

Sie sich, dass die Reizschwelle für Roth am höchsten liege und von da gegen Blau hin immer niedriger werde, und dass nach und nach die Helligkeit immer zunehme, so muss anfangs die Wirkung des Roth bei geringer Helligkeit relativ gering sein, weil man sich noch wenig von der Reizschwelle des Roth entfernt hat, während man sich bei den übrigen Farben schon weiter von der Reizschwelle entfernt hat, da ihre Reizschwelle niedriger ist. Je weiter aber die Helligkeit steigt, um so mehr wird dieser Unterschied in den Hintergrund treten, und um so mehr werden also auch die langwelligigen Strahlen, die rothen und gelben zur Geltung kommen. Mit dieser Ungleichheit in der Lage der Reizschwelle für das Roth und das Blau hängt es zusammen, dass man, wie Purkinje und Dove bemerkten, die Helligkeit der Farben anders beurtheilt, je nachdem sie stark oder schwach beleuchtet sind. Wenn ich Jemanden bei heller Tagesbeleuchtung aus einer Reihe von Papieren ein rothes und ein blaues aussuchen lasse, die ihm und Anderen gleich hell erscheinen, und lasse diese selben Papiere in der Dämmerung, oder sonst bei schwacher Beleuchtung, aber im neutralen Lichte, untersuchen, so finden Alle, dass das blaue Papier heller sei als das rothe, weil man nun eben mit dem Roth näher der Reizschwelle steht und deshalb der Eindruck des Roth nicht nur absolut, sondern auch relativ schwächer ist, als er bei heller Tagesbeleuchtung war.

Da wir uns, wie wir oben gesehen haben, alle Farben vorstellen können als gemischt aus einer bestimmten Farbe des Farbenkreises und aus Weiss, beziehungsweise Grau, so müssen wir auch die Farben in ein System bringen können. Man hat diesem Systeme viele verschiedene Formen gegeben, und in der That kommt auf die Form wenig an. Anfangs hatte man die Farben in einen Kreis anzuordnen gesucht. Es hatte sich aber da gezeigt, dass man wohl die verschiedenen Grade der Sättigung auftragen könne, dass man aber nicht die verschiedenen Grade der Helligkeit und Dunkelheit erhalte. Nimmt man eine Kugel und trägt auf diese nicht nur die Farben auf, sondern denkt sich auch das Innere dieser Kugel mit Farben erfüllt, dann kann man in der That alle Pigmentfarben in ein System bringen. Im Aequator der Kugel sind die reinen Pigmente aufgetragen. An dem einen Pole gehen sie in Schwarz über, an dem andern gehen sie in Weiss über. Man hat also an der Oberfläche der Kugel alle Farben in ihren Uebergängen zum Weiss und Schwarz. In der Axe dieser Kugel muss man sich aber eine Linie denken vom Weiss zum Schwarz, die Linie des neutralen Grau. Im Innern der Kugel wären dann alle Mischfarben des neutralen Grau, die verschiedenen Arten von, Braun, Grau u. s. w. zu finden.

Nach demselben Principe hat man die Farben auf und in einer Pyramide und auf und in einem Kugeloctanten vertheilt. Auf letzterem stand das Weiss in der Mitte des sphärischen Dreieckes, die reinen Farben an den Seiten und Ecken desselben und das Schwarz am Kugelcentrum.

### Zeitlicher Verlauf der Netzhauterregung.

Der Erregungszustand im Sehnerven überdauert jedesmal den Act der Erregung. Die Wirkung überdauert die Ursache. Wenn deshalb mehrere



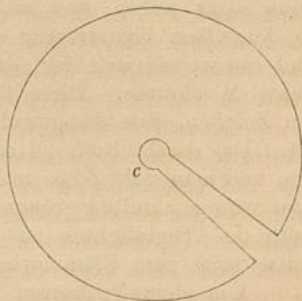
Eindrücke rasch aufeinanderfolgen, so kann es geschehen, dass die späteren eintreffen, ehe die Wirkung der ersten aufgehört hat, so dass also ein kontinuierlicher Eindruck aus einer intermittirenden Reizung entsteht. Darauf beruht es, dass man einen feurigen Kreis sieht, wenn man eine glühende Kohle im Dunkeln im Kreise herumschwingt. Bringt man auf eine Scheibe zwei Farben und dreht sie sehr schnell, so fallen hier auch die Reize über einander und man erhält die Mischfarbe. Auf diese Weise kann man zeigen, dass die verschiedenen Farben miteinander Weiss geben, man kann zeigen, wie Mischfarben entstehen u. s. w. Eine solche Einrichtung ist der Farbenkreisel.

Bei Versuchen mit dem Farbenkreisel ist es natürlich von Wichtigkeit, dass die Farben in gewissen Verhältnissen miteinander gemischt werden, da eine gewisse Menge Roth nur eine gewisse Menge Grün compensirt und eine gewisse Menge Blau nur eine gewisse Menge Gelb. Je zwei Complementärfarben können also auch auf dem Farbenkreisel nur dann Weiss geben, wenn sie in einem bestimmten Verhältnisse auf demselben vertheilt sind. Da hat nun Maxwell eine Art von Scheiben angegeben, vermöge welcher man auf dem Wege des Experimentirens diese Verhältnisse finden kann. Er schneidet nämlich die Papiere aus in Form der vorstehenden Figur 31, in der *c* das Loch für die Axe des Kreisels ist. Sie können dann in einander gesteckt und durch Drehung beliebig verschoben werden, so dass die eine Papierscheibe die andere mehr oder weniger deckt. Man dreht nun, nachdem die Papiere in einer bestimmten Lage befestigt sind, in solcher Richtung, dass die freien Lappen der Scheiben durch den Luftwiderstand nicht gehoben, sondern herabgedrückt werden.

Beim Suchen des neutralen Weiss oder Grau (wirkliches Weiss kann, weil dazu nicht die hinreichende Menge von Licht vorhanden ist, hier nicht erzielt werden) verkleinert man nun die Farbe, welche sich als im Ueberschuss vorhanden erweist, so lange, bis das Grau nicht mehr rothgrau oder grüngrau, gelbgrau oder blaugrau ist, sondern mit dem aus weiss und schwarz gemischten Grau übereinstimmt. Es muss also, wenn wir Ultramarin und Gelb mischen, in dem Blau eine solche Menge blauen Lichtes enthalten sein, dass sie gerade durch das von dem gelben Felde reflectirte gelbe compensirt wird. Solche sich einander genau compensirende Mengen complementärfärbten Lichtes betrachten wir als chromatisch gleichwerthig und sagen von zwei Papieren, die Weiss geben, wenn jedes von ihnen die halbe Scheibe des Farbenkreisels bedeckt, ihre Farben hätten gleiche Intensität. Es ist damit nicht gesagt, dass auch die sogenannte physikalische Intensität, die Summe der lebendigen Kräfte, in beiden farbigen Lichtern gleich sei. Von dieser haben wir überhaupt nur sehr dürftige Kenntniss. Die Mengen Weiss, die dabei in jeder von beiden enthalten sind, sind an und für sich ganz gleichgiltig.

Es führt uns dies zu der Formel zurück, welche wir früher (S. 157) für die Sättigung aufgestellt haben. Die Helligkeit der Farbe hängt ab von der Menge des Lichtes, das sie überhaupt zurückstrahlt. Die Inten-

Fig. 31.





sität der Farbe hängt ab von der Menge des Lichtes ihrer eigenen, ihrer specifischen Farbe, welche sie zurückstrahlt. Die Sättigung drückt das Verhältniss aus zwischen diesem specifischen Lichte und dem weissen Lichte, mit dem es gemischt ist, so dass die Sättigung ein Maximum ist, wenn die Menge des Weiss Null ist, während umgekehrt die Sättigung ein Minimum ist, das heisst die Farbe entweder Weiss oder Grau ist, wenn gar keine specifische Farbe vorhanden ist. Mittelst eines solchen Maxwell'schen Farbenkreisels kann man auch wiederum beweisen, dass die Farbe des gewöhnlichen Tageslichtes nicht weiss, sondern röthlich ist, ja man kann sogar zeigen, dass nicht unbeträchtliche Mengen von rothem Lichte in demselben überschüssig sind. Man nimmt ein ultramarinblaues Papier und ein weisses und lässt diese miteinander rotiren, so bekommt man eine lichte Mischfarbe. Diese fällt aus der Schattirung, sie geht zum Violett, ein Zeichen, dass das gewöhnliche Tageslicht nicht weiss, sondern röthlich ist. Um dieses Roth zu compensiren schaltet man einen grünen Sector ein, und man sieht, dass man je nach der Helligkeit der Farbe einen mehr oder weniger breiten grünen Sector einschalten muss, um das überschüssige Roth des Tageslichtes zu compensiren und auf diesem Wege die helle Schattirung zum Ultramarinblau zu erhalten.

Von dem Verharren des Lichteindruckes im Auge ist noch eine Reihe von anderweitigen Anwendungen gemacht worden, von denen wir hier einige besprechen müssen. Zunächst kann man dadurch den Weg eines sich sehr schnell und dabei periodisch bewegenden Körpers beobachten. Den Weg einer schwingenden Basssaite kann man an und für sich nicht deutlich wahrnehmen. Wenn man aber auf derselben einen kleinen, glänzenden Metallknopf, z. B. einen Stecknadelkopf, anbringt und die Basssaite anreisst und sie so betrachtet, dass sie sich perspectivisch verkürzt, so sieht man an diesem Metallknopf den Weg, den die Basssaite beim Schwingen beschreibt. In ähnlicher Weise kann man durch Anbringen von Lichtreflexen auf schwingenden Stäben den Weg, den sie beschreiben, beobachten. In neuerer Zeit hat namentlich Helmholtz dies benützt, um mittelst Stimmgabeln die Zusammensetzung von Schwingungen zu studiren. Er hat zu diesem Zwecke ein eigenes Instrument, das Vibrationsmikroskop, angegeben und in seinem Werke über Tonempfindungen beschrieben. Man sieht hier durch eine Lupe, die durch eine schwingende Stimmgabel vertical auf- und abbewegt wird, auf ein beleuchtetes Stärkekörnchen, das von einer anderen Stimmgabel horizontal hin- und herbewegt wird. In neuester Zeit hat Marey die Dauer des Lichteindruckes benützt, um den Weg zu sehen, welchen die Flügel der Insecten beschreiben. Er hat einer Brummfliege auf den vorderen Rand des Flügels gegen das Ende hin ein kleines Stückchen Blattgold aufgeklebt. Wenn nun das Thier mit seinen Flügeln schlägt, so sieht man an dem Lichtreflexe den Weg, welchen der Flügel in der Luft beschreibt. Wenn die Bewegung in der Weise periodisch ist, dass jeder Punkt des sich bewegenden Körpers nach bestimmten, gleichen Zeiten immer wieder an denselben Ort zurückkehrt, so kann man nicht nur den Weg, sondern auch die Bewegung selbst für das Auge darstellen. Denken Sie sich, es hätte ein Körper die Schwingungsdauer  $t$  und er würde mir immer wieder sichtbar in Intervallen von der Dauer  $nt$ , worin  $n$  irgend eine ganze Zahl bedeuten soll, so würde ich ihn jedes Mal an demselben Orte sehen, und da diese Eindrücke sehr rasch aufeinander folgen



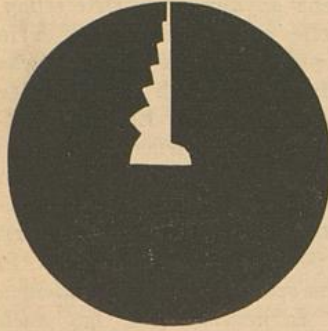
sollen, so würde ich diesen Körper im Zustande der Ruhe sehen. Nun denken Sie sich aber, der Körper würde mir nicht sichtbar nach Intervallen von der Dauer  $nt$ , sondern nach Intervallen von der Dauer  $nt+k$ , worin  $k$  eine verhältnissmässig kleine Grösse, einen geringen Bruchtheil von  $t$  bezeichnen soll, so würde ich ihn nun nicht mehr an demselben Orte sehen, sondern ich würde ihn an einer andern Stelle sehen, bis zu der er in der Zeit  $k$  vorgerückt ist. Das nächste Mal werde ich ihn wieder etwas weiter vorgerückt sehen, und da diese Eindrücke sehr rasch auf einander folgen sollen, so wird in meinem Auge ein continuirlicher Eindruck entstehen in der Weise, als ob sich der Körper in seiner natürlichen Schwingungsrichtung fortbewegte. Wenn ich mir denke, ich bekäme ihn wiederum zu Gesichte in Intervallen von  $nt-k$ , so würde ich ihn auch seinen natürlichen Weg machen sehen, aber rückwärts. Dieses Princip ist zuerst von Savart angewendet worden, um die periodischen Bewegungen in einem Wasserstrahle zu beobachten. Es ist dann später in seinen Methoden und Anwendungen von Doppler entwickelt. In neuerer Zeit hat auch Toepler über dasselbe gearbeitet. Das Sichtbarmachen und das Verschwinden des sich bewegenden Körpers kann wesentlich in zweierlei Weise hervorgebracht werden: erstens dadurch, dass man den Körper in der Periode  $nt+k$  momentan beleuchtet, oder dadurch, dass man den Körper periodisch für das Auge verdeckt und ihn in Perioden von  $nt+k$  frei werden lässt.

Andererseits kann man auch periodische Bewegungen bildlich darstellen. Dazu dienen die sogenannten stroboskopischen Scheiben, die unabhängig von einander von Purkinje, von Plateau und von Stampfer erfunden worden sind. Sie beruhen darauf, dass ein in periodischer Bewegung begriffener Körper in bestimmten Lagen gezeichnet und in diesen Bildern dem Auge schnell nacheinander dargeboten wird. Man lässt so immer Bilder der veränderten Lage aufeinander folgen, bis endlich die periodische Bewegung alle ihre Phasen durchgemacht hat. So stellt man kreisförmige, geradlinige und elliptische Schwingungen, so stehende und fortschreitende Wellen, Maschinentheile in Bewegung, ein sich contrahirendes Herz u. s. w. dar. Es kann dies auf zweierlei Weise erzielt werden. Entweder dadurch, dass man zwei Scheiben hintereinander auf einer Axe befestigt, wovon die vordere Spalten hat und die hintere die Abbilder trägt, so dass man dann während der Umdrehung durch die Spalten auf die Abbilder sieht. Das ist die Purkinje'sche Construction, das sogenannte Kinesoskop. Oder dadurch, dass die beiden Scheiben miteinander vereinigt sind, das heisst, dass eine und dieselbe Scheibe die Abbilder trägt und zwischen ihnen und der Peripherie die Spalten, durch welche man nun während der Umdrehung die Bilder in Spiegel ansieht. Das ist die Construction von Plateau und von Stampfer. Man kann endlich auch eine Erscheinung des localen Contrastes auf der Netzhaut sehr gut darstellen durch das Princip der Persistenz der Erregungszustände. Man trägt auf einer schwarzen Scheibe weisse Sectoren auf. Die Winkelwerthe der weissen Sectoren nehmen gegen die Peripherie hin immer mehr ab, und zwar mit jedem neuen Ringe um die Hälfte. (Fig. 32.) Wenn man diese Scheibe in Drehung versetzt, so entsteht ein System von grauen Ringen. Diese werden immer dunkler gegen die Peripherie hin. Das ist begreiflich, weil die Menge des dem Schwarz beigemengten Weiss gegen die



Peripherie hin immer geringer wird. Zugleich bemerkt man aber, dass jeder Ring da am dunkelsten ist, wo er an den nächsten helleren anstösst,

Fig. 32.



und da am hellsten, wo er an den nächsten dunkleren anstösst, so dass das Princip des Contrastes nicht nur platzgreift im Centralorgane überhaupt, sondern auch in den einzelnen Partien des Sehfeldes. Mach hat diese Scheibe, während sie rotirte, photographirt, und noch an der Photographie konnte man unterscheiden, dass die Ringe immer dunkler erschienen da, wo sie an einen helleren angrenzen, und da heller, wo sie an einen dunkleren angrenzen. Wenn man Krystallmodelle oder andere von ebenen Flächen begrenzte Körper, die aus Gyps gegossen oder weiss angestrichen sind, beobachtet, wird man auch bemerken, dass die

gleichmässig beleuchteten Flächen da heller erscheinen, wo sie an schwächer beleuchtete angrenzen, und da dunkler, wo sie an stärker beleuchtete angrenzen.

Daraus, dass die Ringe, die jene Scheibe bei der Drehung gibt, immer im Allgemeinen mit der Abnahme der Breite des Sectors dunkler werden, geht schon hervor, dass ein Lichteindruck eine gewisse Zeit braucht, um zu seiner vollen Wirkung zu gelangen; denn, wenn er auch in der kleinsten Zeit seine volle Wirkung ausüben könnte, so müssten ja alle diese Ringe gleichmässig weiss sein. Sigmund Exner hat nun mit einem Apparate, der von Helmholtz angegeben ist, und der von ihm mit dem Namen des Tachistoskops bezeichnet wurde, den zeitlichen Verlauf der Erregung untersucht und gefunden, dass die Zeit, welche ein Lichteindruck braucht, um zu seiner vollen Wirkung zu gelangen, sehr verschieden ist, je nach der objectiven Helligkeit, und zwar zeigt es sich hier, dass, wenn die objective Helligkeit in geometrischer Progression zunimmt, die Zeiten, die zur Erreichung der vollen Wirkung nöthig sind, in arithmetischer Progression abnehmen. Wenn man deshalb sagt, dass etwa der fünfte Theil einer Secunde dazu nöthig sei, dass ein Lichteindruck seine volle Wirkung ausübe, so gilt das nur von einem Lichteindrucke von mittlerer Stärke, wie ihn etwa ein von gewöhnlichem diffusum Tageslichte beleuchtetes Blatt Papier hervorbringen kann. Stärkere Lichtintensitäten brauchen beträchtlich kürzere Zeit, während andererseits geringere Lichtintensitäten längere Zeit zur Entwicklung ihrer vollen Wirkung brauchen.

Wir haben ferner gesehen, dass es für die Erregung eine gewisse Reizschwelle gibt, das heisst eine gewisse Intensität, welche ein objectives Licht haben muss, um wirklich eine Erregung hervorzurufen. Da nun hier die Wirkungen sich zeitlich allmähig entwickeln, so ist es von vorneherein klar, dass es auch zeitlich eine gewisse Reizschwelle geben wird, dass ein Licht von einer gewissen Intensität immer eine gewisse Zeit eingewirkt haben muss, ehe man es überhaupt bemerkt. Auch diese Zeit ist von Exner mit dem früher erwähnten Apparate untersucht worden, und es hat sich auch hier ergeben, dass, wenn die objective Lichtintensität im



geometrischen Verhältnisse zunimmt, die für die Wahrnehmung nöthigen Zeiten in arithmetischer Progression abnehmen.

### Nachbilder.

Wenn ein Lichteindruck eine Zeit lang gedauert hat, so verschwindet er wieder. Es fragt sich nun, kommt dann die Netzhaut sofort in Ruhe, oder setzt sich etwas an seine Stelle? Das ist verschieden, je nach der Stärke des Lichteindruckes, der hervorgebracht worden ist. Diese hängt wiederum ab von der Stärke des objectiven Lichtes und von der Zeit, während welcher das objective Licht eingewirkt hat. Nach stärkeren Reizen erfolgen Nachbilder, die vielfach von Purkinje, Plateau und Fechner studirt worden sind. Man theilt sie ein in gleichgefärbte und in complementär gefärbte, also in solche, die dieselbe Farbe haben, wie das Object, und in solche, die die entgegengesetzte, die complementäre Farbe haben. Man theilt sie ferner ein in positive und in negative, wobei man diesen Bezeichnungen denselben Sinn unterlegt, wie er in der Photographie gebräuchlich ist. Man nennt nämlich positiv dasjenige Nachbild, in welchem das hell ist, was im Object hell ist, und negativ nennt man dasjenige Nachbild, in welchem das Dunkel ist, was im Objecte hell ist.

Das erste Nachbild, das zur Erscheinung kommt, ist das positive complementär gefärbte Nachbild, das von Purkinje entdeckt worden ist. Purkinje beschrieb, dass, wenn er eine glühende Kohle langsam herumshawang, er hinter derselben einen rothen Streifen gesehen; das war die directe Verlängerung des Lichteindruckes. Dann sei ein kurzes dunkles Intervall gekommen und hierauf ein grünes Bogenstück, ein grünes Nachbild, das sich weniger im Raume ausbreitete als der rothe Streifen, der vom verlängerten directen Lichteindrucke herrührte. Dieses Grün setzt sich hell auf dunklem Grunde ab. Einige sehen dieses Nachbild etwas anders. Exner beschreibt es so, dass das dunkle Intervall fehlt und das Roth durch eine Art von Grau in das Grün des positiven complementär gefärbten Nachbildes übergeht. Man kann dieses positive complementär gefärbte Nachbild auch sehen, wenn man längere Zeit in eine Kerzenflamme durch ein farbiges, z. B. rothes Glas hineinstarrt. Wenn man dann plötzlich, ohne den Augapfel mit den Augenlidern zu drücken, die Augen schliesst, sieht man eine grüne Flamme, in der das hell ist, was in der Flamme selbst hell ist, und das dunkel, was in der Flamme selbst dunkel ist, also ein positives complementär gefärbtes Nachbild.

Die positiven gleich gefärbten Nachbilder muss man ansehen als hervorgegangen aus der Wiederkehr des Erregungszustandes, welchen das ursprüngliche Licht hervorgebracht hat, die negativen Nachbilder aber, die immer complementär gefärbt sind, sind Abstumpfungsbilder, das heisst sie rühren daher, dass das einwirkende Licht eine Partie unserer Netzhaut unterempfindlich gemacht hat für objectives Licht, und dass deshalb, wenn wir zum Beispiele rothes Licht gesehen haben, der Eindruck von Roth fehlt, wenn gemischtes Licht auf dieselbe Stelle fällt, und deshalb an dieser Stelle der Eindruck von Grün entsteht, welches dunkler ist als der Grund. Es ist über die Richtigkeit dieser Erklärung gestritten worden, weil dieses negative complementär gefärbte Nachbild auch bei geschlossenen Augen, ja selbst, wenn man die Augen mit beiden Händen bedeckt, gesehen