeit von Farbenempfindungen. Man nennt solche Individuen farbenblind. Die Mannigfaltigkeit ihrer Farbenempfindungen ist mehr oder weniger gross. Es ist wahrscheinlich, dass dieser Zustand einfach darin besteht, dass die Beschaffenheit der Netzhaut, welche beim normalen Auge erst auf einer gewissen mittleren Zone beginnt, beim farbenblinden Auge schon in der Fovea centralis stattfindet. Der Grad der Farbenblindheit würde dann um so höher zu nennen sein, einer je weiter auswärts gelegenen Zone der Netzhaut des normalen Auges die Fovea centralis des Farbenblinden in ihrer Beschaffenheit entspricht. Die totale Farbenblindheit würde darin bestehen, dass die ganze Netzhaut die Beschaffenheit der äussersten Randzone des normalen Auges besitzt.

Es scheint eine partielle abnorme Farbenblindheit zu geben, welche sich von der mittleren Zone des normalen Auges der Art nach unterscheidet. Dies wäre wohl so zu erklären, dass ein anderes Paar von Erregbarkeitskurven der drei Fasergattungen kongruent würde, als das Paar für die grün- und rothempfindenden Fasern, was dann zu einem andern System von Farbenempfindungen führen würde. Da indessen dieser ganze Gegenstand mehr der Pathologie als der Physiologie des Auges angehört, so kann hier nicht in das Detail der verwickelten und zum Theil noch nicht ganz aufgeklärten Erscheinungen eingegangen werden.

Die Anhänger der Young'schen Farbenempfindungstheorie haben früher die abnorme sowohl als die normale Farbenblindheit der äusseren Netzhauttheile auf andere Weise zu erklären versucht. Sie nahmen an, dass da wo sich das Farbensystem auf eine einfach unendliche Mannigfaltigkeit zurückzieht eine Fasergattung z. B. die der rothempfindenden fehle. Ein Netzhauttheil aber, welcher bloss blau- und grünempfindende Fasern besitzt, wäre der Empfindung Weiss gar nicht fähig. Wo es sich nun um ein fremdes pathologisch farbenblindes Auge handelt, kann natürlich die Frage nicht entschieden werden, ob dasselbe die Empfindung weiss hat, denn es würde sie nach dieser Auffassungsweise gar nicht kennen. Bei der Farbenblindheit der mittleren Zone des normalen Auges ist diese Ausflucht nicht möglich, da es die Empfindung weiss von der Polarzone seiner Netzhaut her genau kennt. Noch schlagender wird aber diese Auffassung dadurch widerlegt, dass die Strahlungen, welche auf der Polarzone den Eindruck Grün machen, auf der mittleren Zone den des Gelb hervorbringen, während doch hier gerade die Erregung der Grün em-

pfindenden Fasern ganz ungestört durch die Erregung von Roth empfindenden hervortreten müsste, die betreffende Strahlung müsste also entschieden noch grüner aussehen als auf Netzhautstellen die mit rothempfindenden Faserenden versehen sind.

Man könnte allesfalls diese Einwände zu entkräften suchen mit der Behauptung, dass man nicht berechtigt wäre, den qualitativen Charakter der Farbenempfindungen auf weit entlegenen Netzhautstellen so ohne weiteres zu vergleichen. Ich will daher noch eine andere Betrachtung wenigstens andeuten, aus welcher wie mir scheint mit grosser Wahrscheinlichkeit hervorgeht, dass die Annahme des Fehlens einer oder zweier Fasergattungen die Reduktion der Fasermannigfaltigkeit auf den äusseren Zonen der Netzhaut niemals erklären kann. Wie schon oben bemerkt, ist der Uebergang von der zweifach unendlichen Mannigfaltigkeit auf der Polarzone zur einfach unendlichen auf der mittleren ein allmählicher. Man müsste also annehmen, dass die Erregbarkeit der rothempfindenden Fasern von Zone zu Zone abnimmt bis sie zuletzt Null wird resp. die rothempfindenden Fasern fehlen. Diese Abnahme der Erregbarkeit der rothempfindenden Fasern müsste aber offenbar für die wenigst brechbaren Strahlenarten am raschesten geschehen, da sich der Farbeindruck derselben am schnellsten ändert wenn man von der Polarzone zu den Seitentheilen der Netzhaut übergeht. Wenn man sich für alle diese Zonen die drei Erregbarkeitskurven der drei Fasergattungen konstruirt, so würde es wahrscheinlich eine Zone geben, wo die Erregbarkeitskurve der rothempfindenden Fasern nahezu ähnlich unter der der grünempfindenden hinzöge. Für diese Zone würde sich dann aber die Farbenfläche reduciren auf eine Strecke eines Striches der von *B* Fig. 49 nach einem Punkte zu ziehen wäre, welcher die Seite *RG* im Verhältniss der Ordinaten der Erregbarkeitskurven *R* und *G* theilte, wo also die Mannigfaltigkeit der Farben eine einfach unendliche wäre ähnlich der oben (S. 207) beschriebenen. Dann aber bei weiterer Abnahme der Erregbarkeit in den rothempfindenden Fasern würde wieder eine doppelt unendliche Mannigfaltigkeit von Farbenempfindungen auftreten entsprechend einem Flächenstück gelegen in dem Dreieck oberhalb des vorerwähnten Striches. Dies würde der Fall sein auf solchen Zonen der Netzhaut, wo die Erregbarkeit der rothempfindenden Fasern zwar noch kleiner geworden wäre, aber die Ordinaten der Kurve nicht mehr proportional den Ordinaten der für die grünempfindenden Fasern geltenden Kurve. Zuletzt würde sich natürlich die ganze Farbenfläche auf die Linie *BG* der Figur zurückziehen. Es müsste also zwischen zwei Netzhautzonen mit einfach unendlicher Farbenmannigfaltigkeit eine solche mit zweifach unendlicher eingeschlossen liegen, wovon durchaus nichts wahrzunehmen ist.

Die mangelhafte Fähigkeit der seitlichen Netzhauttheile Farben zu unterscheiden ist in neuerer Zeit von zahlreichen Forschern¹ zum Gegenstande der Untersuchung gemacht worden, deren Ergebnisse zum Theil der vorstehenden Darstellung eingefügt sind.

¹ SCHELSKE, Arch. f. Ophthalmologie IX. S. 3; SCHÖN, Die Lehre vom Gesichtsfelde und seinen Anomalieen. Berlin 1874; KLUG, Ueber Farbenempfindung bei indirektem Sehen. Arch. f. Ophthalmologie XXI. S. 1; HOLMGREN, De la cécité des couleurs etc. Stockholm.

FÜNFTES CAPITEL.

Zeitlicher Verlauf der Netzhauterregung.

I. An- und Abklingen der Erregung. Reizung durch weisses Licht.

Da die Trägheit eine allgemeine Eigenschaft der Materie ist, so wird bei jeder Nervenreizung eine gewisse Zeit verstreichen von dem Augenblicke, wo der Reiz einzuwirken anfängt, bis zu dem, wo die Nervenmoleküle die Bewegungsgrösse erlangt haben, welche als merklicher Erregungsgrad bezeichnet werden kann. Ebensowenig können die Nervenmoleküle einmal in Bewegung gesetzt, momentan wieder zur Ruhe kommen, wenn der Reiz aufhört. Jede Erregung muss eine gewisse, wenn auch noch so kurze, Zeit den Reiz überdauern. Diese theoretisch vorauszusetzenden Thatsachen sind indessen keineswegs bei allen Arten der Nervenreizung experimentell erwiesen. So z. B. hat man bei der elektrischen Reizung motorischer Nerven bis jetzt kein „Stadium der latenten Reizung“ nachweisen können, während es bei der elektrischen Muskelreizung $\frac{1}{100}$ Sekunde beträgt. Dies rührt offenbar daher, dass die einer merklichen Nerven-erregung entsprechende Bewegungsenergie ausserordentlich gering ist, so dass nur eine für unsere Beobachtungsmittel verschwindend kleine Zeit dazu gehört, sie den Nervenmolekülen durch den verhältnissmässig starken elektrischen Anstoss mitzutheilen. Dass andererseits eine Nachdauer der Erregung im motorischen Nerven nicht erweisbar ist, hat darin seinen Grund, dass das Reagens auf die Erregung nämlich die Muskelzuckung schon in ihrer einfachsten Gestalt eine ziemlich lange Zeit dauert, in welcher eine etwaige Nachdauer der Erregung des Nerven verschwinden würde. Benutzt man als Reagens auf den Erregungszustand die elektrische Stromschwankung, so könnte man allesfalls von einem Nachweis einer solchen Nachdauer sprechen, so fern in der That auf einen momentanen Reiz an jedem Punkte des Nerven ein Bewegungsvorgang statt hat, der eine merkliche Zeit dauert.

Die Trägheit der Sinnesnervenenden erscheint sehr verschieden. Die Tastnervenenden stehen in der Promptheit, womit sie auf ihren adäquaten Reiz den Druck reagiren und nach Aufhören desselben in den Ruhezustand zurückkehren oben an, denn es können gegen 1000 Einzelreize in einer Sekunde zwar nicht gezählt aber unter-

schieden werden. Auch die Gehörnervenenden vermögen vielleicht an 100 mal in einer Sekunde zwischen dem Zustande der Erregung und Ruhe zu wechseln, wie man bei der Wahrnehmung schwirrender Geräusche bemerken kann. Hinter den genannten Sinnen steht in dieser Beziehung der Gesichtssinn bedeutend zurück. Die verhältnissmässig träge Reaktion des Gesichtssinnes hat offenbar weniger ihren Sitz in den eigentlich nervösen Gebilden, als vielmehr in jenen Anhangsgebilden, wo, wie weiter oben gezeigt wurde, durch äusserst geringfügige Anstösse ein chemischer Process anhebt, der selbständig weiter geht und also erst allmählich zu voller Stärke entbrennt, dann aber auch nicht sofort erlischt, wenn die auslösende Ursache zu wirken aufgehört hat. Die letztere Thatsache des allmählichen „Abklingens“ der Lichtempfindung nach Aufhören des Reizes, das oft viele Sekunden dauert, ist schon von Alters her bekannt und vielfach genau beschrieben. Schliesst und verdeckt man nämlich die Augen, mit denen man irgend welches helle Objekt betrachtet hatte, plötzlich, so dauert die Erregung in den gereizt gewesenen Netzhautelementen noch an und man hat daselbst Lichtempfindungen, deren nach aussen projicirte scheinbare Ursache das „positive Nachbild“ des hellen Objektes genannt wird. Merkwürdigerweise ist dagegen die Trägheit der Netzhaut beim Entstehen der Erregung in der ersten Zeit nach dem Beginne des Reizes ganz unbeachtet geblieben. Soviel ich wenigstens sehe, bin ich selbst der erste gewesen, welcher die Aufmerksamkeit auf diese Erscheinung gelenkt hat.¹ Ich habe dafür die Bezeichnung „Anklingen“ der Erregung vorgeschlagen, die wie es scheint, auch von Anderen passend gefunden wird und daher hier gebraucht werden mag.

Die Thatsache des allmählichen Anklingens der Netzhauterregung und das Gesetz seines zeitlichen Verlaufes habe ich einfach deducirt aus der längst bekannten Erscheinung der rotirenden Scheibe mit weissen und schwarzen Sektoren. Das Gesetz für das Aussehen einer solchen ist in grösster Allgemeinheit schon weiter oben vorgreifend ausgesprochen. Es ist unter dem Namen des TALBOT'schen Satzes bekannt und mag hier noch einmal mit besonderer Rücksicht auf den vorliegenden Zweck in etwas speciellerer Fassung ausgesprochen werden: Wenn eine Netzhautstelle in regelmässig periodischem Wechsel während einer gewissen Zeit a durch Strahlen von gewisser Intensität (die den Eindruck weiss machen mögen) getroffen wird und während einer gewissen Zeit b vollständig unbestrahlt bleibt und

¹ A. FICK, Ueber den zeitlichen Verlauf der Erregung in der Netzhaut. Arch. f. Anat. u. Physiol. 1863.

wenn die Dauer $a + b$ der ganzen Periode weniger als etwa 0,04 Sekunden beträgt, so ist die Empfindung eine völlig stetige und von einer Stärke, wie sie einer andauernden Reizung des Retinastückes durch eine Strahlung von der Intensität $\frac{a}{a + b}$ entspricht. Ausdrück-

lich hervorzuheben ist noch die schon implicite im vorstehenden Satze enthaltene Behauptung, dass die Intensität der gleichmässig erscheinenden Empfindung vollständig unabhängig ist von dem absoluten Werthe der Periodendauer, wofern diese nur eben kurz genug ist, um eine konstante Empfindung zu geben. Eine solche periodische Bestrahlung einer Netzhautstelle kann man am leichtesten verwirklichen durch eine kreisförmige Scheibe, die in zwei oder $2n$ Sektoren getheilt ist, von denen die einen weiss die anderen schwarz sind und die man um eine zu ihrer Ebene im Mittelpunkt senkrecht stehende Axe so rasch dreht, dass der Vorübergang eines weissen und des nachfolgenden schwarzen Sektors zusammen nur etwa $\frac{1}{25}$ Sekunde dauert. Die Bedingung, dass die Netzhautstellen in periodischer Wiederholung eine Zeit lang unbestrahlt bleiben, ist allerdings nur annäherungsweise erfüllt, da eine noch so sorgfältig geschwärzte Papier- oder Sammetoberfläche immer noch Strahlen aussendet, indessen lassen sich doch an solchen gedrehten Scheiben die vorstehenden Sätze mit ausreichender Genauigkeit anschaulich machen. Vor Allem kann der Satz dass die Intensität des Lichtindrucks von der absoluten Dauer der Periode ganz unabhängig ist sehr schön demonstrirt werden, wenn man die gedrehte Scheibe so bemalt wie es in Fig. 56 angegeben ist.¹ Dreht man sie z. B. 25 mal in der Sekunde um, so dauert die Periode in welcher Bestrahlung und Beschattung wechseln für die innerste Zone gerade $\frac{1}{25}$ ", für die mittlere Zone $\frac{1}{50}$ ", für die Randzone $\frac{1}{100}$ ", in allen drei Zonen aber dauert die Bestrahlung gerade die Hälfte der Periode und dem entspricht die genau gleiche scheinbare Helligkeit der drei Zonen. Um den Satz über die Grösse der Helligkeit genau numerisch zu bestätigen, bedarf es allerdings einer kleinen Modifikation der gedachten Scheibe, es müssen nämlich statt der schwarzen Sek-

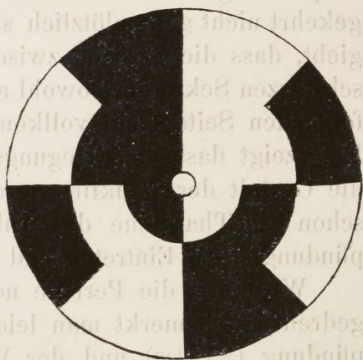


Fig. 56.

¹ Siehe HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 339.

toren Ausschnitte gemacht werden, durch welche man auf einen durch Beschattung absolut lichtlos gemachten Hintergrund sieht.

Wir wollen nun den Vorgang in einem Netzhautpunkte analysiren, welcher statthat, wenn er in stetiger Aufeinanderfolge und Wiederholung die Bilder der Punkte eines Kreises der Sektorenscheibe aufnimmt.¹ Wir tragen zu dem Ende in der Abscissenaxe *Od* Fig. 57 die Zeiten auf und errichten Ordinaten, welche die Intensität der Empfindung in dem durch den Fusspunkt dargestellten Augenblicke messen. Wäre der empfindende Apparat der Netzhaut ohne alle Trägheit, so würde sich die Kurve der Empfindungsintensitäten ausnehmen wie die geknickte Linie *Om nabopcd* u. s. w., wofern man durch die Strecke *Om* die Intensität der Lichtintensität misst, welche bei dauernder Einwirkung der vom weissen Sektor ausgesandten Strahlung stattfindet und wofern durch die Abscissenlänge *Oa* die Dauer des Vorüberganges eines weissen, durch *ab* die Dauer

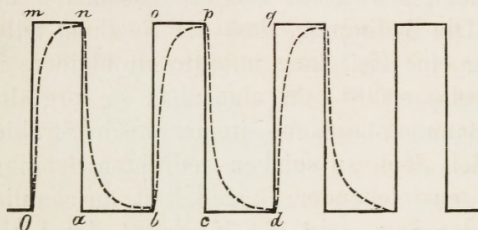


Fig. 57.

des Vorüberganges eines schwarzen Sektors dargestellt wird. Es würde die Empfindung zwischen den Werthen *Om* und Null fortwährend plötzlich schwanken. Sowie nun aber die Scheibe einigermaassen schnell gedreht wird, also die durch *Ob* dargestellte

Zeit einigermaassen kurz ist, so bemerkt man, dass der Uebergang der Empfindungsintensität von ihrem Maximum zu ihrem Minimum und umgekehrt nicht ganz plötzlich stattfindet, was sich dadurch zu erkennen giebt, dass die Grenzen zwischen den vorübergehenden weissen und schwarzen Sektoren, sowohl auf der vorangehenden als auf der nachfolgenden Seite nicht vollkommen scharf, sondern verwaschen sind. Dies zeigt dass die Erregungskurve des einzelnen Netzhautelementes die Gestalt der punktiert gezeichneten Wellenkurven besitzt, womit schon die Thatsache des Anklingens und Abklingens der Lichtempfindung beim Eintreten und Aufhören des Reizes erwiesen ist.

Wird nun die Periode noch kürzer (wird die Scheibe schneller gedreht, so bemerkt man leicht, dass der volle Werth der Lichtempfindung (= *Om*) und der Werth Null gar nicht mehr zu Stande kommen, sondern nur ein Auf- und Abwogen der Empfindung zwi-

¹ Siehe A. FICK, a. a. O.

schen engeren Grenzen stattfindet. Dies ist auch auf Grund der schon gewonnenen Thatsache vorauszusehen, denn wenn der helle Sektor schon vorüber ist, ehe der volle Werth Om erreicht ist, so kommt er überhaupt gar nicht zu Stande, sondern die Empfindungsstärke sinkt herab von einem geringen Werthe und wenn alsdann der schwarze Sektor vorüber ist, ehe die Empfindung auf Null gesunken ist, so kommt auch dieser Werth nicht mehr zu Stande, sondern die Empfindung steigt in Folge der neuen Bestrahlung von einem endlichen Minimalwerthe wieder an. Offenbar wird alsdann die Empfindung durch den zweiten weissen Sektor höher hinauf getrieben werden als durch den ersten, weil sie eben mit einem höheren Anfangswerthe begonnen hat. Ebenso wird sie der zweite schwarze Sektor nicht so tief herabdrücken, als der erste schwarze, weil der Abfall mit einem höheren Werthe begann. So werden die Maxima und Minima sich von Periode zu Periode erhöhen, bis ein stationärer Zustand erreicht ist (und dies geschieht sehr bald) bei dem die Empfindung durch den nachfolgenden schwarzen Sektor um ebensoviel gemindert wird, als sie durch den vorhergehenden weissen Sektor vermehrt war. Der Vorgang wird sich also darstellen durch eine Curve wie die in Fig. 58 stark ausgezogene Zickzacklinie. Jede ganze Periode besteht aus einem kleineren und einem grösseren Zwischenraume zwischen je zwei Ordinaten, der erstere ist die Vorübergangszeit eines weissen, der letztere die eines schwarzen Sektors, oder jener die Zeit des Reizes, dieser die Zeit der Reizlosigkeit. Das grau flimmernde Aussehen der mässig rasch gedrehten Scheibe entspricht ganz dieser Curve.

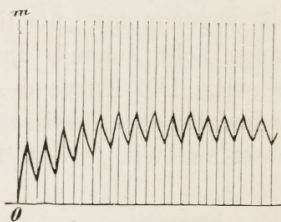


Fig. 58.

Selbstverständlich werden die Unterschiede zwischen den Maximis und Minimis des stationären Zustandes um so kleiner, je kleiner die Periode und ihre beiden Abschnitte werden, und es muss also bei einer gewissen Kleinheit der Periode dahin kommen, dass die Unterschiede unmerklich werden, d. h. dass die rotirende Scheibe gleichmässig grau aussieht und zwar tritt, wie schon bemerkt wurde dieses Unmerklichwerden der periodischen Helligkeitsänderung für mässige Tageshelle bei einer Dauer der Periode von etwa $\frac{1}{25}$ Sekunde ein.

Dass dies gleichmässige Grau nach übereinstimmenden Versuchen verschiedener Forscher ziemlich genau den n ten Theil der Helligkeit des weissen Sektors für sich zeigt, wenn sein Vorüber-

gang den n ten Theil der ganzen Periode bildet, offenbart eine sehr bemerkenswerthe Beziehung zwischen den beiden Functionen der Zeit, von welchen die eine das Anwachsen der Empfindung nach Beginn des Reizes und die andere das Abnehmen der Empfindung nach Aufhören des Reizes darstellt. Es muss nämlich für jeden bestimmten Werth der ansteigenden und abnehmenden Empfindung der $1/n$ von der vollen Empfindungsstärke für dauernde Reizung beträgt, die Steilheit der Kurve des Abklingens zur Steilheit der Kurve des Anklingens sich verhalten wie $1/n : 1 - \frac{1}{n}$. Es muss also insbesondere z. B. auf der halben Höhe der vollen Empfindungsstärke die Steilheit des Anklingens und Abklingens gleich gross sein. Für grössere Werthe der Empfindungsstärke muss die Steilheit des Abklingens grösser sein und für kleinere Werthe die Steilheit des Anklingens.

Die allgemeine Form der Kurve des Abklingens einer Lichtempfindung ist leicht anzugeben. Wenn man nämlich nach kurzdauernder nicht ermüdender Betrachtung eines weissen Objectes das Auge schliesst und verdeckt, so sieht man im dunklen Gesichtsfelde ein sogenanntes „positives“ Nachbild des weissen Objectes das anfangs sehr schnell und dann immer langsamer an Helligkeit abnimmt. Die Kurve des Abklingens der Lichtempfindung muss also jedesfalls der Abscissenaxe die Konvexität zuwenden und etwa so aussehen wie fgh in Fig. 59, wo in der Abscissenaxe die Zeiten

gemessen werden und als Ordinaten die jeweilige Erregungsgrösse aufgetragen ist. In dem durch c dargestellten Augenblicke hört der Reiz auf zu wirken, welcher bis dahin die Erregung auf der durch die Ordinate $be = cf$ gemessenen Höhe erhalten hatte. Es sinkt dann in der folgenden Zeit cd die Erregungsstärke nahezu auf Null herunter, anfangs rapide und dann immer langsamer, wie es dem Verlaufe der Kurve fgh entspricht. Konstruirt man nach dieser allerdings willkürlichen Kurve gemäss der aus dem TALBOT'schen Satze gezogenen Folgerung die Kurve des Anklingens, so zeigt sich dieselbe als eine annähernd gerade Linie. Wenn also eine Strahlung, welche bei dauernder Einwirkung die Erregungsstärke be hervorbringt im Augenblicke a anfinge und im Augenblicke c aufhörte zu wirken, so würde sich der zeitliche Verlauf der Erregung etwa nach Maassgabe der

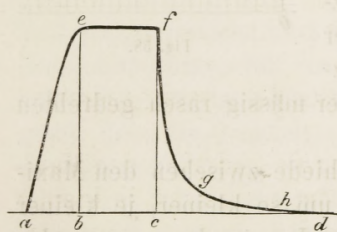


Fig. 59.

gemessenen Höhe erhalten hatte. Es sinkt dann in der folgenden Zeit cd die Erregungsstärke nahezu auf Null herunter, anfangs rapide und dann immer langsamer, wie es dem Verlaufe der Kurve fgh entspricht.

Konstruirt man nach dieser allerdings willkürlichen Kurve gemäss der aus dem TALBOT'schen Satze gezogenen Folgerung die Kurve des Anklingens, so zeigt sich dieselbe als eine annähernd gerade Linie. Wenn also eine Strahlung, welche bei dauernder Einwirkung die Erregungsstärke be hervorbringt im Augenblicke a anfinge und im Augenblicke c aufhörte zu wirken, so würde sich der zeitliche Verlauf der Erregung etwa nach Maassgabe der

Kurve $aefgh$ gestalten, d. h. sie würde während der ersten kurzen Zeit ab von Null bis be ansteigen, während der Zeit bc (von der Ermüdung abgesehen, annähernd) konstant bleiben und dann, wie vorhin schon beschrieben wurde, absinken.

Einfacher und schärfer lassen sich diese Entwicklungen in der Kunstsprache der mathematischen Analysis aussprechen.

Setzen wir eine bestimmte Reizstärke voraus, dann kann die Erregungsstärke x einmal als Funktion der Zeit t von dem Augenblick an wo der Reiz anhebt dargestellt werden und zweitens als Funktion der Zeit von dem Augenblick an, wo der Reiz aufhört, die erstere Funktion sei $x=F(t)$ die zweite sei $x=f(t)$. Wir bilden nun die Differentialquotienten

$$\frac{dF(t)}{dt} \quad \text{und} \quad \frac{df(t)}{dt},$$

welche gleichfalls zwei Funktionen von t sein werden. Denkt man jetzt die beiden Gleichungen $x=F(t)$ und $x=f(t)$ gelöst nach t und den ersten Werth von t in die Funktion $\frac{dF(t)}{dt}$ den zweiten in die Funktion

$\frac{df(t)}{dt}$ substituirt dann hat man zwei Funktionen von x die mit $\varphi(x)$ und $\chi(x)$ bezeichnet werden mögen.

Der Werth von $\varphi(x)$ für einen bestimmten Werth von x stellt dann die Steilheit dar, mit welcher während der Wirkung des Reizes beim Anklingen die Erregung von dem bestimmten erreichten Werthe x aus weiter wächst; und der Werth von $\chi(x)$ für einen bestimmten Werth bedeutet die Steilheit mit welcher während einer Pause des Reizes die Erregung von dem erlangten bestimmten Werthe x weiter sinkt. Nun sei τ der sehr kleine Werth der Periode und während der Zeit $\frac{m}{m+n}\tau$ dauert

die Bestrahlung während der Zeit $\frac{n}{m+n}\tau$ die Nichtbestrahlung. Zeit

der Bestrahlung und Pause verhalten sich also wie $m:n$. Dann ist die Bedingung dafür, dass beim Erregungswerthe x der Erregungszustand stationär bleibt die Gleichung

$$x + \frac{m}{m+n}\tau \cdot \varphi(x) + \frac{n}{m+n}\tau \cdot \chi(x) = x \quad \text{oder} \\ m\varphi(x) + n\chi(x) = 0$$

denn nur wenn diese Gleichung erfüllt ist, nimmt der Erregungswerth x während der Bestrahlungszeit $\frac{m}{m+n}\tau$ um dieselbe unmerkbar kleine

Grösse zu, um welche er in der nachfolgenden Zeit $\frac{n}{m+n}\tau$ der Nicht-

bestrahlung wieder abnimmt. Diese Gleichung lässt erstens sehen, dass die Funktionen $\varphi(x)$ und $\chi(x)$ nothwendig entgegengesetzte Vorzeichen haben müssen, was sich übrigens ohnehin von selbst versteht. Andererseits lässt sie erkennen, dass der Werth von x , bei welchem nach dieser Gleichung der stationäre Zustand eintritt, unabhängig ist von der Perioden-

dauer τ und nur abhängt vom Verhältniss $\frac{m}{n}$ wie auch immer die Funktionen $q(x)$ und $\chi(x)$ beschaffen sind.

Um unsere Gleichung mit dem TALBOT'schen Satze in Beziehung zu setzen, bemerken wir, dass derselbe aussagt: der Werth von x , für welchen der stationäre Zustand eintritt, ist derselbe Bruchtheil der vollen Erregungsstärke bei dauernder Einwirkung der Strahlung wie der Zeitraum

$\frac{m}{m+n} \tau$ von der ganzen Periode. Wir können indessen unbeschadet der

Allgemeinheit den vollen Betrag der Erregungsstärke = 1 setzen und haben dann

$$x = \frac{m}{m+n} \text{ oder } \frac{m}{n} = \frac{x}{1-x}.$$

Durch Einsetzen dieses Werthes geht die obige Gleichung über in

$$x q(x) + (1-x) \chi(x) = 0$$

durch welche jene oben schon ausgesprochene merkwürdige Beziehung zwischen den Funktionen des An- und Abklingens der Erregung festgestellt ist. Nehmen wir an die Funktion des Anklingens wäre wirklich, wie wahrscheinlich gemacht wurde, einfach $F(t) = ct$, dann wäre $q(x) = c$ (Constant) und die Gleichung lautete dann

$$c x + (1-x) \chi(x) = 0 \text{ oder } \chi(x) = -c \frac{x}{1-x}$$

da aber

$$\chi(x) = \frac{df(t)}{dt}$$

so hätte man

$$\frac{df(t)}{dt} = -c \frac{x}{1-x} \text{ oder } \frac{dx}{dt} = -c \frac{x}{1-x}$$

oder endlich

$$- \frac{1}{c} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) dx = dt$$

Das Integral dieser Gleichung ist

$$\frac{1}{c} \left(x - \log x \right) = t + \text{Const}$$

Die Constante bestimmt sich durch die Bedingung, dass zu Anfang der Zeit die volle Erregung 1 statthat, also für $t = 0$ $x = 1$ sein soll $\text{Const} = \frac{1}{c}$. Daher hat man schliesslich

$$t = \frac{1}{c} \left(x - \log x - 1 \right)$$

worin die Definition der Funktion des Abklingens unter der Voraussetzung eines linearen Anklingens gegeben ist, freilich ist die Gleichung nicht nach x lösbar, so dass man $x = f(t)$ nicht algebraisch herstellen kann. Man könnte aber eine beliebig grosse Zahl von zusammengehörigen Werthen von x und t numerisch berechnen.

Nachdem in der dargestellten Weise die Thatsache des Anklingens der Lichtempfindung aus der längst bekannten Erscheinung der gedrehten Sektorenscheibe deducirt war, habe ich dieselbe auch

direkt gezeigt durch Versuche nach folgendem Plane: ein weisses Objekt wurde während einer sehr kurzen Zeit dem Auge dargeboten und hierauf sogleich graue Flächen von verschiedener Helligkeit. Dann war zu beurtheilen welchem dieser letzteren das nur kurze Zeit betrachtete weisse an Helligkeit scheinbar gleich war. Es zeigte sich nun schon bei diesen mit sehr unvollkommenen Hilfsmitteln angestellten Versuchen, was nach der Deduktion zu erwarten war. Je kürzer die Zeit war während deren das weisse Objekt wirkte, desto dunkler war das Grau, welchem es gleich erschien.

Später hat S. EXNER¹ den experimentellen Beweis für die Thatsache des Anklingens der Lichtempfindung auf dem von mir mit höchst unvollkommenen Hilfsmitteln betretenen Wege noch einmal geführt, mit Hülfe eines sehr sinnreichen von HELMHOLTZ erfundenen Apparates, der es gestattet zwei weisse Objekte nebeneinander während sehr kurzer Zeiten erscheinen zu lassen und zwar so, dass die objektiven Helligkeiten sowohl als die kleinen Zeiten, während welcher die beiden Objekte sichtbar sind, in jedes beliebige numerisch angebbare Verhältniss zu einander gesetzt werden können. Es zeigt sich dabei, dass ein an sich weniger helles Objekt durch längere Dauer seiner Wirkung eine ebenso intensive Lichtempfindung hervorrufen kann, wie ein helleres Objekt bei kürzerer Dauer. Der Apparat gestattet quantitative Resultate zu gewinnen, insbesondere lässt sich die Zeit bestimmen, innerhalb deren eine Lichtempfindung zu ihrer vollen Intensität anwächst. Diese Zeit ist wie zu erwarten war um so kleiner, je grösser die Intensität des Reizes oder die Helligkeit des Objektes an sich ist, und zwar nimmt sie sehr annähernd in arithmetischer Progression ab, wenn man die Helligkeit in geometrischer Progression wachsen lässt. Selbstverständlich kann dieser Satz nur bis zu einem gewissen sehr mässigen Grade der Helligkeit Geltung haben, da ja sonst bei sehr hohen Graden der Helligkeit ein negativer Werth der Zeit sich ergeben würde, was unmöglich ist. Nachstehende Tabelle giebt die numerischen Data für zwei Versuchsreihen von EXNER.

Ein Lichtreiz vom Intensitätsgrade	bringt die volle Stärke der Empfindung hervor in	Differenzen der Zeit.
1	0,2873''	
2	0,2460	0,0413
4	0,2000	0,0466
8	0,1508	0,0492

¹ S. EXNER, Ueber die zu einer Gesichtswahrnehmung nöthige Zeit. Sitzgsber. d. Wiener Acad. 1868. October.

Ein Lichtreiz vom Intensitätsgrade	bringt die volle Stärke der Empfindung hervor in	Differenzen der Zeit.
1	0,2654	0,0478
2	0,2176	0,0432
4	0,1744	0,0556
8	0,1188	

Unter Anwendung gewisser durchaus zulässiger Hilfsannahmen lässt sich nach der in Rede stehenden Methode für einen bestimmten Helligkeitswerth die Abhängigkeit der jeweiligen Intensität der im Entstehen begriffenen Lichtempfindung von der Zeit, die seit Beginn des Reizes verstrichen ist, ziemlich genau bestimmen. Als Beispiel einer solchen Bestimmung giebt EXNER folgende Tabelle:

Die Lichtempfindung erreicht von ihrer vollen Stärke	nach einer Einwirkung des Reizes von
$\frac{1}{10}$	0,008''
$\frac{2}{10}$	0,023
$\frac{3}{10}$	0,037
$\frac{4}{10}$	0,040
$\frac{5}{10}$	0,049
$\frac{6}{10}$	0,058
$\frac{7}{10}$	0,081
$\frac{8}{10}$	0,104
$\frac{9}{10}$	0,127
$\frac{10}{10}$	0,166

Stellt man diese Tabelle graphisch dar, indem man die Zeiten als Abscissen die erreichten Intensitäten als Ordinaten aufträgt, so erhält man bis zu der Ordinate, welche $\frac{8}{10}$ der vollen Intensität entspricht sehr annähernd eine gerade Linie, was ich schon durch Zergliederung des TALBOT'schen Satzes wahrscheinlich gemacht hatte.

II. An- und Abklingen der Erregung bei Reizung mit farbigem Licht.

Das Anklingen der Erregung nach Beginn des Lichtreizes ist vom Standpunkte der YOUNG'schen Theorie in jeder Fasergattung ein Vorgang für sich und es ist im Sinne dieser Theorie keineswegs zu erwarten, dass die drei gleichzeitigen Vorgänge genau gleichen Schritt halten. Wäre der Gang des Anklingens in den roth-, grün- und blauempfindenden Fasern sehr verschieden, so müsste ein weisses Objekt in den ersten Momenten nach seinem Auftauchen im Gesichts-

felde gefärbt erscheinen. Davon nimmt man nun bei den Versuchen weder nach meiner noch nach der HELMHOLTZ'schen Methode etwas Entschiedenens wahr, woraus hervorgeht, dass der zeitliche Verlauf des Anklingens der Erregung bei Reizung mit weiss aussehender Strahlung in den verschiedenen Fasergattungen annähernd derselbe ist. Dahingegen zeigen sich sehr eigenthümliche Erscheinungen, wenn man farbig aussehende Strahlungen sehr kurze Zeit hindurch einwirken lässt.

Die ersten hierher gehörigen Angaben finden sich in dem oben citirten Aufsatz.¹ Ich hatte mit meinen unvollkommenen Apparaten schon bemerkt, dass bei sehr kurzer Einwirkung farbige Objekte anders gefärbt erscheinen als bei dauernder Betrachtung. Später hat auf meine Veranlassung KUNKEL² diesen Gegenstand genauer untersucht mit Hilfe des von EXNER angewandten Apparates und homogener Strahlungen. Er fand, dass das Spektrum überaus kurze Zeit betrachtet, ganz farblos und am rothen Ende verkürzt erscheint. Dauert die Einwirkung etwas länger, so scheint es aus einem rothen und blauen Theil zu bestehen und zwar erscheinen die bei dauernder Betrachtung grünen, blauen und violetten Theile nunmehr alle blau. Auf annähernd gleiche physiologische Intensität gebracht, bringen die rothen Strahlen am schnellsten die volle Erregungsstärke zu Wege, weniger schnell die blauen und am wenigsten schnell die grünen. Es wäre natürlich leicht diese Thatsachen auf dem Standpunkte der YOUNG'schen Theorie in ebenso viele Lehrsätze über die Erregungsweise der drei Fasergattungen durch Strahlen von verschiedener Schwingungszahl zu übersetzen.

Ebenso wie das Anklingen der Erregung wird auch das Abklingen derselben in jeder der drei hypothetischen Fasergattungen ein besonderer von den anderen unabhängiger Vorgang sein, und wenn diese drei Vorgänge zeitlich nicht ganz gleichen Schritt halten, so muss das Nachbild eines weissen Objectes nach und nach verschiedene Färbungen zeigen. Dies ist nun in der That schon vor langer Zeit beobachtet und als farbiges Abklingen der Nachbilder von FECHNER, PLATEAU, SEGUIN und Anderen beschrieben. HELMHOLTZ beschreibt in Uebereinstimmung mit FECHNER und SEGUIN die Reihenfolge der Farben, wenn man ein hell weisses Objekt auf dunkeln Grunde momentan betrachtet hat und nun das Auge schliesst

1 A. FICK, Ueber den zeitlichen Verlauf der Netzhauterregung. Arch. f. Anat. u. Physiol. 1863. S. 764.

2 A. KUNKEL, Ueber die Abhängigkeit der Farbenempfindung von der Zeit. Arch. f. d. ges. Physiol. IX. S. 197.

und verdeckt so, dass das positive Nachbild rasch aus dem ursprünglichen weiss durch grünliches Blau in Indigoblau, später in Violett oder Rosa übergeht. Dann folge ein schmutziges Orange, welchem sich oft noch ein sehr schwaches schmutziges Gelbgrün anschliesse. Die ersten Phasen im Abklingen der Nachbilder sind auf dem Standpunkte der YOUNG'schen Theorie leicht dahin zu deuten, dass die Erregung der rothempfindenden Elemente anfangs am schnellsten, später am langsamsten abklinge und die der grünempfindenden anfangs am langsamsten und später am schnellsten, während die blauempfindenden zu Anfang und später bezüglich der Geschwindigkeit des Abklingens in der Mitte stehen. Bei den noch späteren Phasen des Abklingens der Nachbilder scheinen Einflüsse der Ermüdung mit ins Spiel zu treten, von welcher im Folgenden die Rede sein wird.

Bei längerer Betrachtung des Urbildes spielen diese Einflüsse von vorn herein eine Rolle und es wird dadurch die Reihenfolge der Farben im abklingenden Nachbilde verschiedentlich modificirt.

III. Ermüdung der Netzhaut.

Da in den Endapparaten der Sehnerven der Reiz durch Bestrahlung einen chemischen Process auslöst, welcher den Bestand des Apparates irgendwie ändern muss, so wird jeder folgende Reizanstoss denselben vermuthlich in einem andern Zustand treffen und also auch einen andern Effekt hervorrufen als der erste. Ob der Effekt in dem durch den ersten Reiz veränderten Apparat grösser oder kleiner ausfallen wird, lässt sich a priori nicht entscheiden. An sich ist es ebensowohl denkbar, dass die Veränderung durch den ersten Reizanstoss die weitere Veränderlichkeit (Reizbarkeit) erhöht, als dass sie dieselbe herabsetzt. In der That bemerkt man bei wiederholter Reizung eines Muskels sehr oft, dass die Wirkung jeder folgenden Reizung (die Zuckung) grösser ist als die der vorhergehenden. Das ist allerdings von vornherein sicher, dass eine solche Steigerung der Reizbarkeit bei einem dem Blutkreislaufe entzogenen reizbaren Gewebstück nicht ins Unbegrenzte dauern kann, denn durch jeden Reiz wird etwas von dem Vorrathe des dem chemischen Prozesse unterworfenen Materiales verbraucht, so dass dieser Vorrath schliesslich erschöpft werden müsste. Bei einem mit dem lebenden Körper noch verbundenen reizbaren Gewebstück kann freilich dieser Vorrath beständig durch die Ernährung neu ergänzt werden und diese kann auch die Produkte des chemischen Processes schnell wegführen, so dass es an sich nicht ganz undenkbar wäre, dass dennoch jeder

folgende Reiz das reizbare Gebilde in demselben Zustande (also bei gleicher Reizbarkeit) anträte wie der vorhergehende, wenn nämlich die Ernährung mit der durch den Reiz gesetzten Zerstörung genau gleichen Schritt hielt. Wirkt die Reizung aber sehr energisch und in rascher Aufeinanderfolge oder gar stetig andauernd, so ist kaum zu erwarten, dass die Ernährung mit ihrer zerstörenden Wirkung gleichen Schritt halten kann, wir sehen daher bei den reizbaren Gebilden regelmässig auch im lebenden Körper einer energischen Reizung Veränderung der Reizbarkeit folgen, welche wenigstens auf die Dauer ausnahmslos in einer Verminderung besteht. Diese allen reizbaren Gebilden eigene Erscheinung nennt man die Ermüdung. Sie tritt um so leichter und früher ein, je energischer die in dem Gebilde verlaufenden Prozesse sind. An den Nervenfasern ist daher von Ermüdung nur schwer etwas wahrzunehmen, während die Muskeln verhältnissmässig rasch ermüden. Uebrigens beruht die Ermüdung überall wie es scheint, weit mehr auf der Anhäufung der durch den chemischen Process der Erregung gesetzten Produkte als auf der Erschöpfung des Vorrathes von zersetzbarem Material.

Wenn die reizbaren Endapparate der Netzhaut in dem eben definirten Sinne ermüdbar sind, so muss sich dies darin zeigen, dass bei andauernder Bestrahlung einer Netzhautstelle die Intensität der Erregung und folglich der Empfindung mit der Zeit abnimmt. Eine helle Fläche müsste also bei andauernder Fixation allmählich immer weniger und weniger hell erscheinen. Beim gewöhnlichen Sehen wird davon der ungeschulte Beobachter nichts gewahr, doch ist daraus keineswegs zu schliessen, dass diese Erscheinung nicht vorhanden ist, denn einmal pflegen wir selten ein und dasselbe Objekt sehr lange anhaltend zu fixiren, andererseits ist die Intensität einer gegenwärtigen Empfindung überhaupt schon sehr schwer mit der einer vergangenen zu vergleichen, besonders wenn die eine aus der andern durch ganz stetige Veränderung entstanden ist. In der That findet die fragliche Erscheinung statt und wird einem geübten Beobachter bei langdauernder Fixation irgend eines hellen Objectes schwerlich entgehen. Man kann sie aber auch dem Ungeübtesten durch einen sehr einfachen Kunstgriff leicht sichtbar machen. Man lasse ihn ein weisses Papierstück auf möglichst dunkeln Grunde 10—20 Sekunden lang scharf fixiren und schiebe nun ein grosses Blatt von demselben weissen Papier über Grund und Objekt hin, dann wird dem Beobachter die Stelle desselben, welche dem vorher gesehenen hellen Papierstück entspricht, bedeutend dunkler erscheinen als die Umgebung. Von dem vorher gesehenen hellen Objekt

wird, wie man sich auszudrücken pflegt, in dem hernach in grösserer Ausdehnung erhellten Gesichtsfelde ein dunkles, negatives Nachbild erscheinen. Diese Erscheinung muss — wenn auch bei ihren Einzelheiten noch andere Umstände im Spiele sind — im Grossen und Ganzen auf die Ermüdung der Netzhaut bezogen werden. Die Netzhauttheile nämlich, welche anfangs das Bild des hellen Objectes aufnahmen, werden erregt und ermüdet, während die, welche dem schwarzen Grunde im Bild entsprechen, unerregt und unermüdet blieben. Trifft hernach beim Vorschieben der grossen weissen Papierfläche dieselbe Strahlung beiderlei Netzhauttheile, so entsteht in der unermüdeten eine stärkere Empfindung, während in den ermüdeten die schwächere Empfindung fortbesteht.

Bei exakten Versuchen der beschriebenen Art gewahrt man leicht, dass das negative Nachbild um so dunkeler ist, je länger das helle Urbild fixirt wurde, was sich leicht aus dem Fortschreiten der Ermüdung erklärt, die man von vornherein zu erwarten Veranlassung hat. Es zeigt sich ferner, dass schon nach wenigen Sekunden das Nachbild verhältnissmässig sehr dunkel ist, d. h. dass schon nach wenigen Sekunden dauernder Erregung die Erregbarkeit durch Ermüdung sehr bedeutend vermindert ist, dass also die Endapparate des Sehnerven in sehr hohem Grade ermüdbar sind. Bei seinen oben erwähnten Versuchen hat EXNER beobachtet, dass sogar schon nach Bruchtheilen einer Sekunde von dem Augenblicke an gerechnet, wo die Empfindung ihr Maximum erreicht hat, eine Schwächung durch Ermüdung bemerkbar wird. Er führt das nachstehende numerische Beispiel an:

Intensität der Erregung	nach Wirkungsdauer der Strahlung von
$\frac{9}{10}$	0,359''
$\frac{8}{10}$	0,486''
$\frac{7}{10}$	0,659''

Die Intensität der Erregung ist gemessen in Bruchtheilen des Maximums, welches sie bei der angewandten Strahlungsintensität erreicht. Die Wirkungsdauer ist gemessen vom Augenblicke des ersten Aufblitzens der Strahlung. Von den Zahlen der zweiten Spalte müsste also noch die Dauer von 0,166'' Sekunden abgezogen werden wenn man die Zeit von dem Augenblicke an messen wollte, wo die Intensität der Erregung ihr Maximum erreicht hat, denn bis zur Erreichung desselben waren eben 0,166'' verstrichen. (Siehe S. 220.)

Der weitere Gang der Netzhautermüdung war schon vorher von C. F. MÜLLER¹ untersucht. Er betrachtete ein weisses Papierstück vor schwarzem Grunde eine bestimmte Zeit hindurch und liess plötzlich ein graues Papier von photometrisch gemessener Helligkeit daneben halten. Durch Probiren wurde ein Stück von solcher Helligkeit herausgefunden, dass es dem anhaltend fixirten weissen Papier gleich erschien. Dabei hatte sich herausgestellt, dass durch die Ermüdung die Erregung anfangs am schnellsten und dann immer langsamer abnimmt. Das während der ganzen Nacht ausgeruhte Auge ermüdet in den ersten 5 Sekunden viel mehr als das während des Tages allemal nur bis zum vollständigen Verschwinden aller Nachbilder geruhte. Nach den von MÜLLER graphisch dargestellten Versuchsreihen lässt sich aus dem Gang der Ermüdung bei Abendversuchen ungefähr beurtheilen, wie viel das Auge durch den Gebrauch während des Tages an Erregbarkeit derart einbüsst, dass sich die Einbusse nur durch stundenlang dauernde Ruhe wieder ersetzen lässt. Es wird hiernach ein und dasselbe Objekt dem Auge beim ersten Blicke etwas über doppelt so hell erscheinen als am Abend dem nur flüchtig ausgeruhten Auge.

Bezüglich der Abhängigkeit der Ermüdung von der Stärke des Reizes hat HELMHOLTZ² vermuthungsweise den Satz ausgesprochen, dass ihr relativer Werth unabhängig sei von der Reizstärke mit anderen Worten: die Einwirkung eines Reizes während einer bestimmten Zeit reducire gleichen Zustand des Auges vorausgesetzt die gesehene Helligkeit stets um denselben Bruchtheil ihres ursprünglichen Werthes wie gross oder wie klein auch die Reizstärke sei. Hauptsächlich um diesen Satz zu prüfen, hat auf meine Veranlassung C. F. MÜLLER die soeben citirte Untersuchung unternommen und seine Versuche haben ergeben, dass der Satz jedesfalls innerhalb sehr weiter Grenzen der Reizstärke sehr annähernd gültig ist.

Ist das Urbild gefärbt und das hernach auf das ganze Gesichtsfeld einfallende Licht, welches HELMHOLTZ das reagirende Licht nennt, gefärbt oder weiss, so treten am negativen Nachbilde eine Menge von mannigfaltigen Erscheinungen auf. Vom Standpunkte der YOUNG'schen Theorie lassen sich dieselben alle zum Voraus ableiten und es ist daher für die Darstellung derselben ohne Zweifel eine grosse Erleichterung, sich auf den Standpunkt dieser Theorie zu stellen, wenn

1 C. F. MÜLLER, Versuche über den Verlauf der Netzhautermüdung. Züricher Inauguralabhandlung 1866.

2 HELMHOLTZ, Physiologische Optik S. 362.

man sie auch nicht für den endgültigen Ausdruck des wahren Sachverhaltes gelten lassen will.

Im Sinne der YOUNG'schen Theorie wird man anzunehmen haben, dass wie die Erregung so auch die Ermüdung in jeder der drei hypothetischen Fasergattungen ein selbständiger von den beiden Andern unabhängiger Vorgang ist. Es ist ferner die wahrscheinlichste Annahme, dass der absolute Ermüdungsgrad einer Fasergattung der Intensität der vorausgegangenen Erregung proportional ist. Aus diesen beiden Annahmen lassen sich die Erscheinungen der negativen Nachbilder farbiger Objekte bis ins feinste Detail ableiten. Führen wir dies zunächst an einem bestimmten Beispiel durch. Das Urbild sei ein grellrothes Flächenstück auf schwarzem Grunde d. h. ein Flächenstück, welches eine Strahlung aussendet, die vorwiegend die rothempfindenden Fasern erregt. Diese werden also auch vorwiegend ermüdet. Bedecken wir nun Objekt und Grund mit einer weissen Fläche, so werden alle Retinaelemente von einer Strahlung getroffen, welche im unermüdeten Element alle drei Fassergattungen gleich stark erregt. Die den Grund bedeckenden Theile der Fläche werden demnach wirklich weiss erscheinen. In den Netzhautelementen aber, in welchen durch das Urbild die rothempfindenden Fasern stärker als die beiden andern ermüdet sind, werden die blau- und grünempfindenden durch das weisse Licht stärker afficirt und es wird also auf der weissen Fläche ein blaugrünes Nachbild des rothen Urbildes erscheinen. Selbstverständlich hebt sich das blaugrüne Nachbild dunkel von dem weissen Grunde ab, da ja in seinem Bereiche auf der Netzhaut als einer ermüdeten die Gesammtirregung geringer ist als in der vollständig unermüdeten Umgebung.

Schiebt man statt der weissen eine gelb aussehende Fläche vor das rothe Urbild und seinen schwarzen Grund, so erscheint darauf ein grünes Nachbild vom rothen Urbild. In der That erregt ja jetzt das reagirende Licht vorzugsweise die roth- und grün empfindenden Fasern wenig die blauempfindenden. Nun sind aber die rothempfindenden Fasern sehr ermüdet. Es muss also an den betreffenden Netzhautstellen die Rothempfindung zurücktreten und die Grünempfindung allein in sehr entschiedenes Uebergewicht kommen.

Die ganze Lehre von der Färbung negativer Nachbilder farbiger Objekte kann man in folgende Sätze zusammenfassen, die man als Folgerungen aus der YOUNG'schen Theorie oder als Ausdruck der beobachteten Thatsachen ansehen kann. Sei A der Farbenton der Lichtempfindung, welchen die vom Urbilde ausgesandte Strahlung hervorbringt und B der, welcher dem reagirenden Lichte entspricht.

Der Farbenton des Nachbildes wird dann vom Farbenton B derart abweichen, dass er dem zu A komplementären Farbenton C ähnlicher wird. In diesem zwischen B und C liegenden Farbenton wird aber das Nachbild blasser (mehr grau) als das reagirende Licht erscheinen, wenn der Farbenton B dem A näher liegt als dem C und gesättigter wenn B dem C näher liegt als dem A . Interessant ist noch der specielle Fall, wo der Farbenton B des reagirenden Lichtes genau mit dem Farbenton C der zur Farbe des Urbildes komplementär ist übereinstimmt. In diesem Falle wird das Nachbild genau im Farbenton des reagirenden Lichtes erscheinen, aber noch gesättigter aussehen als dieses selbst. Diese Thatsache lässt sich wie HELMHOLTZ gezeigt hat selbst an Spektralfarben beobachten. Lässt man z. B. auf eine kleine Retinastelle blaugrünes Licht längere Zeit einwirken und hierauf nach Beseitigung desselben auf eine grössere Retinafläche, welche die erstere einschliesst, rothes homogenes Licht aus dem Spektrum, so erscheint in dem grösseren rothen Felde ein Nachbild des vorher blaugrünen Fleckes von so gesättigter Röthe, dass dagegen das Roth der Umgebung, wo die unermüdeten Netzhautelemente von dem homogenen rothen Lichte getroffen werden, blass erscheint. In dieser Thatsache liegt der Beweis des bemerkenswerthen Satzes, dass die Farbenempfindungen, welche durch homogene Strahlungen auf unermüdeten Netzhautstellen hervorgebracht werden, noch lange nicht die gesättigtsten sind, deren der Sehapparat überhaupt fähig ist. Diese kommen erst dann zu Stande, wenn homogene Strahlungen auf Netzhautstellen wirken, die zuvor durch die komplementäre Strahlung ermüdet sind. Im Sinne der YOUNG'schen Theorie entspricht dieser Satz der oben gemachten Annahme, dass jede homogene Strahlung im ermüdeten Netzhautelement jede der drei Fasergattungen erregt wenn auch vorzugsweise ein oder zwei derselben.

SECHSTES CAPITEL.

Erregung der Netzhaut durch andere Ursachen
als Lichtstrahlung.

I. Mechanische und elektrische Reizung der Netzhaut.

Die Einstrahlung von Aetherscillationen auf die Netzhaut ist keineswegs die einzige Einwirkung, welche ihre Elemente in denjenigen Bewegungszustand versetzen kann, welchem eine Lichtempfindung entspricht. Vor Allem ist es eine längst bekannte Thatsache, dass die Netzhautelemente sehr leicht von aussen mechanisch und elektrisch gereizt werden können. Jeder heftige Stoss auf das Auge füllt das ganze Gesichtsfeld mit einem intensiven Lichtblitze. Genauer kann man die Wirkung mechanischen Druckes erkennen, wenn man ihn in mässigem Grade auf einen beschränkten Theil des Augapfels wirken lässt der mit nervösen Netzhautelementen versehen ist, der also hinter dem Aequator liegt. Man verfährt am einfachsten so, dass man das Auge nach innen wendet und nun am äusseren Winkel mit dem Fingernagel oder einem abgestumpften Holzstifte gegen den Augapfel drückt. Man sieht alsdann bei geschlossenem Auge im dunklen Gesichtsfelde eine lichte Scheibe mit dunklem Rande der noch einmal von einem hellen umsäumt ist. Der Ort dieses „Druckbildes“ oder „Phosphens“ liegt natürlich nasenwärts im Gesichtsfelde, da die Reizung eines schläfenwärts von der Axe gelegenen Netzhautpunktes selbstverständlich auf ein nasenwärts gelegenes äusseres Objekt bezogen wird. Drückt man oben, so erscheint das Phosphen unten im Gesichtsfelde und umgekehrt. Macht man den beschriebenen Versuch bei offenem Auge, so zeichnet sich das Phosphen im Ganzen dunkel im hellen Gesichtsfelde. Daraus ist zu schliessen, dass der Druck die von ihm getroffenen Netzhautelemente nicht nur reizt, sondern auch ihre Reizbarkeit für Strahlung herabsetzt.

Von den zahlreichen Erscheinungen, welche auf mechanische Erregung der Netzhautelemente zu beziehen sind, mag nur noch eine von PURKINJE und CZERMAK unter dem Namen des Akkommodationsphosphens beschriebene erwähnt werden. Diese beiden Beobachter geben an, dass am äusseren Rande ihres Gesichtsfeldes, das durch Abhaltung äusseres Lichtes verdunkelt ist, eine lichte in sich ge-

schlossene Ringlinie aufblitzt, wenn sie von grösster Anstrengung des Akkommodationsapparates plötzlich zur Ruhe desselben übergehen. CZERMAK meint, dass diese Erscheinung zu erklären sei durch die Zerrung, welche die an der ora serrata gelegenen Netzhautelemente von der beim Nachlassen des tensor chorioideae sich plötzlich anspannenden Zonula Zinnii erleiden.

Bei der bekannten grossen elektrischen Reizbarkeit aller Nervenfasern ist es nicht überraschend auch die Opticusfasern elektrisch reizbar zu finden. In der That sieht man das ganze Gesichtsfeld hell aufblitzen wenn man einen elektrischen Strom, der Zweige durch das Auge sendet schliesst oder öffnet. Der Strom darf hierbei sogar äusserst schwach sein. Während der Dauer eines konstanten das Auge durchfliessenden Stromes zeigen sich auch noch einige Lichterscheinungen, die jedoch wohl nicht alle auf eine eigentliche Reizung der Nerven-elemente des Auges durch den konstanten Strom zu beziehen sind, obwohl eine solche an sich nicht unwahrscheinlich ist, da andere sensible Nerven auch durch den konstanten Strom in dauernder Erregung gehalten werden.

Wenn ein schwacher elektrischer Strom bei geschlossenem Auge aufsteigend durch den nervus opticus geleitet wird, so erscheint während seiner Dauer das dunkle Sehfeld heller und mehr blass violett. Die Eintrittsstelle des Sehnerven soll dabei in den ersten Augenblicken als eine dunkle Kreisscheibe erscheinen. Geht unter gleichen Umständen der Strom absteigend durch den Sehnerven, so wird das Gesichtsfeld noch dunkler und röthlichgelb, wobei sich auch wieder die Eintrittsstelle des Sehnerven auszeichnen soll und zwar als hellere bläuliche Scheibe.

II. Eigenlicht der Retina.

Die Theile des Sehnervenapparates sind nun wie viele andere Nervenapparate z. B. die Gefässnerven die Hemmungsfasern des Vagus und so weiter auch dann meist nicht in vollständiger Ruhe, wenn keinerlei äussere reizende Einwirkung stattfindet. Man nennt bekanntlich eine derartige fortwährende Erregung in einem Nervengebiete, die durch innere Ursachen bewirkt wird, eine tonische. Da aber jede Erregung des Sehnervenapparates als Lichtempfindung zum Bewusstsein kommt, so wird hier die tonische Erregung die Folge haben, dass das Sehfeld auch bei vollständigem Abschluss des Auges gegen Einstrahlung und andere äussere Reize nicht absolut dunkel ist. Diese Lichterscheinungen ohne äusseren Reiz nennt man das „Eigen-

licht der Retina“. Es ist im Allgemeinen nicht konstant, sondern besteht in allerlei bewegten, theils farbigen theils farblosen Flecken die Gestalt und Farbe beständig ändern. Die tonische Erregung des Sehapparates ist also in seinen verschiedenen Elementen offenbar in beständigem Auf- und Abwogen begriffen, was bei andern tonisch erregten Nervenapparaten wohl auch der Fall sein wird.

Was die reizenden Ursachen sind, welche die tonische Erregung hier zu Stande bringen, ist nicht mit Sicherheit zu sagen, doch dürfte wohl am meisten die Vermuthung für sich haben, dass es chemische Einwirkungen des Blutes auf nervöse Elemente sind, die wir ja auch im Gefässnervencentrum ziemlich sicher als eine von den Ursachen der tonischen Erregung ansprechen können. Diese Vermuthung würde noch die andere nach sich ziehen, dass die Stellen wo die Reize des Blutes einwirken nicht in den nur spärlich versorgten Nervenfasern zu suchen wären, sondern in den reichlicher damit gespeisten zelligen Elementen sei es an den peripherischen Enden in der Netzhaut oder an den centralen Enden im Hirn. Die Verstärkung des Eigenlichtes der Retina während eines den Opticus aufsteigend durchfließenden Stromes und die Schwächung derselben während eines absteigenden scheint dafür zu sprechen, dass die Reizstelle im Centrum zu suchen sei, denn diese Stellen sind bei aufsteigendem Strome im Katelektrotonus bei absteigendem im Anelektrotonus und werden also in jenem Falle mehr, in diesem weniger erregbar sein. AUBERT¹ schätzt auf Grund gewisser Versuche und Annahmen die Helligkeit des Eigenlichtes seiner Netzhaut gleich der Hälfte der Helligkeit, in welcher ein von der Venus in grösstem Glanze beschienenes Blatt weisses Papieres erscheinen wird. Jedesfalls ist übrigens die Intensität des Eigenlichtes der Retina eine sehr veränderliche Grösse.

III. Einwirkung der Netzhautelemente aufeinander. Contrast.

Höchst merkwürdig ist noch eine Gruppe von Lichterscheinungen, welche unter dem Namen des Contrastes zusammengefasst werden. Sie sind auch nicht hervorgebracht durch äussere Einwirkung auf die Netzhautelemente, in welchen sie zu Stande kommen, sondern durch die Einwirkungen von Seiten benachbarter Netzhautelemente, durch welche in jenen Erregung oder Modifikationen der Erregbarkeit bewirkt werden.

Die Grunderscheinung des Contrastes ist von Alters her bekannt

¹ AUBERT, Handb. d. ges. Augenheilkunde II. 2. Hälfte. S. 486.

und besteht darin, dass jedes Helle in dunkler Umgebung heller, in noch hellerer Umgebung dunkler erscheint. Es giebt besonders zwei Versuche, in denen man diese Erscheinung sehr rein und schön zur Anschauung bringen kann. Man nehme eine Scheibe die wie Fig. 60 mit weissen und schwarzen Sektoren bemalt ist.

Wird dieselbe mit der erforderlichen Geschwindigkeit um eine in ihrem Mittelpunkt zu ihr senkrecht stehende Axe gedreht, so sollte sie nach den früher entwickelten Sätzen in vier Zonen zerfallen, deren jede vollständig gleich hell erscheinen müsste und zwar die innerste ganz schwarz jede folgende nach aussen heller als die vorhergehende. Dies ist nun aber keineswegs der Anblick den die gedrehte Scheibe bietet, vielmehr erscheint

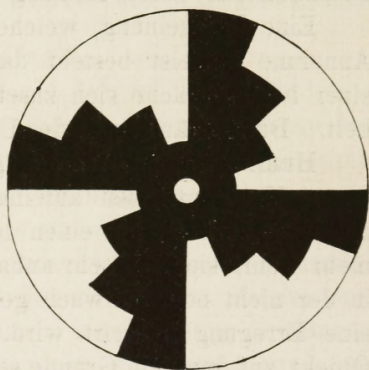


Fig. 60.

jede Zone an ihrem inneren Rande, wo sie an die dunklere Zone grenzt heller, am äusseren Rande dunkler und dazwischen aufs zarteste abschattirt. Vielleicht noch sauberer und beweisender ist der Versuch, wenn man vor einer weissen Fläche eine Reihe von etwa vier Kerzen aufstellt und nun dazwischen bis gegen die Mitte der Reihe einen undurchsichtigen Schirm mit senkrechter gerader Kante vorschiebt. Dann wird ein Theil der weissen Fläche von allen vier Kerzen beleuchtet sein, dann folgt ein senkrechter Streif, der nur von dreien, dann einer der nur von zweien beleuchtet ist u. s. w. bis zu dem Theil der Fläche, welcher von keiner Kerze Licht erhält. Jeder dieser Streifen ist in seiner ganzen Breite gleich stark beleuchtet und doch erscheint er auf der Seite, wo er an den dunkleren grenzt heller, auf der andern dunkler und dazwischen zart abschattirt. Keine Erklärung liegt wohl für diese Erscheinungen näher als die, dass eben eine starke Erregung einer Netzhautstelle die Erregbarkeit in den übrigen herabsetzt und zwar um so mehr, je näher sie ihnen liegt. Diese Annahme ist auch schon längst stillschweigend gemacht oder ausgesprochen. Sie ist aber in neuerer Zeit von HELMHOLTZ ganz in den Hintergrund gedrängt worden, der diese und viele ähnliche Erscheinungen lediglich auf eine Täuschung in der Beurtheilung der Helligkeit bezogen wissen wollte, etwa wie man einen mittelgrossen Mann neben einem kleinen für gross, neben einem grossen für klein hält. Nur vereinzelte Stimmen haben sich immer wieder jener näher liegenden Erklärung zugewandt, aber vor

einigen Jahren ist es wie mir scheint HERING¹⁾ gelungen, durch scharfsinnige Zergliederung der Thatsachen und neue Modifikationen der Versuche unwiderleglich festzustellen, dass die Contrasterscheinungen wesentlich auf einer Aenderung der Erregbarkeit der einen Netzhautstelle durch Reizung der benachbarten beruhen.

Eine Erscheinung, welche sehr schlagend die in Rede stehende Annahme beweist besteht darin, dass ein negatives Nachbild auf einer hellen Fläche sich zusehends mehrere Sekunden lang verdunkelt. Durch Täuschung des Urtheils kann dies nicht erklärt werden.

HERING hat aber ferner gezeigt, dass die Einwirkung benachbarter Netzhautstellen aufeinander nicht lediglich in Herabsetzung der Erregbarkeit der einen bei Reizung der andern besteht. Vielmehr kehrt sich bei sehr anhaltender Reizung der Erfolg um, so dass in der nicht oder schwach gereizten die Erregbarkeit zunimmt resp. eine Erregung inducirt wird. In der That, fixirt man ein helles Objekt auf dunklem Grunde sehr andauernd, so tritt nur in der ersten Zeit die vorhin beschriebene Contrasterscheinung hervor, dass nämlich der dunkle Grund in der Nähe des hellen Objectes noch dunkler erscheint. Allmählich verbreitet sich um das helle Objekt ein lichter Schimmer, der namentlich bei plötzlicher Schliessung der Augen im nunmehr ganz verdunkelten Gesichtsfelde als sehr heller Saum, um das tief dunkle Nachbild des hellen Objectes aufleuchtet. HERING hat diesen Versuch noch mannigfach modificirt und eine ganze Reihe von Erscheinungen beschrieben, die sich entschieden nicht durch Urtheilstäuschungen erklären lassen.

Wendet man bei den Contrastversuchen statt weisses Lichtes farbiges an, so treten auch in den beeinflussten Netzhautstellen Farbenerscheinungen auf, die im Sinne der YOUNG'schen Theorie etwa dahin zusammengefasst werden können, dass die Erregbarkeit derjenigen Fasergattung der nicht gereizten Elemente am meisten vermindert und in der späteren Phase am meisten erhöht wird, welche in den benachbarten gereizten Elementen am meisten erregt ist.

Die Annahme, dass benachbarte Netzhautelemente aufeinander wirken können, dürfte eine anatomische Grundlage finden in der wenigstens von manchen Autoren behaupteten Verknüpfung der zelligen Elemente der Netzhaut. Die Gesetze dieser gegenseitigen Einwirkung benachbarter Netzhautelemente bedürfen aber zweifellos noch weiterer Untersuchung.

1 HERING, Zur Lehre vom Lichtsinne. Sitzgsber. d. Wiener Acad. Juni 1872. December 1873.

ANHANG.

Einige unerklärte subjektive Lichterscheinungen.

Unter verschiedenen Umständen macht sich im Gesichtsfelde die dem gelben Fleck der Netzhaut entsprechende Stelle besonders bemerklich. Für jeden leicht wahrnehmbar ist eine solche Erscheinung bei intermittirender Beleuchtung. Wenn man z. B. die mässig gespreizten Finger einer Hand vor einem gleichmässig hellen Hintergrunde rasch hin- und herbewegt, so bedeckt sich das Gesichtsfeld mit flimmernden dunkeln Flecken und die dem gelben Flecke entsprechende Stelle zeichnet sich aus durch regelmässige Anordnung dieser Fleckchen, ganz in der Mitte erscheint ein genauer Kreis mit auffallend hellem Saume.

Der Kreis, welcher der Mitte des gelben Fleckes entspricht, erscheint manchen Beobachtern auch zuweilen in gleichmässiger konstanter Beleuchtung namentlich wenn dieselbe blau ist. Er soll dann von einem dunklen Hofe umgeben sein entsprechend der gefässlosen Zone des gelben Fleckes. Um den dunkeln Hof zeigt sich ein unbestimmt begrenzter genau kreisförmiger oder rhombischer heller Ring von HELMHOLTZ¹ als LOEWI'scher Ring bezeichnet.

Sieht man nach einer gleichmässig hellen Fläche durch eine polarisirende Vorrichtung z. B. durch ein NICOL'sches Prisma so erscheinen auf dem gelben Fleck die sogenannten Haidinger'schen Büschel. In weisser Beleuchtung zeichnen sich nämlich heller als der Grund und bläulich gefärbt zwei hyperbolisch jedoch verwaschen begrenzte Flecke aus. Die reelle Axe der Hyperbel, deren Mittelpunkt der fixirte Punkt ist, liegt senkrecht zur Polarisirungsebene, so dass sich bei Drehung des Nicols vor dem Auge die ganze Erscheinung dreht. Um die Linie herum, in welcher die Polarisirungsebene die Netzhaut schneidet, erscheint das Gesichtsfeld etwas dunkler und (in weisser Beleuchtung) gelblich gefärbt. Die ganze Erscheinung umspannt einen Gesichtswinkel von etwa 4° .

Da das Licht des hellen Himmels theilweise polarisirt ist, so nehmen manche Menschen die Büschel wahr, wenn sie nach dem blauen Himmel auch ohne polarisirende Vorrichtung sehen.

¹ HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 419.

HELMHOLTZ¹ versucht die Erscheinung zu erklären durch die Annahme von Doppelbrechung in den Radialfasern des gelben Fleckes, welche hier etwas schräg von allen Seiten gegen die Mitte verlaufen.

Wenn man nach längerem Bücken den Kopf wieder erhebt und nach einer gleichmässig hellen Fläche sieht, so sieht man oft auf derselben zahlreiche kleine helle Ringelchen mit heller Mitte in verschlungenen Bahnen herumlaufen. Sie haben grosse Aehnlichkeit mit mikroskopisch gesehenen Blutkörperchen. Dies hat wohl manche Autoren veranlasst, sie für eine Erscheinung der Blutkörperchen in den Capillaren der Netzhaut zu halten. Die übrigen Umstände namentlich die Vereinzelung der Ringelchen und die Form ihrer Bahnen verbieten indessen eine solche Erklärung entschieden.

¹ HELMHOLTZ, Physiol. Optik S. 422.