

Zweiter Abschnitt.

Die Lehre von den Gesichtsempfindungen.

§ 17. Von der Reizung des Sehnervenapparates.

Die Nervenapparate des menschlichen und thierischen Körpers werden durch Einwirkung äußerer Agentien verschiedener Art in einen veränderten Zustand versetzt, den man einerseits an ihnen durch physikalische Hilfsmittel, nämlich durch die Untersuchung ihrer elektromotorischen Wirksamkeit erkennen kann, und der sich andererseits durch Wirkungen zu erkennen giebt, welche die Nerven in anderen mit ihnen organisch verbundenen Theilen des Körpers hervorbringen. So verräth sich dieser veränderte Zustand einiger Nerven durch Zusammenziehungen der mit ihnen verbundenen Muskeln; diese werden motorische Nerven genannt. Andere erregen unter denselben Umständen Empfindungen in dem Gehirne, als dem körperlichen Organe des Bewusstseins, und heißen deshalb sensible Nerven. Bei den motorischen Nerven ist nun der auffälligste Erfolg der verschiedenartigsten äußerer Einwirkungen, des Zerrens, Quetschens, Zerschneidens, des Brennens, Anätzens, der elektrischen Durchströmungen, immer die Zusammenziehung des zugehörigen Muskels, welche nur quantitative Unterschiede der Stärke zeigt. Man faßt deshalb die genannten verschiedenartigen Einwirkungen in ihrem Verhältnisse zu den motorischen Nerven unter einen Namen, den der Reize, zusammen, indem man von ihren qualitativen Verschiedenheiten abstrahirt und sie nur nach der verschiedenen Stärke der Zuckungen, welche sie hervorbringen, quantitativ als stärker oder schwächer reizend von einander unterscheidet. Den veränderten Zustand im Nerven selbst, welcher in Folge der Einwirkung eines Reizes eintritt, nennt man die Reizung, und die Fähigkeit des Nerven, nach Einwirkung von Reizen Muskelzuckungen hervorzubringen, die Reizbarkeit. Diese Fähigkeit kann durch Absterben und mancherlei äußere Einwirkungen beeinträchtigt werden.

Bei den sensiblen Nerven läßt sich das Schema dieser Begriffe noch insofern wieder anwenden, als auch in ihnen die äußeren Einwirkungen, welche, auf einen motorischen Nerven angewendet, Zuckungen hervorzubringen vermögen, wiederum alle eine andere Wirkung eigenthümlicher Art, nämlich eine Empfindung hervorrufen, so lange der Nerv noch nicht abgestorben und vom Gehirne getrennt ist. Aber allerdings tritt hier schon der wesentliche Unterschied ein, daß die Empfindung qualitative Unterschiede zeigt, entsprechend den qualitativen Unterschieden der Einwirkung. Indessen, wenn auch verschiedene Reize verschiedene Empfindungen hervorrufen, so sind die Wirkungen der Reize doch immer Empfindungen, also immer Wirkungen, von einer sonst nicht vorkommenden, dem lebenden Körper eigenthümlichen Art, und eben deshalb hat man den zuerst für die Verhältnisse der motorischen Nerven abstrahirten Begriff der Reize und der Reizung auch auf die der sensiblen Nerven übertragen, und man nennt deshalb ebenso die äußeren Einwirkungen, welche auf lebende sensible Nerven angewendet die Entstehung von Empfindungen veranlassen, Reize, die im Nerven eingetretene Veränderung selbst die Reizung.

Der Zustand der Reizung, welcher an jeder Stelle einer Nervenfasern durch Einwirkung von Reizen eingeleitet werden kann, pflanzt sich stets auch auf alle anderen Theile der Nervenfasern fort, und giebt sich auch in diesen theils durch die veränderten elektromotorischen Wirkungen zu erkennen, theils durch seinen Einfluß auf die anderen organischen Gebilde, Muskeln, Gehirn, Drüsen u. s. w., mit denen der Nerv verbunden ist, indem Zusammenhang des Muskels, oder Empfindung, oder vermehrte Absonderung der Drüse eintritt. Nur wo eingreifende Veränderungen der Structur des Nerven durch mechanische oder chemische Eingriffe, durch Gerinnung des Inhalts der Nervenfasern beim Absterben eingetreten sind, findet die Fortleitung der Reizung ein Hinderniß. Jeder Stelle einer unverletzten Nervenfasern kommt deshalb nicht bloß Reizbarkeit, d. h. die Fähigkeit, in Reizung versetzt zu werden, sondern auch Leitungsfähigkeit für die Reizung zu. Eine Trennung beider Fähigkeiten ist noch nicht beobachtet worden. Übrigens sind bisher noch keine Unterschiede in der Structur und Function der sensiblen und motorischen Fasern bekannt, welche nicht von ihrer verschiedenen Verbindung mit anderen organischen Systemen hergeleitet werden könnten. Die Fasern selbst scheinen nur die Rolle indifferenten leitender Fäden zu spielen, die, je nachdem sie mit einem Muskel oder mit empfindenden Gehirntheilen organisch verbunden sind, als motorische oder sensible Nerven wirken.

193 Die Empfindungen des Menschen zerfallen ihrer Qualität nach in fünf Gruppen, welche den sogenannten fünf Sinnen entsprechen, in der Weise, daß nur die Qualitäten derjenigen Empfindungen unter einander vergleichbar sind, welche dem Qualitätenkreise desselben Sinnes, nicht aber solche, welche zwei verschiedenen Sinnen angehören. So können wir z. B. zwei verschiedene

Empfindungen, die dem Gesichtssinne angehören, nach Lichtintensität und Farbe vergleichen, aber keine von ihnen mit einer Tonempfindung oder Geruchsempfindung.

Die physiologische Erfahrung hat, soweit Prüfung möglich war, gefunden, daß durch Reizung jeder einzelnen sensiblen Nervenfasern nur solche Empfindungen entstehen können, welche dem Qualitätenkreise eines einzigen bestimmten Sinnes angehören, und daß jeder Reiz, welcher diese Nervenfasern überhaupt zu erregen vermag, nur Empfindungen dieses besonderen Kreises hervorruft. Vollständig experimentell beweisen läßt sich der Satz nur für solche Nervenfasern, die in besonderen Nervenstämmen, getrennt von allen Fasern, die anderen Sinnen angehören, zusammenliegen, wie die des Gesichtssinnes im *Nervus opticus*, die des Gehörs im *Nervus acusticus*, die des Geruchs im *Nervus olfactorius*, die des Tastsinns in den hinteren Rückenmarkswurzeln. Läßt man auf diese Nervenstämmen verschiedene Reizmittel einwirken, so entstehen zwar verschiedene Empfindungen, aber nur Empfindungen, die dem Qualitätenkreise des betreffenden Sinnes angehören. Für solche sensible Nervenfasern dagegen, die mit Fasern anderer Art in demselben Stamme verlaufen, wie die Geschmacksnerven mit Tastnerven der Zunge im *Nervus glossopharyngeus* und *lingualis* vereinigt sind, läßt sich dasselbe Verhältnis wenigstens daraus wahrscheinlich machen, daß in Krankheitszuständen zuweilen isolirt Lähmung der Geschmacksempfindungen allein ohne Lähmung der Tastempfindungen oder umgekehrt vorkommt, und auch daraus, daß alle anderen Tastnerven der Fähigkeit, Geschmacksempfindungen zu vermitteln, ermangeln.

Dem Kreise des Gesichtssinns gehören die Lichtempfindungen an, welche alle unter sich in Bezug auf Lichtstärke und Farbe vergleichbar sind. Denjenigen Theil der Nervenmasse des Körpers, durch dessen Reizung dergleichen Empfindungen entstehen können, nennen wir nach J. MÜLLER die Sehsinnssubstanz, oder auch wohl den Sehnervenapparat. Dazu gehört die Netzhaut, der Sehnerv und ein begrenzter Theil des Gehirns, in welchen die Wurzelfaserungen des Sehnerven eintreten. Kein anderer Nervenapparat des Körpers kann Lichtempfindung, d. h. eine Empfindung von derselben Qualität wie der Sehnervenapparat vermitteln, obgleich die leuchtenden Ätherschwingungen auch durch die Tastnerven wahrgenommen werden können, aber freilich in einer ganz anderen Empfindungsqualität, nämlich als Empfindung strahlender Wärme. Es findet hier dasselbe statt, wie bei den Luftschwingungen, welche der Hörnerv als Ton empfindet, während sie gleichzeitig in der Haut die Tastempfindung des Schwirrens erregen, dasselbe wie bei dem Essig, den die Zunge als sauer schmeckt, und der in einer entblößten Hautstelle oder auf einer zarten Schleimhaut, wie die Bindehaut des Auges ist, durch eine Tastempfindung, nämlich durch schmerzhaftes Brennen, sich bemerklich macht.

Andererseits können nicht bloß die leuchtenden Ätherschwingungen den Sehnervenapparat erregen, sondern auch mannigfache andere Reizmittel, namentlich mechanische Einwirkungen und elektrische Ströme, welche ja auch alle anderen Nervenapparate des Körpers in den Zustand von Reizung zu versetzen vermögen. Wenn aber diese Reize den Sehnerven oder die Netzhaut treffen, bringen sie immer nur Gesichtsempfindungen hervor, nicht Gehörs- oder Geruchsempfindungen, und wenn sie etwa gleichzeitig Tastempfindungen erregen, so müssen wir voraussetzen, daß dies geschieht, weil sich im Auge und vielleicht selbst in der Masse des Sehnerven, wie in allen inneren Theilen des Körpers, auch besondere Tastnerven verbreiten. Diese Tastempfindungen, welche durch Einwirkung von Druck oder Elektrizität auf das Auge entstehen, unterscheiden sich übrigens noch dadurch von den gleichzeitig erregten Lichtempfindungen, daß jene am Orte der Reizung wahrgenommen werden, letztere dagegen von der Vorstellung als helle Objecte in das Gesichtsfeld verlegt werden. Wir kommen darauf bei der genaueren Beschreibung der mechanischen Reizung des Auges noch einmal zurück.

Da es sich mit den übrigen Sinnesnerven ebenso verhält, so geht daraus hervor, daß die Qualität der sinnlichen Empfindung hauptsächlich von der eigenthümlichen Beschaffenheit des Nervenapparats abhängt, erst in zweiter Linie von der Beschaffenheit des wahrgenommenen Objectes. Zu dem Qualitätenkreise welches Sinnes die entstehende Empfindung gehört, hängt sogar gar nicht von dem äußeren Objecte, sondern ausschließlichs von der Art des getroffenen Nerven ab. Welche besondere Empfindung aus dem betreffenden Qualitätenkreise hervorgerufen wird, erst dies hängt auch von der Natur des äußeren Objectes ab, welches die Empfindung erregt. Ob uns die Sonnenstrahlen als Licht- oder Wärmestrahlung erscheinen, hängt nur davon ab, ob wir sie durch den Sehnerven oder durch die Hautnerven empfinden; ob sie aber als rothes oder blaues, schwaches oder starkes Licht, sengende oder milde Wärme erscheinen, hängt gleichzeitig von der Art der Strahlen, wie von dem Zustande des Nervenapparates ab. Die Qualität der Sinnesempfindung ist also keineswegs identisch mit der Qualität des Objectes, durch welche sie hervorgerufen wird, sondern sie ist in physischer Beziehung nur eine Wirkung der äußeren Qualität auf einen besonderen Nervenapparat, und für unsere Vorstellungen ist die Qualität der Empfindung gleichsam nur ein Symbol, ein Erkennungszeichen für die objective Qualität.

Das erste und hauptsächlichste Reizmittel des Sehnerven ist das objective Licht. Ich nenne es das erste und hauptsächlichste, weil es bei weitem häufiger und anhaltender auf den Sehnerven einwirkt, als andere Reize, und weil demgemäß auch fast nur die durch objectives Licht hervorgerufenen Empfindungen des Sehnervenapparates zur Wahrnehmung äußerer Objecte verwendet werden. Eine besondere specifische Beziehung oder Homogenität zwischen dem objectiven Lichte und dem Nervenagens der Sehnerven, wie sie von älteren Philosophen und Physiologen meist vorausgesetzt

wurde, brauchen wir deshalb nicht anzunehmen. Denn weder ist der Sehnerv der einzige Nerv, welcher durch objectives Licht gereizt wird — auch die Hautnerven können es werden — noch ist das objective Licht das einzige Reizmittel des Sehnerven. Dafs es das häufigste, und deshalb wichtigste ist, erklärt sich einfach aus der geschützten Lage des Sehnerven und der Netzhaut, die dem Lichte sehr leicht, mechanischen Eindrücken und elektrischen Strömungen viel schwerer zugänglich sind. Diese überwiegende Häufigkeit und Wichtigkeit der Reizung durch objectives Licht hat nun auch die Menschen bestimmt, denjenigen Theil der Ätherschwingungen, welche Lichtempfindung zu erregen im Stande ist, mit dem Namen Licht zu belegen, welcher eigentlich nur der dadurch erregten Empfindung zukommen sollte. Man schied die Sonnenstrahlen in Sonnenlicht und Sonnenwärme, nach den beiden Empfindungsweisen, welche sie zu erregen im Stande sind. So lange die Menschen über die Natur ihrer Sinnesempfindungen nicht weiter nachgedacht hatten, mußten sie geneigt sein, die Empfindungsqualitäten unmittelbar auf die äufseren Dinge zu übertragen, und so in den Sonnenstrahlen zwei, den zwei Empfindungen entsprechende Objecte vorauszusetzen. Man wufste außerdem zunächst über die Sonnenstrahlen weiter nichts, als was die Empfindung aussagte, und man beobachtete neben solchen Strahlungen, bei denen, wie in den Sonnenstrahlen, die schneller schwingenden Wellenzüge überwiegen, die das Auge viel stärker afficiren als die Haut, andere, in denen die langsameren Oscillationen überwiegen, und die die Haut kräftig, das Auge schwach oder gar nicht afficiren, so dafs auch objectiv eine Trennung beider Agentien vorzukommen schien. Erst in der neuesten Zeit hat eine sorgfältige Untersuchung der von unseren Nervenapparaten unabhängigen Eigenschaften der leuchtenden und nicht leuchtenden Wärmestrahlen die Physiker überzeugt, dafs zwischen ihnen kein anderer Unterschied als der der Schwingungsdauer besteht, und hat dadurch die Physik von dem Einflusse, den die Sinnesempfindungen in diesem Falle so lange unberechtigter Weise ausgeübt hatten, befreit. Die nähere Besprechung des objectiven Lichtes als Reizmittel der Netzhaut bleibt den nächstfolgenden Paragraphen vorbehalten.

Die Erscheinungen bei mechanischer Reizung des Sehnervenapparates sind nach der Ausdehnung der Reizung verschieden. Bei einem plötzlichen Schlag oder Stofs auf das Auge entsteht ein blitzähnlich erscheinender und wieder verschwindender, oft sehr heller Lichtschein über das ganze Gesichtsfeld hin. Älteren irrthümlichen Erklärungen dieser Erscheinung gegenüber mag hier hervorgehoben werden, dafs wenn dies im Dunkeln geschieht, ein anderer Beobachter dabei in dem Auge des Getroffenen keine Spur von objectivem Lichte erblickt, so lebhaft auch der subjective Blitz sein mag, und dafs es ebenso wenig möglich ist, durch diese subjective Erleuchtung des dunkeln Gesichtsfeldes irgend etwas von den wirklichen Objecten der Außenwelt zu erkennen.¹

¹ Über einen gerichtlichen Fall, wo Jemand im Finstern einen Schlag auf das Auge bekommen und bei dem dadurch erregten Lichtschein den Angreifer erkannt haben will, s. J. MÜLLER, *Arch. f. Anat.* 1834. S. 140.

Besser untersuchen läßt sich die Wirkung beschränkten Druckes. Wenn man irgendwo am Rande der Augenhöhle mit einer stumpfen Spitze, z. B. der des Fingernagels, gegen den Augapfel drückt, so entsteht eine Lichterscheinung, Druckbild oder Phosphen, und zwar an derjenigen Stelle des Gesichtsfeldes, welche der gedrückten Stelle der Netzhaut entspricht. Wenn man oben drückt, erscheint also der helle Fleck an der unteren Grenze des Gesichtsfeldes, drückt man am äußeren Augenwinkel, so erscheint er am Nasenrücken, drückt man unten oder innen, so erscheint er oben oder außen. Wenn der drückende Körper nicht breit ist, hat die Erscheinung gewöhnlich ein helles Centrum, umgeben von einem dunklen und einem hellen Kreise, Ich finde, daß sie am hellsten ist, wenn der Druck etwa den Äquatorialumfang des Auges trifft, wo die Sclerotica am dünnsten ist. Das Druckbild erscheint dann an der Grenze des dunkeln Gesichtsfeldes als eine helle Bogenlinie, etwa halbkreisförmig. Es ist unter diesen Umständen ziemlich weit von dem Gesichtspunkte (dem am genauesten gesehenen Punkte des Gesichtsfeldes, welcher dem gelben Fleck entspricht) entfernt, und fällt deshalb, wenn man die Augen öffnet, mit dem Bilde äußerer Gegenstände zusammen, die nur undeutlich wahrgenommen werden. Doch erkennt man bei einiger Übung im indirecten Sehen, namentlich wenn sich auffallend helle Gegenstände am scheinbaren Orte des Druckbildes befinden, daß die Objecte in der Gegend des Druckbildes Verzerrungen (wegen der Einbiegung der Sclerotica und Retina) erleiden, und oft auch stellenweise verdunkelt werden. Man kann aber das Druckbild auch dem Gesichtspunkte näher bringen, wenn man das Auge stark nach innen wendet, während man außen drückt oder stark nach außen wendet, während man am inneren Augenwinkel drückt, dabei wird es ein wenig schwächer, weil die hintere Fläche der Sclerotica dem Drucke größeren Widerstand leistet. Einzelnen Personen (z. B. THOMAS YOUNG) gelingt es auch wohl durch Druck am äußeren Augenwinkel das Druckbildchen bis an die Stelle des directen Sehens vorzubringen. Mir gelingt dies nicht, doch kommt das Druckbildchen dem Gesichtspunkte so nahe, daß ich wahrnehmen kann, wie in seinem Centrum die Bilder der äußeren Gegenstände verschwinden. In *Fig. 8, Taf. I.* ist das Druckbild dargestellt, wie es mir erscheint, wenn ich zwischen Auge und Nase ein weißes Papierblatt gegen das Gesicht stelle, das Auge möglichst nach der inneren Seite wende, und mit einer stumpfen Spitze am äußeren Rande der Augenhöhle drücke. *N* bezeichnet die Nasenseite; das Druckbild besteht aus einem dunkeln Flecke, von einem hellen senkrechten Streifen durchzogen. Von dem dunkeln Flecke geht, wenn man in richtiger Höhe drückt, ein horizontaler Fortsatz aus, dessen Spitze bei *a* den Fixationspunkt berührt, und außerdem ist in der Gegend des Sehnerveneintritts ein unbestimmt gezeichneter Schatten *b* sichtbar. Wie man die Stelle des Sehnerveneintritts im Gesichtsfelde erkennen kann, wird in § 18 auseinandergesetzt werden. Ein System feiner paralleler bogenförmiger Linien zwischen dem dunkeln Druckbilde und dem Gesichtspunkte hat schon PURKINJE bemerkt und ab-

gebildet. Ich sehe sie nicht so ausgebildet, wie er sie abbildet, am besten, wenn die Helligkeit der entsprechenden Stelle des Gesichtsfeldes groß ist.

Im dunkeln Gesichtsfelde dagegen erscheint eine helle gelbliche Kreisfläche, in deren Innerem sich zuweilen ein dunkler Fleck oder ein dunkler Ring abzeichnet. Ein schwaches Licht erscheint auch an der Eintrittsstelle des Sehnerven, sodafs die Erscheinung ungefähr der *Fig. 8, Taf. I.* entspricht, wenn man Hell und Dunkel vertauscht denkt. Nur den Fortsatz ¹⁹ zum gelben Fleck hin habe ich im dunkeln Felde nicht sehen können.

Wieder anders sind die Erscheinungen, wenn man längere Zeit einen mäßigen Druck gleichmäßig auf den Augapfel wirken läßt, indem man ihn von vorn her entweder mit den weicheren Stellen der Handwurzel oder mit den zusammengelegten Fingerspitzen einer Hand drückt. Nach kurzer Zeit treten dann sehr glänzende und wechselnde lichte Figuren im Gesichtsfelde auf, die ein wunderliches, phantastisches Spiel vollführen und oft den glänzendsten kaleidoskopischen Darstellungen, wie sie in neuerer Zeit mit Hilfe des elektrischen Lichts entworfen werden, ähnlich sind. PURKINJE hat diese Erscheinungen sehr genau verfolgt, beschrieben und abgebildet; sie scheinen in seinen Augen eine große Regelmäßigkeit gehabt zu haben. Meist zeigten sich auf einem mit feinen Vierecken regelmäßig gemusterten Grunde entweder achtstrahlige sternförmige Figuren, oder dunkle oder helle rhombische Flächen, deren Diagonalen vertical und horizontal gerichtet waren, und die von abwechselnd hellen und dunkeln Bändern umgeben waren. Bei mir selbst finde ich keine solche Regelmäßigkeit der Figuren; der Grund des Gesichtsfeldes ist meist anfangs fein gemustert, aber in den mannigfaltigsten Weisen und mit den verschiedensten Farben, sehr oft als wären sehr viele feine Blättchen oder Moosstengel ausgestreut, ein anderes Mal erscheinen allerlei Vierecke, hell braungelb, mit dunkeln griechischen Linienmustern, zuletzt entwickeln sich meist auf braungelbem Grunde dunkle Liniensysteme, die zuweilen sehr verwickelte sternförmige Figuren, zuweilen nur ein unentwirrbares labyrinthisches Knäuel bilden, und in fortdauernder schwankender oder strömender Bewegung begriffen sind. Außerdem pflegen sich sehr helle blaue oder rothe Funken in einzelnen Stellen des Feldes längere Zeit zu erhalten. Läßt man mit dem Drucke nach, wenn die Erscheinung im größten Glanze entwickelt ist, ohne daß äußeres Licht in das Auge dringt, so dauert das Spiel ähnlicher Figuren noch eine Zeit lang fort, und verschwindet, allmählig dunkler werdend. Öffnet man dagegen das Auge, indem man mit dem Drucke nachläßt, gegen helle äußere Objecte, so herrscht im ersten Momente Dunkelheit, dann werden allmählig in der Mitte des Gesichtsfelds einzelne helle Objecte, aber mit intensivem Glanze sichtbar. So sehe ich z. B. einzelne weißse Papierblätter in ihrer wahren Gestalt in blendender Helligkeit auftauchen, auf ihnen aber noch Reste des vorher vorhandenen Figurenmusters sichtbar, dessen dunkle Theile hier hell erscheinen. Allmählig verliert sich dann die abnorme Helligkeit in demselben Maafse, wie es die Druckbilder vor dem geschlossenen Auge thun, aber

198 noch längere Zeit unterscheidet sich das gedrückte Auge von dem andern dadurch, daß ihm das Gesichtsfeld mehr violett erscheint, dem ungepressten Auge dagegen gelblich. VIERORDT und LAIBLIN berichten, bei anhaltendem Druck auf das Auge die Verästelungen der Gefäße der Netzhaut roth auf dunklem Grunde gesehen zu haben, was ich bisher vergebens versucht habe. Außerdem erscheinen VIERORDT die Retinalgefäße dabei häufig in einer bläulich glänzenden Färbung. Ferner haben sie, wie auch früher STEINBACH und PURKINJE, ein Gefäßnetz mit strömendem Inhalte gesehen. Letzterer erklärte es für das venöse Adernetz der Retina; LAIBLIN schließt aus seinen Beobachtungen, da es neben den vorher erwähnten Retinalgefäßen sichtbar war, daß die wahrgenommene Circulation „einer anderen gefäßreicheren mehr nach außen gelegenen Retinalschicht“ angehören müsse. MEISSNER und mir selbst ist es nie gelungen, unter den Druckbildern des Auges außer zuweilen aufblitzenden Zügen der bekannten Aderfigur der Netzhaut etwas einem Gefäße Ähnliches zu sehen, und wenn ich auch als Schlufsstadium fast immer labyrinthische Liniensysteme in strömender Bewegung sehe, so ist deren Anordnung doch mit keinem Gefäßnetze zu vergleichen. Zu bemerken ist übrigens für die Theorie dieser Erscheinungen, daß nach den von DONDERS mit dem Augenspiegel ausgeführten Untersuchungen durch Druck auf das Auge allerdings Veränderungen in den Netzhautgefäßen eintreten, indem zuerst die Venen zu pulsiren anfangen und später das Blut aus ihnen sich ganz entleert. Diese veränderten Zustände der Gefäße mögen von manchen Augen empfunden werden können. Sonst möchte ich die unruhigen und wechselnden Bilder, welche durch anhaltenden Druck im Auge erzeugt werden, mit dem Gefühle des Ameisenlaufens vergleichen, welches in eingeschlafenen Gliedern, deren Nervenstämme längere Zeit einem Drucke ausgesetzt gewesen sind, eintritt. Wenn wir, schieb auf einer Hüfte sitzend, den Hüftnerven drücken, verliert bald der Fuß und Unterschenkel die Fähigkeit, Berührung äußerer Objecte zu empfinden; dagegen tritt ein heftiges Kriebeln in den taub gewordenen Theilen der Haut ein, welches in ähnlicher Weise schnell wechselnde Erregungen der empfindenden Nervenfasern verräth, wie sie bei dem entsprechenden Zustande der Netzhaut sich durch die wechselnden feinen Figuren im Gesichtsfelde zeigen. Wenn dann der Druck nachläßt, sind bei wiederkehrender Fähigkeit äußere Objecte wahrzunehmen, die ersten Berührungen des Fußes oft schmerzhaft, während das Auge äußere Gegenstände in blendendem Lichte wahrnimmt.

Ein anderes Phänomen, was einer mechanischen Reizung der Netzhaut anzugehören scheint, sind gewisse lichte Flecke, welche empfindliche Augen im dunkeln Gesichtsfelde sehen, wenn sie eine schnelle Bewegung des Auges vollführen. In *Taf. I, Fig. 9*, sind sie abgebildet, wie sie im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde beider Augen mir erscheinen, wenn die Augen in Richtung des Pfeils nach links hin bewegt worden sind. Das mit *L* bezeichnete gehört dem linken, das andere dem rechten Auge an. Die Erscheinung ist in dem nach einwärts bewegten Auge, hier dem rechten, weniger entwickelt

als in dem nach auswärts bewegten. Ich selbst sehe sie nur des Morgens gleich nach dem Erwachen, oder bei Unwohlsein; andere Beobachter, wie PURKINJE und CZERMAK¹, sehen sie zu jeder Tageszeit im Dunkeln als feurige Ringe oder Halbringe. Ihre Entfernung vom Gesichtspunkte ist eine solche, daß ein Beobachter, der die später zu beschreibenden Phänomene des sogenannten blinden Flecks gut kennt, daraus schliessen kann, daß sie der Eintrittsstelle des Sehnerven angehören. Sie entstehen also wahrscheinlich dadurch, daß bei schnellen Bewegungen des Auges der Sehnerv vom Augapfel mit in Bewegung gesetzt und an seiner Eintrittsstelle 199 gezerzt wird. PURKINJE² sieht an der Eintrittsstelle des Sehnerven auch dauernd einen lichten Ring, wenn er das Auge stark nach innen wendet, nach der Mitte des Gesichtsfeldes umgeben von concentrischen hellen Streifen, während bei mir die Erscheinungen nur immer momentan auftauchen. Stellt man den Versuch mit offenem Auge vor einer weissen gleichmäßig beleuchteten Fläche an, so erscheinen bei starker Drehung des Auges dunkle Flecken dem Sehnerveneintritt entsprechend, die, wie CZERMAK bemerkt, beim Drehen nach innen leichter eintreten, und eine regelmässiger Kreisform annehmen als beim Drehen nach ausen. In dem röthlichen Felde, welches die geschlossenen und von ausen beleuchteten Augenlider geben, erscheinen diese dunkeln Flecke blau. Ich selbst erkenne übrigens auch in den dunkeln Flecken Spuren derselben Ährenform, welche die Lichterscheinung im dunkeln Felde zeigt, während CZERMAK hervorhebt, daß bei ihm letztere Erscheinung nicht das negative Abbild der ersteren sei. Auch hier scheinen also die gereizten Nervenfasern ihre Empfindlichkeit gegen äufere Reize durch die Zerrung zu verlieren. Als gereizt mufs man in diesem Falle wohl die Fasern betrachten, die in unmittelbarer Nähe des Sehnerven enden, da die Eintrittsstelle des Sehnerven selbst gegen Lichtreiz unempfindlich ist, und daher nicht zu erwarten ist, daß dort irgend welche der Lichtempfindung fähige Fasern enden, bei deren Reizung eine Lichtempfindung gerade an diese Stelle des Gesichtsfeldes verlegt werden könnte. Endlich ist hierher auch wohl das von PURKINJE³ und CZERMAK⁴ beobachtete Accommodationsphosphen zu rechnen. Wenn man im Finstern die Augen für das Sehen in nächster Nähe einrichtet und dann plötzlich wieder für die Ferne accommodirt, so bemerkt man nahe an der Peripherie des Gesichtsfeldes einen ziemlich schmalen feurigen Saum, welcher, ringförmig in sich selbst zurücklaufend, in dem Momente aufblitzt, wo man mit der fühlbaren Anstrengung fürs Nahesehen nachläßt. PURKINJE sah die Erscheinung auch bei plötzlichem Nachlaß gleichmäßigen Drucks auf das Auge. Ich selbst habe sie früher nicht, neuerdings zuweilen undeutlich sehen können. CZERMAK erklärt sie dadurch, daß im Momente, wo der Zug des Ciliarmuskels

¹ J. CZERMAK, *Physiologische Studien*. Abtheilung I. § 5. S. 42 u. Abth. II. S. 32. — *Wiener Sitzungsber.* 54.

² J. E. PURKINJE, *Beiträge zur Kenntnifs des Sehens*. S. 78.

³ J. E. PURKINJE, *Zur Physiologie der Sinne*. Bd. I. 126. II. 115.

⁴ J. CZERMAK, *Wiener Sitzungsber.* XXVII. 78.

nachläßt, die erschlaffte Zonula sich wieder spannt, während die Linse noch in radialer Richtung verkürzt ist und dadurch eine plötzliche Zerrung des äußersten Randes der Netzhaut eintritt, dessen Ende mit der Zonula verklebt ist.

Accommodire ich stark für die Nähe, während das Auge nach einer gleichmäßig erleuchteten weißen Fläche gekehrt ist, so entsteht im Fixationspunkte ein schattiger Fleck, am Rande braun abschattirt, von dem auch wohl braune oder hell violette Streifen sich nach verschiedenen Seiten hinziehen. Dann pflegt sich das Gesichtsfeld schnell zu verdunkeln, während netzförmige Zeichnungen und Theile der Aderfigur, dunkel auf weißem Grunde darin sichtbar werden. Bei Nachlaß der Accommodation für die Nähe schwindet alles. PURKINJE beschreibt den braunen Fleck, sah aber
200 dessen Centrum weiß. Hierher gehört auch ein elliptischer gefleckter Lichtschein, den PURKINJE¹ bei dunklem Gesichtsfelde erblickte, wenn er mit dem Druck der Augenlider plötzlich nachließ. Damit die Erscheinung zu Stande kam, war es nöthig, daß kurz vorher äußeres Licht auf das Auge gewirkt hat. Ich selbst kann sie nicht sehen.

Durchschneidung und Zerrung der bloßgelegten Sehnerven bei Hunden ruft keine Schmerzensäußerungen hervor, während die gleichen Verletzungen ebenso starker Hautnervenstämmen die allerheftigsten Schmerzen erregen. Beim Menschen wird durch krebssige Entartungen des Auges zuweilen die Exstirpation des Augapfels nöthig. Wenn der Sehnerv in solchen Fällen noch nicht selbst entartet ist, werden im Augenblicke der Durchschneidung des Sehnerven große Lichtmassen gesehen², während die Kranken dabei etwas größeren Schmerz haben, als bei der Durchschneidung der übrigen benachbarten Theile. Daß die Durchschneidung des Sehnerven ganz ohne solchen Schmerz, wie ihn die Tastnerven empfinden, vor sich gehen sollte, dürfen wir nicht erwarten, da wenigstens die übrigen größeren Nervenstämmen ihre *Nervi nervorum* haben, besondere empfindende Fasern, die ihnen ebenso gut zukommen, wie allen übrigen inneren Theilen des Körpers, und welche ihre örtliche Empfindlichkeit vermitteln. Bei den vorderen Wurzeln der Rückenmarksnerven, durch welche nur motorische Fasern aus dem Rückenmarke austreten, kann man nachweisen, daß solche *Nervi nervorum* ihnen aus den hinteren sensiblen Wurzeln zugeschickt werden. Wenn der *Nervus ulnaris* hinter dem inneren Ellenbogenhöcker gestossen wird, giebt sich die Reizung der durchlaufenden Fasern des Nerven durch einen Schmerz kund, der scheinbar im Verbreitungsbezirke des Nerven am fünften und vierten Finger stattfindet, während ein anderer Schmerz an der gestossenen Stelle selbst, welcher unangenehmer ist, als wenn nur die Haut getroffen wäre, den Nerven des Nervenstammes zugeschrieben werden muß. Ebenso fühlen wir, indem wir am äußeren Augenwinkel den Augapfel drücken, örtlich den

¹ J. E. PURKINJE, *Zur Physiologie der Sinne*. II. 78.

² TOURNAU in *J. Müller's Handbuch der Physiologie*. Coblenz 1840. Bd. II. S. 259.

Schmerz des Druckes mittels der empfindenden Nerven dieser Stelle, und sehen einen Lichtschein, den wir in die Gegend des Nasenrückens verlegen. Etwas Ähnliches kann bei der Reizung des Sehnervenstammes vorkommen.

Dafs der Sehnerv und die Netzhaut, welche fähig sind ein so feines Agens, wie das Licht ist, zu empfinden, gegen die gröbste mechanische Mißhandlung ziemlich unempfindlich bleiben, d. h. keinen in das Gebiet der Tastempfindungen gehörigen Schmerz empfinden, erschien früher als ein wunderbares Paradoxon. Die Lösung ergibt sich einfach daraus, dafs die Qualität aller Empfindungen des Sehnerven in den Kreis der Lichtempfindungen gehört. Es fehlt ihm also nicht die Empfindlichkeit, aber die Form der Empfindung ist eine andere.

Sehr mannigfaltig ist ferner das Gebiet der Lichtempfindungen aus inneren Ursachen. Es gehören dahin eine Menge von Lichterscheinungen im Gesichtsfelde, welche in allerlei Krankheitszuständen des Auges oder des ganzen Körpers auftreten, bald über das ganze Feld ergossen, bald räumlich begrenzt, und im letzteren Falle bald in Form unregelmäßiger Flecken, bald als Phantasmen, Menschen, Thiere u. s. w. nachahmend. Vielfach mögen dabei mechanische Ursachen mitwirken, vermehrter Druck des Blutes in den Gefäßen oder der Augenflüssigkeiten; so sieht man beim Nachlasse gleichmäßigen Drucks auf den Augapfel häufig Stücke der Gefäßfigur aufblitzen, oder sieht nach heftigen Anstrengungen theils einzelne pulsirende Stellen, theils gröfsere Stücke der Gefäßfigur¹. In anderen Fällen mag es eine Art chemischer Reizung durch veränderte Zusammensetzung des Blutes sein, z. B. im Falle narkotischer Vergiftungen. Endlich sind manche von diesen Erscheinungen auch wohl zu erklären durch Ausbreitung des Reizungszustandes innerhalb der Centraltheile von anderen Theilen des Nervensystems auf die Wurzeln des Sehnerven. Übertragung der Reizung von einem ursprünglich erregten empfindenden Nerven auf einen anderen solchen Nerven, der von keinem äufseren Einflusse getroffen ist, nennen wir Mitempfindung. So erregt der Anblick großer heller Flächen, z. B. von der Sonne beleuchteter Schneefelder, bei vielen Personen gleichzeitig Kitzel in der Nase, oder das Hören gewisser kratzender und quiekender Töne ein Kältegefühl, welches längs des Rückens herabläuft. Dergleichen Mitempfindungen scheinen auch im Sehnervenapparate vorkommen zu können, wenn andere Empfindungsnerven erregt sind, z. B. die des Darms durch Eingeweidewürmer bei Kindern oder durch aufgehäuften Darmcontenta, Blutstockungen und andere Abnormitäten bei Hypochondern. Eigentliche Phantasmen, d. h. Lichtbilder, welche das Ansehen bekannter Objecte der Außenwelt an sich tragen, scheinen durch eine ähnliche Übertragung des Erregungszustandes von den bei der Bildung von Vorstellungen thätigen Theilen des Gehirns auf den Sehnervenapparat entstehen zu können. Es sind dergleichen gesehen worden

¹ J. E. PURKINJE, *Zur Physiologie der Sinne*. I. 134. II. 115, 118. — *Subjective Erscheinungen nach Wirkung der Digitalis*. II. 120.

von vielen Beobachtern, welche sich, während sie es sahen, der subjectiven Natur des Phantasma durchaus bewußt waren¹. Einige, wie GOETHE und J. MÜLLER, konnten sogar zu jeder Zeit, wenn sie lange in das dunkle Gesichtsfeld der geschlossenen Augen hineinsahen, dergleichen Erscheinungen
 n sehen. AUBERT² beschreibt ebenfalls Phantasmen, die durch Vorstellungen erregt werden, ohne doch in ihrem Inhalt von diesen bedingt zu sein.

201 Übrigens ist das Gesichtsfeld auch des gesunden Menschen zu keiner Zeit ganz frei von solchen Erscheinungen, die man das Lichtchaos, den Lichtstaub des dunkeln Gesichtsfeldes genannt hat; da sie bei manchen Erscheinungen, z. B. den Nachbildern, eine wichtige Rolle spielen, wollen wir sie das Eigenlicht der Netzhaut nennen. Wenn man die Augen schließt und das dunkle Gesichtsfeld aufmerksam betrachtet, wird man anfangs häufig noch Nachbilder der vorher gesehenen äußeren Objecte wahrnehmen (über deren Entstehung siehe unten § 24 und 25), später ein unregelmäßiges schwach beleuchtetes Feld mit mannigfach sich wandelnden Lichtflecken, die häufig Gefäßverästelungen oder ausgestreuten Moosstielen und Blättern ähnlich sind, und bei manchen Beobachtern auch in Phantasmen
 202 übergehen. Eine ziemlich häufige Form dieser Lichterscheinungen scheint die zu sein, welche GOETHE³ wandelnde Nebelstreifen nennt. PURKINJE beschreibt sie als „breite mehr oder weniger gekrümmte Bänder mit zwischenliegenden schwarzen Intervallen, die entweder als concentrische Kreise gegen den Mittelpunkt des Sehfeldes sich bewegen, und dort sich verlieren, oder als wandelnde Bögen an ihm sich brechen, oder als krumme Radien um ihn im Kreise sich bewegen. Ihre Bewegung ist langsam, so daß es gewöhnlich acht Secunden braucht, bis ein solches Band den Weg vollendet und völlig verschwunden ist“. Ich selbst sehe sie meist wie zwei Systeme kreisförmiger Wellen, die langsam gegen ihre Mittelpunkte zu beiden Seiten des Gesichtspunktes zusammenlaufen. Die Lage der Mittelpunkte scheint mir den Eintrittsstellen der beiden Sehnerven zu entsprechen; der Rhythmus fällt mit dem der Respirationsbewegungen zusammen. PURKINJE hatte ein schwächeres Auge und sah nur mit dem rechten Auge ein solches System von Nebelstreifen. Übrigens wird auch der Grund des Gesichtsfeldes, auf dem sich diese Erscheinungen entwerfen, nie ganz dunkel, man sieht im Gegentheile abwechselnde Verfinsterungen und Aufhellungen des Grundes, die oft mit den Athemzügen in gleichem Rythmus geschehen (J. MÜLLER⁴, ich selbst). So bringt auch jede Bewegung der Augen oder Augenlider, jede Veränderung der Accommodation Veränderungen des Lichtstaubes hervor. Auffallend sind diese Gestalten besonders, wenn man in einem unbekanntem ganz dunkeln Raume, z. B. in einem dunkeln Treppenflur, den Weg tappend sucht, weil

¹ Fälle dieser Art sind zusammengestellt in J. MÜLLER *Über phantastische Gesichtsercheinungen*. Coblenz 1826. S. 20.

² H. AUBERT, *Physiologie der Netzhaut*. S. 335.

³ GOETHE, *Farbenlehre*. Abth. I. § 96.

⁴ J. MÜLLER, *Phantastische Gesichtsercheinungen*. S. 16.

sie sich dann an die Stelle der wirklichen Objecte stellen. Dabei bemerkt PURKINJE, daß jede unvermuthete Berührung, jede unsichere Bewegung momentane Oscillationen des Auges hervorruft, die von zarten Lichtwölkchen und anderen Lichtgebilden begleitet sind, welche Veranlassung zu manchen Gespenstergeschichten gegeben haben mögen. AUBERT¹ erwähnt plötzlich auftretende sehr helle Punkte des Sehfeldes, und helle, langsam bewegte Zickzacklinien.

Nach körperlicher Anstrengung und Erhitzung sah PURKINJE² im dunkeln Gesichtsfelde ein mattes Licht wallen und flackern, wie die auf einer horizontalen Fläche verlöschende Flamme von ausgegossenem Weingeiste. Bei schärferer Betrachtung sah er darin unzählige, äußerst kleine lichte Pünktchen, die sich lebhaft durch einander bewegen, und lichte Spuren ihrer Bewegung hinter sich lassen. Eine ähnliche Erscheinung trat ein, wenn er bei geschlossenem rechten Auge das schwache linke zum Sehen anstrengte.

Wichtig ist noch die Erfahrung, daß auch bei Leuten, deren Auge durch Operation entfernt, oder deren Sehnerven und Augen desorganisirt und functionsunfähig geworden waren, subjective Lichterscheinungen vorgekommen sind³. Aus diesen Erfahrungen geht hervor, daß nicht bloß die Netzhaut, sondern auch der Stamm oder die Wurzeln des Sehnerven im Gehirn fähig sind in Folge von Reizungen Lichtempfindung zu erzeugen.

Endlich sind die elektrischen Ströme ein mächtiges Mittel, den Sehnervenapparat, wie die übrigen Nerven zu erregen. Während in der Regel die motorischen Nerven nur in den Augenblicken Zuckung bewirken, wo die Stärke des sie durchfließenden elektrischen Stromes einer schnellen Steigerung oder Abnahme ausgesetzt ist, werden in den Sinnesnerven nicht nur durch Stromesschwankungen, sondern auch durch einen Strom von gleichmäßig anhaltender Stärke Empfindungen hervorgerufen, deren Qualität im letzteren Falle von der Stromesrichtung abhängt.

Wenn der Sehnerv durch Stromesschwankungen gereizt wird, entstehen starke Lichtblitze, die das ganze Gesichtsfeld überziehen. Man kann dieselben sowohl durch Entladungen von Leydener Flaschen als von galvanischen Säulen erzielen, wenn man die Elektrizität so durch den Körper leitet, daß hinreichend starke Zweige der Strömung durch den Sehnerven möglichst parallel seinen Fasern gehen. Man legt also zweckmäßig den einen Zuleiter an die Stirn oder auf die geschlossenen Augenlider, den anderen in den Nacken, oder wenn man bei hinreichend kräftigen Apparaten einen großen Widerstand nicht zu scheuen hat, nimmt man ihn in die Hand. Um den Schmerz in der Haut zu mildern, ist es vorthellhaft, die Zuleiter, welche die Form von Platten oder Cylindern haben können, mit nassen

¹ H. AUBERT, *Physiologie der Netzhaut*. S. 334.

² J. H. PURKINJE, *Beobachtungen und Versuche u. s. w.* I. 63, 134. II. 115.

³ Beispiele bei J. MÜLLER, *Phantastische Gesichtsercheinungen*. S. 30. — A. v. HUMBOLDT, *Gereiste Muskel- und Nervenfasern*. Th. II. S. 444. — LINCKE, *de fungo medullari*. Lips. 1834.

Pappscheiben zu bedecken und die zu berührende Hautstelle einige Zeit vorher schon anzufeuchten. Mit den Schlägen von Leydener Flaschen sind bisher wenig hierher gehörige Versuche angestellt worden, auch ist große Vorsicht wegen der Nähe des Gehirns nothwendig, da FRANKLIN und WILCKE¹ beobachtet haben, daß durch den Kopf geleitete Schläge ein bewußtloses Zusammenstürzen zur Folge haben können. LE ROY² ließ den Entladungsschlag auf einen am Staar erblindeten jungen Mann wirken, indem er dessen Kopf und rechtes Bein mit einem Messingdrahte umwand und durch die Enden der Drähte eine Leydener Flasche entlud. Bei jeder Entladung glaubte der Patient eine Flamme sehr schnell von oben nach unten vorbeigehen zu sehen, und hörte einen Knall wie von grobem Geschütze. Wenn LE ROY den Schlag durch den Kopf des Blinden allein leitete, indem er über den Augen und am Hinterkopfe Metallplatten befestigte, die mit den Belegungen einer Flasche verbunden wurden, so sah der Kranke Phantasmen, einzelne Personen, in Reihe gestellte Volkshaufen u. s. w.

Reicher sind die Erfahrungen über die Wirkungen der galvanischen Ströme. Will man nur die Lichtblitze wahrnehmen, die durch Schließung oder Unterbrechung des Stromes entstehen, so genügen schon wenige Zinkkupferelemente, bei reizbaren Augen sogar schon ein einfaches Plattenpaar. Wenn z. B. ein Stück Zink an die befeuchteten Lider des einen, Silber an die des anderen Auges gelegt wird, und man die beiden Metalle in Berührung bringt, so erscheint im Momente der Berührung und dann wieder im Momente der Trennung ein Blitz. Belehrender ist der Versuch, wenn man das eine Metall an ein Auge legt, das andere in den Mund nimmt, weil dabei zugleich die Abhängigkeit der Stärke des Blitzes von der Stromrichtung erkannt werden kann. Der Blitz bei Schließung der Kette ist nach den Beobachtungen von PFAFF stärker, wenn man das positive Metall (Zink) an das Auge, das negative (Silber) in den Mund bringt, wobei also der Sehnerv von der positiven Elektrizität in aufsteigender Richtung durchflossen wird. Ich bemerke hierbei, daß mir selbst die Versuche mit der einfachen Kette, wahrscheinlich wegen zu geringer Reizbarkeit meines Auges, nie gelungen sind. Dagegen sind die Lichtblitze sehr glänzend, wenn man eine kleine galvanische Säule von etwa zwölf Elementen benutzt. Wählt man eine Batterie von constanter Stromstärke, z. B. von DANIELL'schen Elementen, so findet man, daß der Schließungsblitz bei aufsteigender Stromesrichtung, der Öffnungsblitz bei absteigender stärker ist. Ähnliche Unterschiede der Wirkung je nach der Richtung des Stroms sind auch für die Muskelnerven bekannt, sie sind dort aber auch von der Stärke des angewendeten Stroms abhängig.

Um die dauernde Wirkung eines gleichmäfsig anhaltenden Stroms wahrzunehmen, brauchen wohl die meisten Augen eine kleine Säule, obgleich RITTER auch diese mit der einfachen Kette wahrgenommen hat.

¹ B. FRANKLIN, *Briefe über Elektrizität*. Leipzig 1785. S. 312.

² LE ROY, *Mém. de mathém. de l'Acad. de France*. 1755. p. 86—92.

Um die Blendung des Auges durch Lichtblitze und das unangenehme Muskelzucken bei Öffnung und Schließung des Stroms zu vermeiden, finde ich es vortheilhaft, am Rande des Tisches, neben welchen sich der Experimentirende hinsetzt, zwei mit Pappe, die mit Salzwasser getränkt ist, unwickelte Metallcylinder hinzulegen, die mit den beiden Polen einer DANIELL'schen Batterie von 12 bis 24 Elementen verbunden sind. Man stützt zuerst die Stirne fest auf einen der Cylinder und berührt dann mit der Hand den anderen, wobei man durch langsames Anlegen der Hand erreichen kann, daß die Wirkungen der Stromesschwankung sehr gering sind, dann nach Belieben wieder öffnen oder schliessen kann. Die Stromesrichtung läßt sich wechseln, indem man die Stirn bald auf den einen, bald auf den anderen Cylinder legt. Das Auge ist hierbei auch keinem Drucke ausgesetzt, worauf wohl zu achten ist.

Wenn ein schwacher aufsteigender Strom durch den Sehnerven geleitet wird, wird das dunkle Gesichtsfeld der geschlossenen Augen heller als vorher und nimmt eine weißlich violette Farbe an. In dem erhellten Felde erscheint in den ersten Augenblicken die Eintrittsstelle des Sehnerven als eine dunkle Kreisscheibe. Die Erhellung nimmt schnell an Intensität ab, und verschwindet ganz bei der Unterbrechung des Stroms, die man bei langsamer Lösung der Hand von dem zweiten Cylinder ohne Lichtblitz ausführen kann. Dafür tritt nun, im Gegensatz zu dem vorausgegangenen Blau, mit der Verdunkelung des Gesichtsfeldes auch eine röthlich gelbe Färbung des Eigenlichts der Netzhaut ein,

Bei der Schließung der entgegengesetzten, absteigenden Stromesrichtung tritt der auffallende Erfolg ein, daß das nur mit dem Eigenlicht der Netzhaut gefüllte Gesichtsfeld im Allgemeinen dunkler wird als vorher, und sich etwas röthlich gelb färbt; nur die Eintrittsstelle des Sehnerven zeichnet sich als eine helle blaue Kreisscheibe auf dem dunkeln Grunde ab, von welcher Scheibe häufig auch nur die der Mitte des Gesichtsfeldes zugekehrte Hälfte erscheint. Bei Unterbrechung dieser Stromesrichtung wird das Gesichtsfeld wieder heller und zwar bläulichweiß beleuchtet und der Sehnerveneintritt erscheint dunkel.

AUBERT¹ sieht bei aufsteigendem Strome und nach Unterbrechung des absteigenden Stroms die Eintrittsstellen der Sehnerven als gelbe, helle Ringe, in der Mitte aber dunkel; bei absteigendem Strome und nach Unterbrechung des aufsteigenden bezeichnet er die Farbe des dunkleren Feldes als grünlich; die Sehnerven erscheinen als gelbe Scheiben.

Bewegungen des Auges bringen nach demselben Beobachter an der Peripherie des Sehfeldes große blitzartige Helligkeit (wohl wegen der Stromesschwankungen) hervor.

Bei stärkeren Strömen von 100 bis 200 Zink-Kupferplatten hat RITTER eine Umkehr der Färbung gesehen, während die Vermehrung oder Verminderung der Helligkeit dieselbe blieb, wie bei schwachen Strömen. Starke aufsteigende Ströme erregten ihm also die Empfindung von lichtstarkem

¹ H. AUBERT, *Physiol. der Netzhaut*. S. 345.

Grün, noch stärkere von lichtstarkem Roth, starke absteigende von lichtschwachem Blau. Nach der Unterbrechung des Stroms sah er im ersten Falle zuerst Blau, was schnell in das zurückbleibende Roth der schwachen Ströme umschlug. Nach der Unterbrechung des starken absteigenden Stroms sah er dagegen im ersten Augenblicke Roth, was schnell in das gewöhnliche 206 Blau umschlug. Ich selbst fand, daß bei stärkeren Strömen¹ ein wildes Durcheinanderwogen von Farben entstand, in welchem ich keine Regel zu entdecken vermochte.

RITTER giebt auch noch an, daß das aufsteigend durchströmte Auge die äußeren Gegenstände nicht bloß undeutlicher, sondern auch verkleinert sehe. Das läßt vermuthen, daß er die Augen für die Nähe accommodirt habe. Man kann sich unter Einfluß des heftigen Hautschmerzes, den die einströmende Elektrizität erregt, kaum erwehren, die benachbarten Muskeln zu spannen, die Stirn zu runzeln, die Augenlider zusammenzukneifen. Die meisten Personen sind geneigt, bei jeder Anstrengung des Auges oder seiner Nachbartheile für die Nähe zu accommodiren, und das hat dann auch einen gewissen Einfluß auf die Vorstellung von der Größe der gesehenen Dinge. E. DU BOIS-REYMOND² macht darauf aufmerksam, daß Zusammenziehung der Pupille bei elektrischer Durchströmung des Auges bemerkt sei, wobei wohl auch eine Veränderung des Accommodationsapparates eintreten könne. Bei absteigendem Strome giebt RITTER umgekehrt an, die Gegenstände deutlicher und größer gesehen zu haben.

n Die Undeutlichkeit schwach sichtbarer äußerer Objecte bei aufsteigenden Strömen scheint sich zunächst aus dem sich darüber deckenden subjectiven Lichtscheine zu erklären.

Die elektrische Reizung läßt sich auch auf einzelne Theile der Netzhaut beschränken, wenn sie auch nicht örtlich scharf begrenzt werden kann. Diese Erscheinungen sind in ihren wesentlichen Zügen schon von PURKINJE beschrieben worden. Ich selbst habe es nützlich gefunden, den einen Zuleiter aus einem dünnen Cylinder von Badeschwamm zu bilden, der um ein Kupferstäbchen mit isolirendem Handgriff festgebunden, und reichlich mit Salzwasser getränkt ist. Die andere Elektrode legt man in den Nacken oder faßt sie mit der linken Hand, und berührt mit dem Schwamm die Haut neben dem äußeren oder inneren Augenwinkel, während man unter den geschlossenen Augenlidern das Auge hin und herbewegen kann.

Ist der Schwamm die positive Elektrode, so dringt der elektrische Strom auf der ihm zugewendeten Seite des Auges durch die Netzhaut von außen nach innen, auf der abgewendeten von innen nach außen; umgekehrt wenn der Schwamm negative Elektrizität zuleitet. Dabei zeigt sich, daß die von

¹ Der Strom von 24 DANIELL'schen Elementen wurde durch breite, mit nasser Pappe belegte Metallplatten in Stirn und Nacken eingeleitet. Da der Widerstand in diesem Kreise sehr viel geringer war als bei RITTER's Anordnung, welcher eine Säule von großem Widerstande, und auch noch seinen Arm in dem Kreise hatte, so läßt sich das Verhältniß der Stromstärke in meinen und RITTER's Versuchen nicht wohl bestimmen.

² E. DU BOIS-REYMOND, *Untersuchungen über thierische Elektrizität*. Berlin 1848. Bd. I. S. 353.

aussen nach innen durchflossene Hälfte der Netzhaut Dunkel empfindet, die von innen nach aussen durchflossene dagegen Helligkeit. Zu beachten ist, daß diese Empfindungen vom Beobachter immer in die gegenüberliegende Hälfte des Gesichtsfeldes verlegt werden, als wäre diese elektrische Helligkeit von aussen kommendes Licht.

Unter dieselbe Regel fallen auch die Erscheinungen, welche man beobachtet, wenn man die Elektrode vorn auf die von den Lidern bedeckte Hornhaut setzt. Dann giebt eine positive Elektrode Strom von innen nach aussen durch die ganze Netzhaut, und diese sieht hell.

Die Eintrittsstelle des Sehnerven zeigt bei mir immer den entgegengesetzten Zustand des Feldes, in dem sie liegt. Ihre starke Sehnenscheide könnte als schlecht leitende Masse in Betracht kommen, und bewirken, daß die dicht davor liegenden Nerven-elemente, die das Mark des eintretenden Nerven unmittelbar umgeben, vor der Durchströmung verhältnißmäfsig geschützt sind. Deren Zustand aber pflegen wir (s. unten § 28) auf die ganze Ausdehnung des Sehnervenquerschnitts zu übertragen.

Wenn man nun, während das Auge von der Seite her durchströmt wird, den Blick unter den geschlossenen Lidern gegen die Grenze des hellen und dunkeln Feldes richtet, so erscheinen rechts und links neben dem Fixationspunkte zwei querovale Felder, von denen das in die helle Hälfte des Sehfeldes hineinragende dunkel, das in die dunkle hineinragende hell erscheint. Ihrer Gröfse nach erscheinen sie der Ausdehnung des gelben Flecks zu entsprechen. An dieser Stelle verlaufen die Faserzüge der Netzhaut von den Zapfen aus radial divergirend gegen die dazu gehörigen Ganglienzellen, und es werden die elektrischen Ströme bei der angegebenen Richtung des Blicks im gelben Fleck parallel der Fläche der Netzhaut fliefsen müssen.

Tritt nun positive Elektrizität auf der Schläfenseite in das Auge ein, so ist der peripherische Theil der Netzhaut von aussen nach innen, d. h. von den Zapfen zu den Ganglienzellen durchströmt, und sieht dunkel. Die nach der Schläfenseite gerichteten Faserzüge des gelben Flecks aber werden von den Ganglienzellen zu den Zapfen hin durchströmt, und sehen hell. In diesem Sinne kann man die beobachteten Erscheinungen zusammenbegreifen in die Regel: Elektrische constante Durchströmung der Netzhaut in der Richtung von den Zapfen zu den zugehörigen Ganglienzellen giebt die Empfindung von Dunkel; die entgegengesetzte Durchströmung giebt die Empfindung von Hell.

Es zeigen nun auch die Muskelnerven des thierischen Körpers aufser den schon erwähnten Erscheinungen der Reizung durch Stromesschwankungen einen Einflufs der constanten Ströme auf die Reizempfänglichkeit. Durch schwache Ströme, wie diejenigen immer sind, die bei den beschriebenen Versuchen die Netzhaut treffen, wird nach den von PFLÜGER¹ aufgestellten Gesetzen die Reizbarkeit des Nerven an der Strecke gesteigert, wo die

¹ W. PFLÜGER, *Untersuchungen über die Physiologie des Elektrotonus*. Berlin 1859.

positive Elektrizität hinfließt, an der Strecke vermindert, wo jene Elektrizität herkommt. Dies angewendet auf die Fasern der mittleren Schichten der Netzhaut würde ergeben, daß die Stelle, deren vermehrte oder verminderte Erregbarkeit sich in den Lichterscheinungen bei elektrischer Durchströmung geltend macht, in den hintersten Schichten der Netzhaut zu suchen ist, was mit den Erfahrungen über die Erregung durch Licht, wie der folgende Paragraph zeigen wird, zusammenstimmt.

Elektrotonischer Zustand des Sehnerven oder der Sehnervenausbreitung macht sich hierbei also nicht geltend. Übrigens fragt es sich, ob sich derselbe durch die Schicht der Ganglienzellen hindurch würde fortpflanzen können. Wir kennen bisher nur seine Ausbreitung in Nervenfasern.

207

Die Lehre von den Gesichtsempfindungen fiel in älterer Zeit noch ganz der Philosophie anheim, so lange positive Kenntnisse darüber fehlten. Zunächst mußte eingesehen werden, daß die Empfindungen nur Wirkungen der Aufsendinge auf unseren Körper seien, und daß die Wahrnehmung erst durch psychische Prozesse aus der Empfindung gebildet würde. Mit dieser Einsicht ringt die griechische Philosophie¹. Sie beginnt mit naiven Voraussetzungen über die Möglichkeiten, wie Bilder, die den Gegenständen entsprächen, in die Seele kommen sollten. DEMOKRIT und EPIKUR lassen solche Bilder sich von den Gegenständen lösen und in das Auge fließen. EMPEDOKLES läßt Strahlen sowohl vom Lichte wie vom Auge nach den Gegenständen fließen, und mit letzteren die Gegenstände gleichsam betasten. PLATO scheint zu schwanken. Im Timaeus schließt er sich dieser Vorstellungweise des EMPEDOKLES an; er erklärt die vom Auge ausgehenden Strahlen für ähnlich dem Lichte, aber nicht brennend, und läßt das Sehen nur zu Stande kommen, wo das innere Licht herausgehend an den Gegenständen das verwandte äußere Licht trifft. Im Theaetet dagegen nähert er sich durch Untersuchungen über die geistige Thätigkeit bei den Wahrnehmungen schon dem reiferen Standpunkte des ARISTOTELES.

Bei letzterem² findet sich eine feine psychologische Untersuchung über die Mitwirkung geistiger Thätigkeit in den Sinneswahrnehmungen, das Physikalische und Physiologische, die Empfindung ist deutlich unterschieden von dem Psychischen; die Wahrnehmung äußerer Objecte beruht nicht mehr auf einer Art feiner Fühlfäden des Auges wie die Gesichtsnerven des EMPEDOKLES, sondern auf Urtheil. Das Physikalische an seinen Vorstellungen ist freilich sehr unentwickelt, doch könnte man in den Grundzügen desselben Spuren der Undulationstheorie finden. Denn das Licht ist bei ihm nicht Körperliches, sondern eine Thätigkeit (*ἐνέργεια*) des zwischen den Körpern enthaltenen Durchsichtigen, welches im Zustande der Ruhe Dunkelheit ist. Doch erhebt er sich noch nicht zu der Vorstellung, daß die Wirkung des Lichtes auf das Auge nicht notwendig dem erregenden Lichte gleichartig zu sein braucht. Er sucht vielmehr diese Gleichartigkeit dadurch zu begründen, daß auch das Auge Durchsichtiges enthalte, welches in dieselbe Art von Thätigkeit wie das äußere Durchsichtige treten kann.

Im Mittelalter blieben die eigentlichen und entscheidenden Fortschritte, welche ARISTOTELES in der Theorie des Sehens gemacht hatte, unbeachtet, erst BACO VON VERULAM und seine Nachfolger nehmen diesen Faden wieder auf, discutiren scharf die Abhängigkeit der Vorstellungen von den Empfindungen, bis KANT in seiner „Kritik der reinen Vernunft“ den Abschluß ihrer Theorie liefert. Vieles Richtige, scharf ausgesprochen findet sich auch bei J. G. FICHTE in den „Thatsachen des Bewußtseins“, namentlich die

¹ W. WUNDT, *Zur Geschichte der Theorie des Sehens, Henle und Pfeuffers Zeitschrift für rationelle Medicin.* 1859.

² ARISTOTELES, *De sensibus, de anima lib. II. c. 5—8 und de coloribus.*

Zusammenfassung der Empfindungen in Qualitätenkreise, den fünf Sinnen entsprechend. Was in SCHOPENHAUER's einschlägigen Erörterungen richtig ist, wird meist auf diese Quelle zurückzuführen sein.

In derselben Zeit waren die Naturforscher meist nur mit dem seit KEPPLER sich schnell entwickelnden physikalischen Theile der Theorie des Sehens beschäftigt. Durch HALLER wurde zunächst im Allgemeinen die Lehre von der Reizbarkeit der Nerven festgestellt; dem entsprechend beschreibt dieser auch ganz richtig und klar das Verhältniß des Lichtes zur Empfindung, dieser zur Wahrnehmung¹. Aber es fehlte noch die genauere Kenntniß der durch andere Reizmittel entstehenden Erregungen des Auges, oder wenigstens, was man davon kannte, war vereinzelt, und wurde deshalb nur als Curiosum betrachtet. Das Verdienst, die Aufmerksamkeit der deutschen Naturforscher auf die Wichtigkeit dieser Kenntniß hingeleitet zu haben, gebührt GOETHE in seiner Farbenlehre, wenn ihm auch der Hauptzweck dieses Buches, eine Reform der physikalischen Lichtlehre, die sich der unmittelbaren sinnlichen Anschauung besser anschliesse, zu erzwingen, fehlgeschlug. Darauf folgen nun die reichen Beobachtungen über Erregungen der Empfindungsnerve von RITTER und den andern Galvanikern, namentlich aber die Beobachtungen von PURKINJE, so dafs im Jahre 1826 J. MÜLLER die Hauptsätze dieses Gebiets hinstellen konnte in seiner Lehre von den specifischen Sinnesenergien, wie er sie in seinem Werke über die vergleichende Physiologie des Gesichtsinns zuerst vortrug, und wie sie im Anfange dieses Paragraphen dargestellt ist. Dies Werk und das von PURKINJE stehen in ausgesprochener Beziehung zu GOETHE's Farbenlehre, wenn auch J. MÜLLER deren physikalische Sätze später aufgegeben hat. Das MÜLLER'sche Gesetz von den specifischen Energien war ein Fortschritt von der außerordentlichsten Wichtigkeit für die ganze Lehre von den Sinneswahrnehmungen, ist seitdem das wissenschaftliche Fundament dieser Lehre geworden, und ist in gewissem Sinne die empirische Ausführung der theoretischen Darstellung KANT's von der Natur des menschlichen Erkenntnißvermögens.

Die Druckbilder kannte schon ARISTOTELES. NEWTON² giebt die hypothetische Erklärung, dafs die mechanische Erschütterung der Netzhaut eine ähnliche Bewegung in ihr erzeuge, wie die auf diese Haut stofsenden Lichtstrahlen. Diese Bewegung der Netzhaut betrachtet er als Ursache der Lichtempfindung. Die Meinung, dafs bei den Druckbildern sowohl, als auch bei anderen Gelegenheiten im Auge sich objectives Licht entwickle, hat übrigens bis in neuere Zeit ihre Anhänger gehabt, wovon der oben erwähnte gerichtsarztliche Fall ein Beispiel giebt, in welchem der begutachtende Medicinalrath SEILER die Möglichkeit eines solchen Ereignisses glaubte zulassen zu müssen. Es hat aber niemals ein zweiter Beobachter objectiv das so entwickelte Licht wahrnehmen können. Um diese Meinung wahrscheinlich zu machen stützte man sich theils auf Fälle von Menschen, die in der Dunkelheit, d. h. bei sehr wenig Licht, hatten sehen können, wie Kaiser TIBERIUS, CARDANUS, KASPAR HAUSER, theils auf das sogenannte Leuchten der Thieraugen, der albinotischen oder sonst krankhaft verbildeten Menschengen, welches nur auf Reflexion des Lichts beruht, theils auf stark entwickelte Nachbilder, die des Abends nach verlöschtem Licht bei älteren Männern zuweilen lange zurückzubleiben scheinen; sie sollten die Möglichkeit der Lichtentwicklung im Auge beweisen. Genauere Beschreibungen der Druckbilder sind in späterer Zeit von PURKINJE, SERRES D'UZÈS gegeben worden. Der Gebrauch, den THOMAS YOUNG in der Accommodationslehre davon machte, ist oben Seite 149 erwähnt.

Den Öffnungs- und Schließungsblitz bei elektrischer Durchströmung beobachtete schon VOLTA; RITTER nahm selbst mit der einfachen Kette die dauernden Lichtwirkungen wahr, später gab namentlich PURKINJE eine ausführliche Beschreibung.

¹ A. V. HALLER, *Elem. Physiol.* Tom. V. lib. 16 u. 17.

² J. NEWTON, *Optice*, am Schluß Quaestio XVI.

§ 18. Von der Reizung durch Licht.

Wir haben jetzt das objective Licht, die Ätherschwingungen, als Erregungsmittel des Sehnervenapparates zu betrachten. Die Ätherschwingungen gehören nicht zu den allgemeinen Reizmitteln der Nerven, die wie Elektrizität und mechanische Mißhandlung jede Stelle einer jeden Nervenfasern erregen könnten; und es läßt sich nachweisen, daß die Nervenfasern des Sehnerven innerhalb des Stammes dieses Nerven und innerhalb der Netzhaut von ihnen ebenso wenig wie die motorischen und sensiblen Nervenfasern der übrigen Nerven erregt werden. Es sind vielmehr gewisse Hilfsapparate nothwendig, die an den Enden der Opticusfasern in der Netzhaut liegen, in denen das objective Licht den Anstoß zu einer Nervenregung zu geben im Stande ist.

Wir wollen hier zunächst nachweisen, daß die Nervenfasern im Stamme des Sehnerven durch objectives Licht nicht erregt werden. Die Masse dieser Fasern liegt an der Stelle, wo der Sehnerv durch die Sclerotica in das Auge eintritt, frei gegen die durchsichtigen Mittel des Auges gekehrt, sie ist nicht von schwarzem Pigment bedeckt, und zugleich durchscheinend genug, daß das Licht, was auf sie fällt, merklich in die Masse des Nerven eindringen kann. Man erkennt dies bei den Untersuchungen mit dem Augenspiegel daran, daß man häufig noch Windungen der Centralgefäße innerhalb des Sehnerven erkennen kann, die von der Nervenmasse ganz überdeckt sind. Wenn dergleichen Gefäßwindungen im Innern der Nervensubstanz erkannt werden sollen, muß Licht bis zu ihnen hindringen und von ihnen aus wieder bis zum Auge des Beobachters gelangen können. Es ist also kein Hinderniß für das in das Auge fallende Licht vorhanden, bis zu einer gewissen Tiefe in die Sehnervensubstanz einzudringen. Aber dieses Licht, was auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fällt, wird nicht empfunden.



Fig. 117.

Man schliesse das linke Auge und fixire mit dem rechten das weiße Kreuzchen in Fig. 117, alsdann bringe man das Buch bei der gewöhnlichen horizontalen Richtung der Zeilen in eine Entfernung von etwa einem Fuß

vom Auge, so wird man finden, daß es hier eine gewisse Stellung giebt, wo der weiße Kreis gänzlich verschwindet und der schwarze Grund ohne Lücke erscheint. Damit der Versuch gelinge, achte man aber sorgfältig darauf, daß man den Blick fest auf das Kreuzchen hefte und nicht seitwärts blicke. Nähert man das Buch mehr oder entfernt es weiter, so kommt der weiße Kreis wieder zum Vorschein, und wird im indirecten Sehen deutlich wahrgenommen; ebenso wenn man das Buch schief hält, so daß der weiße Kreis etwas höher oder tiefer zu stehen kommt. Wie der weiße Kreis, verschwinden alle anderen Gegenstände, weiße, schwarze, farbige, welche nicht größer sind als der Kreis, wenn man sie auf denselben legt, und wie vorher verfährt. Man erkennt daraus, daß es im Gesichtsfelde eines jeden einzelnen Auges eine Stelle giebt, in welcher nichts erkannt wird, und daß es also in der Fläche der Netzhaut eine entsprechende Stelle giebt, welche die auf sie fallenden Bilder nicht wahrnimmt. Man nennt diese Stelle den blinden Fleck. Da die blinde Stelle im Gesichtsfelde des rechten Auges nach rechts vom Fixationspunkte, in dem des linken Auges links davon liegt, so muß der blinde Fleck der Netzhaut vom gelben Fleck aus nach der Nasenseite herüber liegen, in welcher Gegend sich die Eintrittsstelle des Sehnerven befindet.

Daß der blinde Fleck wirklich mit der Eintrittsstelle des Sehnerven identisch sei, hatte man schon früher durch Messung seiner scheinbaren Größe und seines scheinbaren Abstandes vom Fixationspunkte des Auges nachgewiesen. Einen noch directeren Beweis hat DONDERS¹ mittels seines Augenspiegels gegeben. Er warf mit diesem Instrumente das Licht einer kleinen entfernt stehenden Flamme in das Auge des Beobachteten, und ließ dieses so wenden, daß das Flammenbildchen auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fiel. Auf dieser Stelle ist das Flammenbildchen nicht scharf gezeichnet, und es erscheint gleichzeitig die ganze Eintrittsfläche des Sehnerven, obgleich mindestens 20 mal größer als das Flammenbildchen, ziemlich hell, was sich aus der durchscheinenden Beschaffenheit der Nervenmasse erklärt. Auf der Netzhaut selbst neben dem Eintritt des Sehnerven bemerkte er kaum eine Spur von Licht, was entweder in den durchsichtigen Mitteln des Auges zerstreut sein konnte, oder von der hell erleuchteten Fläche des Sehnerven seitlich reflectirt war. So lange das Lichtbildchen ganz auf den Eintritt des Sehnerven fiel, hatte der Beobachtete keine Lichtempfindung. Einige meinten einen sehr schwachen Schimmer wahrzunehmen, der wohl durch die erwähnte schwache Erleuchtung der Netzhaut veranlaßt sein mochte. Durch kleine Bewegungen des Spiegels konnte er das Lichtbildchen von einer Seite nach der anderen über die Eintrittsstelle des Sehnerven wandern lassen, und niemals trat Lichtwahrnehmung ein, ehe nicht ein Theil der Flamme deutlich die Grenze überschritt, und so ein Stelle erreichte, wo

211

¹ F. C. DONDERS, *Onderzoekingen gedaan in het Physiol. Labor. d. Utrechtsche Hoogeschool.* VI. 134.

die verschiedenen Schichten der Netzhaut schon vorhanden sind. Hieraus folgt, daß der blinde Fleck der ganzen Eintrittsstelle des Sehnerven, und namentlich nicht etwa bloß den eintretenden Gefäßen entspricht.

Denselben Versuch hat später COCCURUS¹ an dem eigenen Auge des Beobachters auszuführen gelehrt, wodurch er noch belehrender wird. Man braucht dazu einen durchbohrten Spiegel, plan oder convex, wie er in den Augenspiegeln üblich ist, und hält diesen nahe vor das eigene Auge, während durch die Öffnung des Spiegels das Licht einer Lampe in das Auge fällt. Richtet man zunächst das Auge gerade nach dem Rand der Öffnung hin, so gelingt es leicht, das umgekehrte rothe Flammenbildchen auf der Netzhaut des eigenen Auges zu sehen, und indem man dann das Auge mehr und mehr einwärts dreht, während man das Flammenbildchen festzuhalten sucht, gelingt es endlich das Flammenbild auf die Eintrittsstelle des Sehnerven zu bringen und die beschriebenen Beobachtungen anzustellen. Für diesen Zweck ist es übrigens rathsam, die Flamme klein zu machen, oder weit zu entfernen, weil sonst die große Menge Licht, die in das Auge dringt, hinderlich ist. Man sieht dabei auch die Gefäßstämme, hat aber natürlich immer nur ein sehr kleines Gesichtsfeld. Nimmt man eine größere Flammenfläche, so wird das Auge zu sehr geblendet, als daß man viel sehen könnte. Ist die Lichtmenge, welche auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fällt, bedeutend, so nimmt das Auge allerdings einen schwachen Lichtschein wahr, aber, wie wir aus diesen Versuchen schließen müssen, nur deshalb, weil ein Theil des Lichtes sich auf die anstossenden Theile der Netzhaut ausbreitet. Zuweilen entsteht auch bei solchen Versuchen ein rother Lichtschimmer im Auge, wohl wenn ein Gefäßstamm auf der Sehnervenfläche stark erleuchtet wird und Licht reflectirt. Dies beobachteten A. FRICK und P. DU BOIS-REYMOND, wenn sie das Sonnenbildchen einer Convexlinse als Object benutzten.

Die Form und scheinbare Größe des blinden Flecks im eigenen Gesichtsfelde kann man leicht in folgender Weise bestimmen. Man gebe dem Auge 8 bis 12 Zoll über einer weißen Papierfläche einen festen Standpunkt, und zeichne zuerst

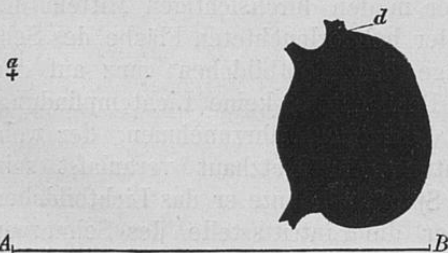


Fig. 118.

auf dem Papier ein Kreuzzeichen als Fixationspunkt für das Auge. Dann führe man die in Tinte getauchte Spitze einer weißen oder mindestens hell gefärbten Feder auf dem Papiere in die Projection des blinden Flecks hinein, so daß die schwarze Spitze verschwindet, und schiebe sie dann von dessen Mittelpunkte aus nach einander in den verschiedenen Richtungen gegen die Peripherie des Flecks vor, und zeichne die Grenze auf, wo sie anfängt, sichtbar zu werden. In dieser Weise habe ich in Fig. 118 den blinden Fleck meines rechten Auges, bezogen auf den Fixations-

¹ A. COCCURUS, *Über Glaukom, Entzündung und die Autopsie mit d. Augenspiegel*. Leipzig 1859. S. 40 u. 52.

punkt a , dargestellt. AB ist der dritte Theil der zugehörigen Entfernung des Auges von der Papierfläche. Man sieht, daß die Gestalt des Fleckes eine unregelmäßige Ellipse ist, an der ich selbst, wie HUECK, die Anfänge von den stärkeren Gefäßstämmen erkennen kann, welche austreten. Wenn man einen kleinen schwarzen Fleck auf das Papier macht, und nach einander verschiedene Gesichtspunkte fixirt, so findet man noch, daß die Fortsetzungen der Gefäße weit in das Feld der Netzhaut hinein blinde Stellen sind. Am leichtesten gelingt dies, wenn man nach COCCIUS sich die Richtung der Gefäßstämmen im eigenen Auge schon aufgesucht hat.

Bezeichnen wir die Entfernung des Auges vom Papier mit f , die Entfernung des zweiten Knotenpunkts von der Netzhaut, welche im Mittel 15 mm beträgt, mit F , den Durchmesser des blinden Flecks in unserer Zeichnung, oder irgend eine andere lineare Größe in der Zeichnung mit d , die entsprechende Größe auf der Netzhaut mit D , so haben wir

$$\frac{f}{F} = \frac{d}{D},$$

woraus wir D berechnen können. Will man sich bei einer solchen Messung von der Größe F , welche für das individuelle Auge nie ganz genau bestimmt werden kann, unabhängig machen, so mißt man besser den Gesichtswinkel, d. h. den Winkel zwischen den Richtungslinien (siehe S. 69), welche den verschiedenen Punkten der Zeichnung entsprechen. Wenn wir voraussetzen dürfen, die auf den Punkt a der *Fig. 118* gerichtete Gesichtslinie sei senkrecht zur Ebene der Zeichnung und die Entfernung ad mit β bezeichnen, den Gesichtswinkel, unter dem ad erscheint, mit α , so ist

$$\frac{\beta}{f} = \operatorname{tg} \alpha,$$

woraus α berechnet werden kann; ebenso ist der Gesichtswinkel zwischen a und jedem anderen Punkte der Zeichnung zu finden. Folgendes sind die Resultate, welche verschiedene Beobachter in dieser Weise erhalten haben:

- 1) Scheinbarer Abstand des Gesichtspunktes von dem ihm nächsten Theile des Randes des blinden Flecks: LISTING¹ 12° 37',5; HELMHOLTZ 12° 25'; TH. YOUNG 12° 56'.
- 2) Scheinbarer Abstand des entferntesten Theils des Randes: LISTING 18° 33',4; HELMHOLTZ 18° 55'; TH. YOUNG 16° 1'.
- 3) Scheinbarer Durchmesser des blinden Flecks in horizontaler Richtung: HANNOVER und THOMSEN² bei 22 Augen 3° 39' bis 9° 47', Mittel aller Messungen 6° 10', LISTING 5° 55',9; GRIFFIN³ im Maximo 7° 31'; HELMHOLTZ 6° 56'; TH. YOUNG, der nicht ganz zweckmäßig zwei Lichter gebraucht hatte, um die Grenze des Flecks zu finden, 3° 5'.
- 4) Wahrer Durchmesser des blinden Flecks, mit LISTINGS Werth für $F = 15$ mm berechnet, in LISTINGS Auge 1^{mm},55; HELMHOLTZ 1,81. HANNOVER und THOMSON im Mittel 1^{mm},116. Eine Messung von E. H. WEBER des Durchmessers der Eintrittsstelle des Sehnerven in den Augen zweier Leichen ergab

¹ J. LISTING, *Berichte der Königl. sächs. Ges. der Wiss.* 1852. S. 149. Ebenda die Beobachtungen von E. H. WEBER.

² A. HANNOVER, *Bidrag til Oiets Anatomie*. Kjöbenhavn. 1850. Cap. VI. S. 61.

³ GRIFFIN, *Contributions to the physiology of vision*. London, Medical Gazette. 1838 Mai. p. 230.

$2^{\text{mm}},10$ und $1^{\text{mm}},72$ ($0,93$ und $0,76$ Par. Lin.). Der Abstand seiner Mitte von der Mitte des gelben Flecks war in dem einen Auge $3^{\text{mm}},8$ ($1,69$ Par. Lin.); derselbe, in LISTINGS Auge berechnet, $4^{\text{mm}},05$. Der größte und kleinste Durchmesser des Gefäßstrangs in der Mitte des Nerven waren $0,313$ und $0,139$ Lin., der größte in dem anderen Auge $0,28$ Lin.

Aus diesen Messungen konnte schon vor den Versuchen von DONDERS geschlossen werden, daß die ganze Eintrittsstelle des Sehnerven unempfindlich gegen das Licht sei.

Um die scheinbare GröÙe des blinden Flecks im Gesichtsfelde noch anders zu bezeichnen, wollen wir anführen, daß auf seinem Durchmesser neben einander 11 Vollmonde Platz haben würden, und daß in ihm ein 6 bis 7 FuÙs entferntes menschliches Gesicht verschwinden kann.

Daß die Sehnervenfasern im Stamme des Sehnerven nicht durch Licht in Reizung versetzt werden können, geht aus den beschriebenen Erscheinungen des blinden Flecks hervor. Daß auch ihre Fortsetzungen, welche von der Eintrittsstelle des Sehnerven über die vordere Fläche der Netzhaut hin ausstrahlen, gegen Licht unempfindlich sind, kann aus dem Umstande geschlossen werden, daß wir begrenzte helle Stellen des Gesichtsfeldes auch wirklich begrenzt sehen. Wenn Licht auf irgend eine Stelle *A* der Netzhaut fällt, so trifft es hier nicht bloß diejenigen Nervenfasern, welche in *A* endigen, sondern auch solche, welche über *A* hinausgehen, und an den mehr peripherisch gelegenen Stellen der Netzhaut endigen. Da nun der Ort, an welchem eine Nervenfaser gereizt worden ist, in der Empfindung nicht unterschieden wird, so würde dadurch für die Empfindung derselbe Erfolg eintreten, als wäre Licht auf jene peripherischen Stellen der Netzhaut gefallen. Wir würden unter diesen Umständen von jedem erleuchteten Punkte einen Lichtschweif nach den Grenzen des Gesichtsfeldes sich hinziehen sehen, was nicht der Fall ist. Es können also auch die vor der Netzhaut ausgebreiteten Fasern des Sehnerven nicht durch objectives Licht reizbar sein.

Daß dagegen die hinteren Schichten der Netzhaut gegen Licht empfindlich sind, geht daraus hervor, daß man den Schatten der NetzhautgefäÙe wahrnehmen kann (§ 15, S. 192). Die NetzhautgefäÙe liegen in der Schicht der Sehnervenfasern, die feineren zum Theil auch noch in der unmittelbar dahinter liegenden Schicht der Nervenzellen (S. 31, *Fig. 16*, 2, 3) und in der fein granulirten Schicht (*Fig. 16*, 4). Aus den Bewegungen des Schattens dieser GefäÙe bei Bewegungen der Lichtquelle haben wir geschlossen, daß die den Schatten empfindende Schicht, die Schicht, in welcher das den Schatten begrenzende Licht Nervenirregung hervorruft, in geringer Entfernung hinter den GefäÙen liegen müsse. Die Messungen von H. MÜLLER (S. 200) ergeben, daß die Entfernung der GefäÙe von der Fläche, die ihren Schatten empfindet, zwischen $0,17$ und $0,36$ mm betragen muß. Die Entfernung der GefäÙe von der hintersten Schicht der Netzhaut, der der Stäbchen und Zapfen (*Fig. 16*, 8, 9), beträgt nach demselben Beobachter $0,2$ bis $0,3$ mm, so daß die empfindende Schicht jedenfalls eine der hintersten Schichten der

Netzhaut sein muß, d. h. die Schicht der Zapfen und Stäbchen, oder die äußere Körnerschicht. Da an der Stelle des deutlichsten Sehens, in der centralen Grube des gelben Flecks nach allen neueren Beobachtungen nur Nervenzellen und Zapfen mit Zapfenkörnern vorkommen, so folgt sicher, daß die Zapfen verbunden mit den Zapfenkörnern genügen, um bei Licht- einwirkung Empfindung zu erregen. Bei der ganz analogen anatomischen Bildung der Stäbchen ist es höchst wahrscheinlich, daß auch diese die ge- nannte Fähigkeit besitzen, wie schon H. MÜLLER und KOELLIKER ausge- sprochen haben. Indessen müssen sie bei der Localisation der Empfindungen eine ganz andere Rolle spielen, da trotz ihrer größeren Feinheit und Anzahl dort, wo sie überwiegend vorkommen, in den peripherischen Theilen der Netzhaut, das Unterscheidungsvermögen für nah benachbarte Eindrücke im Gegentheile unvollkommener ist als in der Netzhautgrube.

Da die Untersuchung über die Feinheit der Wahrnehmung von Ortsunterschieden beim Sehen wesentlich mit der Frage zusammenhängt, welche Elemente der Netzhaut lichtempfindlich sind, (das heißt hier immer: bei Lichteinwirkung Empfindung erregen) und wie sie mit den Nervenfasern zusammenhängen, so wenden wir uns zunächst dieser Frage zu.

Da diejenige Stelle der Netzhaut, welche der feinsten Ortsunterscheidung fähig ist, ein regelmäßiges gebildetes Mosaik von einander trennbarer Theile, der Zapfen, hat, von denen jeder einzelne mit einer Nervenfaser zusammen- hängt, die zunächst zu den Nervenzellen der Netzhaut hinüberführt, so scheint die Annahme nicht unwahrscheinlich, daß jeder einzelne Zapfen seine eigene abgesonderte Nervenleitung zum Gehirn hat, und daß dem entsprechend die in ihm erregte Empfindung von qualitativ gleicher Empfindung in den benachbarten Zapfen unterschieden werden könne. Um diese Hypothese zu prüfen, wäre zu erörtern, wie sich in diesem Falle die Größe der Zapfen verhalten muß, und welche Art von sichtbaren Objecten dabei die sichersten Schlüsse zulassen würden.

Das Licht, welches auf ein einziges empfindendes Element fällt, kann nur eine einzige Lichtempfindung hervorbringen, in der nicht mehr unterschieden wird, ob einzelne Theile des Elements stark, andere schwach erleuchtet sind. Es können lichte Punkte wahrgenommen werden, deren Netzhautbild sehr viel kleiner ist, als ein empfindendes Netzhautelement, vorausgesetzt, daß die Lichtmenge, die von ihnen in das Auge fällt, groß genug ist, ein Netzhautelement merklich zu afficiren. So werden z. B. die Fixsterne, als Objecte von großer Lichtstärke, trotz ihrer verschwindend kleinen schein- baren Größe, vom Auge wahrgenommen. Ebenso können auch dunkle Ob- jecte auf hellem Grunde wahrgenommen werden, obgleich ihre Bilder kleiner sind, als ein empfindendes Nerven- element, vorausgesetzt nur, daß die Licht- menge, welche auf das Element fällt, durch das dahin treffende dunkle Bild um einen wahrnehmbaren Theil verringert wird. Kann das Auge z. B. bei der angewendeten Beleuchtungsstärke Unterschiede der Lichtintensität von $\frac{1}{50}$ erkennen, so würde ein dunkles Bildchen, dessen Flächeninhalt $\frac{1}{50}$ von

dem eines empfindenden Elements ist, noch wahrgenommen werden können. Dagegen ist es klar, daß zwei helle Punkte nur dann als zwei erkannt werden können, wenn der Abstand ihrer Bilder größer ist, als die Breite eines Netzhautelements. Wäre er kleiner, so würden beide Bilder immer auf dasselbe oder auf zwei benachbarte Elemente fallen müssen. Im ersteren Falle würden beide nur eine einzige Empfindung erregen, im zweiten Falle zwar zwei Empfindungen, aber in benachbarten Nervelementen, wobei nicht unterschieden werden könnte, ob zwei gesonderte Lichtpunkte, oder einer da ist, dessen Bild auf die Grenze beider Elemente fällt. Erst wenn der Abstand der beiden hellen Bilder, oder wenigstens ihrer Mitte von einander größer ist als die Breite eines empfindenden Elements, erst dann können die beiden Bilder auf zwei verschiedene Elemente fallen, die sich gegenseitig nicht berühren, und zwischen denen ein Element zurückbleibt, welches nicht oder wenigstens schwächer als die beiden ersten von Licht getroffen wird.

Nach den Angaben von HOOKE¹ erscheinen zwei Sterne, deren scheinbare Entfernung weniger als 30 Secunden beträgt, stets wie ein Stern, und
 216 von Hunderten kann kaum einer die beiden Sterne unterscheiden, wenn ihre scheinbare Entfernung weniger als 60 Secunden beträgt. Die übrigen Beobachter, welche nicht an Sternen, sondern an weißen beleuchteten Strichen oder Vierecken ihre Beobachtungen angestellt haben, fanden eine etwas geringere Genauigkeit. Es wurden von dem besten, von E. H. WEBER untersuchten Auge zwei weiße Striche unterschieden, deren Mittellinien 73 Secunden von einander entfernt waren. Bei stärkerer Beleuchtung komme ich selbst unter möglichst günstigen Umständen bis 64 Secunden. In LISTING'S schematischem Auge entspricht auf der Netzhaut

ein Gesichtswinkel von	einem Abstände von
73"	0,00526 mm
63"	0,00464 „
60"	0,00438 „

Nach KOELLIKER'S Messungen beträgt die Dicke der Zapfen im gelben Flecke 0,0045 bis 0,0054 mm (siehe S. 38), was fast genau mit den vorigen Zahlen übereinstimmt, so daß auch durch diese Messungen die Annahme, daß die Zapfen die letzten empfindenden Elemente der Netzhaut bilden, bestätigt wird.

Spätere Beobachter haben etwas kleinere Zahlen gefunden: M. SCHULTZ 0,0020 bis 0,0025, H. MÜLLER 0,0015 bis 0,0020, WELCKER 0,0031 bis 0,0036 mm.

216 Gleichzeitig ergibt sich, daß die optische Beschaffenheit eines gut gebauten und richtig accommodirten Auges vollkommen genügt, um den Grad von Genauigkeit, welchen die Größe der nervösen Elemente möglich macht, wirklich zu erreichen. Wir haben freilich (§ 13, S. 163) gefunden, daß

¹ R. SMITH, *A complete System of optics*, übers. v. KAESTNER. S. 20.

bei einem Durchmesser der Pupille von 4 mm der durch Farbenzerstreuung erzeugte Zerstreungskreis einen Durchmesser von 0,0426 mm hat, also fast 10 mal größer ist, als die Dicke der Zapfen, aber dort auch schon die Gründe angegeben, warum diese Zerstreungskreise trotz ihrer Größe das Sehen nicht erheblich beeinträchtigen. Die Abweichungen wegen Asymmetrie des Auges (§ 14, S. 182) sind meist viel geringer, und beeinträchtigen das Sehen weniger, wenn nicht gleichzeitig horizontale und verticale Linien gesehen werden sollen.

Auf den Seitentheilen der Netzhaut ist die Unterscheidungsfähigkeit viel geringer als im gelben Flecke, und zwar ist die Abnahme in der Nähe des Netzhautcentrum geringer, als in größerer Entfernung davon. Nach den Messungen von AUBERT und FÖRSTER ist die Abnahme nach verschiedenen Richtungen hin vom Centrum aus verschieden schnell, und zwar geschieht sie rasch oben und unten am schnellsten, nach der äußeren Seite der Netzhaut hin am langsamsten; dabei scheinen die individuellen Unterschiede ziemlich bedeutend zu sein. Ein auffallendes Resultat ihrer Messungen ist auch, daß bei der Accommodation für die Ferne die Abnahme nach den Seiten der Netzhaut hin schneller zu geschehen scheint, als beim Nahesehen. Sie fanden, daß eine ähnliche Abnahme der Genauigkeit der optischen Bilder wenigstens in Kaninchenaugen nach den Seiten der Netzhaut hin nicht stattfindet. Dadurch wird constatirt, daß die Unvollkommenheit des Sehens auf den seitlichen Netzhauttheilen nur von der Beschaffenheit der Netzhaut, nicht von der der optischen Bilder abhängt.

Als Object für die Feststellung der kleinsten zu unterscheidenden Distanzen hat TOB. MAYER und nach ihm E. H. WEBER weiße parallele Linien benutzt, welche durch gleich breite schwarze getrennt waren, VOLKMANN benutzte Spinnwebfäden auf hellem Grunde, ich selbst fand der Beleuchtung wegen passender ein Gitter von schwarzen Drähten zu benutzen, dessen Zwischenräume gleich dem Durchmesser der Drähte waren, und welches vor den hellen Himmel gestellt wurde. Außerdem hat TOB. MAYER auch weiße Vierecke benutzt, theils durch ein schwarzes Gitter getrennt, theils schachbrettartig geordnet.

Man muß bei der Anstellung der Versuche darauf achten, daß das Auge vollständig accommodirt werden könne, und nöthigenfalls ein passendes Brillenglas vor das Auge nehmen. Die Beleuchtung muß stark sein, ohne doch blendend zu werden.

Bei diesen Versuchen bemerkte ich eine auffällende Formveränderung der geraden hellen und dunkeln Linien. Die Breite jedes hellen und jedes dunkeln Streifen des von mir gebrauchten

Gitters betrug $\frac{13}{24} = 0,4167$ mm. In dem Ab-

stande von 1,1 bis 1,2 m fing die Erscheinung an sichtbar zu werden. Das Gitter bekam etwa das Aussehen wie in *Fig. 119 A*; die weißen Streifen erschienen zum Theil wellenförmig ge-

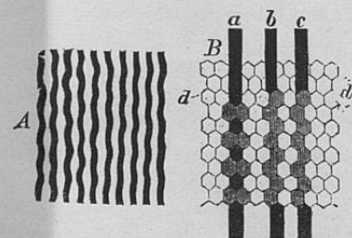


Fig. 119.

krümmt, zum Theil perlschnurförmig mit abwechselnd dickeren und dünneren Stellen. Es seien in *Fig. 119 B* die kleinen Sechsecke Querschnitte der Zapfen

des gelben Flecks, a , b und c drei optische Bilder von den gesehenen Streifen, diese sind oberhalb dd in ihrer wirklichen Form dargestellt, unterhalb dd aber sind alle Sechsecke, deren gröfsere Hälfte schwarz war, ganz schwarz gemacht, deren gröfsere Hälfte weifs war, ganz weifs, weil in der Empfindung immer nur die mittlere Helligkeit jedes Elements wahrgenommen werden kann. Man sieht, dafs dadurch in der unteren Hälfte von *Fig. 119 B* ähnliche Muster entstehen, wie in *A*. PURKINJE¹ hat Ähnliches gesehen, und auch BERGMANN hat beobachtet, dafs zuweilen, ehe die Streifen des Gitters ganz verschwinden, dasselbe schachbrettartig erscheint, zuweilen Streifen in querer Richtung gegen die wirklich vorhandenen gesehen werden, was sich alles durch ähnliche Verhältnisse, wie die hier berührten, erklären läfst².

Wenn bei den Beobachtungen zwei leuchtende Objecte benutzt worden sind, deren Breite gegen ihren Abstand verschwindet, so können sie als zwei nur erkannt werden, wenn zwischen den Netzhautelementen, welche ihre Bilder empfangen, ein anderes zurückbleibt, welches dunkel bleibt. Der Durchmesser eines solchen Elements mufs also jedenfalls kleiner sein, als der Abstand der beiden hellen Bilder. Ist die Breite der Objecte aber gleich dem dunkeln Streifen zwischen ihnen, so ist es nicht gerade nöthig, dafs die Netzhautelemente schmäler seien, als das Bild des dunkeln Streifens. Ein Netzhautelement, welches von dem Bilde des dunkeln Streifens getroffen wird, und mit seinen Seitenrändern noch zum Theil in die hellen Streifen hineinragt, wird deshalb doch noch weniger Licht als seine Nachbarn empfinden können, vorausgesetzt, dafs die ganze Lichtmenge, von der es getroffen wird, kleiner ist, als die der Nachbarn. Wir können in solchen Fällen deshalb mit Gewifsheit nur soviel folgern, dafs die Netzhautelemente kleiner seien als die Entfernung der Mittellinien der hellen Streifen. Auch zeigt sich in der That in den unten angeführten Versuchen von TOB. MAYER, dafs bei parallelen Linien die Unterscheidbarkeit dieselbe bleibt, wenn sich die Breite des Schwarz oder Weiss ändert, aber die Summe der Breite eines schwarzen und eines weissen Streifen constant bleibt. Deshalb habe ich als Breite des Objects immer die Summe angegeben, welche der Entfernung der Mittellinien zweier benachbarter Objecte gleich ist, abweichend von MAYER, WEBER und VOLKMANN, und danach auch den kleinsten Gesichtswinkel berechnet.

¹ J. E. PURKINJE, *Beobachtungen und Versuche*. I. 122.

² BERGMANN, *Henle und Pfeuffer, Zeitschrift für ration. Medicin.* (3.) II. 88.

Beobachter.	Object.	Größe des Objects.	Entfernung vom Auge.	Entfernung dividirt durch Größe des Objects.	Gesichtswinkel in Sekunden.
1) HOOKE	Fixsterne	—	—	—	60
2) TOR. MAYER	a) Parallele Linien mit gleichen Zwischenräumen b) Eben solche mit breiteren und schmaleren Zwischenräumen	0,72 Par. Lin. 0,6 " "	11 Par. Fuß 9 ¹ / ₂	2200 2275	94 90
3) Derselbe	Weise Quadrate durch ein schwarzes Gitter getrennt	0,88 " "	15 ¹ / ₂	2422	80
4) Derselbe	Schachbrettmuster	1,04 " "	12	1661	124
5) VOLKMANN	Spinnwebfäden	0,0052 Par. Zoll	7 Par. Zoll	1346	147,5
6) N. N. bei VOLKMANN	Dieselben	—	13	2500	80,4
7) TH. WEBER bei E. H. WEBER	Parallele Linien mit gleich breiten Zwischenräumen	0,05 Par. Lin.	110 ¹ / ₂ Par. Lin.	2210	90,6
8) N. N. 1 bei demselben	Dieselben	—	138	2760	73
9) N. N. 2 bei demselben	Dieselben	—	110 ¹ / ₂	2210	90,6
10) HEIMHOLTZ	Stabgitter	1,083 mm	3500 mm	3235	63,75
11) O. H. bei demselben	Dasselbe	—	2400	2215	93
12) BERGMANN	Parallele Linien mit gleich breiten Zwischenräumen	2 mm	5500 bis 8000	2750 4000	75 51,6
13) HIRSCHMANN	Parallele Drähte	—	—	4125	50

71 Aus diesen Versuchen ist nur zu schliessen, das es auf der Netzhaut parallele Reihen lichtempfindender Elemente giebt, für welche die Mittellinien der Reihen um weniger als 0,00363 mm (HIRSCHMANN), beziehlich 0,00463 mm (HELMHOLTZ) von einander abstehen. Dabei können aber die Mittelpunkte der Netzhaut-elemente selbst einen erheblich größeren Abstand haben, wenn sie sich nämlich in benachbarten Reihen nicht in normaler Richtung gegenüberstehen, Wären sie z. B. wie die Sechsecke der *Fig. 119 B* geordnet, so können wir zwischen zwei Verticalreihen solcher Sechsecke, die ihre Sechsecke horizontal neben einander in gleicher Höhe haben, noch andere unterscheiden, deren Sechsecke sich zwischen je zwei Horizontalreihen der ersten einschleiben. Letztere Reihen sind übrigens den ersten vollkommen gleich gebildet. Der Abstand der Mittellinien je zweier solcher nächstgelegener Verticalreihen ist gleich dem halben Abstände gegenüberliegender Sechsecksseiten. Aufser der verticalen giebt es noch zwei andere Richtungen um 60° zu jener geneigt für Reihen von gleichem Abstände. Dagegen haben die horizontalen Reihen der Figur etwas weiter von einander entfernte Mittellinien. Wenn s der Abstand der Verticalreihen ist, so ist $s\sqrt{3}$ der der horizontalen Reihen und der um 60° gegen letztere geneigten. In verschiedenen Theilen des Feldes können die Reihen verschiedene Richtungen haben, so das man für jede Linienrichtung immer Stellen findet, welche ihr parallel die engsten Reihen von Netzhautelementen zeigen. Wenn wir aus s den Inhalt der Sechsecke berechnen, so ist dieser $2\frac{3}{4}s^2\sqrt{3}$, und die Anzahl von Netzhautelementen auf einem Quadratmillimeter der Netzhautgrube findet sich zu 13466 (HELMHOLTZ) bis 21907 (HIRSCHMANN.)

Zählungen der Anzahl der Zapfen der Netzhautgrube sind neuerdings in E. BRÜCKE's Laboratorium von Herrn F. SALZER¹ an Augen todgeborener Kinder ausgeführt worden, und haben 13200 bis 13800 Zapfen für das Quadratmillimeter ergeben, was mit der nach meinen Beobachtungen berechneten Zahl gut übereinstimmt. Möglicherweise sind sie bei einzelnen Individuen, oder in einem kleinen Theile der Netzhautgrube, den besonders geübte Beobachter zu benutzen lernen, kleiner, wodurch sich die größeren Zahlen bei Herrn HIRSCHMANN und bei dem von BERGMANN beobachteten zehnjährigen Knaben erklären.

Mit der ersteren Zahl stimmen auch sehr gut die Beobachtungen von Herrn CLAUDE DU BOIS-REYMOND², welcher zu ermitteln suchte, wie viele gleichmäsig vertheilte Lichtpunkte (quincuncial geordnet) auf einer bestimmten Netzhautfläche unterschieden werden könnten. Seine Zahlen schwanken bei verschiedenen Beobachtern zwischen 13500 und 16300 pro Quadratmillimeter Fläche der Netzhautgrube. Rücken die Punkte näher zusammen, so fließen sie zu einer gleichmäsig hellen Fläche zusammen. Das Object war ein Stannioblatt mit 460 eingestochenen Löchern, 2,5 mm von einander entfernt, 0,2 mm im Durchmesser, durch welche Himmelslicht schien. Wenn man das Object näherte, erschienen erst Linienreihen, ehe es sich in Punkte auflöste.

219 Die Untersuchungen von AUBERT und FÖRSTER über die Genauigkeit des Sehens auf den Seitentheilen der Netzhaut sind nach zwei Methoden ausgeführt worden. Bei der ersten Methode blickte der Beobachter durch eine geschwärtzte Röhre, welche fest aufgestellt war, dadurch die Stellung seines Auges sicherte und

¹ F. SALZER, *Sitzb. der K. K. Akad. d. Wissensch. zu Wien.* Bd. 81. Abth. III. Jänner 1880.

² CL. DU BOIS-REYMOND, *Über die Zahl der Empfindungskreise in der Netzhautgrube.* Berlin. 1880. *Inaug. Dissert.*

sein Auge vor blendendem Seitenlicht schützte, nach einem mit Buchstaben und Zahlen, die in gleichen Zwischenräumen von einander standen, bedruckten Bogen (2 Fufs breit, 5 Fufs lang) hin. Dieser war auf zwei horizontale Walzen aufgerollt, so dafs der vom Beobachter gesehene Theil nach jedem Versuch schnell gewechselt werden konnte. Da die aufgedruckten Buchstaben und Zahlen ferner ganz willkürlich durch einander gestellt waren, konnte der Beobachter auch nie andere Zahlen errathen, als die er wirklich gesehen hatte. Vor dem Bogen stand eine Leydener Flasche, welche sich von Zeit zu Zeit entlud, und dadurch den Bogen auf einen Moment erhellte, während es in den Zwischenzeiten so dunkel war, dafs der Beobachter eben nur den Ort der Buchstaben, aber nicht ihre Form erkennen konnte. Während ein Gehülfe den Bogen mit den Buchstaben beliebig stellte, gab der Beobachter nach jeder Richtung an, welche Buchstaben er erkannt hatte. Es wurden vier solche Bogen mit Ziffern und Buchstaben von verschiedener Gröfse gebraucht. Der Abstand des Beobachters von den Objecten konnte geändert werden.

Nennen wir mit AUBERT den doppelten Winkel zwischen der Gesichtslinie und der Richtungslinie der äufsersten gesehenen Buchstaben, d. h. also den Gesichtswinkel des mit erkennbaren Zahlen besetzten Raumes, den Raumwinkel, und den Winkel, unter welchem die gröfsten Dimensionen der gesehenen Buchstaben und Zahlen dem Beobachter erschienen, den Zahlenwinkel, so ergab sich, dafs bei gleicher wirklicher Gröfse der Zahlen das Verhältnifs des Zahlenwinkels zum Raumwinkel nahehin constant war; nur bei Raumwinkeln über 30 oder 40° waren die Zahlenwinkel etwas gröfser, als dies Verhältnifs erforderte. Dagegen fand sich, dafs bei constanter scheinbarer Gröfse der Zahlen kleine nahe Zahlen besser erkannt wurden als gröfsere ferne. Es fand sich nämlich die Verhältnifszahl des Raumwinkels dividirt durch den Zahlenwinkel, wie folgt:

Wirkliche Gröfse der Zahlen in mm.	Grenze des Raumwinkels.	Verhältnifs des Zahlenwinkels dividirt durch den Raumwinkel.		
		Minimum.	Maximum.	Mittel.
26	25°	7	7,9	7,18
26	40	6	7,3	6,69
13	27	11	12	11,14
7	27	9,7	14,5	12,79

In der zweiten Columne ist als Grenze des Raumwinkels derjenige Werth desselben angegeben, bis zu welchem die Messung ging, oder wenigstens nahehin constante Verhältnifszahlen lieferte. Die letzte Columne zeigt, dafs das Verhältnifs zwischen Zahlenwinkel und Raumwinkel steigt, wenn die wirkliche Gröfse der Zahlen sich verkleinert. Dieses letztere Factum ist sehr räthselhaft. Sollte der Mechanismus der Accommodation die peripherischen Theile der Netzhaut verändern? AUBERT macht die Annahme, dafs die Stäbchen beim Fernsehen in den Randtheilen der Netzhaut sich schief stellen und dadurch den normalen Gang der Lichtstrahlen hemmen.

Die zweite Methode der Untersuchung wurde mittels des in *Fig. 120* abgebildeten Apparats bei gewöhnlichem Tageslichte ausgeführt. *A* ist ein weiß lackirter Blechstreifen von 0,3 m Länge und 0,5 m Breite, welcher nach Art der Flügel einer Windmühle um die Axe *u* gedreht werden kann. Der Blechstreifen mit seiner Axe läßt sich an einer verticalen Stahlstange *B* auf- und abschieben, welche auf einem Brettchen *C* befestigt ist. Am andern Ende des Brettchens, gegenüber der Axe des Blechstreifens, befindet sich das eine Auge des Beobachters, während sein anderes Auge durch den schwarzen Papierschirm *D* verdeckt ist, welcher an einem Holz-

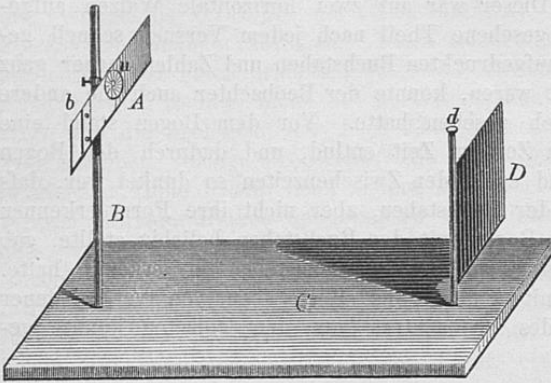


Fig. 120.

stabe *d* so befestigt ist, daß er nach links und rechts gedreht werden kann. Die Axe des Blechstreifens ist 0,2 m von dem Mittelpunkte der Grundlinie beider Augen des Beobachters entfernt. Das Brettchen *C* hat unten eine Handhabe.

Bei den Versuchen legte der Beobachter die Nase an den Holzstab *d*, verdeckte mit dem Schirm das eine Auge, stützte sein Kinn auf das Brett vor dem Schirm und stellte die Axe der Blechtafel in gleiche Höhe mit den Augen. Nun fixirte er den Mittelpunkt der Tafel (oder die Spitze ihrer Axe) unverwandt, und schob allmählig von der Seite her in den Falzen der Blechtafel eine weiße Karte *b* mit 2 Punkten nach dem fixirten Punkte hin. Sobald er, bei ununterbrochen fester Fixation, mit den seitlichen Theilen der Retina die zwei Punkte unterschied, hielt er die Karte fest und las die Entfernung der beiden Punkte von dem Fixationspunkte an einer Metereinheitung, welche sich an den Falzen der Blechtafel befand, ab, und dies wurde für verschiedene Neigungen der Blechtafel gegen den Horizont ausgeführt. Die schwarzen Flecke auf der Karte waren rund, von verschiedener Größe und verschiedenem gegenseitigen Abstände. Beide Punkte standen immer gleich weit von der Drehungsaxe ab.

221

Die *Fig. 121* stellt die Resultate dieser Messungen für ein Paar schwarze Flecke von 2,5 mm Durchmesser und 14,5 mm gegenseitigen Abstand dar. Die

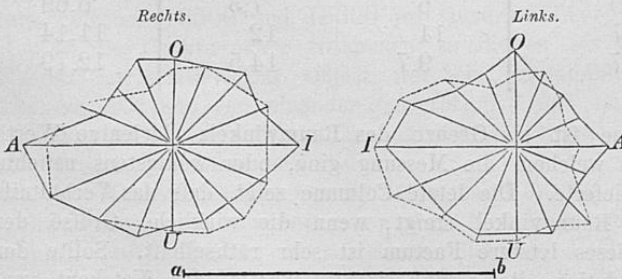


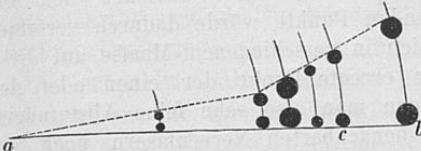
Fig. 121.

ausgezogene Grenzlinie bezieht sich auf AUBERT's, die punktirte auf FÖRSTER's Augen. Der Schnittpunkt der *Radii vectores* entspricht dem Fixationspunkte der Augen, die gezogenen *Radii vectores* selbst entsprechen den einzelnen Messungen und ihrer Richtung nach den verschiedenen Stellungen der Blechtafel. *O* bedeutet oben, *U* unten, *A* außen, d. h. Schläfenseite, *I* innen oder Nasenseite. Die Linie *ab* bezeichnet

die entsprechende Entfernung von der Blechtafel, welche 0,2 m betrug. Alle Lineardimensionen sind auf $\frac{1}{5}$ reducirt¹. Es stellen also diese Flächen zunächst diejenigen Theile des Gesichtsfeldes dar, innerhalb deren man zwei Punkte von der angegebenen Größe und Entfernung von einander unterscheiden kann; will man die entsprechenden Flächen der Netzhaut haben, so muß man sie umkehren. Die unregelmäßig ovale Gestalt dieser Flächen zeigt beträchtliche individuelle Abweichungen selbst zwischen den beiden Augen derselben Person.

Die mittleren Resultate der Messungen an verschiedenen Paaren von schwarzen Flecken sind in *Fig. 122* dargestellt. Der Fixationspunkt ist *a*, und *ab*, *ac* sind die Mittel sämtlicher Entfernungen; welche bei allen vier Augen in je 8 verschiedenen Meridianen für das bezüglich bei *b*, *c* u. s. w. stehende Paar von Punkten an der Blechtafel eingestellt wurden. Bei *c* ist das Paar von Punkten, auf welche sich *Fig. 121* bezieht. Man sieht, daß in größerer Entfernung die Breite des Objects schneller

zunehmen muß, als bei kleineren Entfernungen. Die gefundenen Mittelzahlen selbst sind folgende:



Entfernung der Punkte in mm.	Durchmesser der Punkte in mm.	Mittlerer Abstand vom Centrum der Blechtafel in mm.
3,25	1,25	31
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 fanden die beiden Beobachter übrigens noch öfters unempfindliche Stellen der Netzhaut, gleichsam kleine blinde Flecke, wo einer der Punkte oder beide plötzlich verschwanden. Außer solchen Stellen, wo nur eine vorübergehende Blendung stattzufinden schien, waren auch constante vorhanden, die immer wieder zu finden sind. 222

Daß die Ortsunterscheidung auf den Seitentheilen der Netzhaut so viel schwächer ist, könnte man, indem man nur die Zapfen als lichtempfindlich ansieht, durch die auf gleiche Fläche fallende sparsamere Zahl der durch Stäbchen getrennten und andererseits auch dickeren Zapfen zu erklären suchen. Indessen sind nach AUBERT'S und FÖRSTER'S Messungen die Unterschiede zwischen Centrum und Peripherie größer, als man nach einer solchen Hypothese erwarten sollte. Die Zählungen von F. SALZER zeigen Unterschiede, die das Verhältniß von 2 zu 5 Zapfen auf gleicher Fläche erreichen, meist aber lange nicht so weit gehen. Gleichzeitig ergibt sich aus diesen Zählungen, daß die Anzahl der Zapfen auf der menschlichen Netzhaut gegen 3 Millionen beträgt, während von Nervenfasern im Sehnerven etwa nur 1 Million vorhanden sein können, daß also nicht jeder Zapfen einer Nervenfaser entsprechen kann.

¹ Die Angabe AUBERT'S, daß sie auf $\frac{1}{4}$ reducirt seien, paßt nicht zu den angegebenen Zahlen.

72

Man muß deshalb auch für das Auge an eine andere Hypothese denken, die wahrscheinlich bei den Tastnerven zutrifft. Man denke eine mit empfindenden Elementen bedeckte Fläche, deren Nerven in ein feines anastomosirendes Netz von Nervenfasern aufgelöst sind, welches einerseits mit den zahlreichen empfindenden Elementen, andererseits mit der sehr viel kleineren Zahl zum Gehirn leitenden Nervenfasern in Verbindung steht. Man setze ferner voraus, daß jede Erregung eines empfindlichen Elements sich durch das Netz hindurch den in der Nähe aus dem Netz entspringenden Nervenfasern mittheilen könnte, aber um so schwächer, je weiter entfernt diese entspringen. Unter diesen Umständen würde jeder Punkt der Fläche empfindlich sein und die Erregung verschiedener zwischen den Abgangsstellen derselben drei Nervenfasern liegenden Punkte würde dadurch verschiedenen Eindruck machen, daß die Erregung sich in verschiedenem Maasse auf diese drei Nervenfasern vertheilte, je nachdem der erregte Punkt der einen oder der andern unter ihnen näher gelegen wäre. Wenn man also sehr feine Abstufungen im Verhältniß der Erregungsstärken solcher benachbarten Nervenfasern noch erkennen könnte, würde auch eine sehr feine Unterscheidung verschiedener Lagen eines einzelnen erregten Punktes und seiner Bewegung noch möglich sein. Aber zwei Eindrücke würden zwischen denselben ableitenden Nervenfasern immer nur als ein mittlerer erscheinen können. Eine solche Einrichtung würde also eine sehr beschränkte Unterscheidung zweier gleichzeitig gereizten Stellen, und dabei doch eine feine Wahrnehmung der Fortbewegung einer gereizten Stelle geben können.

Die von TOBIAS MAYER schon beobachtete Abhängigkeit der Unterscheidung kleiner Objecte von der Lichtstärke, auf welche wir näher in § 21 eingehen werden, würde bei der zuletzt erörterten Hypothese davon abhängen können, daß die kleineren localen Unterschiede nur durch Unterschiede der Lichtstärke angezeigt wären, und wir bei schwacher Helligkeit nur gröfsere Bruchtheile von Lichtstärke unterscheiden.

Aber auch für das Sehen mit gesonderten empfindlichen Elementen, wie es wahrscheinlich in der Netzhautgrube stattfindet, können die oben erwähnten Zeichnungen und Muster des Eigenlichts der Netzhaut schwach beleuchtete und wenig ausgedehnte Bilder leicht unkenntlich machen, während gleichmäfsige schwache Belichtung einer ausgedehnteren Fläche leichter als von aufsen kommend zu erkennen wäre.

842

Die ärztlichen Bestimmungen der Sehschärfe werden in der Regel mit Buchstaben von verschiedener Gröfse ausgeführt, welche man aus gröfserer Entfernung und mit passender Unterstützung der Accommodation durch Brillengläser betrachten läfst. Als Maafs der Sehschärfe eines Auges benutzt man einen Bruch, dessen Zähler der Abstand ist, in welchem jene Buchstaben noch gelesen werden konnten, dessen Nenner dagegen die Entfernung ist, aus der sie unter einem Winkel von 5 Winkelminuten erscheinen. Die letzteren Entfernungen sind bei Buchstabenproben, welche SNELLEN veröffentlicht hat, schon angegeben.

Im Durchschnitt findet sich nach VROESOM DE HAAN diese Genauigkeit im 10. Lebensjahre gleich 1,1, im 40. gleich 1,0, im 80. gleich 0,5 und nimmt überhaupt mit steigendem Lebensalter continuirlich ab.

Nach den Beobachtungen von E. JAVAL ist aber bei Correction des Astigmatismus und guter Beleuchtung (gleich der von 500 Kerzen in 1 m Entfernung) die Genauigkeit des Sehens um $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ gröfser, als DE HAAN angab.

Veränderungen in der Netzhaut, welche bei der Reizung durch Licht eintreten. Dergleichen sind erst in neuester Zeit beobachtet worden, sie sind Bleichung des Sehroth, Bewegungen der Pigmentkörnchen in dem Pigmentepithel der Netzhaut, und elektrische Ströme.

Bleichung des Sehroth. Dafs die Aufsenglieder der Stäbchen der Frösche unter Umständen roth aussehen, war gelegentlich schon von H. MÜLLER, LEYDIG und MAX SCHULTZE beobachtet worden, von letzterem auch bei der Ratte und Eule. FR. BOLL¹ fand, dafs es hauptsächlich das Licht ist, welches dieses Pigment, das er „Sehroth“ nannte, zerstört, und dafs man dasselbe regelmäfsig beobachten kann, wenn man die Frösche vor ihrem Tode im Dunkeln aufbewahrt, und das Auge schnell, bei möglichst geringem Lichte präparirt. Die genauere physikalische und chemische Kenntnifs der Bedingungen, die hierauf Einflufs haben, und der Vorgänge dabei, verdanken wir Herrn W. KÜHNE, nach dessen Darstellung² ich hier referire. Wenn man die Präparation des Auges im Natronlicht vornimmt, ist gar keine grofse Eile nöthig. Der Sehpurpur ist in den Stäbchen fast aller Wirbelthiere, auch beim Menschen gefunden worden. In der Nähe des vorderen Randes der Netzhaut fehlt er beim Menschen, Affen und andern Thieren, bei ersteren scheinen auch die im Umkreise der Netzhautgrube spärlich zwischen den Zapfen des gelben Flecks stehenden Stäbchen purpurfrei zu sein. Die Aufsenglieder der Zapfen sind nicht gefärbt, die Netzhautgrube eines frisch, unter den nöthigen Vorsichtsmafsregeln exstirpirten menschlichen Auges fand KÜHNE durchaus farblos³.

Das rothe Pigment kann durch Lösung reiner gallensaurer Alkalisalze gelöst werden. Die Lösungen sind klar, purpurn in verschiedener Tiefe und Farbenton, am Lichte werden sie schnell roth, dann gelb, zuletzt farblos. Durch Dialyse kann das gallensaure Salz ausgewaschen werden, unter Rücklassung einer weichen purpurfarbigen Masse, die vom Lichte ebenfalls schnell gebleicht wird.

Die Lösung des Sehpurpur im Dunkeln verdünnt wird rosenroth, stärker verdünnt lila. Frischer Sehpurpur in Lösung läfst Roth und Violet durch; von $D. \frac{1}{2}$. E im Gelbgrün bis G an der Grenze des Violet ist die Absorption ziemlich gleich stark, an der erstgenannten Grenze ein wenig stärker, nach den Enden des Spectrum hin schwächer. Gelb gewordenes Sehroth absorhirt das Violet, läfst aber Grün wieder durch.

Im lebenden Auge mit Hülfe des Augenspiegels ist der Sehpurpur wegen des dunklen, vom Blut gerötheten Hintergrundes der Netzhaut nicht sichtbar.

Im Interferenzspectrum wird der Sehpurpur zuerst im Gelbgrün, am Orte der stärksten Absorption gebleicht; das durch die Bleichung veränderte Pigment (Sehgelb) wird dagegen durch die blauen und violetten Strahlen schneller als durch die weniger brechbaren farblos gemacht.

¹ F. BOLL, Berlin. Monatsber. 12. Nov. 1876. *Accad. dei Lincei*. 3. Decbr. 1876. Derselbe, *du Bois-Reymond's Archiv für Anatomie und Physiologie*. 1877. S. 4.

² Zusammengefaßt in L. HERMANN, *Handbuch der Physiologie*. Bd. III. Th. 1. *Chemische Vorgänge in der Netzhaut* von W. KÜHNE. Leipzig. 1879.

³ W. KÜHNE, *Untersuchungen des physiol. Instituts der Univers. Heidelberg*. Bd. III. Heft 1 und 2. Bd. IV. Heft 3.

Bei Mensch und Thieren fluorescirt die Stäbchenschicht ungebleicht schwach und mit bläulichem Scheine, bedeutend stärker und grünlich, nachdem sie durch Licht vollkommen entfärbt worden. Stäbchen ohne Purpur, wie sie am vorderen Rande der menschlichen Netzhaut vorkommen, lassen kaum Fluorescenz erkennen, ebenso wenig die purpurfreien Zapfen; die Netzhautgrube erscheint in gut conservirten menschlichen Netzhäuten, auch wenn ihre langen Zapfenaufsglieder noch vorhanden sind, im Focus ultravioletter Strahlen immer als dunkler Fleck, und um so auffallender dunkel, je mehr die Stäbchen der Umgebung zu fluoresciren beginnen.

Die Bleichung des Sehpurpurs geschieht auch während des Lebens durch das in das Auge fallende Licht. Ein lebender Frosch braucht nur 10 bis 15 Minuten gegen die unbedeckte Sonne gehalten zu werden, oder 30 Minuten im Freien gutem Tageslichte ausgesetzt zu sein, um den Purpur zu verlieren. Bei einem Kaninchen mit erweiterten Pupillen genügt ebenfalls ungehindertes Tageslicht in einer Viertelstunde. Wenn man die Augen nachher bei Natronlicht unter aller Vorsicht präparirt, sind die Netzhäute farblos, beziehlich gelb oder chamois, wenn das Licht schwächer war.

Die Bleichung geschieht nur so weit die Netzhaut vom Lichte getroffen wird. Wenn also das Auge unbeweglich so aufgestellt wird, daß es scharfe Bilder auf seiner Netzhaut entwirft, so erhält man eine Art photographischer Bilder auf derselben, Optogramme, wie sie ihr erster Darsteller, Herr W. KÜHNE, genannt hat.

An einigermaßen frischen, ausgeschnittenen Kaninchen- und Rindsaugen erhält man die Bilder leicht durch Exponiren auf dem Grunde eines cylindrischen, innen geschwärzten Kastens von 50 cm Durchmesser und 50 cm Höhe, der mit einer matten Glastafel bedeckt ist, auf welcher Streifen schwarzen Papiers das Object bilden. Die Belichtung erfordert 2—7 Minuten guten Himmelslichts. Die Netzhaut muß dann bei Natronlicht unter Salzwasser sogleich, oder nach 24stündigem Liegen des durchschnittenen Auges in Alaunlösung von 4 pCt. abgehoben und flottirend, oder auf ein glasirtes weißes Porcellanschälchen ausgebreitet betrachtet werden.

Auch im Auge gefesselter lebender Kaninchen mit durch Atropin erweiterter Pupille und unbeweglich gemachten Augen können in 10 Secunden bis 7 Minuten Optogramme erzeugt, und nach schneller Tödtung des Thieres beobachtet werden. Die aus der Alaunlösung genommenen Netzhäute, 8 Tage lang im Dunkeln getrocknet, haben ziemlich echt gefärbtes Sehgelb, welches am Licht kaum noch verändert wird.

Im Froschauge bildet das Haften des schwarzen Epithels an den belichteten Stellen ein Hinderniß. Am besten wird dies überwunden, wenn man die curareisirten Frösche durch Liegen im Wasser ödematös macht und dann das Lichtbild entwickelt.

Die Verfärbung des Purpurs geht im lebenden Auge durch dieselben Farbenstufen, wie im Tode, aus purpurroth wird sie reinroth, ziegelroth, orange, rosa, chamois, gelb, bevor sie ganz farblos wird.

Im lebenden Auge stellt sich der Sehpurpur im Dunkeln wieder her; bei Fröschen selbst in ausgeschnittenen Augen, die dem Blutumlauf entzogen

sind. Das geschieht im Dunkeln sogar noch an der ausgeschnittenen Netzhaut, so lange sie mit dem Pigmentepithel ihrer Rückseite in Berührung ist, auch wenn sie schon abgehoben worden und dann wieder aufgelegt ist. Die regenerative Fähigkeit des Pigmentepithels kann schnell durch Erhitzen der Augen bis 45° C. aufgehoben werden, sonst geht sie durch Absterben langsamer verloren, bei Säugern schneller als bei Fröschen. Übrigens wirkt auch das nicht pigmenthaltige Epithel albinotischer Kaninchenaugen regenerirend, wenn auch solche Versuche am Säugethieraugen wegen des schnellen Absterben des Epithels nur unvollständig gelingen.

Ein ganz entfärbtes Auge eines lebenden Frosches braucht 20 Minuten Dunkelheit, um die erste Spur der Stäbchenfärbung wieder zu gewinnen, 1 bis 2 Stunden, im Eiswasser sogar bis 9 Stunden, um den Purpur wieder herzustellen. Kaninchen brauchen 7 Minuten Dunkelheit, um den ersten Anflug, 33 bis 38 Minuten, um die volle Sättigung des Purpurs herzustellen. Darüber kann sehr scharf durch Optogramme entschieden werden, die man im lebenden Auge erzeugt, und nachher in der Dunkelheit wieder ausblenden läßt, ehe man das Thier zur Untersuchung des Auges tödtet.

Der sich regenerirende Sehpurpur zeigt nicht die gelblichen Färbungen des bleichenden Purpurs, sondern tritt gleich lila oder rosenroth hervor. Es wird also bei der Regeneration ganz gebleichten Purpurs kein Sehgelb wieder gebildet. Sehr viel schneller geht dagegen die Herstellung des Purpur von statten, wenn die Bleichung nur bis zur Bildung von Sehgelb fortgeschritten ist, also muß dies in Purpur zurückgeführt werden können. Und auch an Froschnetzhäuten, die vom Epithel getrennt, gebleicht, und dann auf das Epithel zurückgelegt sind, beobachtet man diese schnellere Regeneration durch gelb hindurch. Herr W. KÜHNE nimmt an, daß in diesen Fällen das Sehgelb, beziehlich dessen farbloses Product das Schweiß der Stäbchen noch nicht verloren gegangen sei, und das Material zur Neubildung des Purpurs gebe. Ist aber das Schweiß den Stäbchen im lebenden stark belichteten Auge verloren gegangen, so müssen die Epithelzellen neues Material liefern, welches nicht gelb wird.

Übrigens zeigen auch Lösungen von Sehpurpur schwache Regeneration, um so deutlicher, wenn die Netzhaut in die Cholatlösung mit der Epithelschicht eingebracht war. Die regenerirende Substanz aus dem Epithel scheint also in kleinen Mengen löslich zu sein.

Die Epithelzellen scheinen selbst gegen Licht empfindlich zu sein und ihre regenerirende Fähigkeit dadurch zu verlieren, wobei rothes Licht, wie es auch durch die natürlich gefärbten Stäbchen ihnen zukommt, weniger schädlich ist, als andres. Es zeigt sich dies, wenn man von dem Pigment abgezogene Netzhäute von ödematösen Curarefröschen auf die mehr oder weniger dem Lichte ausgesetzt gewesene Pigmentschicht eines andern Froschauges bringt. Rothe Belichtung zeigt sich dabei sehr wenig nachtheilig für die regenerativen Prozesse. Die Schwächung der Epithelwirkung durch Belichtung zeigt sich auch darin, daß eine gewisse Stärke rother Belichtung,

welche die Augen von Dunkelfröschen nicht bleicht, doch im Stande ist, die Wiederfärbung gebleichter Augen zu verhindern.

Da Sehpurpur in den Aufsengliedern der Zapfen bisher nie gefunden wurde, auch nicht bei der größten Schnelligkeit der Präparation und Vorsicht in der Belichtung des Auges, und die Netzhautgrube, in der wir die schärfste Localisation beim Sehen finden, keine Stäbchen und keinen Purpur enthält, außerdem ganze Thierclassen keinen Purpur in ihren Augen zeigen (Schlangen, die meisten Wirbellosen), so kann zweifellos ohne Purpur gesehen werden. Ja auch bei Thieren, welche nur Stäbchen, oder wenigstens nur purpurhaltige Elemente in ihrer Netzhaut haben, wie die Kaninchen, ist es nach KÜHNES Beobachtungen sicher, daß sie sehen, selbst wenn man sie vorher so lange dem Sonnenlichte ausgesetzt hat, daß ihre Netzhaut vollständig gebleicht sein muß.

Man wird dem Sehpurpur nur Functionen zuschreiben können, durch welche sich die peripherischen Theile der Netzhaut vor dem Centrum auszeichnen. Wir werden später sehen, daß jene für schwache Lichteindrücke, namentlich bewegter Gegenstände empfindlicher sind. Bekannt ist, daß feine Lichtpunkte, wie die Plejaden, direct fixirt, fast verschwinden, bei Fixation eines nahe gelegenen andern Sterns dagegen viel heller zum Vorschein kommen. Wir kommen in § 21 und 23 hierauf zurück.

Einwirkung des Lichts auf das Pigmentepithel. Bewegungen der Pigmentkörnchen im Innern von Zellen, wo sie in contractiles Protoplasma eingelagert sind, kommen auch außerhalb des Auges unter dem Einfluß von Licht vor. Am auffallendsten sind sie in der Haut der Chamäleonten, wo sie von E. BRÜCKE untersucht worden sind, ebenso in der Haut der Frösche. Daß die Pigmentschicht nach Belichtung der Netzhaut stärker anhaftet, war von BOLL¹ bemerkt worden, die Bewegung der Körnchen von CZERNY², ANGELUCCI³, W. KÜHNE erkannt und studirt. Ich referire wieder nach des Letzteren zusammenfassender Darstellung.

Bei Fröschen, die im Dunkeln gegessen haben, liegen die Pigmenthäufchen um die äußeren Enden der Stäbchen zusammengedrängt, so daß die Endflächen der Stäbchen, die den Pigmentzellen anliegen, unbedeckt bleiben, und Licht von der Aufsenseite der Netzhaut durch die Axe der Stäbchen nach innen durchgehen kann. Versucht man, die Netzhaut abzuziehen, so löst sie sich in der Regel von der Schicht der Pigmentzellen, indem deren zwischen die Stäbchen eindringenden Fortsätze herausgezogen werden.

Wirkt Licht ein, so verbreitet sich das Pigment sowohl hinter der Endfläche des Stäbchens, als in die Fortsätze zwischen die Aufsenglieder, theilweis sogar zwischen die Innenglieder der Stäbchen und Zapfen, und da auch gleichzeitig die Aufsenglieder der Stäbchen schwellen, so liegen sie

¹ F. BOLL, *Monatsber. d. Akad. Berlin.* 1877, Jan. 11.

² CZERNY, *Wiener Sitzungsber.* LVI.

³ A. ANGELUCCI, *Atti dell' Acad. d. Lincei.* 1877—78. Ser. III. Vol. 2. p. 1031—1055, auch im *Archiv für Anat. u. Physiol.* 1878.

fester zusammengedrängt zwischen den gefüllteren Pigmentfortsätzen. Dadurch scheint das Haften derselben bedingt zu sein. Bei niederer Temperatur tritt es weniger stark ein. Die Wanderung des Pigments beginnt, noch ehe die Bleichung des Sehpurpurs erheblich vorgeschritten ist, sie schreitet nach KÜHNE am weitesten fort in rother Beleuchtung, welche den Purpur nur langsam bleicht. ANGELUCCI fand blaues Licht wirksamer. Zum vollständigen Vordringen des Pigments genügen nach ihm 10—15 Minuten, zur Rückbildung sind $1\frac{1}{2}$ bis 2 Stunden nöthig.

Die Erscheinungen sind am vollständigsten an Fröschen zu studiren, doch zeigt sich das stärkere Haften nach Belichtung deutlich auch bei Vögeln und Säugethieren, und ist in einem geeigneten Falle von KÜHNE auch am Menschen beobachtet worden.

Dafs das Vortreten des Pigments die Regeneration des Sehpurpurs sehr erleichtern, seine Bleichung verzögern werde, scheint wahrscheinlich, dafs es Ausbreitung und Reflexion des Lichtes in der musivischen Schicht der Netzhaut beschränke, ebenfalls. Dagegen erscheint die Bewegung des Pigments, so weit wir sie bisher kennen, viel zu träge, als dafs sie dem schnellen Wechsel von Licht und Dunkel auf der Netzhaut entsprechen könnte, und die Pigmentzellen zu grofs, als dafs sie Sehelemente darstellen könnten. Zu bemerken ist freilich, dafs auch die sehr schnelle Flimmerbewegung der mit Wimperhärcchen versehenen thierischen Zellen durch Protoplasma vermittelt ist. Wenn also Lichtreiz in den Pigmentkörperchen vibrirende Bewegungen, ähnlich denen der BROWNSchen Molecularbewegung hervorbringen könnte (wofür aber bisher noch jede Beobachtung fehlt), so könnten dadurch auch wohl die zwischen den Pigmentfortsätzen liegenden Aufsenglieder der Stäbchen und Zapfen gereizt werden.

Neuerdings hat HEFF VAN GENDEREN STORT¹ gefunden, dafs sich auch die Innenglieder der Zapfen unter Lichteinwirkung zusammenziehen, kürzer und dicker werden. Die gewöhnlich gegebenen Abbildungen der Zapfen entsprechen diesem belichteten Zustand. Mäfsiges Tageslicht bringt dies in 10—15 Minuten hervor; die brechbaren Strahlen wirken schneller, doch ist schliesslich das Maximum der Contraction immer dasselbe. Die Veränderung kann in rothem Licht ohne gleichzeitiges Hervortreten des Pigments vorkommen. Übrigens wirkt nicht blos Licht, was die Netzhaut trifft, sondern reflectorisch auch solches, was das andere Auge oder die Haut des Frosches trifft.

Electricische Ströme des Sehnervenapparates.

Nach den Entdeckungen von E. DU BOIS-REYMOND erregen alle Nervenstämme des thierischen Körpers elektrische Ströme, wenn an ihnen in noch reizbarem Zustande ein Querschnitt angelegt, und ein leitender Bogen mit einem Ende an die natürliche Oberfläche des Nerven (natürlichen Längsschnitt) mit dem andern an den Querschnitt angelegt wird. Der Bogen mufs

¹ VAN GENDEREN STORT, *Akad. zu Amsterdam*. Sitzung 28. Juni 1884.

so eingerichtet sein, daß in ihm keine selbständige elektromotorische Kraft ihren Sitz hat, namentlich nicht an den Stellen, wo die feuchten Leiter, die zunächst den thierischen Theilen anliegen, an die metallischen Elektroden stoßen, die das Ende des Galvanometerdrahtes bilden. Der Strom geht im ungereizten Zustande des Nerven vom Längsschnitt durch den Bogen zum Querschnitt. Diesen Strom bezeichnet E. DU BOIS REYMOND als den ruhenden Nervenstrom. Er verschwindet, wenn der Nerv abstirbt.

Um die galvanische Polarisation bei solchen Versuchen möglichst zu vermeiden, werden nach des genannten Autors neueren Vorschriften¹ die Enden der Multiplicatorleitung mit zwei kleinen amalgamirten Zinkplättchen versehen, die in Glasröhren mit concentrirter Lösung von Zinksulphat gefüllt stecken, an ihrem unteren Ende verengert und durch Pfröpfe von plastischem Thon geschlossen sind. Der Thon ist mit 0,75 bis 2 procentiger Kochsalzlösung durchtränkt, weil dies eine Flüssigkeit ist, deren Berührung den Lebenseigenschaften der thierischen Gewebe sehr wenig nachtheilig ist. Bei den Versuchen über Ströme der Netzhaut hat neuerdings Herr W. KÜHNE noch feine Membranstücke der Froschlunge über den Thon gebreitet.

Wenn der Nerv, von dessen Querschnitt der Strom abgeleitet wird, gereizt wird, sei es durch eine Reihe hin- und hergehender elektrischer Inductionsströme, sei es in anderer Weise, so tritt eine Verminderung des Stromes, beziehlich Umkehr desselben ein, die negative Schwankung des Nervenstroms. Dieselbe schwindet ebenfalls beim Absterben des Nerven, pflanzt sich im lebenden Nerven mit derselben Geschwindigkeit fort, wie die Reizung, und zwar nach aufwärts, wie nach abwärts, und ist nach allem, was wir darüber wissen, die stete Begleiterin des Eintritts der Reizung. Beim Aufhören der Reizung schwindet sie wieder ziemlich schnell, indem der Strom des ruhenden Nerven wieder eintritt.

Die beschriebenen Erscheinungen sind nach den Untersuchungen von Herrn W. KÜHNE auch am Stamm des Sehnerven zu beobachten, ganz in derselben Weise wie an den motorischen Nerven, und es ist ihm sogar gelungen die negative Schwankung am Sehnerven des Frosches bei Reizung der Netzhaut durch Licht nachzuweisen. Der Versuch wird nur schwierig durch die Kleinheit der Objecte und die Nothwendigkeit die subtile Präparation bei schwacher Beleuchtung mit rothem Licht oder Natronlicht in einem übrigens dunklen Raum schnell zu vollenden, da eines der zwischen Netzhaut und Sehnerven eingeschalteten Gebilde verhältnißmäßig schnell seine Reizbarkeit verliert, während die genannten Organe selbst ziemlich ausdauernd sind.

Die Sehnerven größerer Fische (Barsch, Hecht) lassen sich bequemer präpariren; aber die Reizbarkeit der Augen ist nicht so ausdauernd, wie

¹ E. DU BOIS-REYMOND, *Beschreibung einiger Vorrichtungen und Versuchsweisen zu elektrophysiologischen Zwecken*. Abhandl. d. Akad. zu Berlin. 1862. Phys. Cl. S. 65; auch in *Gesammelte Abhandlungen zur Muskel- u. Nervenphysik*. Bd. I. Berlin 1875. S. 145—168.

die der Frösche, deren Sehnerven bei den größten Exemplaren nur 4 bis 4,5 mm lang ist. Bei letztern ist es Herr KÜHNE gelungen, indem er die Elektroden nur am Längsschnitt und Querschnitt des Sehnerven verlegte, eine allerdings kleine negative Schwankung bei Einwirkung des Lichts auf den Bulbus von der Hornhaut her zu beobachten. Der einzige Unterschied der sich zeigte war eine meist noch bei Unterbrechung der Beleuchtung eintretende kurze Verstärkung der negativen Schwankung, nach welcher erst der Ruhezustand wieder eintrat. Herr KÜHNE bezeichnet dies als die negative Schlußschwankung. Sie schwindet im Laufe des Absterbens eher als die gewöhnliche negative Schwankung, die wir von den Muskelnerven kennen.

Auffallendere Abweichungen von dem Gesetze der Muskelnerven zeigt die Netzhaut, der auch in ihrer elektrischen Wirksamkeit eine ungemein feine Empfindlichkeit zukommt, welche sich sogar im isolirten Zustande als ziemlich ausdauernd erweist.

Der Ruhestrom der Netzhaut, wenn man die Elektroden an die entgegengesetzten Seiten der Membran anlegt, geht von der vorderen Seite, wo die Sehnervenfasern liegen, durch den leitenden Bogen zur Stäbchenseite. Er hat also die Richtung des Stromes der ruhenden motorischen Nerven, wenn wir die Ausbreitung der Sehnervenfasern als die hier wirksame Faserschicht betrachten, die hinteren Schichten der Netzhaut als deren natürliche Querschnitte.

Betrachten wir diese Richtung des Ruhestromes als die positive Richtung der Netzhautströme, so giebt plötzliche Belichtung der Netzhaut des Frosches, sei es mit blauem, grünem, gelbem, rothem oder weißem Lichte, erst einen ganz kurzen Ausschlag in positivem Sinne, dann eine negative Schwankung, welche eine verhältnißmäßig constante Ablenkung des Galvanometers hervorbringt, die nur langsam bei gleichmäßig andauernder Belichtung sich dem ursprünglichen Ruhezustande wieder nähert. Diese negative Schwankung ist nicht nothwendig absolut negativ, d. h. die Stromstärke geht nach Ablauf des anfänglichen positiven Ausschlags allerdings zurück, aber sie bleibt dann gerade bei den frischesten Präparaten oft bei einem höher positiven Werthe als dem des Ruhestromes stehen. Bei abnehmender Reizbarkeit schwindet der positive Vorschlag und tritt die negative Schwankung ohne einen solchen ein. Dasselbe geschieht, wenn die Thiere vor dem Versuch im Hellen gesessen haben.

Wenn man die Beleuchtung plötzlich unterbricht, so tritt erst wieder ein kurzer positiver Ausschlag ein, ehe die Netzhaut auf den Ruhestrom zurückkehrt. Auch dieser positive Nachschlag fehlt den Muskelnerven und schwindet bei abnehmender Reizbarkeit der Netzhaut in der Regel erst später, als der positive Vorschlag bei beginnender Reizung.

An Kaninchenaugen haben HOLMGREN wie KÜHNE nur das Stadium der einfachen negativen Schwankung ohne positiven Vorschlag gesehen; wohl aber kam der Nachschlag vor.

Das Pigmentepithel der Netzhaut scheint keine elektromotorische Kraft zu haben. Die Netzhaut mit Pigment bedeckt wirkt ebenso, wie ohne dasselbe, das Pigment ohne Netzhaut auf der Aderhaut haftend, zeigt keinerlei elektrische Änderung bei eintretender Beleuchtung.

Die Lichtempfindlichkeit der isolirten Netzhaut kann noch erstaunlich groß sein. Herr KÜHNE hat negative Schwankung durch eine glimmende Cigarre 50 cm entfernt erhalten, ebenso durch das von seinem Gesicht zurückgeworfene Licht einer Kerze, ja sogar durch das Phosphoreszenzlicht der jetzt käuflichen Leuchtfarbe.

Spuren der Lichtempfindlichkeit fanden sich bis 24 Stunden nach der Isolation der Netzhaut des Frosches, wenn sie in der feuchten Kammer und im Dunkeln aufbewahrt war.

Der ganze Bulbus zeigt bei Fröschen auf Lichteinwirkung im frischesten Zustande nur das Auftreten eines andauernden positiven Stroms, dem bei Aufhören der Belichtung der positive Nachschlag und Rückgang in die Ruhelage folgt. Erst beim Absterben oder nach Mißhandlung fängt die negative Schwankung an sich zu zeigen.

Im Innern des ausgeschnittenen Bulbus verliert die Netzhaut ihre Erregbarkeit, namentlich schnell auch durch Belichtung, während sie isolirt, in Berührung mit dem Sauerstoff der Luft, sich wieder erholen kann.

Die Bulbusströme bleiben unverändert, auch wenn man die ganze vordere Hälfte der Augenkapsel mit der Iris wegnimmt, ja selbst die Zonula ausschneidet und die Linse vorsichtig entfernt. Erst wenn man an der Zonula zerrt, etwas Glaskörper abfließen läßt, oder hineinbläst, tritt die negative Schwankung der Netzhautströme hervor. Diese scheint deshalb von einer Störung des natürlichen Zusammenhanges der Netzhaut herzuführen; Herr KÜHNE vermuthet eine Störung ihrer Verbindung mit dem regenerirenden Pigmentepithel.

Eine einigermaßen ähnliche Erscheinung kommt beim gewöhnlichen Strome des ruhenden Muskels vor, der von den Sehnenflächen aus, die nach E. DU BOIS-REYMOND den natürlichen Querschnitt des Muskels bilden, verhältnißmäßig schwach elektromotorisch gegen den Längsschnitt wirkt, ehe der Querschnitt in irgend einer Weise verletzt, und in seinem Absterben beschleunigt ist. Der genannte Autor schließt daraus, daß in den Enden der Muskelfasern unter der Sehnenfläche eine eigenthümlich wirkende Schicht von elektromotorisch wirksamen Molekeln liege, die er die *parelektronische* Schicht nennt, die, so lange sie kräftig wirksam ist, die übrigen elektrischen Anordnungen des ruhenden Muskels nach außen hin nahezu unwirksam macht. Diese macht aber die negative Stromschwankung bei der Reizung nicht aus.

In der Netzhaut müßte die leicht zerstörbare Schicht die Schwankung bei der Reizung mitmachen, so daß sie die negative Schwankung der dauerhafteren Elemente nach außen hin verdeckt, so lange sie kräftig ist.

Bei den Fischen ist die Schwankung auf Belichtung von Anfang negativ, und sogar im Anfang am stärksten, so daß Herr KÜHNE in seinen Figuren einen stärker negativen Vorschlag anzeigt.

Wenn die bei diesen Erscheinungen sich zeigenden entgegengesetzt gerichteten Wirkungen nicht ganz gleich schnell eintreten und aufhören, könnten sich daraus auch die Vorschläge und Nachschläge bei Eintritt und Aufhören der Reizung erklären, die von den Erscheinungen an den Nervenstämmen abweichen. Zur Zeit ist es noch nicht möglich in einem Gebilde von so verwickeltem Bau, wie es die Netzhaut ist, in der überdies verschiedene nach verschiedenen Richtungen hin elektromotorisch wirkende Theile von verschiedenem Grade der Verletzbarkeit vorkommen, den Einfluß, den die einzelnen haben, von einander zu sondern. Zunächst aber ist die wichtige Thatsache festgestellt, daß Änderungen in der elektromotorischen Wirksamkeit auf Reizung im Sehnerven und in der Netzhaut ebensogut, wie in den Nervenstämmen und Muskeln erfolgen. Diese Vorgänge, sowie die beobachteten chemischen Änderungen und Bewegungen sichtbarer Theilchen zeigen, daß auch in der Netzhaut durch das Licht zunächst Wirkungen auf die ponderablen Theile derselben hervorgebracht werden, ähnlich denen, die in den gereizten Muskeln und Nervenstämmen vorgehen. Da elektrische Ströme die Zersetzungen hervorzurufen und die Ionen in ihrem Sinne wandern zu lassen, so ist auch von dieser Seite her der Eintritt chemischer Bewegungen während der Lichtwirkung constatirt.

Die Erscheinungen des blinden Flecks wurden von MARIOTTE entdeckt, der mit der Absicht an diese Versuche ging, zu untersuchen, welcher Art das Sehen auf der Eintrittsstelle des Sehnerven sei. Der Versuch erregte damals solches Aufsehen, daß er ihn 1668 vor dem Könige von England wiederholte. PICARD gab dem Versuche eine Form, bei der man beide Augen offen halten kann, und doch eine Sache nicht sieht. Zu dem Ende befestigte er an einer Wand ein Papier, stellte sich in die Entfernung von etwa 10 Fufs davon, und ließ die Augen nach dem nah vor das Gesicht gehaltenen Finger convergiren, so daß in beiden Augen das Bild auf den blinden Fleck fällt, und deshalb gar nicht gesehen wird, während es sonst unter diesen Umständen doppelt erscheint. MARIOTTE überbot ihn, indem er bei zwei offenen Augen zwei Objecte verschwinden ließ. Man befestigt an der Wand zwei Papiere gleich hoch, drei Fufs von einander, stellt sich 12 bis 13 Fufs von der Wand entfernt, hält den Daumen etwa 8 Zoll weit vom Auge, so daß er dem rechten Auge das linke Papier, dem linken Auge das rechte Papier verdeckt, und fixirt den Daumen, dann verschwinden auch die beiden Papiere, weil sie in demjenigen Auge, dem sie nicht verdeckt sind, auf den blinden Fleck fallen. LE CAT versuchte auch schon die Größe des blinden Flecks auf der Netzhaut zu berechnen, wobei er ihn freilich viel zu klein, nämlich $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{4}$ Linie fand. DANIEL BERNOULLI zeichnete seine Form auf den Fußboden, indem er eine Münze auf den Fußboden eines Zimmers legte, ein Pendel nahm, dessen eines Ende er an das rechte Auge hielt, und das andere den Boden fast berühren ließ. Das linke Auge verschloß er, mit dem rechten sah er am Pendel herunter, und suchte nun die Stellen auf dem Fußboden auf, wo die Münze anfang unsichtbar zu werden; er fand eine fast elliptische Figur. Die Berechnung der Größe des blinden Flecks auf der Netzhaut lieferte ihm aber wegen ungenügender Kenntniß der optischen Constanten des Auges einen zu hohen Betrag, nämlich $\frac{1}{7}$ des Augendurchmessers.

Es knüpft sich an die Entdeckung von MARIOTTE sogleich eine weitläufige Discussion über eine Frage, die bei den damaligen geringen Kenntnissen der Nervenleistungen natürlich gleich entstehen mußte, nämlich die Frage, ob denn überhaupt die Netzhaut es sei, wie KEPLER und SCHEINER vorausgesetzt hatten, welche das Licht empfände. MARIOTTE schloß, daß es vielmehr die Aderhaut sei, denn diese fehlt im blinden Fleck, während die Fasern der Netzhaut dort gerade recht dicht zusammenliegen. In der That schlossen sich eine Reihe namhafter Optiker der Meinung von MARIOTTE an, wie MERY, LE CAT, MICHELL, unter den Neueren D. BREWSTER. Es wurde namentlich hervorgehoben, daß die Netzhaut das Licht wegen ihrer Durchsichtigkeit nicht zurückhalte, daß sie zu dick sei, um ein scharfes Bild zu geben; auch suchte LE CAT nachzuweisen, daß die Aderhaut eine Fortsetzung der *Pia Mater* des Gehirns sei. Die Lichtempfindlichkeit der Netzhaut wurde vertheidigt, durch PECQUET, DE LA HIRE, HALLER, PORTERFIELD, PERRAULT, ZINN. Der Hauptgrund für die Meinung dieser Männer war eigentlich immer nur, daß die Netzhaut die anatomische Entfaltung eines mächtigen Nerven ist, während die Aderhaut nur wenige dünne Nerven enthält. Was sie sonst von Gründen beibringen konnten, um ihre Meinung zu stützen und die Schwierigkeiten des MARIOTTE'schen Versuchs zu beseitigen, war nicht viel werth. PORTERFIELD nahm an, daß der Sehnerv, an seiner Eintrittsstelle noch von den schlingen Nervencheiden umgeben und durchzogen, nicht weich und zart genug sei, um ein so feines Agens, wie das Licht sei, zu empfinden. HALLER hebt ebenfalls hervor, daß an der Eintrittsstelle des Sehnerven keine eigentliche Netzhaut vorhanden sei, sondern eine weiße cellulöse und poröse Haut, die zum Sehen untauglich sein könne, ohne daß die Netzhaut es sei. Andere, wie RUDOLPHI, anfangs auch COCCIUS, glaubten, daß die unempfindliche Stelle nur den Centralgefäßen der Sehnerven entspräche, was aber widerlegt wurde, sobald man die optischen Constanten des Auges besser kennen lernte, z. B. durch HANNOVER, E. H. WEBER, A. FICK und P. DU BOIS-REYMOND. J. MÜLLER glaubte die Erscheinung durch die Annahme erklären zu können, daß die MARIOTTE'sche Erscheinung analog sei dem Verschwinden der Bilder gefärbter Objecte, die auf weißem Grunde liegen auf den Seitentheilen der Netzhaut, worauf wir in § 23 zurückkommen werden. Es geschieht dies durch Ermüdung der Netzhaut. Auf der Eintrittsstelle des Sehnerven, meinte er, geschehe es nur sehr viel schneller und plötzlich. Dagegen ist einzuwenden, daß ein helles Object, welches in dem ungesehenen Raume des Gesichtsfeldes plötzlich auftaucht, gar nicht wahrgenommen wird, also auch die Sehenssubstanz gar nicht reizt, also auch nicht ermüden kann.

Die oben gegebenen nothwendigen Folgerungen aus den Thatfachen stellte REFRAUD im Jahre 1851 auf, und dehnte den Schluß, daß das objective Licht unfähig sei, die Sehnervenfasern zu afficiren, auch gleich auf die an der vorderen Fläche der Netzhaut verlaufenden Fasern aus. Da ein anatomischer Zusammenhang der Stäbchenschicht mit den Nerven-elementen der Netzhaut damals noch nicht bekannt war, so blieb nur die Annahme, daß die Nervenzellen oder Körner der Netzhaut die lichtempfindenden Elemente seien. Bald darauf entdeckte H. MÜLLER die Radialfasern der Netzhaut, welche die Zapfen und Stäbchen mit den Elementen verbinden, KOELLIKER wies dieselben an Menschen nach, und beide schlossen daran die Vermuthung, daß die Elemente der Stäbchenschicht die lichtempfindlichen seien, für welche schließlich von H. MÜLLER auch der physiologische Beweis gegeben wurde. Dieselbe Ansicht war übrigens, freilich ohne genügende Kenntnifs der mikroskopischen Elemente, früher von TREVIRANUS aufgestellt worden, der die lichtempfindlichen Elemente Nervenpapillen nannte.

Die Genauigkeit des Sehens hat man viel untersucht seit der Zeit, wo man anfing Teleskope zu bauen. HOOKE wendete gleich zuerst das richtige Princip an, indem er untersuchte, bei welchem Winkelabstande Doppelsterne als solche erkannt werden könnten. Die meisten folgenden Beobachter dagegen suchten nach der kleinsten GröÙe eines schwarzen Flecks, der noch erkannt werden könnte, und erhielten natürlich sehr abweichende Resultate, so HEVELIUS, SMITH, JURIN, TOB. MAYER, COURTIVRON, MUNCKE, TREVIRANUS. Den Einfluß der Erleuchtung bei diesen Versuchen erkannten JURIN und MAYER. Ersterer glaubte die Thatfache, daß zwei Striche von einander zu trennen, erst

bei einem größeren Sehwinkel möglich sei, als jeden einzelnen von ihnen zu erkennen, daraus zu erklären, daß das Auge zitterte und deshalb die Bilder zweier Stäbe sich deckten. Die Gründe, warum nur die Trennung distincter Objecte ein constantes Maafs geben kann, entwickelte VOLKMANN, und nach dieser Methode wurden Messungen von E. H. WEBER, BERGMANN, MARIÉ DAVY und die oben angeführten ausgeführt.

Für die Entdeckung des Sehpurpurs sind im Text schon die hauptsächlichsten Litteraturnachweise gegeben. Die übrigen werden in der vollständigen Litteraturübersicht am Schlusse des Werkes folgen.

Die Reizungströme der Netzhaut wurden von HOLMGREN¹ 1870 gefunden, unabhängig von ihm (1874) auch von den Herrn DEWAR und M'KENDRICK². Die feinere Ausarbeitung dieses Gegenstandes, welche erst unter Berücksichtigung der mittels des Sehpurpurs constatirten grossen Lichtempfindlichkeit der Netzhaut, und unter Anwendung der dabei gefundenen Methoden sie unversehrt zu halten, möglich wurde, verdanken wir hauptsächlich Herrn W. KÜHNE³.

§ 19. Die einfachen Farben.

Wir gehen jetzt über zur Untersuchung der Empfindungen, welche verschiedenartiges Licht im Sehnervenapparat erregt. Es giebt, wie wir schon im § 8 auseinandergesetzt haben, Licht von verschiedener Schwingungsdauer, welches sich ausserdem in physikalischer Beziehung durch seine Wellenlänge, seine Brechbarkeit und Absorptionsfähigkeit in gefärbten Mitteln unterscheidet. In physiologischer Beziehung unterscheidet sich Licht von verschiedener Schwingungsdauer im Allgemeinen dadurch, daß es im Auge die Empfindung verschiedener Farben erregt.

Fast alle Lichtquellen, welche wir kennen, entsenden gleichzeitig Licht verschiedener Schwingungsdauer. Um aus solchem gemischten Lichte einfaches Licht, d. h. Licht von einem einzigen Werthe der Schwingungsdauer auszusondern, ist die Brechung in durchsichtigen Prismen das vollkommenste Mittel. Wenn von einer entfernten Lichtquelle *a* (*Fig. 123*) einfaches blaues Licht durch ein Prisma *P* in das Auge des Beobachters *O* fällt, so werden die Lichtstrahlen im Prisma gebrochen, von ihrem früheren Wege abgelenkt, und der Beobachter erblickt daher das Bild der Lichtquelle verschoben in der Richtung, nach welcher der brechende Winkel *p* des Prisma gekehrt ist, etwa bei *b*, natürlich in der Farbe des Lichts,

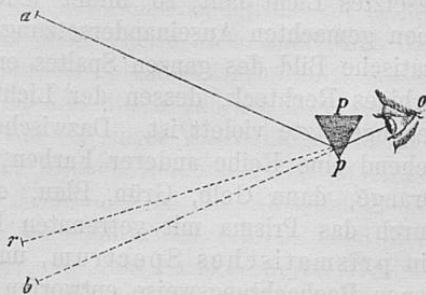


Fig. 123.

¹ F. HOLMGREN, *Upsala Läkareförenings Förhandlingar*. Vol. VI. 1870—71. No. 5. p. 419. Auch in *Untersuchungen aus dem Physiol. Inst. d. Univ. Heidelberg*. Bd. III. S. 278.

² DEWAR und M'KENDRICK, *on the Physiological action of light*. *Transact. of the R. Society of Edinburgh*. Vol. XXVII. p. 141.

³ W. KÜHNE, *Untersuchungen aus dem Physiologischen Institute d. Univ. Heidelberg*. Bd. III. S. 327—377. (1880.) Bd. IV. S. 1 bis 106 (1881).

welches von a ausgegangen ist, hier also blau. Fällt einfaches Licht anderer Brechbarkeit, etwa rothes, von a durch das Prisma in das Auge des Beobachters, so sieht er wieder ein Bild der Lichtquelle, jetzt roth, und weniger weit verschoben, als das blaue war, etwa bei r . Geht gleichzeitig rothes und blaues Licht von a aus, so sieht der Beobachter auch gleichzeitig das rothe Bild bei r und das blaue Bild bei b ; und geht endlich weißes Licht von a aus, welches sowohl rothes, als blaues, als auch Licht von allen anderen Stufen der Brechbarkeit enthält, so entspricht jeder einzelnen Farbe ein besonderes Bild der Lichtquelle, und zwar so, daß die Bilder der zwischen roth und blau liegenden Farben sich nach der Ordnung ihrer Brechbarkeit zwischen r und b einreihen. Sind sehr viele solche farbige Bilder zwischen r und b eingeschoben, und hat jedes eine gewisse Breite, die der Breite des leuchtenden Objects bei a nahehin gleich ist, so wird jedes einzelne farbige Bild einen Theil seiner Nachbarbilder verdecken. Auch ist leicht einzusehen, daß es desto weniger die Nachbarbilder decken und sich mit ihnen vermischen wird, je schmaler das leuchtende Object ist, und je schmaler daher auch jedes einzelne farbige Bild wird, verglichen mit der ganzen Länge des Spectrum rb . Wenn in dem von der Lichtquelle ausgehenden Lichte Strahlen von allen continuirlich in einander übergehenden Stufen der Brechbarkeit vorkommen, kann man zwar nicht vollständig verhindern, daß die nächst benachbarten Bilder der Lichtquelle sich decken, aber man kann die Lichtquelle und ihre Bilder so schmal machen, daß sich nur noch solche Bilder decken, welche Farben angehören, für welche die Unterschiede der Brechbarkeit verschwindend klein sind.

Wenn die Lichtquelle ein sehr feiner Spalt ist, durch den zusammengesetztes Licht fällt, so bildet jeder einzelne Punkt des Spaltes nach der eben gemachten Auseinandersetzung ein linienförmiges Spectrum. Das prismatische Bild des ganzen Spaltes erscheint demnach dem Beobachter als ein farbiges Rechteck, dessen der Lichtquelle zugekehrtes Ende roth, das entgegengesetzte violett ist. Dazwischen finden sich allmählig in einander übergehend eine Reihe anderer Farben, nämlich, vom Roth anfangend, zunächst Orange, dann Gelb, Grün, Blau, endlich Violett. Man nennt ein solches durch das Prisma mit getrennten Farben entworfenes Bild einer Lichtlinie ein prismatisches Spectrum, und zwar ist es, nach der bisher beschriebenen Beobachtungsweise entworfen, ein subjectives Spectrum, da es nur einem virtuellen Bilde der Lichtquelle entspricht. Man kann es aber auch zu einem reellen Bilde machen, indem man hinter das Prisma da, wo sich bisher das Auge des Beobachters befand, eine Sammellinse aufstellt, welche die durch das Prisma gebrochenen Lichtstrahlen zu einem reellen Bilde von rb in oder hinter ihrem Brennpunkte vereinigt. So erhält man ein objektives Spectrum. Ein solches wird schon bei der ersten Beobachtungsweise auf der Netzhaut des Beobachters entworfen. Wenn das von der Lichtquelle ausgehende Licht alle continuirlich in einander übergehenden Grade der Brechbarkeit darbietet, ist, wie wir gesehen haben, auch das

Spectrum eine continuirlich beleuchtete Fläche. Wenn aber von der Lichtquelle nur Licht von bestimmten einzelnen Werthen der Brechbarkeit ausgeht, so kann das Spectrum auch nur so viele einzelne verschiedenfarbige Bilder der Lichtquelle enthalten, als Grade der Brechbarkeit unter den Strahlen vorkommen, und man wird dann die Lichtquelle und ihre Bilder so schmal machen können, daß das jeder Farbe angehörige Bild von seinen Nachbarn durch einen dunklen Zwischenraum getrennt ist. So haben wir vorher angenommen, daß nur rothes und blaues Licht in dem Lichte des Punktes *a* *Fig. 123* vorkäme, und gesehen, daß dann bei *b* ein blaues Bild, bei *r* ein rothes erscheint, beide durch den dunklen Zwischenraum *br* von einander getrennt. Dasselbe ist natürlich der Fall, wenn nicht zwei, sondern zehn oder hundert oder tausend verschiedene Arten einfachen Lichtes in dem Lichte von *a* vorkommen.

Von dieser Art ist die Zusammensetzung des Sonnenlichts. Wenn wir ein möglichst vollkommenes Spectrum des Sonnenlichts herstellen, finden wir es von einer großer Zahl dunkler Linien getheilt, den FRAUNHOFER'schen Linien, aus deren Vorhandensein wir schliessen müssen, daß gewisse Stufen der Brechbarkeit unter den Strahlen des Sonnenlichts nicht vorkommen. Je vollkommener die Trennung der Farben im Spectrum ist, desto größer ist auch die Zahl der dunkeln Linien. Die stärksten von ihnen sind von FRAUNHOFER und STOKES mit Buchstaben bezeichnet worden, weil sie ein außerordentlich sicheres und bequemes Mittel abgeben, im Spectrum Strahlen von genau bestimmten Werthen der Schwingungsdauer und Brechbarkeit immer wieder zu finden, und wir werden uns deshalb im Folgenden auch dieser Bezeichnung bedienen, so oft es darauf ankommt, die Art einer Farbe genau zu bestimmen. Auf *Taf. II, Fig. 2* ist das Sonnenspectrum mit seinen dunkeln Linien abgebildet. Da die einzelnen Theile des Spectrums bei Prismen aus verschiedenen Stoffen verschiedenes Längenverhältniß haben, und wieder ein ganz anderes Verhältniß in den durch Diffraction erzeugten Spectren, wo die Vertheilung der Farben nur von ihrer Wellenlänge abhängt, so ist die Vertheilung der Farben in einer solchen Zeichnung bis zu einem gewissen Grade willkürlich. In unserer Abbildung ist die Anordnung, wie es für die physiologischen Betrachtungen am wichtigsten schien, nach dem Principe der musikalischen Scale getroffen, so daß Farben, deren Wellenlängen sich zu einander verhalten wie die zweier um ein halbes Tonintervall verschiedener Töne, überall gleich weit von einander entfernt sind. Mathematisch ausgedrückt, entsprechen also gleiche Distanzen in der Zeichnung gleichen Unterschieden der Logarithmen der Schwingungsdauer. Die Ziffern auf der einen Seite bezeichnen die Anzahl der halben Tonintervalle, die Buchstaben auf der anderen bezeichnen die Namen der stärkeren dunkeln Linien, wie sie von FRAUNHOFER und STOKES gewählt worden sind.

Da in der Benennung der verschiedenen Farben einige Unsicherheit herrscht, wollen wir für das vorliegende Werk folgendes darüber festsetzen:

Roth nenne ich die Farbe des weniger brechbaren Endes des Spectrum, welche von der äußersten Grenze desselben bis etwa zur Linie *C* keine merkliche Änderung des Farbentons zeigt. Der Repräsentant unter den Farbstoffen ist etwa der Zinnober. Von ihm zu unterscheiden ist das Purpurroth, welches in seinen weißlicheren Abstufungen Rosenroth wird und dem reinen Roth gegenüber bläulich erscheint. Dieser Farbenton, für dessen gesättigteste Abstufung wir den Namen Purpur bewahren wollen, während die röthlicheren Abstufungen desselben Karminroth heißen mögen, kommt im Spectrum nicht vor, sondern kann nur durch Mischung seiner äußersten Farben, des Roth und Violett, hervorgebracht werden.¹

Von der Linie *C* bis zur Linie *D* geht das Roth über durch Orange, d. h. Gelbroth mit überwiegendem Roth, in Goldgelb, d. h. Gelbroth mit überwiegendem Gelb. Ersterem entspricht unter den metallischen Farbstoffen etwa die Mennige, letzterem die Bleiglätte (Bleioxyd).

Von *D* bis zur Linie *b* hin finden wir sehr schnelle Farbenübergänge. Zunächst folgt ein sehr schmaler Strich reinen Gelbs, welcher etwa dreimal so weit von *E* als von *D* absteht. Dann folgt Grüngelb und zwischen *E* und *b* reines Grün. Für das reine Gelb und Grün haben wir zwei sehr gute Repräsentanten unter den Malerfarben, nämlich für ersteres das fein niedergeschlagene, hellere chromsaure Bleioxyd (Chromgelb) und für das letztere das arsenigsaure Kupferoxyd (SCHEEL'sches Grün).

Zwischen *E* und *F* geht das Grün durch Blaugrün in Blau über, zwischen *F* und *G* folgen verschiedene Töne des Blau. Wegen der verhältnißmäßig grossen Breite der blauen Töne in dem durch Brechung erzeugten Spectrum des Sonnenlichts hat NEWTON hier verschiedene Namen angewendet, englisch: *blue* und *indico*, lateinisch der Reihe nach *thalassinum*, *cyaneum*, *coeruleum*, *indicum*, worauf dann Violett, *violaceum*, folgt. Wir können den Namen Indigblau beibehalten für die nach *G* hinliegenden zwei Drittheile des Raumes *FG*. Für das weniger brechbare Blau des ersten Drittel von *FG* hat man bisher meist einfach den Namen Blau angewendet, auch wohl unrichtig Himmelblau, aber die Ähnlichkeit mit dem Himmelblau bekommt dieses Blau in einem Spectrum von bequemer Helligkeit nur durch die gröfsere Lichtstärke, während das Indigblau, dem der Farbenton des blauen Himmels angehört, in einem solchen Spectrum für diesen Vergleich zu dunkel erscheint. Da nun der gemeine Sprachgebrauch den reinen Himmel als den Hauptrepräsentanten des Blau betrachtet, und ihm den Namen des Blau bewahrt, wenn er es mit weniger brechbarem Blau vergleicht und letzteres bei einem solchen Vergleiche als grünlich bezeichnet, so können wir im wissenschaftlichen Sprachgebrauche nicht wohl das letztere einfach als Blau im Gegensatz zum Indigblau bezeichnen, und ich habe deshalb den Namen Cyanblau dafür gewählt mit Rücksicht auf die Bezeichnung *cyaneum* bei NEWTON für die grünlich blauen Töne des Spectrum. Zur Bezeichnung

¹ In den Schriften von Herrn E. HERING und seinen Anhängern ist unter Roth immer Purpurroth verstanden.

des Farbentons allein würde auch der Namen Wasserblau gut passen, denn grosse Massen sehr reinen Wassers (Genfer See, Gletschereis) zeigen in ihrem Innern in der That diese Farbe. Hat man z. B. längere Zeit in das Wasser des Genfer Sees an einem hellen Tage geblickt, und sieht zum Himmel auf, so erscheint dieser im Contrast violett, oder selbst rosaroth. Da indessen die Farbe der gewöhnlich gesehenen Wassermassen sehr weifslich ist, mit Ausnahme etwa tiefer Eisspalten, so ziehe ich vor, den Namen Wasserblau nur für die weifslichen Abstufungen des Cyanblau anzuwenden. Unter den Farbstoffen entspricht das Berliner Blau (Eisencyanürcyanid) dem Cyanblau, das Ultramarin dem Indigblau.

Jenseits der Linie *G* bis nach *H* oder *L* folgt Violett (Farbe der Veilchen); es ist von manchen Schriftstellern auch Purpur genannt worden. Violett und Purpur bilden den Übergang der Farbentöne von Blau und Roth. Wir wollen, wie gesagt, den Namen Purpur nur auf die röthlicheren Farbentöne dieses Übergangs anwenden, welche im Spectrum nicht vorkommen.

Schliesslich folgt als Ende des Spectrum auf der brechbarsten Seite das Ultraviolett. Dieser Theil von *L* bis zum Ende bei *R* kann nur gesehen werden, wenn die bisher beschriebenen helleren Theile des Spectrum sehr sorgfältig abgeblendet sind. Die Anwesenheit von Lichtstrahlen besonderer Art an dieser Stelle lernte man zuerst durch die chemischen Wirkungen derselben kennen, und nannte sie deshalb unsichtbare chemische Strahlen. In Wahrheit sind diese Strahlen aber nicht unsichtbar, wenn sie auch allerdings das Auge verhältnissmässig viel schwächer afficiren, als die Strahlen des mittleren leuchtenden Theils des Spectrum zwischen den Linien *B* und *H*. Sobald man die letzteren durch geeignete Apparate vollständig entfernt, sind die ultravioletten Strahlen dem Auge ohne Schwierigkeit sichtbar, und zwar bis zum Ende des Sonnenspectrum. Ihre Farbe ist bei geringer Lichtintensität indigblau, bei grösserer Intensität bläulich grau. Am leichtesten nachgewiesen wird die Anwesenheit dieser Strahlen durch das Phänomen der Fluorescenz. Beleuchtet man nämlich mit ultraviolettem Lichte eine klare Lösung von saurem schwefelsaurem Chinin, so geht von allen Punkten dieser Lösung, welche von dem ultravioletten Lichte getroffen werden, weifs bläuliches Licht nach allen Richtungen aus, welches etwa wie ein leuchtender Nebel erscheint, der die Lösung durchzieht. Untersucht man dies weifs bläuliche Licht mit dem Prisma, so erkennt man, dafs es nicht ultraviolettes Licht ist, sondern gemischtes weifsliches Licht mittlerer Brechbarkeit. Am einfachsten kann man die Erscheinung deshalb so beschreiben: So lange die ultravioletten Strahlen auf die Chininlösung wirken, ist diese selbstleuchtend, und sendet gemischtes weifslich blaues Licht von mittlerer Brechbarkeit aus. Da nun das Auge für Licht der letzteren Art ausserordentlich viel empfindlicher ist, als für ultraviolettes Licht, so nimmt es bei gewissen Graden der Lichtstärke von letzterem nicht das geringste wahr, bis es eine fluorescirende Substanz trifft, und auf dieser wird dann das bisher unsichtbare Licht sichtbar. Zu den Körpern, welche das Phänomen der Fluorescenz in hohem

Grade zeigen, gehören aufser dem Chinin noch das mit Uran gefärbte Glas, das Äsculin, Kaliumplatincyanür u. s. w.

Da wir an den fluorescirenden Substanzen keine andere Veränderung bemerken, die Fluorescenz mag noch so oft hervorgerufen werden, da auch keine Wärme dabei zu verschwinden scheint, so müssen wir aus dem Gesetz von der Erhaltung der Kraft schliessen, dafs die lebendige Kraft des durch die Fluorescenz erzeugten Lichtes nicht gröfser ist trotz seiner stärkeren Wirkung auf das Auge, als die des einfallenden ultravioletten Lichts. Genaue Untersuchungen über das Verhältnifs der Helligkeit des durch Fluorescenz veränderten und unveränderten ultravioletten Lichts sind noch nicht angestellt. Doch kann man aus gewissen Thatsachen, die später bei Beschreibung der Methoden erwähnt werden sollen, schliessen, dafs das erstere etwa 1200 mal heller ist als das letztere. Davon, dafs die Helligkeit beider Lichter für das Auge wirklich aufserordentlich verschieden sei, überzeugt man sich auch ohne Messung, wenn man ultraviolettes Licht, welches von allem brechbareren Lichte gehörig gereinigt und in einen Focus vereinigt ist, erst auf einen nicht fluorescirenden Schirm, z. B. weifses Porzellan, und dann auf Chinin fallen läfst. Dafs das Sonnenspectrum, wenigstens nachdem das Sonnenlicht durch die Atmosphäre gegangen ist, wirklich nicht weiter reicht, als das Auge bei geeigneter Ablendung des helleren Lichts ultraviolettes Licht wahrnimmt, folgt daraus, dafs auch, wenn man durch Quarzprismen und Quarzlinsen ein objectives Spectrum auf ein Uranglas oder einen anderen fluorescirenden Körper wirft, das Phänomen der Fluorescenz nur genau ebenso weit auftritt, als das Auge ultraviolettes Licht wahrnehmen kann. Andererseits aber hat STOKES gefunden, dafs das Spectrum des elektrischen Kohlenlichts, durch Quarzapparate auf einen fluorescirenden Schirm geworfen, viel weiter reicht als das Sonnenspectrum. Seine Methode ist also in der That geeignet, auch noch brechbareres Licht sichtbar zu machen, als das Sonnenlicht enthält, und wir müssen daraus schliessen, dafs das Spectrum des durch die Atmosphäre gegangenen Sonnenlichts wirklich da aufhört, wo das Auge und die fluorescirenden Körper die Grenze anzeigen.

229 Sehr weit reichendes ultraviolettes Licht zeigen die Funken großer Inductionsapparate zwischen Cadmiumelektroden. Bei Entladungen, die durch hoch evacuirt Räume gehen, kommen Strahlen vor, die fast alle durchsichtigen festen Körper fluoresciren machen, aber nicht durchgehen.

229 Auch am anderen Ende des Spectrum gelingt es bei sorgfältiger Ablendung des helleren gewöhnlich sichtbaren Lichts Theile des Spectrum sichtbar zu machen, die für gewöhnlich unsichtbar bleiben. Genügende Ablendung ist hier sehr leicht durch ein rothes Glas, welches man in den Weg der Lichtstrahlen einschiebt, zu erreichen. Oder da die rothen (mit Kupferoxydul gefärbten) Gläser viel Orange durchlassen, kann man nöthigenfalls zu dem rothen Glase noch ein blaues, mit Kobaltoxyd gefärbtes fügen, welches Orange absorhirt, aber das äufserste Roth ungeschwächt durchläfst. Aber es ist wenig, was man am rothen Ende durch eine solche Beobachtungsweise

gewinnt, verglichen mit der großen Ausdehnung des ultravioletten Spectrum. ²³⁰
Der Streifen rothen Lichts, welcher jenseits der Linie *A* hinzukommt, hat etwa die Breite des Abstandes *AB*. Der Farbenton des Roth ist bis zum äußersten Ende hin unverändert, und nähert sich keineswegs dem Purpur.

Am rothen Ende reicht nun aber in der That das Sonnenspectrum weiter, als es vom Auge wahrgenommen wird. Bisher hat man die Anwesenheit solcher überrothen Strahlen nur durch ihre Wärmewirkungen wahrnehmbar machen können, und sie deshalb dunkle Wärmestrahlen genannt. Da sie vom Glase, Wasser und vielen anderen durchsichtigen Substanzen stärker als die leuchtenden Strahlen absorbiert werden, so muß man Steinsalzprismen und Steinsalzlinsen anwenden, um die ganze Ausdehnung des dunkeln Wärmespectrum kennen zu lernen. Im prismatischen Spectrum ist die Breite des dunkeln Wärmespectrum jedenfalls eine beschränkte, weil nämlich, der Theorie der elastischen Ätherschwingungen gemäß, bei zunehmender Wellenlänge der Strahlen die Brechung sich einem Minimum nähert, welches nicht überschritten werden kann, und bei welchem die Dispersion der Farben aufhört. In

Fig. 124 sind als horizontale Abscissen die Wellenlängen aufgetragen, und zwar von einem Anfangspunkte an gerechnet, der von *H* ebenso weit entfernt liegt wie der Punkt *b*, aber in der Verlängerung der Linie *bH*. Die Buchstaben *B* bis *H* entsprechen den FRAUNHOFER'schen Linien und ihrer Stellung in einem Interferenzspectrum.

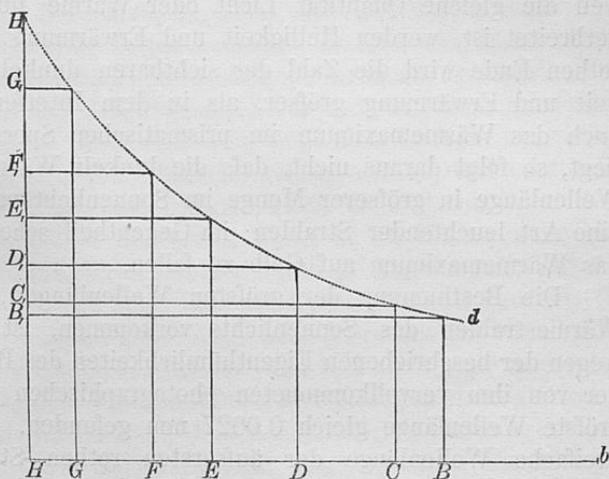


Fig. 124.

Als verticale Coordinaten sind die Brechungsverhältnisse für eines der von FRAUNHOFER benutzten Flintglasprismen aufgetragen.

Linie	B	C	D	E	F	G	H
Brechungsverhältniß	1,6277	1,6297	1,6350	1,6420	1,6483	1,6603	1,6711

Die Buchstaben *B*, bis *H*, bezeichnen die Stellung der dunkeln Linien in dem Spectrum dieses Flintglases. Die Grundlinie *Hb* entspricht dem Brechungsverhältniß 1,6070, welches für diese Glasart das Minimum ist, dem sich bei steigender Wellenlänge die Brechungsverhältnisse asymptotisch nähern müssen¹. Die punktirte Curve *H,d* drückt also die Brechbarkeit

¹ Der Werth dieses Minimum ist nach der Berechnung von BADEN POWELL (Pogg. XXXVII) genommen worden, dessen Interpolationsformel nahe genug mit den theoretisch abgeleiteten Formeln von CAUCHY übereinstimmt.

der Strahlen als Function der Wellenlänge aus, sie würde bei weiterer
 231 Fortsetzung sich asymptotisch der Grundlinie Hb anschließen. Daraus
 folgt, daß, wenn wir uns das Brechungsspectrum H, B , über sein rothes
 Ende bei B , fortgesetzt denken durch dunkle Wärmestrahlen, das Spectrum
 seine äußerste Grenze an der Grundlinie bei H finden muß¹, welche von
 B , dem Ende des gewöhnlich sichtbaren Roth, ungefähr so weit absteht,
 wie B von F , der Grenze zwischen Grün und Blau, eine Entfernung, die
 ungefähr der Hälfte der Länge des gewöhnlich sichtbaren Spectrum entspricht.
 Übrigens fällt es in der *Fig. 124* leicht auf, wie in dem Brechungsspectrum
 B, H , wenn man es mit dem Interferenzspectrum BH vergleicht, die Strahlen
 des blauen Endes F, G, H , auseinandergezogen, die des rothen Endes B, C, D ,
 aneinandergedrängt sind. Dieses Zusammendrängen der Strahlen im Brechungs-
 spectrum muß natürlich zunehmen, je mehr man sich im Raum der dunkeln
 Wärmestrahlen der Grenze nähert. Am blauen Ende, wo das Spectrum ge-
 dehnt ist, wird dabei die Zahl der sichtbaren dunkeln Linien größer, und
 weil die gleiche Quantität Licht oder Wärme über einen größeren Raum
 verbreitet ist, werden Helligkeit und Erwärmung geringer. Umgekehrt am
 rothen Ende wird die Zahl der sichtbaren dunkeln Linien geringer, Hellig-
 keit und Erwärmung größer, als in dem Interferenzspectrum. Wenn also
 auch das Wärmemaximum im prismatischen Spectrum außerhalb des Roth
 liegt, so folgt daraus nicht, daß die dunkeln Wärmestrahlen der betreffenden
 Wellenlänge in größerer Menge im Sonnenlicht vorhanden seien, als irgend
 eine Art leuchtender Strahlen; im Gegentheile scheint im Interferenzspectrum
 das Wärmemaximum auf Gelb zu fallen.

Die Bestimmung der größten Wellenlängen, welche in den dunkeln
 Wärmestrahlen des Sonnenlichts vorkommen, ist äußerst schwierig, eben
 n wegen der beschriebenen Eigenthümlichkeiten des Brechungsspectrum. Mittels
 der von ihm vervollkommenen photographischen Methoden hat ABNEY die
 größte Wellenlänge gleich 0,0027 mm gefunden. Es ist dies mehr als die
 231 dreifache Wellenlänge der äußersten rothen Strahlen, die nach meinen
 Messungen 0,00081 mm beträgt. Es zeigen übrigens diese dunkeln Wärme-
 strahlen die Erscheinungen der Interferenz, wie die Lichtstrahlen, woraus
 folgt, daß sie wie diese in einer schwingenden Bewegung bestehen; sie
 zeigen genau dieselben Gesetze der Polarisation, woraus folgt, daß auch in
 ihnen die Schwingungsrichtung senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung ist, und
 unterscheiden sich also von den leuchtenden Strahlen nur durch ihre größere
 Wellenlänge und die damit verbundene geringere Brechbarkeit.

Der Grund für die Unsichtbarkeit der überrothen Strahlen könnte ent-
 weder darin zu finden sein, daß sie von den Augenmedien absorbirt werden,
 oder daß die Netzhaut für sie nicht empfindlich ist. Daß Wasser die dunkeln

¹ Diese Grenze scheint nach einer Bemerkung von FR. EISENLOHR in den Versuchen von MELLON
 n wirklich erreicht zu sein. *Kritische Zeitschr. für Chemie*. Erlangen 1858. S. 229. Theoretisch ist eine
 solche durchaus zu erwarten, LANGLEY, *Phil. Magaz.* Vol. 21. p. 349 (1886), hat aber bei seinen Beobach-
 tungen über dunkle Strahlen, die viel weiter gehen als alle bisherigen, keine solche Grenze erreicht.

Wärmestrahlen in hohem Mafse absorbirt, hat schon MELLONI nachgewiesen. Mit den durchsichtigen Mitteln des Ochsenauges haben BRÜCKE und KNOBLAUCH Versuche angestellt. Es wurden nämlich Hornhaut, Glaskörper und Linse eines Ochsenauges in eine passende röhrenförmige Fassung so eingeschaltet, daß Hornhaut und Linse die vordere und hintere Begrenzung bildeten, der Glaskörper zwischen beiden lag. Durch dieses vollkommen durchsichtige System fiel Sonnenlicht, von einem Heliostaten in ein dunkles Zimmer geworfen, auf eine thermoelektrische Säule. Es brachte eine Ablenkung des damit verbundenen Multiplicators von 26 bis 30° hervor. Nachdem aber die beiden Seiten des Auges über einer Terpentinflamme beruht waren, was vollkommen gut und, wie die nachherige Untersuchung zeigte, ohne alle sonstige Veränderung der Hornhaut und Linse gelang, konnte keine Wärme mehr durch das Auge hindurchstrahlen. Rufsschichten sind aber für die dunkeln Wärmestrahlen durchgängig, nicht für die leuchtenden. Hätte also ein Theil der durch die Augenmedien gehenden Strahlen aus dunkeln Wärmestrahlen bestanden, so hätte sich von diesen auch noch nach der Berussung eine Wirkung zeigen müssen. Es läßt sich durch diesen Versuch allerdings nicht genau nachweisen, daß die Grenzen der Sichtbarkeit des Roth mit den Grenzen der Diathermansie der Augenmedien zusammenreffen, aber jedenfalls steht fest, daß von den unsichtbaren überrothen Strahlen wenig oder nichts mehr zur Netzhaut gelangen kann, und es scheint dieser Umstand zu genügen, um ihre Unsichtbarkeit zu erklären.

CIMA¹ hat ähnliche Versuche angestellt, wobei er als Wärmequelle eine LOCATELLI'sche Lampe benutzte, deren Strahlen durch die Augenmedien auf eine thermoelektrische Säule fielen. Er fand, daß die Krystalllinse 13 Procent, der Glaskörper allein 9 Procent und das ganze Auge auch 9 Procent der einfallenden Wärme durchließ. Dasselbe fanden J. JANSSEN² und R. FRANZ³; die Absorption war der des Wassers sehr ähnlich. Hornhaut und Linse schienen etwas stärker zu wirken. Untersuchungen von ENGELMANN⁴ haben ein ähnliches Resultat ergeben.

Daß die übervioletten Strahlen die Augenmedien durchdringen können, folgt direkt schon aus der Möglichkeit das überviolette Spectrum mit seinen dunkeln Linien zu sehen. DONDERS⁵ und REES haben objectiv nachgewiesen, daß diese Strahlen durch Glasgefäße, welche mit Glasfeuchtigkeit vom Ochsen gefüllt waren, und in die auch Hornhaut und Linse eingebracht wurden, ohne auffallend geschwächt zu werden, hindurchgehen. Um das ultraviolette Licht nach dem Durchgange durch die Augenflüssigkeiten sichtbar zu machen, fingen sie es auf der Fläche einer Chininlösung auf, wo es die blaue Fluorescenz hervorrief. BRÜCKE hatte ähnliche Versuche schon früher angestellt, bei denen er die Wirkung des Lichts auf Guajak-

¹ CIMA, *Sul potere degli umori dell' occhio a trasmettere il calorico raggionante*. Torino 1852.

² J. JANSSEN, C. R. LI. 128—131, 373—374; *Ann. de chir.* (3) XL. 71—93.

³ R. FRANZ in *Poggend. Ann.* CXV. 26—279.

⁴ TH. W. ENGELMANN, *Onderz. ged. in het physiol. Laborat. te Utrecht*. 3^{de} Reeks D. VII. Bl. 291. 1882.

⁵ F. C. DONDERS, *Onderzoekingen gedaan in het physiol. Laborat. te Utrecht*. Jaar VI. p. 1. *Müller's Archiv für Physiol.* 1853. S. 459.

lösung und auf photographisches Papier untersuchte, nachdem es durch die Augenmedien gegangen war.

Guajakharz, frisch aus der alkoholischen Lösung durch Eintrocknen im Dunkeln gewonnen, wird von den blauen, violetten und übervioletten Strahlen blau gefärbt, von den schwächer brechbaren wieder entbläut. Im gewöhnlichen Tageslichte überwiegt die Wirkung der bläuernden Strahlen. Tageslicht aber, welches durch die Krystalllinse eines Ochsenauges gegangen ist, färbt das Harz nur gelbgrün, und eine schon gebläute Harzschicht wird durch dasselbe Licht wieder bis zu demselben Gelbgrün entbläut. Daraus folgt, daß die Linse die bläuernden Strahlen des Tageslichts stärker absorbiert, als die nicht bläuernden. Bei starker Absorption der gewöhnlich sichtbaren blauen und violetten Strahlen müßte die Linse selbst gelblich gefärbt erscheinen. Da sie im normalen Zustande ziemlich ungefärbt erscheint, so können es unter den Guajak bläuernden Strahlen nur die übervioletten sein welche die Linse verhältnißmäßig beträchtlich absorbiert. Für die Hornhaut und den Glaskörper ergeben ähnliche Versuche von BRÜCKE, daß sie eine ähnliche Wirkung wie die Linse, aber in einem viel schwächerem Grade besitzen. Damit stimmt überein, daß die Hornhaut und Linse des Auges, wie man auch am lebenden Auge leicht sehen kann, selbst einen ziemlichen Grad von Fluorescenz besitzen, wenn violettes oder überviolettes Licht auf sie fällt. Sie strahlen dabei weißblaues Licht aus, ähnlich dem der Chininlösungen. Fluorescirende Körper aber absorbieren stets merklich die Strahlen, durch welche ihre Fluorescenz erregt wird.

Wenn nun auch die Versuche von BRÜCKE lehren, daß die ultravioletten Strahlen beim Durchgang durch die Augenmedien, namentlich die Krystalllinse, merklich geschwächt werden, wie namentlich bei der Wirkung auf Guajakinctur sich zu erkennen giebt: so lehren andererseits doch die Versuche von DONDERS, daß diese Schwächung nicht so bedeutend ist, um bei der gewöhnlichen Vergleichung der Helligkeit durch das ununterstützte Auge aufzufallen. Andererseits ist schon oben angeführt worden, daß die Helligkeit des unveränderten ultravioletten Lichts gegen die des ungefähr gleich aussehenden durch Fluorescenz des Chinin erzeugten Lichts sich etwa wie 1 : 1200 verhält. Daraus schliessen wir, daß Absorption des Lichts in den Augenmedien nur zum allerkleinsten Theile Schuld sein kann an der geringen subjectiven Helligkeit des Ultravioletts, daß diese vielmehr in einer Unempfindlichkeit der Netzhaut ihren Grund haben muß.

Zu erwähnen ist noch, daß der Farbeindruck, welchen einfaches Licht im Auge hervorruft, abhängig ist von der Lichtintensität, in der Weise, daß alle einfachen Farben bei gesteigerter Helligkeit sich dem Weiß oder Weißgelb nähern. Am leichtesten geschieht dies mit dem Violett, welches sich desto mehr vom Blau entfernt und dem Purpur nähert, je lichtschwächer es ist, und im Gegentheil bei einem mäßigen Grade von Helligkeit, wie ihn das Spectrum der Sonne im Fernrohr leicht erreicht, schon weißgrau erscheint, und nur einen schwachen bläulich violetten

Schein behält. Nach dem Vorschlag von MOSER sieht man dies auch sehr gut, wenn man bei halb bewölktem Himmel sich die Sonne mit einem ziemlich dunkeln violetten Glase bedeckt. Dann erscheint die Sonnenscheibe, durch das Glas gesehen, vollständig ebenso weiß, wie, neben dem Glase vorbei gesehen, die hellbelegneten Wolken erscheinen. Ebenso wird das Blau des Spectrum bei geringer Helligkeit mehr indigblau, bei größerer himmelblau, und bei noch größerer, welche übrigens immer noch ohne Belästigung des Auges zu ertragen ist, weißblau, endlich weiß. Daher die oben erwähnte fälschliche Anwendung der Benennung Himmelblau für das brechbarere und gleichzeitig lichtstärkere Cyanblau des Spectrum. Das Grün geht durch Gelbgrün in Weiß, Gelb direct in Weiß über, aber erst bei blendender Helligkeit. Roth zeigt die Erscheinung am schwersten, und nur bei den höchsten Graden der Helligkeit habe ich es sowohl im Spectrum, als durch ein rothes Glas nach der Sonne blickend, hellgelb werden sehen. Alle diese Versuche gelingen gleich gut mit sorgfältig gereinigtem einfachen, wie mit gemischtem Lichte von der betreffenden Farbe, wie es durch gefärbte Gläser gegeben wird.

Unter allen Theilen des Spectrum ist der Farbenton des violetten und übervioletten Lichts am veränderlichsten bei veränderter Lichtstärke. Um Farbentöne des brechbarsten Endes mit einander zu vergleichen, muß man sie nahe auf gleiche Intensität bringen. Bei schwacher Helligkeit nähern sich die blauen Töne des Spectrum mehr dem Indigo, das Violett dem Rosa, wie schon angegeben wurde; etwa von der Linie *L* ab bis zum Ende des Spectrum findet aber eine Umkehr in der Reihe der Farben statt; der Farbenton wird nämlich nicht weiter dem Rosa ähnlicher, sondern kehrt von hier wieder zum Indigoblau zurück. Bei mäfsiger Steigerung der Lichtstärke dagegen erscheint das überviolette Licht bläulich weißgrau, weißlicher als gleich starkes indigblaues Licht, und man hat es deshalb auch lavendelgrau genannt.

Die Umkehr in der Farbenreihe, welche das überviolette Licht bei geringer Helligkeit zeigt, beruht wahrscheinlich nicht auf der Reactionsweise des Nervenapparats, sondern scheint dadurch bedingt zu sein, daß die Netzhaut selbst fluorescirt, d. h. unter der Einwirkung übervioletter Strahlen Licht niederer Brechbarkeit, und zwar solches von bläulich oder grünlich weißer Farbe aussendet. Wenigstens die Netzhaut aus dem Auge einer Leiche, welche ich selbst¹ untersuchte, und die Netzhäute aus ganz frischen Augen von eben getödteten Ochsen und Kaninchen, welche SETSCHENOW² untersuchte, zeigten einen freilich sehr geringen Grad von Fluorescenz, und das Licht, welches sie dabei aussandten, hatte die angegebene Farbe. Die Stärke ihrer Fluorescenz war geringer, als die von Papier, Leinwand und Elfenbein, aber erschien doch immer noch stark genug, um die Farbe, in der das überviolette Licht empfunden wird, verändern zu können. Ich

¹ H. HELMHOLTZ, *Poggend. Ann.* XCIV. 205.

² J. SETSCHENOW, *Graefe's Archiv für Ophthalmologie.* Bd. V. (2.) S. 205. 1859.

235 verglich zu diesem Ende das Licht, was durch Fluorescenz der Netzhaut erzeugt wurde, und sich von den fluorescirenden Stellen dieser Membran nach allen Seiten in den Raum hinein verbreitete, mit ultraviolettem Licht, welches diffus von einem weissen Porzellanplättchen reflectirt wurde, also ebenso wie jenes sich nach allen Seiten hin verbreitete. Die Netzhaut und das Porzellanplättchen wurden hierbei durch ein schwach brechendes Prisma angesehen, welches das veränderte von dem unveränderten ultravioletten Lichte schied. Es erschien unter diesen Umständen das durch Fluorescenz in der Netzhaut erzeugte Licht ebenso hell, wie die unveränderte ultraviolette Beleuchtung der Porzellanplatte.

n Nach den Beobachtungen von W. KÜHNE, die auf S. 266 angeführt sind, fluorescirt das ungebleichte Sehroth nur schwach in weissblauer Farbe, das gebleichte Sehweifs dagegen stärker und grünlich. Die von mir und SETSCHENOW beobachtete Fluorescenz todter Netzhäute ist die des Sehweifs gewesen. Die der lebenden Membran würde danach in der Farbe dem Lavendelgrau des ultravioletten Spectrum ganz ähnlich sein können, und es wird fraglich, ob wir diesen Theil des Spectrum vielleicht nur sehen, weil in ihm die Netzhaut fluorescirt, und dieses Fluorescenzlicht, was gröfsere Wellenlängen hat, dieselbe reizt. Nicht ausgeschlossen ist allerdings, dafs die ultravioletten Strahlen auch direct erregen. Vor Herrn KÜHNE'S Untersuchungen hatte ich auf eine solche gemischte Erregung der Netzhaut geschlossen, und das Lavendelgrau als Mischung des direct gesehenen Violet und des grünlich weissen Fluorescenzlichtes betrachtet.

235 Wenn man ein prismatisches Spectrum von geringer Länge betrachtet, so dafs man das Ganze gleichzeitig vor Augen hat, so erscheint es nur aus vier Farbenstreifen zusammengesetzt: Roth, Grün, Blau und Violet, während durch den Contrast mit diesen Hauptfarben ihre Übergänge fast ganz verschwinden, höchstens erkennt man noch, dafs das Grün an der Seite des Roth gelblich wird. Noch verstärkt wird die Trennung der Farben dadurch, dafs drei von den stärkeren dunkeln Linien des Sonnenspectrum *D*, *F* und *G* ungefähr den Grenzen der genannten vier Farben entsprechen. Aber auch, wenn man die Linien nicht erkennen kann, tritt dieselbe Scheidung der Farben ein. Bei längeren Spectris gelingt es zwar eher die Übergangsfarben zu erkennen, indessen wird doch immer der Eindruck im Auge durch die Nachbarschaft von so lebhaften und gesättigten Farben, wie sie das Spectrum zeigt, beträchtlich verändert, so dafs die Übergangsfarben nicht recht ungestört zur Erscheinung kommen. Um die Reihe der einfachen Farben genau kennen zu lernen, mufs man sie isoliren. Zu dem Ende entwirft man ein recht reines objectives Spectrum auf einem Schirme, der einen schmalen Spalt hat, so dafs nur ein schmaler Farbenstreifen des Spectrum durch den Spalt dringen und einen dahinter aufgestellten weissen Schirm erleuchten kann. Indem man den Spalt langsam die Länge des Spectrum durchwandern läfst, bekommt man nach einander die Reihe der Farbtöne, die es enthält, einzeln zu Anschauung. Dabei zeigt sich, dafs nirgends ein

Sprung in der Farbenreihe ist, sondern die Farbtöne continuirlich in einander übergehen. Es ist dieser Versuch gleichzeitig eines der prachtvollsten Schauspiele, welches die Optik darbietet, wegen des Reichthums, der intensiven Sättigung und der zarten Übergänge der Farbtöne.

Wegen der allmäligen Übergänge ist es auch unmöglich, den einzelnen Farben im Spectrum naturgemäß eine bestimmte Breite anzuweisen. Um die Stelle und Vertheilung der Farben, so weit es möglich ist, zu bezeichnen, will ich hier die den FRAUNHOFER'schen Linien entsprechenden Farbtöne hersetzen mit ihren Wellenlängen, letztere ausgedrückt durch Milliontel eines Millimeters: 236

Linie.	Wellenlänge.	Farbe.
<i>A</i>	760,40	Äußerstes Roth.
<i>B</i>	686,853	Roth.
<i>C</i>	656,314	Grenze des Roth und Orange.
<i>D</i>	{ 589,625 589,023	Goldgelb.
<i>E</i>	526,990	Grün.
<i>F</i>	486,164	Cyanblau.
<i>G</i>	430,825	Grenze des Indigo und Violet.
<i>H</i>	396,879	Grenze des Violet.
<i>L</i>	381,96	} Überviolet.
<i>M</i>	372,62	
<i>N</i>	358,18	
<i>O</i>	344,10	
<i>P</i>	336,00	
<i>Q</i>	328,63	
<i>R</i>	317,98	
<i>U</i>	294,77	

Da der Unterschied der Farbenempfindung im Auge wie der der Tonhöhe im Ohre dem Unterschiede in der Schwingungsdauer der erregenden Licht- oder Tonwellen entspricht, so hat man vielfältig versucht, die Farbenstufen des Spectrum nach demselben Principe abzutheilen, wie es bei den ganzen und halben Tönen in der musikalischen Tonleiter geschieht. NEWTON versuchte es zuerst. Da er aber noch nicht die Abhängigkeit der Breite, welche die einzelnen Farben im prismatischen Spectrum einnehmen, von der Natur der brechenden Substanz kannte, und der damals noch sehr unentwickelten Undulationstheorie des Lichtes abgeneigt war, so theilte er unmittelbar das Spectrum von Glasprismen, so weit er es kannte, ungefähr zwischen den Linien *B* und *H*, in 7 Streifen ein, deren Breite dem Verhältnisse der Intervalle in einer Tonleiter, d. h. den Zahlen $\frac{9}{8}, \frac{16}{15}, \frac{10}{9}, \frac{9}{8}$,

$\frac{10}{9}, \frac{16}{15}, \frac{9}{8}$, proportional war, und unterschied, diesen sieben Intervallen entsprechend, sieben Hauptfarben, nämlich: Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violet. Dafs in dieser Reihe zwei Arten des Blau genannt sind, während Goldgelb, Gelbgrün, Meergrün fehlen, die dem Auge von den benachbarten Hauptfarben mindestens ebenso gut verschieden erscheinen, wie
 237 Indigo von Cyanblau und Violet, rührt von der auf S. 282 erwähnten Eigenthümlichkeit der Brechungsverhältnisse in den durchsichtigen Substanzen her, vermöge deren in jedem prismatischen Spectrum die brechbareren Farbtöne stärker ausgedehnt werden, als die weniger brechbaren. In den Interferenzspectris, wo die Vertheilung der Farben nur von der Wellenlänge, nicht von der Natur eines brechenden Medium abhängt, ist der blauviolette Raum viel schmaler, und würde bei einer ähnlichen Eintheilung nicht in drei Streifen zerfallen sein, dagegen der Raum des Roth und Orange etwa drei eingenommen hätte.

Wenn wir jetzt mit Hülfe der seitdem gemachten Entdeckungen und Messungen das Spectrum eintheilen, indem wir das Eintheilungsprincip der musikalischen Tonleiter auf die Schwingungsdauer der Lichtwellen anwenden, wie es in *Taf. II, Fig. 2* geschehen ist, und das Gelb dem Grundtone c , die Linie A dem tieferen G entsprechend machen, so bekommen wir für die einzelnen halben Töne folgende Farbenstufen:

<i>Fis.</i>	Ende des Roth	<i>fis.</i>	Violet
<i>G.</i>	Roth	<i>g.</i>	Überviolet
<i>Gis.</i>	Roth	<i>gis.</i>	Überviolet
<i>A.</i>	Roth	<i>a.</i>	Überviolet
<i>B.</i>	Rothorange	<i>b.</i>	Überviolet
<i>H.</i>	Orange	<i>h.</i>	Ende des Sonnenspectrum.
<i>c.</i>	Gelb		
<i>cis.</i>	Grün		
<i>d.</i>	Grünblau		
<i>dis.</i>	Cyanblau		
<i>e.</i>	Indigblau		
<i>f.</i>	Violet.		

Die Töne, welche Octaven bilden, sind nebeneinander gestellt. In *Taf. II Fig. 2* sind rechts die den Tonintervallen entsprechenden Stellen durch Linien bezeichnet.

n Nach derselben Berechnungsweise würde die von Herrn ABNEY gefundene Grenze des Ultraroth im Sonnenspectrum auf A_{-2} , zwei Octaven unter dem helleren Roth liegen. Herrn LANGLEY's¹ Messungen führen noch viel weiter und machen es überhaupt zweifelhaft, ob eine Grenze des Spectrum für die überrothen Strahlen grosser Wellenlänge existirt. Andererseits führen Herrn CORNU's²

¹ S. P. LANGLEY, *Researches of Solar Heat. Professional papers of the Signal Service.* Washington 1884.
 — *Sillim. Journ.* Vol. XXVII. March 1884 und Vol. XXXII. August 1886.
² CORNU, C. R. 88. p. 1285—1290 (1879).

mit Sonnenlicht ausgeführte Spectralphotographien bis zur Wellenlänge 293,2 dem oben angeführten h entsprechend für das äußerste Ultraviolett, was die Atmosphäre noch bis zum Riffelhause bei Zermatt (2570 m hoch) durchdringt. Im elektrischen Kohlenlicht kommen nach seinen Untersuchungen noch Strahlen vor, die schneller schwingen, aber durch die Luft schnell absorbiert werden; solche von 211,84 Wellenlänge schon in 10 m, von 184,21 in 1 m, von 156,58 in 0,1 m verlöschend. Dadurch ist für unsere Beobachtungen im Luftraum die Grenze gezogen.

Danach würde, akustisch berechnet, die äußerste Grenze des elektrischen Kohlenlichts bei h' , eine Octave höher als die Grenze des Sonnenspectrum liegen.

Aus der gegebenen Vergleichungstafel der halben Töne und Farbenstufen geht nun hervor, daß an beiden Grenzen des Spectrum die Farbe sich innerhalb mehrerer halber Tonstufen nicht merklich ändert, in der Mitte dagegen die sehr mannigfaltigen Übergangsfarben des Gelb in Grün alle in die Breite eines einzigen halben Tones zusammengedrängt sind. Daraus folgt, was im folgenden Paragraphen weiter zu besprechen ist, daß in der Mitte des Spectrum das Auge für die Änderung der Schwingungsdauer des Lichts viel empfindlicher ist, als an den Enden des Spectrum, und daß die Farbenstufen ihrer Größe nach keineswegs in ähnlicher Weise von der Schwingungsdauer abhängen, wie die Abstufungen der Tonhöhe.

Da die vorliegenden physiologischen Untersuchungen eine viel genauere Scheidung des einfachen Lichts von einander nothwendig machen, als es bei physikalischen Untersuchungen im Allgemeinen erfordert wird, will ich hier die Theorie der Brechung in Prismen besprechen, soweit sie für die Herstellung reiner Spectra nöthig ist. Man hatte früher, so viel ich gefunden habe, immer nur die Brechung einzelner Lichtstrahlen in den Prismen untersucht, aber nicht die Lage und Beschaffenheit der prismatischen Bilder, und doch, wenn man mit dem Auge durch ein Prisma sieht, oder das aus dem Prisma tretende Licht durch Linsen und Fernröhre gehen läßt, kommt es wesentlich darauf an, die prismatischen Bilder für jede Art homogenen Lichtes zu kennen, denn sie sind dann als die Objecte für die weiteren optischen Bilder zu betrachten, welche die Augenmedien und Linsen entwerfen.

Diese Lücke habe ich selbst in der ersten Auflage dieses Werkes auszufüllen gesucht. Da die betreffende mathematische Untersuchung aber seitdem anderwärts¹ veröffentlicht worden, und rein physikalischer Natur ist, möge es hier genügen, ihre Ergebnisse auseinanderzusetzen.

Bilder entworfen bei parallelen einfallenden Strahlen. Wenn die einfallenden Strahlen untereinander parallel sind, so fallen sie alle unter gleichen Einfallswinkeln und in parallel liegenden Einfallsebenen auf die erste Fläche des Prisma, haben also auch nach der ersten und demzufolge ebenso nach der zweiten Brechung parallele Richtung. Unter diesen Umständen können sie nach der Brechung im Prisma, wie vorher, angesehen werden wie Strahlen, die von einem unendlich entfernten leuchtenden Punkte kommen; sie sind vor wie nach der Brechung homocentrisch, und das durch das Prisma gegangene Bündel kann

¹ H. HELMHOLTZ, *Wissenschaftliche Abhandlungen*. Bd. II. S. 147—182. Leipzig 1883.

V. HELMHOLTZ, *Physiol. Optik*. 2. Aufl.

also ebenso gut wie das einfallende benutzt werden, um durch Linsen oder Kugelspiegel genaue Bilder des unendlich entfernten leuchtenden Punktes, beziehlich seines ebenfalls unendlich entfernten prismatischen Bildes zu geben.

Bei den neueren Spectralapparaten benutzt man meistens diese Eigenthümlichkeit der parallelen Strahlenbündel vollkommene optische Bilder zu geben, indem man die lichtgebende Linie, sei es nun ein feiner Spalt, durch den äußeres Licht eindringt, oder ein glühender Draht, oder eine mit elektrischem Glimmlight gefüllte Capillarröhre, in die Brennebene einer achromatischen Convexlinse bringt (Collimatorlinse), in der alle von einem Punkt der Lichtquelle ausgehenden Strahlen erst durch Brechung parallel gemacht werden, ehe sie auf das Prisma fallen. Um diesen Vortheil aber vollständig zu haben, muß man darauf achten, daß die lichtgebende Linie sich genau in der Brennebene der Collimatorlinse befindet.

I. Bilder unendlich entfernt leuchtender Flächen.

Nur wenn die Flächen verschwindend kleine Ausdehnung haben, sind die prismatischen Bilder derselben ihren Objecten geometrisch ähnlich, da die Ablenkung der Strahlen, welche in verschiedenen Richtungen durch das Prisma gehen, verschieden groß ist.

Wir wollen eine senkrecht zur brechenden Kante des Prisma gelegte Ebene eine Hauptebene desselben nennen. Die Einfallslothe liegen immer in einer Hauptebene.

A. Ablenkung von Strahlen, die in einer Hauptebene verlaufen. Für die Anwendung ist dies der wichtigste Fall. In *Fig. 125* sei die Ebene der

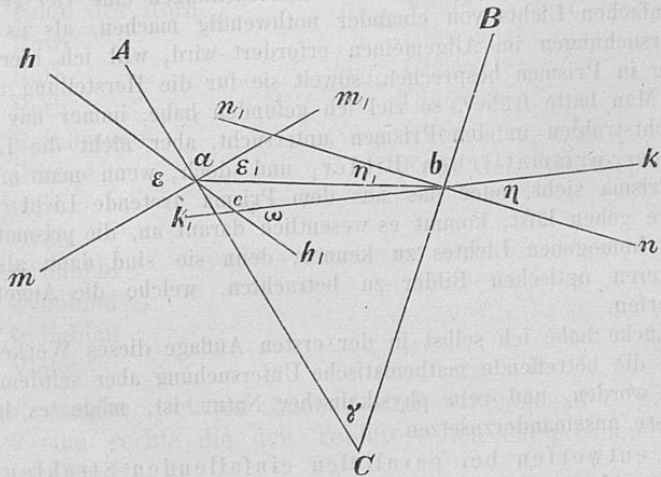


Fig. 125.

Zeichnung die betreffende Hauptebene, und die brechende Kante des Prisma senkrecht zu derselben durch den Punkt C gehend gedacht. AC und BC seien die Schnittlinien der beiden brechenden Flächen des Prisma mit der Ebene der Zeichnung. ha , ab , bk seien Stücke des Strahls, mm , und nn , die Einfallslothe in a und b . Da nach der Voraussetzung der einfallende Strahl ha senkrecht zu der brechenden Kante sein soll, die Einfallslothe dies ebenfalls sind: so müssen beide ganz in der Ebene der Zeichnung liegen, wenn diese den Einfallspunkt a enthält. Die Ebene

der Zeichnung ist also Einfallsebene, folglich auch Brechungsebene für den Strahl; also liegt auch der dem gebrochenen Punkte angehörige Punkt b , wie das zweite Einfallslot nn , in derselben; folglich auch der zweite gebrochene Strahl bk , und da ha und bk in derselben Ebene liegen und nicht parallel sind, müssen sie passend verlängert sich in dieser Ebene schneiden. Der Schnittpunkt sei c .

Die Winkel, welche die Strahlen der Reihe nach mit den beiden Einfallsloten verbinden, bezeichne ich mit

$$\begin{aligned} \angle ham &= \varepsilon \quad . \quad \angle kbn = \eta \\ \angle bam, &= \varepsilon, \quad . \quad \angle abn, = \eta, \end{aligned}$$

Den brechenden Winkel des Prisma bezeichne ich

$$\angle ACB = \gamma.$$

Nun ist, wenn wir mit R einen rechten Winkel bezeichnen,

$$\angle abB = \eta, + R$$

und Außenwinkel zum Dreieck bCa ; als solcher ist

$$\begin{aligned} abB &= bCa + Cab, \quad \text{oder} \\ \eta, + R &= \gamma + R - \varepsilon, \end{aligned}$$

also:

$$\gamma = \eta, + \varepsilon, \quad \dots \dots \dots 1).$$

Dazu kommt, wenn n das Brechungsverhältniß des Prisma bezeichnet:

$$\left. \begin{aligned} \sin \varepsilon &= n \cdot \sin \varepsilon, \\ \sin \eta &= n \cdot \sin \eta, \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 2).$$

Der Ablenkungswinkel ω zwischen den beiden Strahlen ist Außenwinkel zum Dreieck abc , also

$$\begin{aligned} \omega &= \varepsilon - \varepsilon, + \eta - \eta, \\ &= \varepsilon + \eta - \gamma \quad \dots \dots \dots 3). \end{aligned}$$

Aus der allgemeinen trigonometrischen Formel

$$\sin \varepsilon + \sin \eta = 2 \cdot \sin \frac{\varepsilon + \eta}{2} \cdot \cos \frac{\varepsilon - \eta}{2}$$

ergibt sich bei Berücksichtigung der Gleichungen 1), 2) und 3)

$$\sin \left(\frac{\omega + \gamma}{2} \right) = n \cdot \sin \left(\frac{\gamma}{2} \right) \cdot \frac{\cos \left(\frac{\varepsilon - \eta}{2} \right)}{\cos \left(\frac{\varepsilon - \eta}{2} \right)} \quad \dots \dots 4).$$

Daraus folgt, dafs, wenn der Strahl durch beide Prismenflächen unter gleichen Winkeln geht, also

$$\varepsilon = \eta,$$

wobei auch

$$\varepsilon, = \eta,$$

sein mufs, die Gröfse der Ablenkung sich durch die Gleichung bestimmt

$$\sin \left(\frac{\omega + \gamma}{2} \right) = n \cdot \sin \left(\frac{\gamma}{2} \right), \quad \dots \dots \dots 5).$$

welche Gleichung zur Bestimmung des n für die Substanz der Prismen vorzugsweise gebraucht wird.

Wenn dagegen $\varepsilon > \eta$, ist auch nothwendig $\varepsilon_r > \eta_r$, nach Gleichungen 2).
Diese differentirt ergeben dann

$$\cos \varepsilon \cdot d\varepsilon = n \cdot \cos \varepsilon_r \cdot d\varepsilon_r,$$

$$\cos \eta \cdot d\eta = n \cdot \cos \eta_r \cdot d\eta_r,$$

und ebenso folgt aus Gleichung 1), worin γ unveränderlich ist:

$$d\eta_r = -d\varepsilon_r.$$

Dividirt man die ersteren Gleichungen durch einander, so giebt dies

$$\frac{d\eta}{d\varepsilon} = - \frac{\cos \eta_r \cdot \cos \varepsilon}{\cos \eta \cdot \cos \varepsilon_r}, \quad (6)$$

was sich umschreiben läßt nach Gleichungen (2) in:

$$\begin{aligned} \frac{d\eta}{d\varepsilon} &= - \sqrt{\frac{(1 - n^2 \cdot \sin^2 \varepsilon_r) \cdot (1 - \sin^2 \eta_r)}{(1 - n^2 \cdot \sin^2 \eta) \cdot (1 - \sin^2 \varepsilon)}} \\ &= - \sqrt{\frac{(1 + n^2 \cdot \sin^2 \varepsilon_r \cdot \sin^2 \eta_r) - (n^2 \cdot \sin^2 \varepsilon_r + \sin^2 \eta_r)}{(1 + n^2 \cdot \sin^2 \varepsilon_r \cdot \sin^2 \eta) - (\sin^2 \varepsilon_r + n^2 \sin^2 \eta)}}. \end{aligned}$$

Nun wird $\left(-\frac{d\eta}{d\varepsilon}\right)$ größer als 1 sein, wenn in dem letzten Ausdruck unter dem Wurzelzeichen der Zähler größer als der Nenner ist, d. h. wenn

$$(n^2 \cdot \sin^2 \varepsilon_r + \sin^2 \eta_r) < (\sin^2 \varepsilon_r + n^2 \sin^2 \eta)$$

oder

$$(n^2 - 1) \cdot \sin^2 \varepsilon_r < (n^2 - 1) \cdot \sin^2 \eta,$$

oder

$$\varepsilon_r < \eta_r.$$

Es ist aber nach Gleichung 3)

$$\begin{aligned} d\omega &= d\varepsilon + d\eta = d\eta \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{d\eta} + 1\right) \\ &= d\varepsilon \cdot \left(1 + \frac{d\eta}{d\varepsilon}\right). \end{aligned}$$

Es ist also bei der gemachten Annahme, wonach

$$\eta_r > \varepsilon_r,$$

sein soll, und also auch

$$\eta > \varepsilon,$$

$d\omega$ positiv, wenn der größere Winkel η steigt, der kleinere abnimmt, der Strahl sich also immer weiter von der Symmetrielage entfernt. Das Gleiche ist übrigens auch der Fall, wenn $\varepsilon > \eta$, und nun umgekehrt ε wächst.

Daraus geht hervor, daß wir in der Symmetrielage ein Minimum der Ablenkung ω haben.

Die Grenzwinkel für die durchzulassenden Strahlen werden durch die Grenzen der totalen Reflexion bestimmt. Diese tritt ein, wenn die Gleichungen 2) entweder für $\sin \varepsilon$ oder für $\sin \eta$ einen Werth größer als 1 ergeben würden, der dem Sinus eines reellen Winkels nicht zukommen kann. Daraus folgt, daß der größte Werth der Winkel ε , und η , den wir mit h bezeichnen wollen gegeben wird durch die Gleichung

$$\sin h = \frac{1}{n}.$$

Für Glas vom Brechungsverhältniſſ $\frac{3}{2}$ ist $h = 41^\circ 49'$, für Flintglas mit $n = \frac{5}{3}$ ist es $36^\circ 52'$.

Da nun nach Gleichung 1)

$$\gamma = \varepsilon + \eta,$$

so folgt, daſs

$$\gamma < 2h$$

sein muß, wenn der brechende Winkel überhaupt Licht durchlassen soll. Das giebt für die beiden eben genannten Glasarten die Grenzen $83^\circ 38'$ und $73^\circ 44'$ für die größten brechenden Winkel, die überhaupt Licht durchlassen.

Ist der brechende Winkel kleiner als $2h$, so sind die Grenzen der durchzulassenden Strahlen dadurch gegeben, daſs einerseits ε , andererseits η , gleich h werden können. An der einen Grenze ist also

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= h & \varepsilon &= R \\ \eta_1 &= \gamma - h \text{ und } \sin \eta = n \cdot \sin(\gamma - h). \end{aligned}$$

An der andern Grenze vertauschen sich nur die Werthe von ε und η , sowie von ε und η untereinander. Der Winkel $(\gamma - h)$ kann bei kleinen Werthen des brechenden Winkels γ auch negativ werden, d. h. der betreffende Strahl liegt dann im Prisma auf der der brechenden Kante abgekehrten Seite des Einfallslotthes, auſserhalb des Prisma auf der zugekehrten Seite.

Die scheinbare Breite des Spalts im prismatischen Bilde für monochromatisches Licht ergibt sich aus Gleichung 6), wenn wir $d\varepsilon$ als den Werth der scheinbaren Breite des wirklichen Spalts vom Orte des Prisma gesehen nehmen. Dann ist $d\eta$ die entsprechende Gröſſe im prismatischen Bilde. Wie wir eben gesehen haben, ist $d\eta > d\varepsilon$, wenn $\eta > \varepsilon$. Schmalere Spaltbilder bekommen wir also für ein größeres ε , kleineres η , d. h. wenn wir in die uns zugekehrte Seite des Prisma senkrechter hineinschauen, als dem Minimum der Ablenkung entspricht.

Gröſſe der Zerstreuung für Licht von verschiedener Brechbarkeit. Wenn die einfallenden Strahlen aus fester Richtung kommen, der Winkel ε für sie also nicht variirt, so ändert sich doch η mit dem Brechungsverhältniſſ n . Die Gröſſe

$$d\eta = \frac{d\eta}{dn} \cdot dn$$

giebt dann die scheinbare Breite des Farbstreifens im Spectrum, der dem Intervall des Brechungsverhältniſſes $d\eta$ entspricht.

Um den Differentialquotienten $\frac{d\eta}{dn}$ zu bilden, können wir die Gleichungen 2) und 1) differentiiren, indem wir ε und γ als unveränderlich betrachten. Dies giebt:

$$\begin{aligned} 0 &= dn \cdot \sin \varepsilon + n \cdot \cos \varepsilon \cdot d\varepsilon, \\ \cos \eta \cdot d\eta &= dn \cdot \sin \eta + n \cdot \cos \eta \cdot d\eta, \\ d\varepsilon + d\eta &= 0. \end{aligned}$$

Multipliciren wir die erste der drei Gleichungen mit $\cos \eta$, die zweite mit $\cos \varepsilon$,

und addiren mit Berücksichtigung der dritten, so giebt dies

$$\begin{aligned} \cos \eta \cdot \cos \varepsilon, \cdot d\eta &= dn \cdot \sin \gamma \\ \frac{d\eta}{dn} &= \frac{\sin \gamma \cdot}{\cos \eta \cdot \cos \varepsilon,} \dots \dots \dots 7). \end{aligned}$$

Das Product der beiden Cosinus im Nenner dieses Ausdrucks ist veränderlich, wenn man das Prisma dreht. An der einen Grenze, wo der austretende Strahl streifenden Austritt hat, ist $\cos \eta = 0$, also $\frac{d\eta}{dn} = \infty$. An der andern Grenze ist dagegen $\varepsilon, = h$ und

$$\cos \eta = \sqrt{1 - n^2 \cdot \sin^2 (\gamma - h)};$$

also

$$\frac{d\eta}{dn} = \frac{\sin \gamma}{\cos h \cdot \sqrt{1 - n^2 \cdot \sin^2 (\gamma - h)}}.$$

Zwischen beiden giebt es aber noch ein Minimum des Werthes dieser Größe, welche einem Maximum von $(\cos \varepsilon, \cdot \cos \eta)$ entspricht. Die genaue Richtung dieses Minimum wird durch eine Gleichung dritten Grades gegeben. Es liegt zwischen dem streifenden Austritt und der Richtung der kleinsten Ablenkung des Strahls.

Reinheit des Spectrum. Diese wird, so weit sie von dem regelmäsig gebrochenen Lichte abhängt, bedingt sein durch das Verhältniß zwischen der Breite der Farbstreifen und der scheinbaren Breite des Spalts im prismatischen Bilde.

Erstere, die wir mit P bezeichnen wollen, ist gegeben durch das $\frac{d\eta}{dn}$ der Gleichung 7), letztere durch das $\frac{d\eta}{d\varepsilon}$ der Gleichung 6),

$$P = \frac{\frac{d\eta}{dn}}{\frac{d\eta}{d\varepsilon}} = \frac{\sin \gamma}{\cos \eta, \cdot \cos \varepsilon} \dots \dots \dots 8).$$

Die Form dieses Ausdrucks ist ganz dieselbe, wie in Gleichung 7), nur daß die Winkel für die beiden Seiten des Prisma mit einander vertauscht sind. Die Reinheit wird also am größten bei streifender Incidenz der einfallenden Strahlen vom dickeren Ende des Prisma her, wo der Spalt sehr schmal erscheint. Ein Minimum der Reinheit tritt zwischen dieser Richtung und der der kleinsten Ablenkung ein; dann wächst die Reinheit wieder ein wenig, wenn der Austrittswinkel sich der streifenden Incidenz nähert.

Die streifenden Incidenzen schwächen aber das Licht sehr durch starke Reflexion und erfordern große Genauigkeit der ebenen Flächen, so daß sie deshalb praktisch wenig zu empfehlen sind. Die Lage der kleinsten Ablenkung hat unter anderen Vorzügen den, daß der Lichtverlust der geringste ist.

B. Brechung von Strahlen, welche in einer zur brechende Kante parallelen Ebene sich ausbreiten. Gerade Linien, welche der brechenden Kante parallel sind, wie es bei den als Lichtquelle dienenden Spalten und glühenden Drähten gewöhnlich der Fall ist, erscheinen gekrümmt, an ihren Enden stärker

abgelenkt, als in derjenigen Stelle, die in einer durch das Auge des Beobachters gelegten Hauptebene liegt.

Die Einfallsebene und die Hauptebene, welche zu jedem der beiden Einfallspunkte des durchgehenden Strahls gehören, schneiden sich im Einfallslot, das in dem betreffenden Einfallspunkte errichtet ist. Bezeichnen wir nun wie bisher mit ε und ε_1 den Einfalls- und Brechungswinkel, mit δ und δ_1 die Projectionen dieser Winkel auf die Hauptebene, und mit φ den Winkel zwischen der Einfallsebene und der Hauptebene, so ist nach einem bekannten Satze der sphärischen Trigonometrie

$$\begin{aligned} \operatorname{tang} \delta &= \cos \varphi \cdot \operatorname{tang} \varepsilon \\ \operatorname{tang} \delta_1 &= \cos \varphi \cdot \operatorname{tang} \varepsilon_1. \end{aligned}$$

Das Brechungsgesetz aber ergibt:

$$\sin \varepsilon = n \cdot \sin \varepsilon_1.$$

Ersetzt man hierin die Sinus durch die Tangenten, und erhebt auf das Quadrat, so giebt dies:

$$\frac{\operatorname{tang}^2 \varepsilon}{1 + \operatorname{tang}^2 \varepsilon} = n^2 \cdot \frac{\operatorname{tang}^2 \varepsilon_1}{1 + \operatorname{tang}^2 \varepsilon_1},$$

als eine andere Form des Brechungsgesetzes. Ersetzt man hierin ε und ε_1 durch ihre Projectionen auf eine Hauptebene, so ergiebt sich

$$\frac{\operatorname{tang}^2 \delta}{\cos^2 \varphi + \operatorname{tang}^2 \delta} = n^2 \cdot \frac{\operatorname{tang}^2 \delta_1}{\cos^2 \varphi + \operatorname{tang}^2 \delta_1},$$

oder

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tang}^2 \delta &= \frac{n^2 \cdot \operatorname{tang}^2 \delta_1 \cdot \cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi - (n^2 - 1) \cdot \operatorname{tang}^2 \delta_1} \\ \operatorname{tang}^2 \delta_1 &= \frac{\operatorname{tang}^2 \delta \cdot \cos^2 \varphi}{n^2 \cdot \cos^2 \varphi + (n^2 - 1) \cdot \operatorname{tang}^2 \delta} \end{aligned} \right\} \dots 9)$$

so daß jeder dieser Winkel aus dem andern gefunden werden kann.

Wenn wir die beiden Winkel η und η_1 ebenso auf dieselbe Hauptebene projectirt denken, und ihre Projectionen ζ und ζ_1 nennen, den Winkel zwischen den Ebenen der beiden Winkel dagegen ψ , so erhalten wir entsprechende Gleichungen, wie 9) auch für ζ und ζ_1 , also mit kleiner Änderung der Schreibweise:

$$\operatorname{tang}^2 \zeta = \frac{n^2 \cdot \operatorname{tang}^2 \zeta_1}{1 - \frac{n^2 - 1}{\cos^2 \psi} \cdot \operatorname{tang}^2 \zeta_1} \dots \dots \dots 9a).$$

Wieder haben wir für den brechenden Winkel des Prisma

$$\gamma = \delta_1 + \zeta_1, \dots \dots \dots 10)$$

und wenn wir mit O die Projection des Ablenkungswinkels ω auf die Hauptebene bezeichnen

$$O + \gamma = \delta + \zeta \dots \dots \dots 10a),$$

Die Winkel ψ und φ sind miteinander verbunden durch die Gleichung

$$\frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi \cdot \cos^2 \delta_1 + \sin^2 \gamma_1} = \frac{\cos^2 \psi}{\cos^2 \psi \cdot \cos^2 \zeta_1 + \sin^2 \zeta_1}, \dots 10b)$$

welche sich ergiebt, wenn man durch den Strahl im Prisma und seine Projection

auf die Hauptschnitte eine Ebene legt, die demzufolge der brechenden Kante parallel sein muß, und berücksichtigt, daß die in dieser Ebene liegenden Winkel zwischen dem Strahl und seinen beiden Projectionen gleich sein müssen.

Die in Gleichung 9a) gegebene Form läßt am leichtesten erkennen, daß wenn der Winkel φ oder ψ wächst, sein Cosinus also abnimmt, auch der Nenner des Bruchs kleiner und $\tan \varphi$ oder $\tan \zeta$ größer wird. Die Brechung in den Projectionen des Strahls ist also stärker, je mehr die Einfallsebene von der Hauptebene abweicht. Da dies bei beiden Brechungen im Prisma stattfindet, muß auch die Gesamtablenkung der Projection von Strahlen, die geneigt zur Hauptebene durchgehen, stärker sein, als für solche, die in der Hauptebene verlaufen und bleiben.

Gleichung 10b) ergibt, daß auch die Größen $\cos \varphi$ und $\cos \psi$ nur gleichzeitig zu- und abnehmen können.

Wegen der hieraus resultirenden Krümmung prismatischer Bilder von leuchtenden Linien, dürfen letztere keine große Länge haben, wenn man genaue Spectren haben will und die brechende Kante des Prisma muß senkrecht gegen die Gesichtslinie des Beobachters und parallel dem Spalt sein.

II. Bilder näherer Punkte für Strahlen in der Hauptebene.

In Fig. 126 sei ab ein auf die Grenzfläche zweier durchsichtiger Medien fallender Strahl, ab , ein zweiter ihm sehr nahe benachbarter von demselben leuchtenden Punkte a ausgehender in derselben Einfallsebene gelegen. Das von b auf ab , gefällte Loth treffe den letzteren Strahl in d . Dies Loth macht mit der Ebene cb , denselben Winkel, wie die zu beiden normalen Linien ac und ae , also ist

$$bd = bb, \cdot \cos \alpha.$$

Wenn wir $bb, = dx$ und den sehr kleinen Winkel b, ab mit $d\alpha$ bezeichnen, können wir diese Gleichung schreiben

$$r \cdot d\alpha = dx \cdot \cos \alpha.$$

Sind nun b, f , und bf die gebrochenen Strahlen, die sich rückwärts verlängert schneiden müssen, da sie beide in der Ebene der Zeichnung (Einfallsebene) liegen, und ist e deren Schnittpunkt, $eb = r$, so besteht die entsprechende Beziehung zwischen diesen

$$r, \cdot d\beta = dx \cdot \cos \beta.$$

Daraus folgt:

$$\frac{r,}{r} = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \cdot \frac{d\alpha}{d\beta}.$$

Nach dem Brechungsgesetz ist

$$\sin \alpha = n \cdot \sin \beta,$$

also wenn wir α und β ändern:

$$\cos \alpha \cdot d\alpha = n \cdot \cos \beta \cdot d\beta.$$

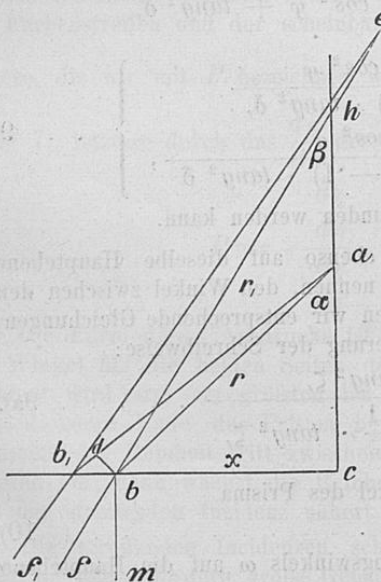


Fig. 126.

Dies in die obige Gleichung gesetzt, giebt

$$\frac{r_1}{r} = \frac{n \cdot \cos^2 \beta}{\cos^2 \alpha} \quad (11).$$

Wenn b , die Kante eines Prismas ist, und an der zweiten Fläche desselben der Einfallswinkel im Glase β , ist, außerhalb desselben α , wenn ferner r_2 die Entfernung des scheinbaren Convergenzpunktes der Strahlen nach der zweiten Brechung anzeigt, so ist hierfür entsprechend

$$\frac{r_2}{r} = \frac{n \cdot \cos^2 \beta}{\cos^2 \alpha} \quad (11a).$$

Also aus 11) und 11a)

$$\frac{r_2}{r} = \frac{\cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta}{\cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta} \quad (11b).$$

Es ist dies dieselbe GröÙe, die oben in Gleichung 6) schon vorgekommen ist als Werth von $\left(\frac{d\alpha}{d\beta}\right)^2$, und es lassen sich dieselben Betrachtungen anwenden, um den Gang dieser Function darzustellen.

Im Minimum der Ablenkung ist $\alpha = \beta$, $\alpha_1 = \beta_1$, folglich auch $r_2 = r$. Wenn $\alpha_1 < \alpha$ ist $r_2 > r$, umgekehrt $r_2 < r$, wenn $\alpha_1 > \alpha$. Man merkt dies sehr deutlich bei der Einstellung des Fernrohrs auf die FRAUNHOFER'schen Linien eines endlich entfernten Spaltes.

IIa. Astigmatismus der Bilder näherer Lichtpunkte.

Wenn man sich Fig. 126 um das vom leuchtenden Punkte a auf die brechende Fläche gefällte Loth ac als Axe gedreht denkt, so ändert die brechende Fläche ihre Lage nicht, indem sie sich in sich selbst verschiebt; der Einfallspunkt des Strahls ab aber verschiebt sich in der brechenden Fläche senkrecht zur Linie cb , während wir ihn in II. sich in Richtung dieser Linie selbst verschieben ließen; bf bleibt der zu ab gehörige gebrochene Strahl, und wenn h der Punkt ist, wo derselbe die Axe ac schneidet, so bleibt auch dieser Schnittpunkt bei der Drehung unverändert. Während also a der Ausgangspunkt aller in der Entfernung cb einfallenden Strahlen ist, ist h der Schnittpunkt der zugehörigen gebrochenen Strahlen. Bezeichnen wir $bh = r_3$, so ist

$$\sin \alpha = \frac{x}{r}$$

$$\sin \beta = \frac{x}{r_3},$$

also nach dem Brechungsgesetz

$$\frac{x}{r} = n \cdot \frac{x}{r_3}$$

oder

$$r_3 = n \cdot r.$$

Bezeichnet man mit r_4 den Abstand des Convergenzpunktes der betreffenden Strahlen nach der Brechung an der zweiten Prismenfläche, indem wir wieder die brechende Kante senkrecht zur Ebene der Zeichnung durch b gehend annehmen,

so wird für ein schmales Strahlenbündel der angegebenen Art wieder

$$r_3 = n \cdot r_4,$$

folglich

$$r_4 = r \dots \dots \dots 12).$$

Dies gilt also für schmale Strahlenbündel, die in Ebenen senkrecht zur Einfallsebene divergiren, wenn die mittlere Einfallsebene gleichzeitig Hauptebene ist. Für die in der Hauptebene divergirenden Strahlenbündel dagegen gelten die Gleichungen des Abschnitts II. Diese zeigen, daß $r_2 = r$ nur im Minimum der Ablenkung wird. In diesem Falle ist ein durch das Prisma gegangenes homocentrisches Strahlenbündel auch nach der Brechung homocentrisch; in andern Fällen astigmatisch.

Im Allgemeinen ist es für die Reinheit der Farbenstreifen und die Schärfe der FRAUNHOFER'schen Linien nicht erforderlich, daß die gebrochenen Strahlen homocentrisch seien. Nur ist zu bemerken, daß man bei astigmatischen Strahlen die Einstellung des Fernrohrs nicht gleichzeitig für die FRAUNHOFER'schen Linien und für die Ränder des Spectrum, die den Enden des Spalts entsprechen, oder für ZANTEDESCHI's Linien, die quer durch die Farbenstreifen ziehen und von kleinen Ungleichheiten des Spalts herrühren, genau machen kann.

260 Was die Helligkeit des Spectrum betrifft, so verhält sich die Helligkeit h des Spaltes, die er für irgend eine einzelne homogene Farbe hat, zu der seines Bildes umgekehrt wie seine Breite $d\varepsilon$ zu der des Bildes $d\eta$, wenn man übrigens von den Verlusten absieht, die das Licht durch Reflexion an den Glasflächen erleidet, und wenn die Apertur des Prisma größer als die Pupille ist, oder beim Gebrauch eines Fernrohrs größer als das Objectivglas. Also

$$h \cdot d\varepsilon = h_1 \cdot d\eta$$

oder mit Benutzung des früher gefundenen Verhältnisses von $d\varepsilon$ und $d\eta$

$$h_1 = h \cdot \frac{\cos \eta \cdot \cos \varepsilon_1}{\cos \varepsilon \cdot \cos \eta_1}.$$

Nun ist die Helligkeit H irgend einer Stelle des Spectrum aber gleich der Summe der Helligkeiten h_1 aller einzelnen homogenen Farben, welche sich dort decken. Im Allgemeinen können wir annehmen, daß einfache Farben von sehr kleinem Unterschiede der Wellenlänge λ nahehin dieselbe Helligkeit haben. Bezeichnen wir also mit $d\lambda$ und dn dies Intervall der Wellenlänge und Brechbarkeit, innerhalb deren die sich deckenden Farben liegen, so können wir setzen

$$H = h_1 \cdot d\lambda = h_1 \cdot \frac{d\lambda}{dn} \cdot dn,$$

woraus mit Berücksichtigung des in 7) gefundenen Werthes von dn folgt:

$$H = h \cdot \frac{\cos \eta \cdot \cos \varepsilon_1}{\sin \gamma} \cdot d\varepsilon \cdot \frac{d\lambda}{dn},$$

wo $d\varepsilon$ die scheinbare Breite des Spaltes bezeichnet. Um die Bedeutung dieses Ausdruckes von H zu verstehen, bemerken wir noch, daß, wenn wir unter Voraussetzung einer geometrischen Lichtlinie statt des Spaltes den Gesichtswinkel $d\eta$ bestimmen, unter welchem die innerhalb des Intervalls dn vorkommenden Farben in dem ideell reinen Spectrum erscheinen, sich das Verhältniß $\frac{d\eta}{d\lambda}$, dessen Werth

wir mit l bezeichnen wollen, durch eine ähnliche Differentiation wie vorher findet

$$\frac{d\eta}{dn} = \frac{d\eta}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{dn} = l \cdot \frac{d\lambda}{dn} = \frac{\sin \gamma}{\cos \eta \cdot \cos \varepsilon_1}.$$

Dann wird

$$H = \frac{h \cdot d\varepsilon}{l}.$$

Abgesehen also von dem Verluste durch Reflexion und Absorption, ist die Helligkeit des Spectrum, unabhängig von der Brechkraft des Prisma und den Brechungswinkeln, direct proportional der Helligkeit der betreffenden Farben im Spectrum, der scheinbaren Breite des Spaltes und umgekehrt proportional der scheinbaren Länge des betreffenden Theils des Spectrum.

Wenn die Brechung im Minimum der Ablenkung geschieht, ist die scheinbare 261
Breite des Spaltes der seines Bildes gleich, und man kann $\frac{l}{d\varepsilon}$ als Maß der Reinheit des Spectrum betrachten. Dann ist also die Helligkeit des Spectrum bei gleichbleibender Helligkeit des durch den Spalt dringenden Lichts einfach umgekehrt proportional seiner Reinheit. Daraus folgt also, daß zur Erreichung der größten Reinheit auch das intensivste Licht nöthig ist.

Dagegen würde es theoretisch möglich sein, etwas größere Helligkeit bei gleicher Reinheit des Spectrum zu gewinnen, wenn man den Einfallswinkel an der ersten brechenden Fläche vergrößert, und den Spalt breiter macht; um aber die Länge des Spectrum constant zu erhalten, müßte man auch noch den brechenden Winkel vergrößern. Indessen läßt sich praktisch dadurch nichts gewinnen, weil der Lichtverlust durch Reflexion immer größer wird, und die kleinen Abweichungen der brechenden Flächen von einer vollkommenen Ebene das Bild desto mehr verwirren, je größer der Einfallswinkel ist.

Bisher ist der Gebrauch des Prisma ohne Vergrößerungsgläser vorausgesetzt worden. Das prismatische Spectrum kann nun aber auch wie jedes andere optische Bild als Object für ein Fernrohr gebraucht und beliebig vergrößert werden. Dabei wird die Reinheit des Spectrum natürlich nicht verändert, und wenn das Fernrohr eine hinreichend große Apertur hat, um die gesehenen Gegenstände in ihrer natürlichen Helligkeit zu zeigen, und die Apertur des Prisma dieser gleichkommt, so ist auch die Helligkeit des vergrößerten Bildes unverändert. Auch bleiben die in dem Vorausgehenden hingestellten Regeln über Helligkeit und Reinheit des Spectrum unverändert, wenn man unter $d\varepsilon$ die scheinbare Größe des Spaltes, unter $d\eta$ die seines Bildes, unter l die Länge des bestimmten Theils des Spectrum versteht, wie sie durch das Fernrohr erscheinen. Aus der für die Helligkeit hingestellten Bedingung ergibt sich übrigens, warum für Versuche ohne Fernrohr ganz kleine Prismen ausreichen, während man für Fernrohrversuche desto größere haben muß, je stärker die Vergrößerung.

Um ein Spectrum herzustellen, läßt man Licht durch einen engen Spalt auf ein Prisma fallen, das hindurchgegangene Licht kann man entweder direct in das Auge oder ein Fernrohr fallen lassen, oder es durch eine Linse zu einem objectiven Bilde des Spectrum condensiren.

Als Lichtquelle kann man jeden leuchtenden Körper benutzen, bekanntlich ist die Helligkeit der einzelnen Farben in dem Lichte verschiedener selbstleuchtender Körper,

262 irdischer sowohl als himmlischer, von verschiedener Stärke, die Anordnung der dunkeln und hellen Linien ist verschieden. Will man das Spectrum des Sonnenlichts zu den Versuchen benutzen, so genügt für Spectren, in denen man nur die gröberen dunkeln Linien und nur die gewöhnlich sichtbaren Farben sehen will, das von einem Spiegel reflectirte Licht des Himmels oder ein von der Sonne beschienenes Papierblatt; nur ist in dem ersteren das Gelb und Orange ein wenig schwach. Man hat hierbei den Vortheil das diese Art der Beleuchtung lange Zeit unverändert sich erhält. Um die stärkeren dunkeln Linien *D*, *F* und *G* zu sehen genügt schon ein Spalt von 1 mm Breite in 400 mm Entfernung durch ein Flintglasprisma, dessen brechender Winkel 50° beträgt, mit bloßem Auge betrachtet; entfernt man sich doppelt so weit vom Spalte, so sieht man schon die meisten von FRAUNHOFER mit großen Buchstaben bezeichneten Linien. Man muß nur gerade die Stellung des Prisma suchen (nach S. 296), bei welcher sich das Auge für die Linien accommodiren kann.

Braucht man ein Spectrum von größerer Reinheit, in welchem auch die feineren dunkeln Linien sichtbar werden sollen, oder will man die äußersten Grenzen des Spectrum sichtbar machen, so muß man einen Spiegel aufstellen, welcher Licht von den der Sonne benachbarten Theilen des Himmels, oder von der Sonne selbst durch den Spalt auf das Prisma wirft, und diesen Spiegel, da die Sonne ihren Ort am Himmel ändert, entweder etwa alle drei Minuten von neuem einstellen oder ihn an einen Heliostaten befestigen, welcher ihm eine entsprechende-Bewegung mittheilt.

Den Spalt, durch welchen das Licht dringt, und welcher das eigentliche Object des prismatischen Bildes ist, kann man für Versuche, bei denen es nicht auf die feineren dunkeln Linien ankommt, oder wenn man seine Entfernung vom Prisma sehr groß machen kann, leicht aus undurchsichtigem Papier schneiden. Muß man dagegen einen sehr feinen Spalt anwenden, so dienen dazu am besten die GRAVESANDE'schen Schneiden.

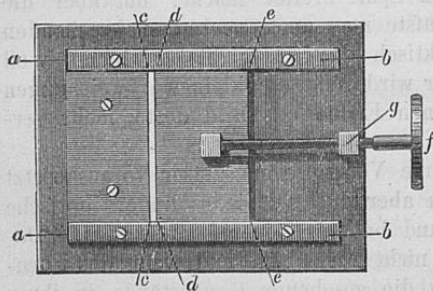


Fig. 127.

sprechenden Stelle einen Ausschnitt, welcher das zwischen den Schneiden durchgegangene Licht frei weiter gehen läßt.

Die GRAVESANDE'schen Schneiden müssen in der Mitte eines hinreichend großen dunkeln Schirms befestigt und ihre dem Beobachter zugekehrte Seite selbst geschwärzt sein. Der Schirm muß groß genug sein, daß in der Nähe des Spaltes nirgends ein beleuchteter Gegenstand sichtbar ist, dessen Spectrum bis zu dem des Spaltes hinreichen könnte. Bei allen Versuchen, wo nicht die vollständige Entfernung der letzten Reste weißen Lichtes erfordert wird, kommt es mehr darauf an, daß der Schirm, in welchem sich der Spalt befindet, gleichmäßig dunkel, als daß er absolut dunkel sei. Überall wo eine Verschiedenheit der Beleuchtung, selbst nur der Gegensatz von Sammet schwarz und Grauschwarz sich findet, zeigt das Prisma Farben, während eine gleichmäßig beleuchtete Fläche dergleichen nicht zeigt. Man kann also eine große Zahl solcher Versuche vollständig gut in einem hellen Zimmer auführen, wenn man nur den Spalt in einem genügend großen und gleichmäßig schwarz gefärbten Schirm anbringt.

Für viele Versuche, bei denen es nicht auf sehr sorgfältige Reinigung des farbigen Lichtes ankommt, sind die Spectroskope sehr bequem. Das Prisma ist darin auf einem drehbaren Stativ aufgestellt, welches auch zwei Röhren trägt, von denen die eine ein vollständiges, auf Unendlich eingestelltes Fernrohr ist, die andre von einem solchen nur die Objectivlinse als Collimatorlinse enthält, statt des Oculars dagegen den Spalt mit GRAVESANDE'S Schneiden in einer Auszugsröhre trägt. Das Innere dieser Röhre ist sorgfältig geschwärzt, der Raum zwischen beiden Röhren, in dem das Prisma steht, wird mit einem schwarzen Tuche überdeckt, um alles fremde Licht abzuhalten. Der Spalt wird genau in den Brennpunkt der Collimatorlinse eingestellt, so daß diese die Strahlen von jedem Punkt des Spaltes einander parallel macht; so fallen sie auf das Prisma, und nachdem sie von diesem abgelenkt sind, in das Fernrohr, durch welches der Beobachter das in ein Spectrum ausgezogene Bild des Spaltes sieht. Sind die beiden Röhren an Armen befestigt, die um die verticale Axe des Stativs drehbar sind, und deren Drehungswinkel durch eine passend angebrachte Winkeltheilung gemessen werden kann, so nennt man die Apparate Spectrometer. Die Construction derselben findet sich in den physikalischen Lehrbüchern beschrieben.

Für viele physiologisch optische Fragen ist es wichtig etwas grössere Felder nur mit einer der Spectralfarben ausgefüllt, vor sich zu haben. Dazu kann man das Spectroskop leicht einrichten, wenn man für das Fernrohr eine zweite Auszugsröhre mit GRAVESANDE'S Schneiden anfertigen läßt, die an Stelle der Ocularröhre in das Fernrohr eingesetzt werden kann. Das Schema dieser Anordnung ist in *Fig. 128* dargestellt; darin ist *k* eine Sammellinse, welche die ankommenden Lichtstrahlen auf den Spalt des Schirmes *b* concentrirt; *l* ist die Collimatorlinse, in deren Brennpunkt der Spalt von *b* steht, *P* das Prisma, *m* das Fernrohrobjectiv, in dessen Brennpunkt statt des Oculars der zweite Schirm *a* steht; hinter diesem das Auge des Beobachters. Wenn die beiden

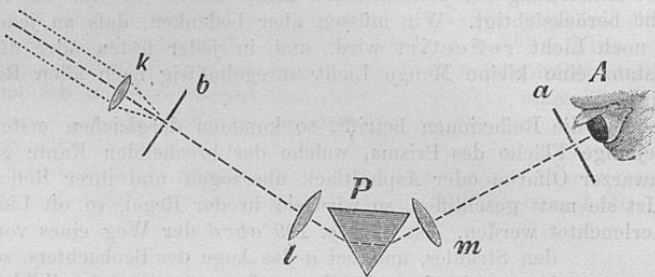


Fig. 128.

Spalte dann genau so eingestellt werden, daß für eine gewählte Farbe der zweite genau das optische Bild des ersten ist, so geht durch den zweiten nur farbiges Licht von der Brechbarkeit dieser Farbe hindurch, alles andere wird neben dem Spalte abgefangen. Der Beobachter sieht dann durch den zweiten Spalt die ganze brechende Fläche des Prismas vor sich mit nur dieser einen Farbe beleuchtet. Sollte dieselbe noch nicht ganz homogen erscheinen, so sind die beiden Spalten nicht in genau zusammengehörigen Vereinigungspunkten. Erscheint die Farbe durch den oberen Theil des Ocularspalts gesehen etwas anders, als durch den untern Theil, so sind die Spalte nicht parallel.

Um hierbei gleichmäßige Beleuchtung des Prismas zu erhalten, und andererseits um bei der Beobachtung des Spectrum durch das Fernrohr nicht durch Diffractionen und halbe Zerstreungskreise gestört zu werden, muß man dafür sorgen, daß von jedem Punkt des Spaltes volle Lichtkegel zu der Collimatorlinse, beziehlich durch das Prisma zum Objectiv des Fernrohrs gehen. Deshalb ist es bei schmalen Lichtquellen oft nöthig, vor dem ersten Spalt *b* noch eine Brennlinse *k* aufzustellen, die ein Bild der Sonne oder der Beleuchtungsflamme auf der Ebene des Spaltes entwirft. Übrigens ist zu

bemerken, daß die Collimatorlinse die im Folgenden zu besprechenden Störungen durch Licht, welches unregelmäßige Wege einschlägt, verneht.

- 262 Wenn es dagegen auf vollständige Entfernung des weißen Lichtes ankommt, wie bei den Versuchen, welche die Unzerlegbarkeit und Unveränderlichkeit
- 263 des homogenen Lichtes nachweisen sollen, und bei den Untersuchungen der Grenzen des Spectrum, muß der Schirm, in welchem sich der Spalt befindet, absolut dunkel sein. Am leichtesten ist dies zu erreichen, wenn man über ein zu optischen Versuchen eingerichtetes dunkles Zimmer mit verschlossenen und dicht eingefügten Fensterläden verfügen kann. Man setzt dann die Platte mit den Schneiden gleich in eine Öffnung der Läden selbst ein. Übrigens läßt sich dasselbe oft auch in den gewöhnlichen Wohnzimmern erreichen, wenn man die Fenstervorhänge und Fensterläden bis auf eine schmale Spalte schließt, durch welche das Licht einfällt. Die Spalte wird im Boden eines schwarz ausgestrichenen Kastens angebracht, dessen offene Mündung dem Beobachter zugekehrt ist. Die Seitenwände des Kastens halten das seitlich einfallende Licht vom Grunde des Kastens ab, so daß dieser schon sehr dunkel wird. Neben den Spalt klebt man dann zwei Streifen schwarzen Sammets in den Grund des Kastens, deren Breite der Länge des Spaltes gleich ist, und deren Länge die Länge des auf die Ebene des Spaltes projectirten Spectrum um etwas übertrifft, so daß sich das ganze Spectrum auf der Fläche des Sammets entwirft. Außerdem muß man durch Aufstellung passender dunkler Schirme dafür sorgen, daß kein Licht von den noch übrig gebliebenen helleren Stellen des Zimmers auf das Prisma oder die Linsen des Fernrohrs und das Auge des Beobachters fällt.

Die Herstellung eines absolut dunkeln Schirms in einem dunkeln Zimmer genügt aber noch nicht, um das Spectrum von den letzten sichtbaren Resten weißen Lichts zu befreien, so lange noch intensives Licht von mehreren Farben das Prisma selbst, die Linsen des Fernrohrs und das Auge des Beobachters trifft. In der oben entwickelten Theorie für die Entstehung der prismatischen Bilder haben wir nur das regelmäÙig gebrochene Licht berücksichtigt. Wir müssen aber bedenken, daß an jeder brechenden Fläche auch noch Licht reflectirt wird, und in jeder festen oder flüssigen durchsichtigen Substanz eine kleine Menge Licht unregelmäÙig nach allen Richtungen hin zerstreut wird.

Was zunächst die Reflexionen betrifft, so kommen dergleichen erstens im Prisma vor, wenn diejenige Fläche des Prisma, welche der brechenden Kante gegenüberliegt, nicht mit schwarzer Ölfarbe oder Asphaltlack überzogen und ihrer Reflexionsfähigkeit beraubt ist. Ist sie matt geschliffen, so wird sie in der Regel, so oft Licht durch das Prisma geht, erleuchtet werden. Ist in *Fig. 129 abcd* der Weg eines von *d* kommenden Strahles, und bei *a* das Auge des Beobachters, so erblickt der letztere in der scheinbaren Lage *fe* ein Spiegelbild der Fläche *fe* des Prisma, welches hell erscheint, wenn diese Fläche erleuchtet ist, und also diffuses weißes Licht im Gesichtsfelde des Beobachters verbreitet. Ist die Fläche *fe* dagegen auch polirt, so reflectirt sie das Licht regelmäÙig, und namentlich bei Prismen, deren Querschnitt ein gleichschenkeliges Dreieck ist, gelangt aufser dem Wege *dcba* auch noch Licht auf dem Wege *debgecb* nach drei Reflexionen bei *b*, *g* und *c* nach *a*. Dieses Licht ist nicht in Farben zerlegt, sondern weiß. Der Beobachter sieht vermittels dieses Lichts ein schwaches weißes Bild des Spaltes in seinem Gesichtsfelde und kann es benutzen, um das Minimum der Ablenkung genau hervorzubringen. Bei Prismen, deren Querschnitt ein gleichschenkeliges Dreieck ist, fällt nämlich dieses weiÙe Bild genau mit der Farbe des Spectrum zusammen, welche im Minimum der Ablenkung steht. Ein solches genau begrenztes schwaches

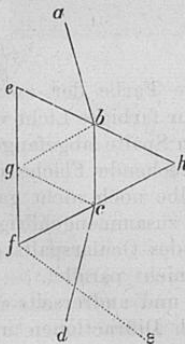


Fig. 129.

weißes Bild des Spaltes ist allerdings bei unseren Versuchen weniger zu fürchten, weil es einen verhältnißmäßigen kleinen Theil des Gesichtsfeldes einnimmt, es ist weniger schädlich, als das Spiegelbild der Fläche *fe*, wenn diese matt geschliffen ist. Dagegen

kann nun auch durch diese Fläche Licht von seitlichen Gegenständen in das Auge des Beobachters kommen, für dessen Ablendung man sorgen muß. Am besten ist es jedenfalls, mit Ausnahme der beiden brechenden Flächen des Prisma alle übrigen zu schwärzen.

Wenn man das Spectrum durch ein Fernrohr beobachtet, kommen auch die Reflexionen an den vorderen und hinteren Flächen der Linsen in Betracht. Es werden dadurch kleine lichtschwache regelmässige Bildchen der vor dem Fernrohr liegenden Objecte entworfen, die aber meist so liegen, dafs der Beobachter sein Auge nicht für sie accommodiren kann, und die deshalb eine schwache weifse Beleuchtung des Gesichtsfeldes geben. Man bemerkt diese Beleuchtung leicht, wenn man ein Fernrohr auf einen tief-schwarzen Gegenstand richtet, während seitwärts sich sehr helle befinden. Das Gesichtsfeld grenzt sich dann als schwach erleuchtet gegen die schwarze Blendung des Oculars ab.

Einen ähnlichen, aber schwerer zu beseitigenden Effect hat die Zerstreuung des Lichts in den Glasmassen. Eine jede noch so klare Glasmasse erscheint weiflich trübe, sobald man sie scharf von der Sonne beschienen vor dunklem Grunde betrachtet, namentlich wenn das Auge sich nahehin in der Richtung der durchgelassenen Strahlen befindet. Dasselbe ist, wie wir schon früher bemerkt haben¹, der Fall mit der Hornhaut und Linse des menschlichen Auges. Wir müssen also berücksichtigen, dafs jede der vom Lichte durchlaufenen Glasmassen eine, wenn auch verhältnifsmässig kleine Menge des Lichtes, welches überhaupt durch sie hinget, diffus zerstreut und mit solchem Licht das Gesichtsfeld des Beobachters anfüllt. Ebenso ist auch stets eine sehr kleine Menge von jeder Art Licht, welche überhaupt in das Auge dringt, über die ganze Netzhaut ausgebreitet. Solches unregelmässig zerstreute Licht ist allerdings von auferordentlich geringer Lichtstärke, wenn man es mit dem regelmässig gebrochenen oder reflectirten Lichte vergleicht. Doch wird es merklich, wenn man sehr lichtschwache Theile des Spectrum zu untersuchen hat. Es ist z. B. der Grund, warum man bei den gewöhnlichen Einrichtungen der Spectralversuche das äußerste Roth der Linie *A* und das Ultraviolett nicht wahrnimmt, und es macht sich auch sehr bemerklich, wenn man einzelne Stellen des Spectrum durch farbige Gläser oder Flüssigkeiten sehr abschwächt, dann kann der Farbenton solcher Stellen durch das diffus im Gesichtsfelde verbreitete schwache Licht sehr beträchtlich geändert werden.

Diese Schwierigkeiten lassen sich bei Untersuchungen über lichtschwache Theile des Spectrum nur dadurch vollständig überwinden, dafs man durch den Spalt nur noch

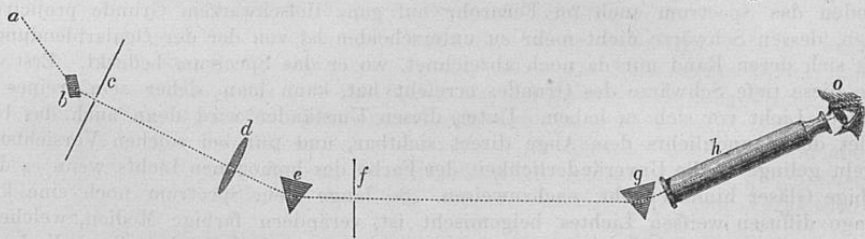


Fig. 130.

solches Licht in größerer Stärke auf das Prisma und Fernrohr fallen läßt, wie es gerade untersucht werden soll, und alles Licht anderer Art, so weit man kann, ausschließt. In einzelnen Fällen kann man dies einfach dadurch erreichen, dafs man farbige Gläser zwischen die Lichtquelle und den Spalt einschaltet, z. B. rothes Glas, um die Grenze des äußersten Roth im Spectrum sichtbar zu machen. Allgemeiner und vollständiger erreicht man den Zweck, wenn man hintereinander zwei Spalten und zwei Prismen aufstellt, in der Weise, dafs durch den zweiten Spalt, dessen Bild das Spectrum geben soll,

¹ S. oben S. 25 und 177.

nur noch Licht der betreffenden Art hindurchgeht. Das Schema dieser Anordnung ist in *Fig. 130* gegeben. Der einfallende Lichtstrahl *ab* trifft bei *b* auf den Spiegel des Heliostaten, geht durch einen Spalt in dem Schirme *c*, der im Allgemeinen nicht sehr eng zu sein braucht, fällt dann auf die Linse *d* und das Prisma *e* auf den Schirm *f*, welcher so weit von der Linse absteht, daß die vom Spalte *c* ausgegangenen Strahlen auf ihm vereinigt werden, so daß auf ihm ein in ein Spectrum ausgezogenes Bild dieses Spaltes entsteht. Dieses erste Spectrum braucht im Allgemeinen nicht rein zu sein. Es muß vielmehr, so oft man einen etwas breiteren Theil des Spectrum untersuchen will, wie z. B. das Ultraviolett, so unrein sein, daß es eine Stelle giebt, wo sich sämtliche ultraviolette Strahlen decken. Um dies nach Belieben zu reguliren, ist es eben vortheilhafter, das Prisma zwischen Linse und Schirm zu stellen. Nähert man den Schirm dem Prisma, und entfernt die Linse um ein entsprechendes Stück, so wird das Spectrum kürzer und unreiner. Entfernt man den Schirm von dem Prisma, so wird er länger und reiner. In dem Schirme *f* befindet sich zwischen GRAVESANDE'schen Schneiden ein feiner Spalt, den man so stellt, daß gerade die Farbe des Spectrum, welche untersucht werden soll, sich auf ihm projectirt. Will man z. B. das Ultraviolett untersuchen, so rückt man den Spalt so, daß er neben dem äußersten Rande des sichtbaren Violet steht. Unter diesen Umständen geht nun regelmäßig gebrochenes Ultraviolett, so lichtstark als es eben die Sonne liefert, durch den Spalt, und gleichzeitig etwas weißes von der Substanz des Prisma und der Lins^e diffus zerstreutes oder an ihren Flächen mehrfach reflectirtes Licht. Das letztere ist allerdings außerordentlich viel schwächer, als das regelmäßig gebrochene Sonnenlicht im Spectrum, aber doch stark genug, um auf dem Schirme *f* das Ultraviolett ganz zu verdecken. Das durch den Spalt *f* gegangene Licht fällt nun auf das zweite Prisma *g* und dahinter entweder unmittelbar oder durch ein Fernrohr in das Auge des Beobachters, wenn man nicht vorzieht, statt des Fernrohrs eine Linse aufzustellen, und in ihrem Brennpunkte auf einem Schirme ein objectives Bild des Spectrum aufzufangen. Da durch den Spalt *f* noch etwas weißes Licht gegangen ist, bekommt man auch hier ein vollständiges Spectrum, aber alle seine Theile sind sehr lichtschwach mit Ausnahme des Ultraviolet, oder welche andere Farbe des im ersten Prisma regelmäßig gebrochenen Lichtes man eben durch den Spalt *f* hat gehen lassen. Wenn auch nun im zweiten Prisma *g* und in den Linsen des Fernrohrs *h* oder im Auge des Beobachters *o* Licht unregelmäßig zerstreut wird, so ist alles andere Licht außer dem Ultraviolett jetzt schon zu schwach, als daß die geringen zerstreuten Theile desselben noch sollten wahrgenommen werden können. In der That gelingt es unter diesen Umständen das Spectrum auch im Fernrohr auf ganz tiefschwarzem Grunde projectirt zu sehen, dessen Schwärze nicht mehr zu unterscheiden ist von der der Ocularblendung, so daß sich deren Rand nur da noch abzeichnet, wo er das Spectrum bedeckt. Erst wenn man diese tiefe Schwärze des Grundes erreicht hat, kann man sicher sein, reines einfarbiges Licht vor sich zu haben. Unter diesen Umständen wird denn auch das Ultraviolett des Sonnenlichts dem Auge direct sichtbar, und nur bei solchen Vorsichtsmaßregeln gelingt es die Unveränderlichkeit der Farbe des homogenen Lichts, wenn es durch farbige Gläser hindurchgeht, nachzuweisen. So lange dem Spectrum noch eine kleine Menge diffusen weißen Lichtes beigemischt ist, verändern farbige Medien, welche die betreffende Farbe durch Absorption sehr schwächen, auch scheinbar ihren Farbenton. Ein blaues mit Kobalt gefärbtes Glas zum Beispiel löscht das Gelb des Spectrum fast ganz aus, läßt aber die blauen Strahlen des zerstreuten weißen Lichts ungeschwächt durchgehen, so daß diese, mit dem durch Absorption geschwächten Gelb sich mischend, eine weiße oder selbst blauweiße Mischfarbe an Stelle des Gelb geben, welche Mischfarbe aber nicht, wie D. BREWSTER glaubte, Licht von einem einzigen Grade der Brechbarkeit enthält, sondern deren Licht durch ein zweites Prisma wieder zerlegt werden kann in verschiedenfarbiges und verschieden brechbares Licht. Stellt man denselben Versuch dagegen an einem von diffus^em Lichte vollständig befreiten Spectrum an, so bleibt das homogene Gelb auch bei den äußersten Graden der Schwächung durch ein blaues Glas rein gelb. Wir dürfen deshalb auch nicht, wie BREWSTER es gethan hat,

aus diesem und ähnlichen Versuchen schliesen, daß das Licht gleicher Brechbarkeit und Wellenlänge noch wieder aus drei verschiedenen Lichtarten von rother, gelber und blauer Farbe zusammengesetzt sei, welche verschiedenfarbigen Lichter nur in verschiedenen Theilen des Spectrum verschieden gemischt seien, und durch die Absorption in farbigen Medien von einander getrennt werden könnten. Die Versuche, auf welche er diese Resultate gründet, beruhen theils auf dem erwähnten Umstande, zum Theil auf Contrastwirkungen, zum Theil auf der schon oben erwähnten Abhängigkeit des Farbentons von der Intensität des Lichts¹.

266

Nach der beschriebenen und in *Fig. 130* schematisch dargestellten Methode kann man das übriviolette Spectrum in ganzer Länge dem Auge direct sichtbar machen, ohne eine fluorescirende Substanz anzuwenden, doch müssen für das äußerste Ultraviolett die Prismen und Linsen alle aus Bergkrystall gefertigt sein, nicht aus Glas, weil letzteres die äußersten ultravioletten Strahlen des Sonnenspectrum merklich absorhirt. Man sieht dann auch sehr deutlich die außerordentlich große Zahl dunkler Linien, welche dieser Theil des Spectrum enthält. Ich glaubte die Helligkeit des im Fernrohre gesehenen ultravioletten Spectrum verstärken zu können, wenn ich in die Ocularblendung eine dünne Schicht Chininlösung zwischen zwei Quarzplatten einschaltete. Dann wird das Spectrum gerade auf die Chininlösung projicirt und erregt deren Fluorescenz. Die fluorescirende Chininfläche wird durch die Ocularlinse betrachtet, und es erscheint nun dem Beobachter ein ähnliches Bild, wie es ohne Chininschicht erscheint, nur ist das Bild dann nicht aus ultraviolettem Lichte, sondern aus weißblauem Lichte mittlerer Brechbarkeit gebildet. Die Helligkeit dieses Bildes war aber in meinem Fernrohr nicht, wie ich erwartet hatte, größer als die des direct gesehenen ultravioletten Lichts, sondern fast gleich, eher kleiner, und die Linien waren wegen der Dicke der Chininschicht undeutlicher. Der Grund davon ist darin zu suchen, daß durch das Objectivglas des Fernrohrs nur ein schmaler Lichtkegel in das Instrument eindringt, alles oder fast alles Licht dieses Kegels aber auch in das Auge fällt und die Netzhaut beleuchtet, wenn keine Chininschicht eingeschaltet ist. Wenn aber das ultraviolette Licht auf eine Chininlösung fällt, so verbreitet sich das vom Chinin ausgehende Licht nach allen Richtungen des Raums hin, und nur ein sehr kleiner Theil desselben trifft das Auge des Beobachters, daher dessen Netzhaut trotz der großen Steigerung der Helligkeit des fluorescirenden Lichts nicht stärker beleuchtet wird. Auf diese Erfahrung ist die oben gegebene Angabe über das Verhältniß der Helligkeit des unveränderten ultravioletten Lichts und der dadurch auf Chinin erregten Fluorescenz gegründet.

Ist a die Apertur des Objectivglases oder des davor stehenden Prisma, wenn letzteres die Grundfläche des Lichtkegels begrenzt, und r der Abstand des Bildes, und denkt man sich ferner um den Ort des Bildes als Mittelpunkt eine Kugelfläche vom Radius r geschlagen, so würde das ultraviolette Licht, wenn es sich ungestört fortpflanzte, von der Kugelfläche nur eine Fläche von der Größe a beleuchten. Wäre das Bild aber auf Chinin gefallen, so würde es die ganze Kugelfläche, deren Größe $4\pi r^2$ ist, gleichmäßig beleuchten. Im ersten Falle ist das Licht also concentrirter in dem Verhältnisse $\frac{4\pi r^2}{a}$ im Vergleich zum letzteren Falle, und wenn ein Auge, dessen Pupille ganz in das Strahlenbündel beider Lichtarten eingetaucht ist, sie beide gleich hell sieht, so folgt, daß bei gleicher Verbreitungsweise das Fluorescenzlicht im Verhältniß $\frac{4\pi r^2}{a}$ heller sein würde. Letzterer Bruch war bei meinem Apparat, nach Anstellung der nöthigen Correctionen, gleich 1200. Daraus folgt also, daß das ultraviolette Licht auf einem Chininschirme aufgefangen etwa 1200 Mal heller erscheinen muß, als wenn es auf einer nicht fluorescirenden matten weißen Fläche von Porzellan aufgefangen wird.

¹ HELMHOLTZ, *Pogg. Ann.* LXXXVI. 501. 1852. — BERNARD, *Ann. de Chim.* XXXV. 385—438. 1852.
v. HELMHOLTZ, *Physiol. Optik.* 2. Aufl.

Die Fluorescenz der stark fluorescirenden Substanzen kann man in jedem Spectrum leicht beobachten und erkennen. Handelt es sich aber darum die schwächsten Grade der Fluorescenz wahrzunehmen, wie z. B. die der Netzhaut, so kann man den in *Fig. 130* dargestellten Apparat mit folgenden Abänderungen benutzen. Man macht das erste Spectrum sehr unrein, indem man den ersten Spalt bei *c* ganz wegnimmt und das Prisma *e* ziemlich nahe an den Schirm *f* heranrückt; dabei läßt man die Grenze des Violet auf dem Schirme *f* gerade dessen weit geöffneten Spalt berühren. Von dem Fernrohr *h* läßt man nur die Objectivlinse stehen, und bringt dann in deren Brennpunkt, wo das ultraviolette Licht am meisten concentrirt und von allem weissen Lichte gereinigt ist, die fraglichen Substanzen. Es giebt kaum irgend welche Stoffe, an denen man unter solchen Umständen nicht Spuren von Fluorescenz wahrnehme. Da bei diesen Versuchen auch das unveränderte ultraviolette Licht noch sichtbar sein kann, so blickt man nach 267 der untersuchten Substanz entweder durch ein gelbes oder grünes Glas (am besten Uranglas), welches das Ultraviolet auslöscht, oder durch ein schwach brechendes Prisma, welches das Ultraviolet von den Farben mittlerer Brechbarkeit trennt. Die Fluorescenz der Linse und der Hornhaut des Auges ist leicht nachzuweisen, wenn man ein lebendes Auge in den Focus ultravioletten Lichts bringt. Die Linse wird so stark beleuchtet, dafs man noch viel besser als bei der Beleuchtung mit gewöhnlichem Licht (S. 25—26) ihre Lage dicht hinter der Iris und ihre Form erkennen kann. Die fluorescirende Linse zerstreut natürlich eine grofse Menge blauweissen Lichts gleichmäfsig über den ganzen Hintergrund des Auges. Wenn man dagegen ein ultraviolettes Spectrum betrachtet, sieht man dies sehr scharf und fein gezeichnet. Daher darf man nicht daran denken, dafs das überviolette Licht dem Auge etwa wegen der Fluorescenz der Linse sichtbar würde. Letztere könnte nie ein scharf begrenztes Netzhautbild geben.

In derselben Weise wie das Ultraviolet untersucht man das äufserste Roth.

Die Methoden der Wellenmessungen gehören in die physikalische Optik, auf welche ich in dieser Beziehung verweisen mufs.

VOR NEWTON'S Zeit bestand die Farbentheorie meist aus unbestimmten Hypothesen. Da das aus dem gesammten weissen Lichte ausgeschiedene farbige Licht als Theil nothwendig immer geringere Intensität hat als das Ganze, so betrachtete man in älterer Zeit diese Verminderung der Lichtintensität als das Wesentlichste der Farbe, und die Meinung des ARISTOTELES, Farbe entstehe durch die Mischung von Weifs und Schwarz, zählte viele Anhänger. Er selbst ist unschlüssig, ob er diese Vermischung als eine wahre Verschmelzung oder mehr als ein atomistisches Über- oder Nebeneinanderliegen denken soll. Das Dunkel, meint er, müsse durch die Reflexion an den Körpern entstehen, da jede Reflexion das Licht schwäche. Es ist dies die durchgängige Ansicht bis zum Anfange der neueren Zeit z. B. bei MAUROLYCUS, JOH. FLEISCHER, DE DOMINIS, FUNK, NUGUER (siehe GOETHE'S Geschichte der Farbenlehre), und in neuerer Zeit hat GOETHE¹ sie noch einmal in seiner Farbenlehre zu vertheidigen gesucht. Dieser geht eigentlich nicht darauf aus eine Erklärung der Farbenerscheinungen im physikalischen Sinne zu geben — als solche genommen, würden seine Sätze sinnlos sein —, sondern er sucht nur die Bedingungen allgemein aufzustellen, unter denen Farben entstehen; diese sollen sich in einem „Urphänomen“ deutlich darlegen. Als solches betrachtet er die Farben trüber Medien. Eine grofse Zahl solcher Medien machen durchgehendes Licht roth, auffallendes läßt sie vor dunklem Hintergrunde blau erscheinen. Während nun GOETHE im Allgemeinen der Ansicht des ARISTOTELES folgt, dafs das Licht verdunkelt, oder mit Dunkel gemischt werden müsse, um Farben zu erzeugen, glaubt er in den Erscheinungen der trüben Medien die besondere Art der Verdunkelung gefunden zu haben, welche nicht Grau, sondern Farben erzeuge. Was dadurch am Lichte selbst geändert werde, erklärt er nie. Er spricht wohl davon, dafs das trübe Medium dem Lichte etwas Körperliches, Schattiges gebe, wie es zur Erzeugung der Farbe nöthig sei. Wie er sich dies denkt, deutet er nicht näher an. Unmöglich kann er meinen, dafs von den Körpern etwas

¹ GOETHE, *Beiträge zur Optik*. Weimar 1791. 92. — *Zur Farbenlehre*. 1810.

Körperliches mit dem Lichte davonfliege; und einen andern Sinn könnte es doch kaum haben, wenn es eine physikalische Erklärung sein sollte.

GOETHE betrachtet ferner alle durchsichtigen Körper als schwach trübe, so auch das Prisma, und nimmt an, daß das Prisma dem Bilde, welches es dem Beobachter zeigt, von seiner Trübung etwas mittheile. Er scheint dabei gemeint zu haben, daß das Prisma nie ganz scharfe Bilder entwirft, sondern undeutliche, verwaschene; denn er reiht sie in der Farbenlehre an die Nebenbilder an, welche parallele Glasplatten und Krystalle von Kalkspath zeigen. Verwaschen sind die Bilder des Prisma allerdings im zusammengesetzten Lichte, vollkommen scharf im einfachen, welches GOETHE, wie es scheint, aber nie vor sich gehabt hat, da er die zusammengesetzten Methoden, welche es liefern können, einzuschlagen verschmähte. Betrachte man, meint er, durch das Prisma eine helle Fläche auf dunklem Grunde, so werde das Bild vom Prisma verschoben und getrübt. Der vorangehende Rand desselben werde über den dunklen Grund hinübergeschoben, und erscheine als helles Trübes vor Dunklem blau. Der hinterher folgende Rand der hellen Fläche werde aber von dem vorgeschobenem trüben Bilde des darnach folgenden schwarzen Grundes überdeckt und erscheine als ein Helles hinter einem dunkeln Trüben gelbroth. Warum der vorangehende dunkle Rand vor dem Grunde, der nachbleibende hinter demselben erscheine, und nicht umgekehrt, erklärt er nicht. Auch diese Darstellung der Sache, wenn man sie als physikalische Erklärung fassen wollte, wäre sinnlos. Denn das prismatische Bild, welches in diesen Fällen gesehen wird, ist ein potentiell, also nur der geometrische Ort, in welchem rückwärts verlängert, sich die Lichtstrahlen, welche in das Auge des Beobachters fallen, schneiden würden, und kann also nicht die physikalischen Wirkungen eines trüben Mittels ausüben. Es sind diese GOETHE'schen Darstellungen eben nicht als physikalische Erklärungen, sondern nur als bildliche Versinnlichungen des Vorgangs aufzufassen. Er geht überhaupt in seinen naturwissenschaftlichen Arbeiten darauf aus, das Gebiet der sinnlichen Anschauung nicht zu verlassen, jede physikalische Erklärung muß aber zu den Kräften aufsteigen, und die können natürlich nie Object der sinnlichen Anschauung werden, sondern nur Objecte des begreifenden Verstandes.

268

Die Versuche, welche GOETHE in seiner Farbenlehre angiebt, sind genau beobachtet und lebhaft beschrieben; über ihre Richtigkeit ist kein Streit. Die entscheidenden Versuche mit möglichst gereinigtem einfachen Lichte, auf welche NEWTON's Theorie gegründet ist, scheint er nie nachgemacht oder gesehen zu haben. Seine übermächtig heftige Polemik gegen NEWTON gründet sich mehr darauf, daß dessen Fundamentalthypothesen ihm absurd erscheinen, als daß er etwas Erhebliches gegen seine Versuche oder Schlußfolgerungen einzuwenden hätte. Der Grund aber, weshalb ihm NEWTON's Annahme, das weiße Licht sei aus vielfarbigem zusammengesetzt, so absurd erschien, liegt wieder in seinem künstlerischen Standpunkte, der ihn nöthigte alle Schönheit und Wahrheit unmittelbar in der sinnlichen Anschauung ausgedrückt zu suchen. Die Physiologie der Sinnesempfindungen war damals noch unentwickelt; die Zusammensetzung des Weißen, welche NEWTON behauptete, war der erste entschiedene empirische Schritt zu dem Erkenntniß der nur subjectiven Bedeutung der Sinnesempfindungen. Und GOETHE hatte daher ein richtiges Vorgefühl, wenn er diesem ersten Schritte heftig opponirte, welcher den „schönen Schein“ der Sinnesempfindungen zu zerstören drohte.

Das große Aufsehen, welches GOETHE's Farbenlehre in Deutschland machte, beruhte zum Theil darauf, daß das große Publicum, ungeübt in der Strenge wissenschaftlicher Untersuchungen, natürlich mehr geneigt war einer künstlerisch anschaulichen Darstellung des Gegenstandes zu folgen, als mathematisch physikalischen Abstractionen. Dann bemächtigte sich auch die HEGEL'sche Naturphilosophie der GOETHE'schen Farbenlehre für ihre Zwecke. HEGEL wollte ähnlich wie GOETHE in den Naturerscheinungen den unmittelbaren Ausdruck gewisser Ideen oder gewisser Stufen des dialectisch sich entwickelnden Denkens sehen, darin liegt seine Verwandtschaft mit GOETHE und sein principieller Gegensatz gegen die theoretische Physik.

DESCARTES¹ machte bei Gelegenheit seiner Untersuchungen über die Theorie des Regenbogens eine neue Hypothese, indem er annahm, die Theilchen, aus denen das Licht bestehe, hätten nicht bloß eine geradlinige Bewegung, sondern rotiren auch noch um ihre Axe und von der Rotationsgeschwindigkeit hänge die Farbe ab. Die Rotation und somit auch die Farbe könne übrigens geändert werden durch Einwirkung durchsichtiger Körper. Ähnliche mechanische Vorstellungen bildeten sich HOOKE und DE LA HIRE; letzterer liefs die Farben von der Stärke abhängen, mit der das Licht den Sehnerven trifft.

Endlich bewies NEWTON² die Zusammensetzung des weissen Lichts, und schied einfaches Licht aus, zeigte, dafs dies farbig erscheine, dafs dessen Farbe durch Absorption und Brechung nicht weiter verändert werden könne, dafs verschiedenfarbiges Licht verschiedene Brechbarkeit besitze, und dafs die Farben der natürlichen Körper durch verschiedene Absorption und Reflexion der verschiedenartigen Lichtstrahlen entstünden. Übrigens erklärt er die Farbe der Lichtstrahlen schon durchaus aus ihrer Wirkung auf die Netzhaut; nicht die Lichtstrahlen selbst seien roth, sondern sie bewirkten die Empfindung des Roth. Er folgte der Emanationstheorie des Lichtes; Hypothesen über den physikalischen Unterschied der verschiedenfarbigen Lichtarten machte er nicht.

Ziemlich gleichzeitig, 1690, hatte HUYGHENS die Hypothese aufgestellt, dafs das Licht in Undulationen eines feinen elastischen Medium bestehe; diese Hypothese brachte EULER³ mit NEWTON'S Entdeckungen in Verbindung, und folgerte daraus, dafs die einfachen Farben sich durch ihre Schwingungsdauer unterschieden; aber freilich nahm er zuerst an, die rothen machten die schnelleren Schwingungen, und fand erst später das Richtige; HARTLEY stützte diese Ansicht richtig auf die Farben dünner Blättchen. Eine bestimmte Entscheidung darüber wurde erst möglich, als TH. YOUNG und FRESNEL das Princip der Interferenz entdeckt hatten, und durch diese Entdeckung gewann auch erst die Undulationstheorie eine allgemeine Anerkennung.

Gegen NEWTON'S Folgerung, dafs die Farbe der Strahlen von der Brechbarkeit abhängt, Strahlen von einem constanten Grade der Brechbarkeit übrigens homogen und von unveränderlicher Farbe seien, trat D. BREWSTER auf. Er meinte beobachtet zu haben, dafs homogenes Licht, wenn es durch farbige Mittel gehe, seine Farbe ändern könne, und meinte auf diese Weise aus homogenem Lichte Weiss ausscheiden zu können. Er schlofs daraus, dafs es dreierlei verschiedene Arten Licht, den drei sogenannten Grundfarben entsprechend, gebe, rothes, gelbes und blaues, und dafs jede dieser Lichtarten Strahlen von jedem Grade der Brechbarkeit innerhalb der Grenzen des Spectrum liefere, aber so, dafs das rothe Licht am rothen Ende, das gelbe in der Mitte, das Blau am blauen Ende überwiege. Farbige Mittel sollten die verschiedenfarbigen Lichter gleicher Brechbarkeit in verschiedener Stärke absorbiren und dadurch von einander trennen können.⁴ Gegen BREWSTER opponirten AIRY, DRAPER, MELLONI, HELMHOLTZ⁵, F. BERNARD⁶. Aufser einigen Fällen, wo durch Contrastwirkungen der nebenstehenden lebhafteren Farben der Farbenton der durch farbige Gläser sehr geschwächten Strahlen verändert erschien, und anderen Fällen, wo die oben erwähnte Änderung der Farbe mit der Lichtstärke in Betracht kam, rühren die meisten von BREWSTER geltend gemachten Beobachtungen von dem oben schon erwähnten Umstande her, dafs kleine Mengen weissen Lichts durch mehrfache Reflexion an den Oberflächen oder durch diffuse Reflexion in der Substanz der Prismen und der Augenmedien über das Gesichtsfeld zerstreut waren.

Die Vergleichung der einfachen Farben mit den Tönen wurde von NEWTON zuerst angestellt; er verglich aber nur die Breite der Farbstreifen im Spectrum von Glasprismen mit den musikalischen Intervallen der phrygischen Tonleiter. Schon LAMBERT

¹ R. CARTESIUS, *de meteoris*. 1637. Cap. VIII.

² J. NEWTON, *Philosoph. Transact.* 1675. — *Optics*, London 1704.

³ L. EULER, *Nova theoria lucis colorum*, in *Opusculis*. Berol. 1746. — *Mém. d. l'Acad. de Berlin*. 1752. p. 271.

⁴ D. BREWSTER, *Edinb. Transact.* IX. P. II. p. 433. 1831. — Ebenda XII. P. I. 123. *Poggend. Ann.* XIII. 435.

⁵ H. HELMHOLTZ, *Poggend. Ann.* LXXXVI. 501. 1852.

⁶ F. BERNARD, *Ann. d. Chim.* (3.) XXXV. 385–438. 1852.

bemerkte, dafs in dieser Abtheilung viel Willkürliches wäre, da keine festen Grenzen im Spectrum beständen. Nur soviel sei richtig, dafs die Farbstreifen vom Roth gegen das Violet dergestalt in der Breite anwachsen, dafs man nicht sowohl die Summe ihrer Breiten, als die Summe ihrer Verhältnisse zum Maafse derselben nehmen mufs, so wie es in der Musik mit den Tönen geschieht. Ähnlich urtheilte DE MAIRAN. Indessen suchte doch Pater CASTEL auf diese Vergleichung ein Farbenclavier zu gründen, welches durch eine gewisse Farbenfolge ähnliche Wirkungen, wie die Musik hervorbringen sollte. HARTLEY, welcher die Unterschiede der Farben auf Schwingungen verschiedener Länge zurückzuführen suchte, gewann dadurch die Möglichkeit einer directeren Vergleichung mit den Schwingungszahlen der Töne. In demselben Sinne bemerkte auch TH. YOUNG, dafs der ganze Umfang des damals bekannten Theils des Spectrum einer grossen Sexte gleich kommt, dafs Roth, Gelb, Blau etwa den Verhältnissen 8 : 7 : 6 entsprechen. Nach dem nun in neuerer Zeit die Gröfse der Wellenlängen für die verschiedenen Farben namentlich durch FRAUNHOFER's Messungen genauer bekannt geworden ist, hat DROBISCH¹ wieder versucht, die Vergleichung der Farbenscala mit der Tonscala herzustellen. Er vergleicht wie NEWTON die Breite der Farben mit den Intervallen der sogenannten phrygischen Tonart $1 : \frac{9}{8} : \frac{6}{5} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{5}{3} : \frac{16}{9} : 2$. Da aber das Verhältnifs der Wellenlängen für die Grenzen des gewöhnlich sichtbaren Spectrum, wie es FRAUNHOFER ausgemessen hat, kleiner ist als eine Octave, so erhebt er alle jene Verhältnifszahlen in eine Potenz, als deren Exponent er erst $\frac{2}{3}$, später $\frac{6}{7}$ wählte. Dadurch erhält er folgende Tafel, in der die Wellenlängen in Milliontheilen eines Millimeters ausgedrückt sind:

Roth	} Linie B = 687,8 C = 655,6
688,1	
Orange	} D = 588,8
622,0	
Gelb	} E = 526,5
588,6	
Grün	} F = 485,6
537,7	
Blau	} G = 429,6
486,1	
Indigo	} H = 396,3
446,2	
Violet	}
420,1	
379,8	

Die Grenzen der Farben unter sich stimmen in diesem Schema ziemlich gut mit den natürlichen überein; zweckmäfsig möchte es vielleicht sein statt der kleinen Terz die grosse zu nehmen, also die ganze Vergleichung auf die Durtonleiter zu bauen, wie DROBISCH auch selbst bemerkt; dann fiel die Grenze des Orange und Gelb, die im obigen Schema im Goldgelb bei D liegt, dem reinen Gelb näher. Aber wenn auch in sofern die Vergleichung stimmt, so vergesse man nicht, dafs der ganze Sinn der Vergleichung zwischen Schall- und Lichtwellen schon durch die Erhebung der musikalischen Verhältnisse in eine gebrochene Potenz verloren gegangen ist, dafs die Enden des

¹ DROBISCH, *Abhandlung der sächs. Gesellsch. der Wiss.* Bd. II. *Sitzungsberichte* derselben Novbr. 1852. — *Poggend. Ann.* LXXXVIII. 519–526.

270 Spectrum willkürlich abgebrochen sind, da in der That die schwach wirkenden Endfarben des Spectrum an beiden Seiten viel weiter reichen, dafs die NEWTON'sche Abtheilung der 7 Hauptfarben schon willkürlich gemacht und nur der musikalischen Analogien wegen so gewählt ist — Goldgelb verdiente mindestens ebenso gut seinen Platz zwischen Gelb und Orange, wie Indigo zwischen Blau und Violet, ebenso Gelbgrün und Blaugrün, — und dafs endlich Grenzen der Farben im Spectrum wirklich nicht existiren, sondern von uns nur der Nomenclatur zu Liebe willkürlich gezogen werden. Ich selbst glaube deshalb, dafs diese Vergleichenngen gar keinen Werth haben.

Endlich hat auch UNGER¹ versucht, auf die Vergleichung der Lichtwellenverhältnisse mit den musikalischen Intervallen eine Theorie der ästhetischen Farbenharmonie zu gründen. In seinen factischen Angaben über die harmonirenden Farben scheint viel Wahres zu sein, was grofsentheils aus Kunstwerken richtig abstrahirt ist; aber seine Theorie, die Vergleichung mit den musikalischen Verhältnissen, ist etwas gewaltsam erzwungen. Auf seiner chromharmonischen Scheibe hat er Farbtöne zusammengestellt, die den 12 halben Tönen der Octave entsprechen sollen, zu welchem Zweck er aber zwischen Violet und Roth purpurrothe Farben einschaltet, die als einfache Farben nicht existiren. In diese purpurnen Töne läfst er die FRAUNHOFER'schen Linien *G*, *H*, *A* fallen, während die beiden ersteren das reine Violet begrenzen, die letztere dem reinen Roth angehört. Die einfachen Farben, welche über das Violet hinausliegen, sind in Wahrheit blau, nicht purpurroth. Die vollkommenste Harmonie soll dem Duraccord entsprechen. Dieser liefert auf seiner Scheibe z. B. die viel gesehene Zusammenstellung der italienischen Maler: Roth, Grün, Violet. Aber der richtige Duraccord, wenn man Grün als grofse Terz nimmt, wäre Roth, Grün, Indigblau. Den antiken Malern fehlt ein gutes Roth, sie brauchen Mennige, Orange, dafür und bilden den Accord: Orange, Grünblau, röthlich Violet. Die Mollaccorde geben einen sanfteren und trüberen Eindruck, die verminderten und übermäfsigen Dreiklänge geben einen pikanten, weniger künstlerisch reinen Eindruck. Ich glaube, dafs man für die richtigen Beobachtungen der Farbenwirkung, die sich bei UNGER finden, statt der erzwungenen musikalischen Analogien einen anderen Grund suchen mufs. Die gesättigten Farben bilden in der That eine in sich zurücklaufende Reihe, wenn wir die Lücke zwischen den Enden des Spectrum durch die purpurnen Töne ergänzen, und dem Auge scheint es angenehm zu sein, wenn ihm drei Farben geboten werden, die ungefähr gleichweit in der Reihe auseinanderliegen. Die oben erwähnte berühmte Zusammenstellung der italienischen Maler: Roth, Grün, Violet, welche keinem richtigen Duraccorde entspricht, entspricht in Wirklichkeit den drei Grundfarben von TH. YOUNG, und darin kann der Grund ihrer ästhetischen Wirkung liegen. Andere Farben, in richtiger Distanz von einander gewählt, machen einen ähnlichen befriedigenden Eindruck. Wo zwei derselben sich zu sehr nähern, wird der Eindruck minder rein. Das ist vielleicht die Bedeutung von UNGER's Beobachtungen; übrigens kann offenbar bei der sogenannten Farbenharmonie von einem so strengen Bestimmung wie bei den musikalischen Intervallen nicht die Rede sein.²

¹ UNGER, *Disque chromharmonique*. Göttingen 1854. *Poggend. Ann.* LXXXVII. 121—128. C. R. XL. 218.

² Eingehendere Auskunft über die bisher angestellten Vergleichenngen der einfachen Farben mit den Tonintervallen findet man:

1703. I. NEWTON. *Optics*. Lib. I. Pars 2. Prop. 3.
 1725—35. L. B. CASTEL. *Clavecin oculaire* in *Journ. de Trevoux*.
 1737. DE MAIRAN *Mém. de l'Acad. des Sc.* 1737. p. 61.
 1772. LAMBERT. *Farbenpyramide*. Augsburg 1772. § 19.
 1772. HARTLEY in PRIESTLEY *Geschichte der Optik*. S. 549.
 1802. TH. YOUNG *Phil. Transact.* 1802. p. 38.

§ 20. Die zusammengesetzten Farben.

Wir haben gesehen, daß homogenes Licht von verschiedener Brechbarkeit und Schwingungsdauer die Empfindung verschiedener Farben in unserem Sehnervenapparate hervorbringt. Wenn nun ein und dieselbe Stelle der Netzhaut gleichzeitig von Licht zweier oder mehrerer verschiedener Grade der Schwingungsdauer getroffen wird, so entstehen neue Arten von Farbenempfindungen, welche im Allgemeinen von denen der einfachen Farben des Spectrum verschieden sind, und welche das Eigenthümliche haben, daß aus der Empfindung der zusammengesetzten Farbe nicht erkannt werden kann, welche einfache Farben in ihr enthalten sind. Es läßt sich vielmehr im Allgemeinen die Empfindung jeder beliebigen zusammengesetzten Farbe durch mehrere Arten der Zusammensetzung verschiedener Spectralfarben hervorbringen, ohne daß es auch dem geübtesten Sinnesorgane möglich wäre, ohne Hülfe physikalischer Instrumente zu ermitteln, welche einfache Farben in dem zusammengesetzten Lichte verborgen sind. Es unterscheidet sich dadurch das Auge in seiner Reaction gegen die Ätherschwingungen wesentlich vom Ohre, welches, von Tonwellen verschiedener Schwingungsdauer getroffen, die einzelnen Töne zwar zu einer Gesamtempfindung eines Accords verbindet, aber doch jeden einzelnen einzeln darin wahrnehmen kann, so daß zwei aus verschiedenen Tönen zusammengesetzte Accorde dem Ohre niemals identisch erscheinen, wie es für das Auge verschiedene Aggregate zusammengesetzter Farben sein können.

Was hier gesagt ist, bezieht sich auf die unmittelbare Sinnesempfindung, und wird keineswegs umgestoßen durch die Erfahrung, daß uns ein Act des Urtheils zuweilen die Zusammensetzung wenigstens der Hauptsache nach richtig erkennen läßt. Wer einige Erfahrung über die Resultate der Mischung farbigen Lichtes hat, glaubt zuweilen in einer Mischfarbe die einfachen Farben, welche sie zusammensetzen, wirklich zu sehen, und giebt an, ob mehr von der einen oder anderen darin sei. Indessen wird dann ein Act des auf Erfahrung gegründeten Urtheils mit einem Acte der Empfindung verwechselt. Wenn man z. B. Purpur betrachtet, so kann man wissen, daß es überwiegend aus Roth und Violet zusammengesetzt sei, und in welchem Verhältnisse beide ungefähr gemischt sind. Aber man kann nicht wissen, ob in der Farbe noch untergeordnete Mengen von Orange oder Blau ent-

1852. DROBISCH. *Abhandl. d. sächsischen Gesellsch. der Wiss.* Bd. II. *Sitzungsberichte derselben.* Novbr. 1852. *Pogg. Ann.* LXXXVIII. 519—526.
 UNGER, *Pogg. Ann.* LXXXVII. 121—128. C. R. XL. 239.
1854. UNGER, *Disque chromharmonique.* Göttingue.
1855. H. HELMHOLTZ, *Sitzbr. d. Akad. d. Wiss. zu Berlin* 1855. S. 760. *Inst.* 1856. p. 222.
 J. J. OPPEL. *Über das optische Analogon der musikalischen Tonarten.* *Jahresber. der Frankf. Vers.* 1854—55. p. 47—55.
 E. CHEVREUL. *Remarques sur les harmonies des couleurs.* C. R. XL. 239 bis 242; *Edinb. Journ.* (2.) I. 166—168.

halten sind. Wäre es die Empfindung und nicht bloß das auf Erfahrung gestützte Urtheil, so müßte man das letztere ebenso gut ermitteln können, als das erstere. Beim Weiß, welches die größte Mannigfaltigkeit der Zusammensetzung zuläßt, wird es Niemandem einfallen, heraussehen zu wollen, welche einfachen Farben darin enthalten sind, ob zwei, oder drei, oder vier, und welche besonderen. Wie leicht aber Täuschung hier möglich ist, zeigt das Grün, in welchem, getäuscht durch die Mischung der Malerfarben, sowohl das Gelb als das Blau zu sehen Männer wie GOETHE und BREWSTER behauptet haben, während jetzt nachgewiesen worden ist, daß Grün aus jenen Farben gar nicht zusammengesetzt werden kann, wenn man nicht Modificationen derselben nimmt, die selbst schon grünlich sind.

Am auffallendsten wird die Täuschung, als könnte man zwei einfache Farben gleichzeitig an demselben Orte sehen, wenn eine Fläche gleichzeitig von zwei verschiedenen Farben erleuchtet wird, aber so daß an einzelnen Stellen die eine, an anderen Stellen die andere überwiegt, namentlich wenn die eine den Grund füllt, die andere darauf eine regelmäßige Zeichnung bildet. Besonders günstig ist es auch, wenn die Zeichnung oder die Flecken ihren Ort wechseln. Dann glauben wir oft die beiden Farben gleichzeitig, die eine gleichsam durch die andere hindurch an demselben Orte zu sehen. Wir verfahren in solchen Fällen ebenso, als sähen wir Objecte durch einen farbigen Schleier, oder von einer farbigen Fläche gespiegelt. Wir haben durch Erfahrung gelernt, uns auch unter solchen Umständen ein richtiges Urtheil über die wahre Farbe des Objectes zu bilden, und dieselbe Scheidung zwischen der Farbe des Grundes und des darauf unregelmäßig verbreiteten Lichts nehmen wir dann auch in allen ähnlichen Fällen im Urtheile vor, wobei uns später zu beschreibende subjective Wirkungen der Nachbilder unterstützen. Will man die Empfindung der Mischfarben ungestört haben, so muß eben das gemischte Licht in dem ganzen Felde, wo es verbreitet ist, gleichmäßig gemischt sein.

In einzelnen Fällen, namentlich wenn zwei Farben, die im Spectrum weit auseinander liegen, ein scharf begrenztes Feld füllen, erkennen wir die Farben an den Rändern mittels der Farbenzerstreuung im Auge¹ von einander gesondert. Auch das giebt natürlich keinen brauchbaren Einwurf gegen den aufgestellten Satz, da in diesem Falle das Auge selbst wie ein Prisma wirkt, und bewirkt, daß verschiedene Theile der Netzhaut von dem verschiedenfarbigen Lichte getroffen werden.

Die Methoden um verschiedenfarbiges Licht zusammenzusetzen, und die Wirkung des zusammengesetzten Lichts auf das Auge zu prüfen, sind die folgenden:

274 1) Man bringt verschiedene Spectra oder verschiedene Theile desselben

¹ S. oben S. 158.

Spectrum zum Decken. So erhält man die Zusammensetzungen je zweier einfacher Farben.

2) Man blickt durch eine ebene Glastafel in schräger Richtung nach einer farbigen Fläche, während die dem Beobachter zugekehrte Seite der Glastafel ihm gleichzeitig Licht eines andersfarbigen Objects durch Reflexion zusendet. So gelangt in das Auge des Beobachters gleichzeitig von der Glastafel durchgelassenes Licht der einen und reflectirtes Licht der anderen Farbe, und beide treffen dieselben Theile der Netzhaut. Auf diese Weise kann man namentlich bequem die zusammengesetzten Farben der Naturkörper weiter zusammensetzen.

3) Man läßt auf dem Farbenkreisel Scheiben schnell rotiren, auf denen verschiedenfarbige Sectoren angebracht sind. Ist die Rotation schnell genug, so verbinden sich die Eindrücke, welche die verschiedenen Farben auf der Netzhaut machen, zur Empfindung einer einzigen Farbe, der Mischfarbe.

4) Man betrachtet die Grenze zweier verschiedenfarbiger Felder durch ein doppeltbrechendes Prisma aus Kalkspath, so daß die Doppelbilder der Grenzlinie auseinander geschoben werden. Zwischen diesen beiden Bildern der Grenzlinie erscheint dann die Mischfarbe.

Alle vier Methoden geben in Rücksicht der Farbenmischung gleiche Resultate, ihre Ausführung wird unten specieller beschrieben werden. Nicht angewendet werden darf die Methode der Mischung pulveriger oder flüssiger Pigmente, welche von NEWTON und vielen anderen Physikern als gleichgeltend mit der ersten Methode, der Mischung von Spectralfarben, betrachtet worden ist. Denn der gemischte Farbstoff giebt keineswegs ein Licht, welches die Summe der von den einzelnen, in der Mischung enthaltenen Farbstoffen reflectirten Lichter wäre.

Nehmen wir, um dies deutlich zu machen, zunächst farbige Flüssigkeiten. Das Licht, welches durch sie hindurchgeht, wird durch Absorption gefärbt, d. h. es werden von den verschiedenfarbigen Strahlen des weißen Lichts einige, schon nachdem sie eine kurze Strecke in der Flüssigkeit zurückgelegt haben, so geschwächt, daß sie verschwinden, während andere längere Strecken der Flüssigkeit durchlaufen können, ohne merklich geschwächt zu werden. In dem ausgetretenen Lichte überwiegen die letzteren, und dieses Licht hat also die Farbe derjenigen Strahlen, welche am wenigsten von der Flüssigkeit absorbirt werden. Diese Absorption einzelner Farben des Spectrum kann man nachweisen, wenn man solches Licht, welches durch eine farbige Flüssigkeit (oder farbiges Glas) gegangen ist, nachher ein Prisma passiren läßt, und ein Spectrum bildet. In dem Spectrum fehlt dann eine Reihe von Farben, oder ist sehr schwach, während die Theile des Spectrum, deren Farbe der der Flüssigkeit entspricht, die gewöhnliche Helligkeit haben.

Mischt man nun zwei farbige Flüssigkeiten miteinander, welche sich gegenseitig chemisch nicht verändern, so daß die Absorptionskraft jeder einzelnen für die verschiedenfarbigen Lichtstrahlen unverändert bleibt, so gehen nur solche Strahlen durch die Mischung, welche von keiner der beiden

Flüssigkeiten absorbirt werden. Das sind gewöhnlich die Strahlen, welche in der prismatischen Reihe in der Mitte liegen zwischen den Farben der beiden gemischten Flüssigkeiten. Die meisten blauen Körper, z. B. die Kupferoxydsalze, lassen die blauen Strahlen ungeschwächt, etwas weniger gut die grünen und violetten, schlecht dagegen die rothen und gelben hindurch. Die gelben Farbstoffe dagegen lassen fast alle das Gelb ungeschwächt, gut auch noch Roth und Grün, schlechter Blau und Violet hindurch. Unter solchen Umständen wird durch eine Mischung einer gelben und blauen Flüssigkeit meistens das Grün am besten hindurchgehen, weil die blaue Flüssigkeit die rothen und gelben, die gelbe Flüssigkeit die blauen und violetten Strahlen zurückhält. Es ist eine Wirkung derselben Art, als wenn man Licht durch zwei verschiedenfarbige Glasplatten hinter einander gehen läßt, wodurch es immer viel mehr geschwächt wird, als wenn es durch zwei Platten gleicher Farbe gegangen ist. Aber es ist klar, daß hierbei keine Summation des Lichtes stattfindet, welches jede einzelne Flüssigkeit für sich hindurchläßt, sondern im Gegentheil eine Art von Subtraction, insofern die gelbe Flüssigkeit von den durch die blaue gegangenen Strahlen noch alle die wegnimmt, welche in ihr der Absorption verfallen. Daher sind auch Mischungen farbiger Flüssigkeiten in der Regel viel dunkler als jede einzelne Flüssigkeit für sich.

Bei den pulverigen Farbstoffen verhält es sich ganz ähnlich. Wir müssen jedes einzelne Pulvertheilchen eines Farbstoffes als ein kleines durchsichtiges Körperchen betrachten, welches das Licht durch Absorption färbt. Allerdings ist das Pulver solcher Farbstoffe im Ganzen genommen in hohem Grade undurchsichtig. Indessen wo wir Gelegenheit haben Farbstoffe in zusammenhängenden Massen von gleichmäßig dichter Structur zu sehen, finden wir sie wenigstens in dünnen Blättern durchsichtig. Ich erinnere an den krystallisirten Zinnober, Grünspan, Chromblei, das blaue Kobaltglas u. s. w., welche wir in fein pulverigem Zustande als Farbstoffe benutzen.

Wenn nun Licht auf ein solches aus durchsichtigen Theilen bestehendes Pulver fällt, wird ein kleiner Theil an der oberen Fläche reflectirt, der Rest dringt ein, und wird erst von den tiefer liegenden Begrenzungsflächen der Pulvertheilchen zurückgeworfen. Eine einzelne Tafel von weißem Glase reflectirt von senkrecht einfallendem Lichte $\frac{1}{25}$, zwei solche $\frac{1}{13}$, eine große Zahl fast alles. Bei Pulver aus weißem Glase müssen wir folglich schließen, daß bei senkrechter Incidenz ebenfalls nur $\frac{1}{25}$ des auffallenden Lichtes von der obersten Schicht reflectirt wird, das übrige von den tieferen Schichten. Ebenso muß es sich für blaues Licht bei blauem Glase verhalten. Es wird also bei farbigen Pulvern stets nur ein sehr kleiner Theil des Lichtes, welches sie geben, von der obersten Schicht reflectirt, bei weitem das meiste aus tieferen Schichten. Das von der obersten Fläche reflectirte Licht ist weiß, wenn die Reflexion nicht eine metallische ist; erst das aus den tieferen Flächen zurückkehrende ist durch Absorption gefärbt, um so tiefer, je länger sein Weg in der Substanz gewesen ist. Daher ist auch gröberes Pulver

desselben Farbstoffs dunkler gefärbt als feineres. Bei der Reflexion kommt es nämlich nur auf die Zahl der Oberflächen an, nicht auf die Dicke der Theilchen. Sind letztere größer, so muß das Licht einen längeren Weg in der Substanz zurücklegen, um die gleiche Menge reflectirender Oberflächen zu treffen, als wenn sie kleiner sind. Die Absorption der absorbirbaren Strahlen ist also in einem groben Pulver stärker, als in einem feineren. Jenes hat eine dunklere und gesättigtere Farbe als letzteres. Die Reflexion an den Oberflächen der Pulvertheilchen wird geschwächt, wenn wir ein flüssiges Verbindungsmittel zwischen sie bringen, dessen Brechungsvermögen dem ihrigen näher steht als das der Luft. Trockene Pulver von Pigmenten sind deshalb in der Regel weißlicher, als wenn sie mit Wasser oder mit dem noch stärker brechenden Öl durchtränkt sind.

Wenn nun ein gemischtes farbiges Pulver Licht nur aus der obersten Schicht reflectirte, in welcher Theilchen von beiden Farben gleichmäßig durch einander liegen, würde das zurückgeworfene Licht wirklich die Summe der Lichter sein, welche die einzelnen ungemischten Pulver geben. Für die größere Menge reflectirten Lichtes aber, welches aus den tieferen Schichten zurückkommt, ist das Verhältniß ebenso wie bei gemischten farbigen Flüssigkeiten, oder hinter einander gelegten farbigen Gläsern. Dieses Licht hat auf seinem Wege Pulvertheilchen von beiderlei Art passiren müssen, und enthält also nur noch diejenigen Lichtstrahlen, welche durch beide Arten von Pulverkörnchen hindurchgehen können. Für den größeren Theil des Lichtes, welches von gemischtem Farbenpulver zurückgeworfen wird, findet also nicht eine Addition beider Farben, sondern in dem Sinne, wie vorher erläutert wurde, eine Subtraction statt. Daher erklärt sich auch die Thatsache, daß die Mischungen von Pigmenten viel dunkler sind, als die einfachen Pigmente, namentlich, wenn ihre Farben weit auseinander liegen. Zinnober und Ultramarin geben z. B. ein Schwarzgrau, welches kaum einen Schein von Violet, der Mischfarbe des rothen und blauen Lichtes, hat, weil das eine Pigment die Strahlen des anderen fast vollständig ausschließt. Bequem kann man diese Unterschiede sichtbar machen, wenn man auf einen Farbenkreisel, *Fig. 131*, am Rande Sektoren *a* und *b* mit zwei einfachen Farbstoffen überzieht, in der Mitte *c* aber die Mischung der Farbstoffe selbst aufträgt. So geben Kobaltblau und Chromgelb am Rande, wo sie getrennt aufgetragen sind, und beim Drehen der Scheibe sich der Eindruck ihres farbigen Lichtes erst in der Netzhaut verbindet, weißliches Grau, während ihre materielle Mischung ein viel dunkleres Grün giebt.

Es dürfen also die Resultate der Mischung von Malerfarben durchaus nicht benutzt werden, um daraus Schlüsse auf die Mischung farbigen Lichtes zu machen. So ist z. B. der Satz, daß Gelb und Blau Grün giebt, für die Mischung von Malerfarben ganz richtig, aber fälschlich auf die Mischung farbigen Lichtes übertragen worden.

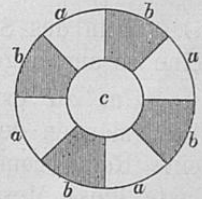


Fig. 131.

Ogleich nun die Bezeichnungen Farbenmischung und Mischfarbe von der Mischung der Farbstoffe hergenommen sind, so wollen wir sie zunächst auch für die Zusammensetzung farbigen Lichtes beibehalten, auf welche sie nicht ganz rechtmäßiger Weise übertragen wurden, machen aber darauf aufmerksam, daß, wenn nicht ausdrücklich das Gegentheil gesagt ist, darunter nicht die Mischung von Farbstoffen und deren Resultat verstanden werden darf.

n Wo dies deutlicher hervorgehoben werden soll, können wir diese Zusammensetzung auch als Addition der Farben bezeichnen, was später gerechtfertigt werden soll.

276 Durch die gleichzeitige Einwirkung verschiedener einfacher Farben auf dieselbe Stelle der Netzhaut entsteht nun eine neue Reihe von Farbeempfindungen, welche durch die einfachen Spectralfarben nicht hervorgebracht werden. Diese neuen Empfindungen sind die des Purpurs, des Weiß und der Übergangsstufen des Weiß einerseits in die Spectralfarben und Purpur andererseits.

277 Purpurroth entsteht durch Mischung derjenigen einfachen Farben, welche am Ende des Spectrum stehen. Am gesättigtesten fällt es aus, wenn man Violet und Roth mischt; weißlicher wird es, Rosenroth, wenn man statt des Violet Blau und statt des Roth Orange nimmt. Das Purpurroth, welches durch Carminroth in das Roth des Spectrum übergeht, ist durchaus verschieden von den beiden Farben Roth und Violet, welche an den äußersten Grenzen des gewöhnlich sichtbaren Spectrum stehen, bildet aber für das Auge einen Übergang zwischen beiden mit continuirlichen Zwischenstufen, so daß dadurch die Reihe der gesättigten Farben, d. h. derjenigen, welche die wenigste Ähnlichkeit mit Weiß haben, in sich zurücklaufend wird.

Weiß entsteht durch Zusammensetzung verschiedener Paare von einfachen Farben. Farben, welche in einem bestimmten Verhältnisse gemischt Weiß geben, nennt man complementäre Farben. Es sind unter den Spectralfarben complementär:

Roth	und	Grünlich Blau
Orange		Cyanblau
Gelb		Indigblau
Grünlich Gelb		Violet.

Das Grün des Spectrum hat keine einfache Complementärfarbe, sondern nur eine zusammengesetzte, nämlich Purpur.

Um zu ermitteln, ob etwa regelmässige Verhältnisse zwischen den Wellenlängen der einfachen complementären Farben bestehen, habe ich für eine Reihe complementärer Farbenpaare die Wellenlängen bestimmt, und lasse diese Messungen hier folgen. Die Längeneinheit ist ein Milliontheil eines Millimeters.

Farbe.	Wellenlänge.	Complementärfarbe.	Wellenlänge.	Verhältniß der Wellenlängen.
Roth	656,2	Grünblau	492,1	1,334
Orange	607,7	Blau	489,7	1,240
Goldgelb	585,3	Blau	485,4	1,206
Goldgelb	573,9	Blau	482,1	1,190
Gelb	567,1	Indigblau	464,5	1,221
Gelb	564,4	Indigblau	461,8	1,222
Grüngelb	563,6	Violet	von 433 ab	1,301

Im Violet mußten seiner Lichtschwäche wegen die äußersten Strahlen von der Wellenlänge 433 ab alle zusammengefaßt werden.

Nach diesen Messungen sind in *Fig. 132* in horizontaler Richtung die Wellenlängen der Farben von 400 bis 700 der obigen Einheiten aufgetragen, in verticaler die der zugehörigen Complementärfarben. Die Curven drücken also die Wellenlänge der Complementärfarbe als Function der Wellenlänge jeder einfachen Farbe aus. Am Rande stehen die Namen der den Wellenlängen entsprechenden Farben. Die wirklich gemessenen Werthe sind durch Kreuzchen bezeichnet.

Diese Curven zeigen eine auffallende Unregelmäßigkeit der Vertheilung 278 der complementären Farben im Spectrum an. Wenn man auf der horizontalen Abscissenlinie vom Violet zum Roth fortschreitet, ändert sich die Wellenlänge der Complementärfarbe zuerst, wie die fast horizontal liegende Curve anzeigt, äußerst langsam. Gelangt man zu den grünlichen blauen Farben, so ändert sich jene Länge dagegen außerordentlich schnell, der absteigende Ast der Curve nähert sich einer senkrechten Linie. Das letztere ist ebenso im Gelb der Fall, während am rothen Ende die Änderung wieder äußerst langsam wird. Es hängt dies damit zusammen, daß, wie ich schon im vorigen Paragraphen bemerkt habe, der Farbenton an den Enden des Spectrum sich im Verhältniß zu den Wellenlängen außerordentlich langsam, in der Mitte dagegen sehr schnell ändert. Demgemäß ist denn auch zwischen den Wellenlängen verschiedener Complementärfarben durchaus kein einfaches oder constantes Verhältniß aufzufinden. Es schwankt, wenn man die musikalische

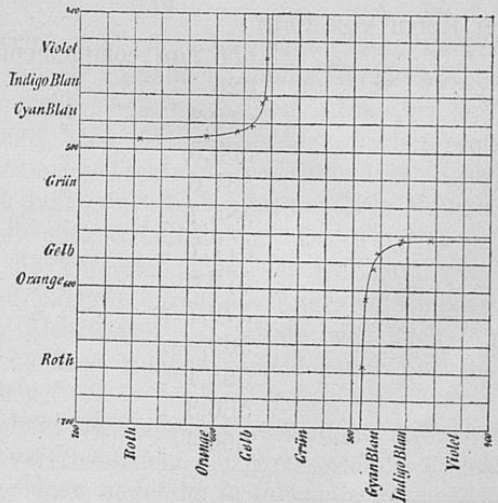


Fig. 132.

Bezeichnungsweise anwendet, zwischen dem der Quarte (1,333) und dem der kleinen Terz (1,20).

Seitdem ich diese Messungen ausgeführt habe, ist noch von vier andern Personen die Reihe ihrer Complementärfarben bestimmt worden, nämlich von den Herrn J. VON KRIES, M. VON FREY¹, A. KÖNIG und C. DIETERICI². Die Resultate weichen nur unbedeutend von den meinigen ab, doch sind die Unterschiede wohl nicht auf Beobachtungsfehler, sondern auf individuelle Eigenthümlichkeiten der Farbensysteme zu schieben.

Es ergab sich

bei Herrn VON KRIES:

656,2 $\mu\mu$	complementär	zu	492,4 $\mu\mu$
626.—	„	„	492,2 „
612,3	„	„	489,6 „
599,5	„	„	487,8 „
587,6	„	„	484,7 „
579,7	„	„	478,7 „
577.—	„	„	473,9 „
575,5	„	„	469,3 „
572,9	„	„	464,8 „
571,1	„	„	460,4 „
571.—	„	„	452,1 „
570,4	„	„	440,4 „
570,1	„	„	429,5 „

bei Herrn VON FREY:

656,2 $\mu\mu$	complementär	zu	485,2 $\mu\mu$
626.—	„	„	484,6 „
612,3	„	„	483,6 „
599,5	„	„	481,8 „
587,6	„	„	478,9 „
586,7	„	„	478,7 „
577,7	„	„	473,9 „
572,8	„	„	469,3 „
570,7	„	„	464,8 „
569.—	„	„	460,4 „
568,1	„	„	452,1 „
566,3	„	„	440,4 „
566,4	„	„	429,5 „

¹ M. VON FREY und J. VON KRIES. *Archiv für Anat. und Physiol.* Physiol. Abth. Jahrgang 1881. S. 336. Die in dieser Abhandlung nach einer willkürlichen Scale angegebenen Complementärfarben sind in Wellenlängen umgerechnet worden von A. KÖNIG (Verhdl. der physikal. Gesellschaft in Berlin. Sitzung vom 13. Juni 1884)

² A. KÖNIG und C. DIETERICI. *Wied. Ann.* 33. 1887.

Z. Psychol. Physiol. Sinnesorg. IV, 1893, 5241

bei Herrn A. KÖNIG:

675.—	$\mu\mu$	complementär zu	496,5	$\mu\mu$
663.—	"	"	495,7	"
650.—	"	"	496,7	"
638.—	"	"	495,9	"
615,3	"	"	496.—	"
582,6	"	"	483,6	"
578.—	"	"	476,6	"
576.—	"	"	467.—	"
574,5	"	"	455.—	"
573.—	"	"	450.—	"

bei Herrn C. DIETERICI:

670.—	$\mu\mu$	complementär zu	494,3	$\mu\mu$
660.—	"	"	494.—	"
650.—	"	"	494,3	"
635.—	"	"	494.—	"
626.—	"	"	493.1	"
610.—	"	"	492.2	"
588.—	"	"	485,9	"
585,7	"	"	485,7	"
578.—	"	"	476,6	"
575.6	"	"	470.—	"
571,5	"	"	455.—	"
571,3	"	"	448.—	"
571.4	"	"	442.—	"

Ich bemerke übrigens hier noch, daß die Lichtintensitäten zweier 278
complementärer einfacher Farben, welche zusammen gerade Weiß geben,
dem Auge durchaus nicht immer gleich hell erscheinen. Nur bei der
Mischung von Cyanblau und Orange sind Mengen beider Farben von
einer dem Auge ungefähr gleich erscheinenden Lichtmenge nothwendig. Sonst
erscheinen Violett, Indigblau und Roth dunkler als die complementären Mengen
des dazu gehörigen Grünlichgelb, Gelb oder Grünlichblau. Da, wie sich im
nächsten Paragraphen ergeben wird, die Vergleichen der Helligkeit pro-
portionaler Mengen verschiedenfarbigen Lichtes durch das Auge verschieden
ausfallen bei verschiedener absoluter Lichtstärke, so lassen sich auch für
die Verhältnisse der Helligkeit complementärer Mengen verschiedener Farben-
paare keine bestimmten Zahlen angeben.

Die Spectralfarben haben demnach in Mischungen verschiedene färbende
Kraft, sie sind gleichsam Farben von verschiedenem Sättigungsgrade. Violet
ist am meisten gesättigt, die anderen folgen ungefähr in folgender Reihe:

Violet
Indigblau
Roth Cyanblau
Orange Grün
Gelb.

279 Endlich haben wir noch die Resultate der Mischung solcher Farben zu untersuchen, welche nicht complementär sind. Darüber läßt sich folgende Regel aufstellen: Wenn man zwei einfache Farben mischt, die im Spectrum weniger von einander entfernt sind, als Complementärfarben, so ist die Mischung eine der zwischenliegenden Farben und zieht im Allgemeinen desto mehr in das Weiße, je größer der Abstand der gemischten Farben ist, wird dagegen desto gesättigter, je kleiner ihr Abstand. Mischt man dagegen zwei Farben, die in der Spectralreihe weiter von einander abstehen, als Complementärfarben, so erhält man Purpur oder solche Farben, die zwischen einer der gemischten und dem entsprechenden Ende des Spectrum liegen. In diesem Falle ist die Mischung desto gesättigter, je größer der Abstand der gemischten Farben im Spectrum ist, sie ist desto weißlicher, je kleiner ihr Abstand ist, vorausgesetzt, daß er immer größer bleibt, als der von zwei Complementärfarben.

2 Die Herren A. KÖNIG und C. DIETERICI¹ haben bei ihren weiter unten zu beschreibenden Versuchen gefunden, daß für die große Majorität der menschlichen Augen an beiden Enden des Spectrum zwei Strecken vorkommen, von ihnen Endstrecken genannt, in denen nur Unterschiede der Helligkeit, nicht solche des Farbentons zu finden sind. Die rothe Endstrecke reicht bis etwa zur Wellenlänge 655, nahe der Linie *C*, die violette beginnt bei 430, nahe der Linie *G*. An diese schließen sich zwei Strecken, Zwischenstrecken genannt, deren Farben vollständig genau durch Mischung der an den Enden dieser Strecken stehenden Farben wiedergegeben werden können. Die weniger brechbare Zwischenstrecke geht vom Roth bis in das Orange, etwa von Wellenlänge 655 bis 630, die brechbarere von 430 bis 475 (Cyanblau). Zwischen den beiden Zwischenstrecken bleibt eine Mittelstrecke übrig von 630 bis 475, deren Farben nicht mehr aus zwei entfernter stehenden gemischt werden können.

279 So geben Gelb und Cyanblau gemischt ein sehr weißliches Grün. Ferner giebt Roth, dessen Complementärfarbe Grünlichblau ist, mit Grün gemischt weißliches Gelb, welches bei wechselnden Mengenverhältnissen der einfachen Farben entweder durch Orange in Roth, oder durch Grünlichgelb in Grün übergehen kann. Orange und Grünlichgelb können gemischt auch reines Gelb geben, welches gesättigter ist, als das aus Roth und Grün erzeugte. Mischen wir dagegen Roth und Cyanblau, so bekommen wir Rosa (weißliches Purpurroth), welches bei verändertem Mischungsverhältnisse in Roth oder durch weißliches Indigblau in Cyanblau übergehen kann. Dagegen giebt Roth mit Indigblau, und noch mehr mit Violet ein gesättigtes Purpurroth.

Die folgende Tabelle zeigt diese Resultate übersichtlich. An der Spitze der verticalen und horizontalen Columnen stehen die einfachen Farben; wo

¹ A. KÖNIG und C. DIETERICI. Sitzungsberichte der Berliner Akad. Sitzung vom 20. Juli 1886. S. 805.

sich die betreffende verticale und horizontale Columne schneiden, ist die Mischfarbe angegeben, welche übrigens immer bei verändertem Mischungsverhältnisse durch die in der Spectralreihe dazwischenliegenden Farben in jede der beiden einfachen Farben der Mischung übergehen kann.

	Violet	Indigblau	Cyanblau	Blaugrün	Grün	Grüngelb	Gelb
Roth	Purpur	dk. Rosa	wfs. Rosa	Weifs	wfs. Gelb	Goldgelb	Orange
Orange	dk. Rosa	wfs. Rosa	Weifs	wfs. Gelb	Gelb	Gelb	
Gelb	wfs. Rosa	Weiss	wfs. Grün	wfs. Grün	Grüngelb		
Grüngelb	Weiss	wfs. Grün	wfs. Grün	Grün			
Grün	wfs. Blau	Wasserblau	Blaugrün				
Blaugrün	Wasserblau	Wasserblau					
Cyanblau	Indigblau						

dk. = dunkel.
wfs. = weifslich.

Übrigens zeigt es sich auch bei diesen Mischungen wieder, dafs die Spectralfarben einen verschiedenen Sättigungsgrad der Farbe haben. So giebt Roth mit gleich hellem Grün gemischt ein röthliches Orange, Violet mit gleich hellem Grün ein dem Violet nahestehendes Indigblau. Dagegen geben Farben von gleicher Sättigung in gleicher Helligkeit gemischt auch Mischfarben, die von ihren beiden Constituenten ungefähr um gleichviel verschieden sind.

Durch Mischung von mehr als zwei homogenen Lichtern bekommen wir also keine neuen Farbeindrücke mehr, sondern die Zahl derselben ist durch die Mischungen je zweier einfacher Farben schon erschöpft; ja wir haben bei den letzteren Mischungen gefunden, dafs die meisten Mischfarben durch verschiedene Paare von einfachen Farben erzeugt werden konnten. Die Mischungen von zusammengesetzten Farben haben im allgemeinen dasselbe Ergebnifs, wie die Mischung der ihnen ähnlichen Spectralfarben; nur fällt die Mischung um so weifslicher aus, als die in die Mischung eintretenden Farben selbst schon weifslicher sind als Spectralfarben.

Somit führen alle möglichen Combinationen von Ätherwellensystemen verschiedener Schwingungsdauer nur zu einer verhältnifsmäfsig geringen Anzahl verschiedenartiger Erregungszustände des Sehnervenapparats, die sich in verschiedenen Farbenempfindungen zu erkennen geben. Und zwar unterscheiden wir in der Empfindung und demgemäfs auch in der Sprache nicht mehr als dreierlei Arten von Unterschieden in dem Aussehen verschieden beleuchteter Theile des Sehfeldes, welche wir bezeichnen können als

1. Unterschiede der Helligkeit,
2. Unterschiede des Farbentons,
3. Unterschiede der Farbensättigung.

Die gesättigtesten objectiven Farben, die wir kennen, sind uns in der Reihe der Spectralfarben gegeben. Die Enden dieser Reihe können wir zusammenschliessen durch das aus Mischung von Roth und Violet entstehende

Purpurroth. Die Unterschiede, welche zwischen den Empfindungen dieser Farben bestehen, bezeichnen wir als solche des Farbentons. Denken wir uns eines dieser gesättigten farbigen Lichter mit mehr oder weniger Weiß gemischt, so bekommen wir Farbeindrücke, die sich dem des Weiß mehr oder weniger nähern, und als die weniger gesättigten oder weißlichere Abstufungen derselben Farbe zu bezeichnen sind. In der Sprache bezeichnen wir nur selten die weißlicheren Farben durch besondere Namen, wie z. B. weißliches Purpur als rosenroth, weißliches Roth als fleischfarben, sondern setzen, um sie bezeichnen zu können, vor den Namen der Farbe die Zusätze „hell“, „blafs“ oder „weiß“, wie z. B. „hellblau“, „blafsblau“, „weißblau“ eine Reihe von Übergängen aus dem gesättigten Blau in Weiß bezeichnen. Betreffs der Bezeichnung weißlicher Farben durch die Vorsetzsilbe „hell“ ist noch zu bemerken, daß diese ihrem Sinne nach eigentlich eine lichtstarke Farbe bezeichnen sollte, und hier der Sprachgebrauch eine lichtstarke Farbe nicht von einer weißlichen unterscheidet, was der im vorigen Paragraphen erwähnten Thatsache entspricht, daß auch dem Auge die lichtstarken gesättigten Farben des Spectrum weißlich, d. h. weniger unterschieden von lichtstarkem Weiß, als die weniger lichtstarken Abstufungen derselben Farbtöne erscheinen.

Unterschiede der Lichtstärke werden von der Sprache nur, insofern dadurch eine Eigenschaft von Körpern angegeben werden soll, als Farben bezeichnet. Mangel des Lichts nennen wir Dunkelheit; einen Körper, der kein Licht zurückwirft, wenn solches auf ihn fällt, nennen wir schwarz; einen Körper, welcher alles auffallende Licht diffus reflectirt, nennen wir weiß. Ein Körper, der von allem auffallenden Licht einen gleichen Bruchtheil zurückwirft, ist grau; und einer der Licht gewisse Wellenlängen in stärkerem Verhältniß als das anderer zurückwirft, ist farbig.

In diesem Sinne also sind auch Weiß, Grau und Schwarz Farben. Lichtschwache gesättigte Farben unterscheiden wir durch den Zusatz „dunkel“ wie dunkelgrün, dunkelblau; bei äußerst geringer Lichtstärke wenden wir für sie aber auch dieselben Namen an, wie für lichtschwache weißliche Farben, nämlich für lichtschwaches Roth, Gelb, Grün die Namen Rothbraun, Braun und Olivengrün; für überwiegend weißliche Farben von geringer Lichtstärke wählt man dagegen Bezeichnungen wie röthlichgrau, blau grau u. s. w.

Bezüglich des Weiß ist wohl zu beachten, daß wir weiß diejenigen Körper nennen, die Licht aller Art, so weit unser Auge es wahrnehmen kann, möglichst vollständig reflectiren. Eben deshalb erscheinen sie bei jeder Art der Beleuchtung mindestens ebenso hell, meist heller, als alle farbigen Körper. Dadurch ist der Begriff des Weiß als Körpereigenschaft in der Wahrnehmung unzweideutig festgestellt; er ist aber zunächst ganz unabhängig von dem Verhältniß, in dem die einzelnen Farben im beleuchtenden Lichte gemischt sind, d. h. von dem Farbenton dieser Mischung. In der

That unterscheiden wir bei jeder Art der Beleuchtung weisse Körper sicher als solche, wenn es auch vorkommen kann, daß wir Körper für weifs halten, die bei Sonnenbeleuchtung besehen uns schwach farbig erscheinen, der vorher gebrauchten künstlichen Beleuchtung ähnlich. So halten wir bei Kerzenbeleuchtung gelegentlich auch gelbliche Papiere oder Zeuge für weifs.

Nun ist die Sonne bei weitem die reichlichste und mächtigste Lichtquelle, die wir kennen, und bei deren Beleuchtung wir am häufigsten und meisten unser Auge brauchen, die auch alle Unterschiede der Färbung am klarsten hervortreten läßt, namentlich nach der Seite der blauen Töne. Wir betrachten daher auch als vorzugsweise weifs die Farbe des vollen Sonnenlichts. Schwache Farbenabweichungen einer andern Lichtquelle von dem Sonnenlicht, oder die kleinen Abweichungen in der Färbung des Tageslichts, die dadurch entstehen, daß dasselbe bald von der Sonne direct, bald vom blauen Himmel, bald von beleuchteten Wolken, bald von dicken grauen Wolkenschichten herrührt, bemerken wir entweder nur bei größerer Aufmerksamkeit, oder auch wohl gar nicht, wenn wir nicht Gelegenheit haben die verschiedenen Beleuchtungsweisen unmittelbar hinter einander zu sehen. Hierbei wirken auch die Ermüdungsvorgänge im Auge mit, die wir in der Lehre von den Nachbildern weiter unten erörtern werden. Bei stark farbiger Beleuchtung ist aber allerdings die Erinnerung an das viel gesehene Sonnenlicht in unserm Gedächtniß treu genug, um die bestehende Abweichung der zeitweiligen Beleuchtung zu erkennen.

Wie unsicher und schwankend aber unsre Vorstellung von dem, was wir Weifs nennen, ist, zeigt sich am deutlichsten, sobald wir versuchen Weifs durch Mischung von Spectralfarben herzustellen, wenn dabei jedes andre weisse Licht ausgeschlossen ist. Wenn wir nicht daneben eine Probe von normalem Weifs des Tageslichts vor Augen haben, mit dem wir die gebildete Mischfarbe vergleichen können, so kommen wir nur zu einer groben und schwankenden Annäherung an Weifs.

Es ist meines Erachtens daher ungerechtfertigt, wenn man die grobe Bestimmtheit, welche der Begriff des objectiven Weifs, als Eigenschaft von Körpern, hat, auch auf die Lichtmischung und entsprechende Empfindung Weifs übertragen will. Allerdings können die, welche dies thun, GOETHE als Gewährsmann anführen. Als Körperfarbe ist es durch seine Lichtstärke ausgezeichnet, und als solche mag man es in bildlicher Redeweise als das ungetrübtste und reinste Licht bezeichnen. Aber wenn wir von der Beschaffenheit der objectiven Lichtquellen absehen, so ist bis jetzt noch kein einziges Kennzeichen aufgefunden worden, wodurch unter den verschiedenen Abstufungen weiflicher Farbtöne einer als das normale Weifs eine besonders ausgezeichnete Rolle spielte. Da übrigens die thierischen Organe in der Reihe der Generationen sich ihren am häufigsten eintretenden Aufgaben anpassen, so ist es allerdings nicht auffallend, daß die Farbe des Sonnenlichtes eine centrale, wenn auch nicht gerade bestimmt zu definirende Stellung im Farbensystem einnimmt.

281

Das Schwarz ist eine wirkliche Empfindung d. h. Wahrnehmung eines bestimmten Zustandes unseres Organs, wenn es auch durch Abwesenheit alles Lichts hervorgebracht wird. Wir unterscheiden die Empfindung des Schwarz deutlich von dem Mangel aller Empfindung. Ein Fleck unseres Gesichtsfeldes, von welchem kein Licht in unser Auge fällt, erscheint uns schwarz; aber die Objecte hinter unserem Rücken, von denen auch kein Licht in unser Auge fällt, mögen sie nun dunkel oder hell sein, erscheinen uns nicht schwarz, sondern für sie mangelt alle Empfindung. Bei geschlossenen Augen sind wir uns sehr wohl bewußt, daß das schwarze Gesichtsfeld eine Grenze hat, wir lassen es keineswegs sich bis hinter unseren Rücken erstrecken. Nur diejenigen Theile des Gesichtsfeldes, deren Licht wir wahrnehmen können, wenn solches vorhanden ist, erscheinen schwarz, wenn sie kein Licht aussenden.

Daß Grau identisch sei mit lichtschwachem Weiß, Braun mit lichtschwachem Gelb, Rothbraun mit lichtschwachem Roth, erkennt man am leichtesten durch die prismatische Analyse des Lichts von grauen, blauen oder rothbraunen Körpern, schwerer durch Projection des Lichts von der betreffenden Farbe und Stärke auf einen Schirm, weil wir fortdauernd die Neigung haben zu trennen, was in der Farbe oder dem Aussehen eines Körpers von der Beleuchtung und was von der Eigenthümlichkeit der Körperoberfläche selbst herrührt. Der Versuch muß deshalb so eingerichtet werden, daß der Beobachter verhindert wird zu erkennen, es sei eine besondere Beleuchtung vorhanden. Ein graues Papierblatt, welches im Sonnenschein liegt, kann heller aussehen, als ein weißes, welches im Schatten liegt, während doch das erstere grau, das zweite weiß erscheint; denn wir wissen, daß das weiße Blatt, in den Sonnenschein gelegt, viel heller sein würde, als das graue, welches zur Zeit darin sich befindet. Wenn man aber eine graue Kreisfläche auf weißem Papier anbringt, und durch eine Sammellinse Licht auf sie concentrirt, ohne daß das weiße Papier gleichzeitig mitbeleuchtet wird, so kann man das Grau weißer erscheinen lassen, als das weiße Papier, so daß in diesem Falle sich die Empfindungsqualität durchaus nur als abhängig von der Lichtstärke zeigt.

Ebenso gelang es mir homogenes Goldgelb des Spectrum als Braun erscheinen zu lassen, indem ich mittels einer unten auseinander zu setzenden Methode auf einem weißen unbeleuchteten Schirme ein rechteckiges Feld damit beleuchtete, daneben ein größeres Feld des Schirms dagegen mit hellerem weißen Lichte. Roth in derselben Weise angewendet gab Rothbraun, Grün Olivengrün.

Berücksichtigen wir also noch die Lichtintensität, so finden wir, daß oben gemachten Angabe entsprechend, daß die Qualität eines jeden Farbeindrucks von drei veränderlichen Größen abhängt, nämlich der Lichtstärke, dem Farbentone und seinem Sättigungsgrade. Andere Unterschiede der Qualität des Lichteindrucks existiren nicht. Man kann dieses Resultat in folgender Weise aussprechen:

282

Der Farbeindruck, den eine gewisse Quantität x beliebig gemischten Lichtes macht, kann stets auch hervorgebracht werden durch Mischung einer gewissen Quantität a weissen Lichtes und einer gewissen Quantität b einer gesättigten Farbe (Spectralfarbe oder Purpur) von bestimmtem Farbentone.

Dieser Satz beschränkt die Menge der verschiedenartigen Farbeindrücke, wenn sie auch noch unendlich groß bleibt, doch auf ein kleineres Maass, als wenn jede mögliche Combination verschiedener einfacher Lichtstrahlen einen besonderen Farbeindruck gäbe. Wollen wir die objective Natur eines gemischten Lichts vollständig bestimmen, so müssen wir angeben, wieviel Licht von jeder Grösse der Wellenlänge darin ist. Da es nun unendlich verschiedene Wellenlängen giebt, ist die physikalische Qualität eines gemischten Lichts nur darzustellen als eine Function von unendlich vielen Unbekannten. Dagegen kann der Eindruck, den beliebig gemischtes Licht auf das Auge macht, immer dargestellt werden als eine Function von nur drei Variablen, die in Zahlen ausgedrückt werden können, nämlich 1) der Quantität gesättigten farbigen Lichts, 2) der Quantität weissen Lichts, die gemischt dieselbe Farbenempfindung geben, 3) der Wellenlänge des farbigen Lichts. Dadurch gewinnen wir auch endlich ein Princip, wonach wir die Farben in eine systematische Ordnung bringen können. Abstrahirt man nämlich zunächst von den Unterschieden der Lichtstärke, so bleiben noch zwei Veränderliche übrig, von denen die Qualität der Farbe abhängt, nämlich der Farbenton und das Verhältniß des farbigen zum weissen Lichte, und wir können uns die Menge der Farben, wie die verschiedenen Werthe einer jeden Grösse, welche von zwei Variablen abhängt, in einer Ebene nach ihren zwei Dimensionen hin ausgebreitet denken. Die Reihe der gesättigten Farben ist in sich zurücklaufend, sie muß also auf einer geschlossenen Curve angebracht werden, für welche NEWTON einen Kreis, *Fig. 133*, wählte. Er selbst brachte auf seinem Farbenkreise nur sieben gesättigte Spectralfarben in Sektoren an, deren Farbenton und Breite er nach einer akustischen Analogie wählte. Für den hier verfolgten Zweck dagegen wären die gesättigten Farben in continuirlichem Übergange längs der Peripherie; und in die Mitte des Kreises Weiss zu setzen, und auf die Verbindungslinien des Mittelpunktes mit den einzelnen Punkten der Peripherie die Übergangsstufen zwischen dem Weiss und der an dem betreffenden Punkte der Peripherie stehenden Farbe anzubringen, so daß die weislicheren unter ihnen dem Mittelpunkte, die gesättigten der Peripherie näher stehen. So erhielt man eine Farbenscheibe, die alle möglichen Arten gleich lichtstarker Farben in ihren continuirlichen

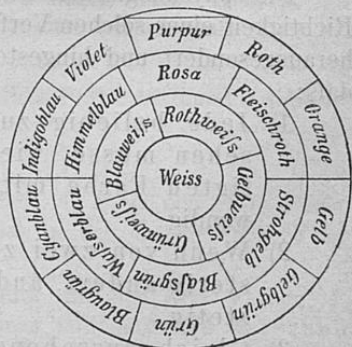


Fig. 133.

alle möglichen Arten gleich lichtstarker Farben in ihren continuirlichen

Übergängen geordnet darböte. Wollte man auch noch die verschiedenen Grade der Lichtstärke der Körperfarben berücksichtigen, so müßte man, wie LAMBERT es that, noch die dritte Dimension des Raums zu Hülfe nehmen, und zwar kann man die dunkelsten Farben, bei denen die Zahl der unterscheidbaren Töne immer geringer wird, endlich in eine Spitze, dem Schwarz entsprechend, zusammenlaufen lassen. So erhält man eine Farbenpyramide

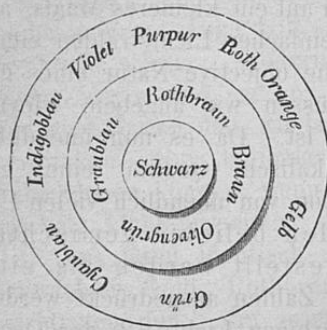


Fig. 134.

oder einen Farbenkegel. In Fig. 134 sind drei Querschnitte eines solchen Kegels über einander liegend dargestellt. Der größte, der Grundfläche entsprechend, würde dieselbe Farbenvertheilung wie der Farbenkreis Fig. 133 zeigen müssen. Der mittlere, aus der Mitte des Kegels genommen, zeigt am Rande das Rothbraun, Braun, Olivengrün, Graublau und in seiner Mitte Grau, endlich der kleinste, nahe an der Spitze des Kegels genommen, zeigt Schwarz, wie es die Figur anzeigt.

Geometrische Darstellung des Farbmischungsgesetzes.

Das Princip einer solchen Darstellung ist zuerst von J. NEWTON hingestellt worden, obgleich er auf der erwähnten in sieben Sektoren getheilten Farbenscheibe nicht gerade die volle Bedeutung desselben darlegen konnte. Er dachte sich nämlich die zu mischenden Farben durch Gewichte dargestellt, die in die Schwerpunkte der zugehörigen Sektoren eingesetzt wurden. Dann construirte er den gemeinsamen Schwerpunkt dieser Gewichte. Dessen Lage zeigt dann den Farbenton der Mischfarbe an, seine Entfernung vom Mittelpunkt den Grad ihrer Sättigung.

Die physiologischen Voraussetzungen, welche der Ausführbarkeit und Richtigkeit eines solchen Verfahrens zu Grunde liegen, hat Herr H. GRASSMANN herausgesondert und hingestellt. Außer dem schon oben erwähnten Satze, dafs:

- 1) Jede beliebig zusammengesetzte Mischfarbe gleich aussehen müsse, wie die Mischung einer bestimmten gesättigten Farbe mit Weiß, sind dazu noch folgende Sätze notwendig:
- 2) Wenn von zwei zu vermischenden Lichtern das eine sich stetig ändert, ändert sich auch das Aussehen der Mischung stetig.
- 3) Gleich aussehende Farben gemischt geben gleich aussehende Mischungen.

Wenn wir diese drei Grundsätze annehmen, läßt sich eine Anordnung der Farben in einer Ebene herstellen, welche erlaubt die Mischfarbe durch eine Schwerpunktsconstruction zu finden. Wir wollen eine solche Farben-

tafel, in welcher die Mischfarben nach dem Princip der Schwerpunktsconstructionen gefunden werden, eine geometrische Farbentafel nennen. Da die Lichtquanta verschiedenfarbigen Lichtes keine allgemein gültige quantitative Vergleichung durch das Auge zulassen, so darf man sich bei der Construction einer solchen Tafel vorbehalten die Einheit der Lichtquantität jeder Farbe durch die NEWTON'sche Regel der Farbenmischung selbst festzusetzen. Wenn man drei Farben beliebig wählt, von denen aber keine durch Mischung der beiden anderen erzeugt werden kann, ihnen drei beliebige Orte in der Farbentafel anweist, die nicht in einer geraden Linie liegen, und die Einheiten ihrer Lichtquanta beliebig festsetzt, so ist nachher der Ort und die Einheit des Lichtquantum jeder anderen Farbe in der Farbentafel fest bestimmt.

Construction der Farbentafel. Wenn die drei Farben A, B, C , von denen man ausgehen will, gewählt, die Einheiten ihrer Lichtmengen und ihre Orte in der Farbentafel bestimmt sind, die wir mit a, b und c in *Fig. 135* bezeichnen wollen, so mische man die Quantitäten α der Farbe A und β der Farbe B , und setze die Mischfarbe in den gemeinschaftlichen Schwerpunkt der Gewichte α und β , von denen α im Punkt a und β im Punkt b befindlich gedacht wird. Der Schwerpunkt d liegt in der Verbindungslinie ab der beiden Gewichte und zwar so dafs

$$\alpha \cdot ad = \beta \cdot bd.$$

So liegen denn überhaupt alle Mischfarben von A und B auf der Linie ab . Soll nun mit den Quantitäten α und β der Farben A und B auch noch die Quantität γ der Farbe C gemischt werden, so können wir erst α und β wie vorher gemischt denken, die Mischfarbe, deren Quantität mit $(\alpha + \beta)$ bezeichnet werden muß, in d eingesetzt, und nun den Schwerpunkt e der beiden Gewichte $(\alpha + \beta)$ in d und γ in c construiren, welcher in der Linie cd liegen muß. Hier ist der Ort der gemeinsamen Mischfarbe, deren Quantität ε gesetzt werden muß

$$\varepsilon = \alpha + \beta + \gamma.$$

Dadurch ist auch die Einheit des Lichtquantum für diese Farbe bestimmt; diese ist

$$1 = \frac{\varepsilon}{\alpha + \beta + \gamma}.$$

Es ist dabei ersichtlich, dafs jede aus den drei Farben A, B, C mischbare Farbe innerhalb des Dreiecks abc liegen muß; für jede ist in der angegebenen Weise Ort und Einheit der Lichtmenge zu bestimmen.

Denkt man sich die Orte und Maafseinheiten aller aus den drei Farben A, B und C mischbaren Farben bestimmt, so kann man nun auch die Orte und Maafseinheiten der aus A, B und C nicht mischbaren Farben bestimmen. Es sei M eine solche Farbe. Man kann jedenfalls eine so kleine Quantität μ dieser Farbe wählen, dafs, wenn man sie mit einer der Farben des Dreiecks mischt, die Mischfarbe auch noch innerhalb des Dreiecks liegt. Man mische sie z. B. mit der Quantität ε (diese nach der schon festgesetzten Einheit gemessen) der in e befind-

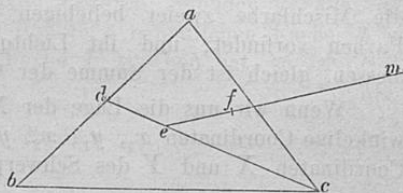


Fig. 135.

lichen Farbe. Denkt man sich die Quantität der Farbe M anfangs unendlich klein, und stetig steigend bis μ , so wird die Mischfarbe anfangs die in e befindliche Farbe selbst sein, sich nach GRASSMANN'S zweitem Grundsatz stetig ändern, d. h. continuirlich in die benachbarten Farben übergehen. Ist die Quantität von M bis μ gewachsen, so möge f der Ort und g die Quantität der betreffenden Mischfarbe sein, und f noch innerhalb des Dreiecks liegen. Gemäß unserer Regel muß erstens sein

$$g = \varepsilon + \mu.$$

Dadurch ist die Quantität μ auf die von uns festgesetzten Maafseinheiten zurückgeführt. Zweitens muß f der Schwerpunkt von μ in m und ε in e sein, d. h. es muß m in der Verlängerung der Linie ef liegen, und

$$\frac{mf}{ef} = \frac{\varepsilon}{\mu}.$$

Dadurch ist also auch die Lage und die Maafseinheit der Farbe M festgesetzt und kann ebenso für alle anderen aus A , B und C nicht mischbaren Farben bestimmt werden.

285 Beweis der Richtigkeit dieser Construction. Es muß nun gezeigt werden, daß unter Voraussetzung der Richtigkeit von GRASSMANN'S Sätzen in einer so construirten Farbentafel, für welche auch die Maafseinheiten der Lichtquantität der verschiedenen Farben in der angegebenen Weise festgesetzt sind, die Mischfarbe zweier beliebigen Farben sich im Schwerpunkte der gemischten Farben vorfindet, und ihr Lichtquantum, nach den festgesetzten Einheiten gemessen, gleich ist der Summe der Quantitäten der gemischten Lichter.

Wenn wir uns die Lage der Massenpunkte m_1, m_2, m_3 u. s. w. durch rechtwinkelige Coordinaten $x_1, y_1; x_2, y_2; x_3, y_3$ u. s. w. gegeben denken, so sind die Coordinaten X und Y des Schwerpunkts gegeben durch die Gleichungen

$$\begin{aligned} X(m_1 + m_2 + m_3 + \text{etc.}) &= m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \text{etc.} \\ Y(m_1 + m_2 + m_3 + \text{etc.}) &= m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3 + \text{etc.} \end{aligned}$$

Im Folgenden bezeichnen wir die Coordinaten des mit irgend einem beliebigen Buchstaben n bezeichneten Punktes mit x_n und y_n .

A. Es sollen gemischt werden zwei Farben E_0 und E_1 , welche selbst aus den drei ursprünglich gewählten Farben A, B und C gemischt werden können. Es seien die Quantitäten ε_0 und ε_1 der Farben E_0, E_1 mischbar aus den Quantitäten $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ und beziehlich $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ der Farben A, B, C , so ist nach der Constructionsregel, wenn wir mit x_0, y_0 die Coordinaten des Ortes von ε_0 mit x_1, y_1 die von ε_1 in der Farbentafel bezeichnen

$$\begin{aligned} x_0(\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0) &= \alpha_0 x_a + \beta_0 x_b + \gamma_0 x_c \\ x_1(\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1) &= \alpha_1 x_a + \beta_1 x_b + \gamma_1 x_c \\ y_0(\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0) &= \alpha_0 y_a + \beta_0 y_b + \gamma_0 y_c \\ y_1(\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1) &= \alpha_1 y_a + \beta_1 y_b + \gamma_1 y_c \\ \varepsilon_0 &= \alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 \\ \varepsilon_1 &= \alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1. \end{aligned}$$

Nun ist nach dem Grundsatz, daß gleichaussehende Farben gemischt gleichaussehende Mischfarben geben, die Mischfarbe von ε_0 und ε_1 dieselbe wie von

$\alpha_0 \beta_0 \gamma_0$ und $\alpha_1 \beta_1$ und γ_1 ; die Coordinaten X und Y des Ortes der letzteren Mischung sind bei der Constructiou der Farbentafel durch die Gleichungen

$$X(\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 + \alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1) = (\alpha_0 + \alpha_1)x_a + (\beta_0 + \beta_1)x_b + (\gamma_0 + \gamma_1)x_c$$

$$Y(\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 + \alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1) = (\alpha_0 + \alpha_1)y_a + (\beta_0 + \beta_1)y_b + (\gamma_0 + \gamma_1)y_c$$

gegeben oder indem man mittels der obigen sechs Gleichungen x_a, x_b, x_c und y_a, y_b und y_c eliminiert

$$X(\varepsilon_0 + \varepsilon_1) = \varepsilon_0 x_0 + \varepsilon_1 x_1$$

$$Y(\varepsilon_0 + \varepsilon_1) = \varepsilon_0 y_0 + \varepsilon_1 y_1$$

d. h. die Coordinaten X, Y der Mischfarbe von ε_0 und ε_1 sind dieselben, wie die des Schwerpunkts von ε_0 und ε_1 .

Die gesammte Lichtquantität q der Mischung von ε_0 und ε_1 muß wiederum gleich sein der Lichtquantität, welche bei Mischung der gleichaussehenden Quantitäten $(\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0)$ einerseits und $(\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1)$ andererseits entsteht, d. h.

$$q = \alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 + \alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1 = \varepsilon_0 + \varepsilon_1,$$

womit die Richtigkeit der gegebenen Constructionsregel für alle aus A, B und C mischbaren Farben auf der in gesagter Weise construirten Farbentafel erwiesen ist.

B. Wenn zwei nicht aus A, B und C mischbare Farben M_0 und M_1 gemischt werden sollen. Es seien x_0, y_0 die Coordinaten, μ_0 die Quantität der Farbe M_0 , x_1 und y_1 seien die Coordinaten, μ_1 die Quantität der Farbe M_1 . Es sei der Ort von M_0 in der Farbentafel dadurch gefunden worden, daß die Quantität μ_0 mit der Quantität ε_0 der im Punkte e befindlichen Farbe E gemischt, die Quantität q der in f befindlichen Farbe F gegeben hat, so ist

$$\varepsilon_0 + \mu_0 = q$$

$$q x_f = \varepsilon_0 x_e + \mu_0 x_0$$

$$q y_f = \varepsilon_0 y_e + \mu_0 y_0.$$

Ebenso sei der Ort der Farbe M_1 dadurch gefunden worden, daß μ_1 gemischt mit der Quantität ε_1 der Farbe E die Quantität ψ der im Punkte g befindlichen Farbe G gegeben hat. Es ist

$$\varepsilon_1 + \mu_1 = \psi$$

$$\psi x_g = \varepsilon_1 x_e + \mu_1 x_1$$

$$\psi y_g = \varepsilon_1 y_e + \mu_1 y_1.$$

Um den Ort der Mischfarbe von μ_0 und μ_1 in derselben Weise zu bestimmen, mische man diese mit der Quantität $\varepsilon_0 + \varepsilon_1$ der Farbe E . Dies kommt aber nach GRASSMANN'S drittem Satze darauf hinaus, daß man die Quantitäten q und ψ der Farben F und G mischt. Die Coordinaten dieser Mischfarbe seien ξ und v , gegeben durch die Gleichungen

$$(q + \psi)\xi = q x_f + \psi x_g$$

$$(q + \psi)v = q y_f + \psi y_g.$$

Dann sind die Coordinaten X und Y der Mischfarbe von μ_0 und μ_1 , deren noch unbestimmte Quantität mit η bezeichnet werde, gegeben durch die Gleichungen

$$(q + \psi)\xi = (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)x_e + \eta X$$

$$(q + \psi)v = (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)y_e + \eta Y$$

$$q + \psi = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \eta.$$

Indem man mit Hülfe der früheren Gleichungen hieraus ϱ , ψ , x_e und y_e eliminiert, erhält man:

$$\begin{aligned}\mu_0 x_0 + \mu_1 x_1 &= \eta X \\ \mu_0 y_0 + \mu_1 y_1 &= \eta Y \\ \mu_0 + \mu_1 &= \eta,\end{aligned}$$

wonach die Mischfarbe von μ_0 und μ_1 wirklich, wie verlangt wurde, im Schwerpunkte beider Massen liegt, und ihre Quantität der Summe beider Quantitäten gleich ist.

C. Wenn eine aus A, B, C mischbare und eine nicht mischbare Farbe gemischt werden sollen, ist ähnlich zu verfahren, wie im Falle B. Es sei μ_0 die Menge der aus A, B, C nicht mischbaren Farbe und ihre Coordinaten x_0, y_0 seien dadurch gefunden, daß sie mit der Quantität ε_0 der im Punkte E stehenden Farbe gemischt, die Quantität ϱ der in F stehenden Farbe gegeben habe. Demnach ist

$$\begin{aligned}\mu_0 x_0 + \varepsilon_0 x_e &= \varrho x_f \\ \mu_0 y_0 + \varepsilon_0 y_e &= \varrho y_f \\ \mu_0 + \varepsilon_0 &= \varrho.\end{aligned}$$

Der Ort der Mischfarbe η aus μ_0 und einer aus A, B, C mischbaren Farbe μ_1 im Punkte G befindlich, ergibt sich, indem man η mit ε_0 mischt, und dann nach 287 der gegebenen Constructionsregel weiter verfährt. Da aber η aus μ_0 und μ_1 zusammengesetzt ist, kann man auch zuerst μ_0 und ε_0 mischen, wobei man nach der Voraussetzung die Quantität ϱ der in F stehenden Farbe erhält, und dann ϱ mit μ_1 . Der gemeinsame Schwerpunkt beider ist der Ort der Mischfarbe von η und ε_0 , seine Coordinaten ξ und v sind durch folgende Gleichungen gegeben:

$$\begin{aligned}(\varrho + \mu_1) \xi &= \varrho x_f + \mu_1 x_g \\ (\varrho + \mu_1) v &= \varrho y_f + \mu_1 y_g.\end{aligned}$$

Die Coordinaten X und Y von η sind nun nach der aufgestellten Constructionsregel zu finden durch die Gleichungen:

$$\begin{aligned}(\varrho + \mu_1) \xi &= \eta X + \varepsilon_0 x_e \\ (\varrho + \mu_1) v &= \eta Y + \varepsilon_0 y_e \\ \varrho + \mu_1 &= \eta + \varepsilon_0,\end{aligned}$$

woraus schließlicly folgt:

$$\begin{aligned}\eta X &= \mu_0 x_0 + \mu_1 x_g \\ \eta Y &= \mu_0 y_0 + \mu_1 y_g \\ \eta &= \mu_0 + \mu_1,\end{aligned}$$

was zu erweisen war.

Bisher haben wir zur Bestimmung des Ortes der aus A, B, C nicht mischbaren Farben immer nur ihre Mischung mit einer einzigen Farbe E angewendet. Der letzte Satz zeigt aber, daß auch die Anwendung jeder anderen Farbe G dieselben Bestimmungen der Farbenorte geben würde.

Veränderlichkeit der Form der Farbentafel.

Es läßt sich nicht von vorn herein übersehen, welche Gestalt die Curve

haben werde, in welche bei einer solchen Construction die einfachen Farben zu stehen kommen. Diese Curve wird, abgesehen von individuellen Verschiedenheiten der Beobachter, je nach der Wahl der drei Farben, mit denen man die Construction beginnt, und ihrer drei Maafseinheiten, die man willkürlich festsetzt, sehr mannigfach sein können. Eine Maafseinheit muß immer willkürlich bleiben, ebenso die Lage zweier Punkte, in die man zwei der gewählten Farben setzt. Erst von den anderen 4 Stücken hängt dann die Form jener Curve ab. Man kann also noch vier Bedingungen festsetzen, welche sich im allgemeinen durch eine entsprechende Wahl der vier anderen willkürlich gebliebenen Gröfsen werden erfüllen lassen. So würde man z. B. verlangen können, daß in der Farbentafel die Entfernung fünf beliebig gewählter einfacher Farben vom Weiß gleich groß sein solle. Es würde alsdann die Grenzcurve der Farbentafel, welche die einfachen Farben enthält, sich kaum merklich von NEWTON'S Kreise unterscheiden, wie er in *Fig. 133* dargestellt ist, nur würde zwischen dem äußersten Roth und Violet die Sehne, welche dort gezeichnet ist, statt des Bogens die Fläche begrenzen müssen, weil das Purpur, welches nur aus den beiden genannten Farben gemischt werden kann, auf der geraden Verbindungslinie beider Farben liegen müßte. Außerdem folgt aus den Principien der Construction, daß jede zwei Complementärfarben an entgegengesetzten Enden eines Durchmessers des Kreises liegen müssen, weil die Mischfarbe Weiß immer in der Verbindungslinie derjenigen Farben liegen muß, aus denen sie gemischt ist. Diese Bedingung ist auch in *Fig. 133* erfüllt.

Was die festzusetzenden Maafseinheiten der Lichtquanta verschiedenfarbigen Lichts betrifft, so würden für diesen Fall, wo man das Farbenfeld durch eine Kreislinie begrenzen läßt, complementäre Mengen der Complementärfarben, d. h. solche Mengen, welche gemischt weiß geben, als gleich groß angesehen werden müssen, weil nach der Voraussetzung ihre Mischfarbe Weiß gleich weit von ihnen entfernt liegt. Der Schwerpunkt zweier Gewichte kann aber nur dann im Mittelpunkte ihrer Verbindungslinie liegen, wenn die Gewichte gleich sind. Ferner würden von anderen nicht complementären Farben solche Mengen als gleich groß angesehen werden, welche mit einer genügenden Quantität ihrer Complementärfarbe vereinigt gleiche Quantitäten Weiß geben. Aus dem, was ich früher über die verschiedene Sättigung der Spectralfarben angeführt habe, geht schon hervor, daß die Quantitäten, welche hier als gleich betrachtet werden, dem Auge durchaus nicht gleich hell erscheinen. Im nächsten Paragraphen indessen wird sich zeigen, daß Vergleichung der Helligkeit verschiedener Farben durch das Auge bei verschiedener absoluter Lichtstärke nicht ganz übereinstimmende Resultate ergiebt, während im Gegentheil, soweit GRASSMANN'S Gesetze gelten, eine Festsetzung der Maafseinheiten verschiedener Farben durch die Ergebnisse der Farbenmischung von der absoluten Helligkeit unabhängig sein muß.

Will man dagegen in der Farrentafel als gleich groß solche Quantitäten verschiedenfarbigen Lichts betrachten, welche dem Auge wenigstens innerhalb gewisser Grenzen der Lichtintensität als gleich hell erscheinen, so erhält die Curve der einfachen Farben nach meinen älteren Beobachtungen¹ eine ganz andere Gestalt ähnlich wie in *Fig. 136*. Die ge-

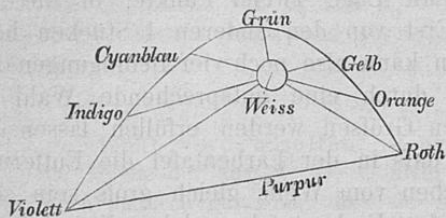


Fig. 136.

sättigten Farben Violett und Roth müssen weiter vom Weiss entfernt sein, als ihre weniger gesättigten Complementärfarben, weil nach dem Urtheile des Auges bei der Mischung von Gelbgrün und Violett zu Weiss die Quantität violetten Lichtes viel kleiner ist, als die des gelbgrünen, und wenn das Weiss im Schwerpunkte beider liegen soll, die kleinere Quantität Violett an einem größeren Hebelarme wirken muss, als die grössere Lichtmenge des Gelbgrün. Übrigens würden auch hier wieder die Spectralfarben an der Peripherie der Curve, das Purpur auf einer Sehne stehen müssen, Complementärfarben an den entgegengesetzten Enden von Sehnen, welche durch den Ort des Weiss gelegt sind, wie bei der kreisförmigen *Fig. 133*.

Die Zurückführung des Farbenmischungsgesetzes auf Schwerpunktsconstructionen wurde zuerst von NEWTON nur als eine Art mathematischen Bildes vorgeschlagen, um die große Menge der Thatsachen dadurch auszudrücken, und er stützte sich nur darauf, dass die Folgerungen aus jener Darstellung qualitativ mit den Erfahrungsthat-sachen übereinstimmten, ohne dass er quantitative Prüfungen ausgeführt hätte. Dergleichen quantitative Prüfungen sind in neuerer Zeit zunächst von MAXWELL vorgenommen worden. Er verfertigte sich eine Reihe Kreissectoren von größerem, eine andere von kleinerem Radius, welche mit Pigmenten (Zinnober, hellem Chromgelb, Pariser Grün, Ultramarin, Weiss und Schwarz) überzogen waren, und befestigte dieselben so auf einer rotirenden Scheibe, dass beliebige größere und kleinere Stücke der einzelnen Sectoren sichtbar wurden, und zwar wurde in der Mitte der Scheibe eine andere Zusammenstellung gemacht als am Rande. Die Breite der Sectoren wurde so lange abgeändert, bis beide Farbenmischungen bei schneller Rotation der Scheibe ganz gleich erschienen. Dann der Winkel bestimmt, in dem die einzelnen Sectoren sichtbar waren. So lassen sich unzählige Farbenzusammenstellungen machen, und das Mischungsgesetz lässt sich an ihnen prüfen. Der Sinn dieser Prüfung lässt sich unserer bisher gewählten Darstellungsweise gemäß folgendermaßen deutlich machen. Man construirt eine Farrentafel, in welcher drei von den Farben der Scheibe, z. B. Roth, Grün und Blau, als Grundfarben be-

¹ In wie weit die Helligkeit und die Unterschiedsempfindlichkeit der Farben in der Farrentafel ausgedrückt werden kann siehe § 21.

trachtet, ihre Helligkeiten gleich der willkürlichen Maafseinheit gesetzt werden. Dann sind bei jedem Mischungsversuche aus diesen drei Farben die angewendeten Helligkeiten derselben gleich dem Bogen ihres Sectors dividirt durch die Kreisperipherie zu setzen. Zuerst wird es möglich sein, aus den drei Farben ein Grau zusammzusetzen, und gleich zu machen einem aus Schwarz und Weiß zusammengesetzten Grau. Dadurch bestimmt sich die Stelle und Maafseinheit des Weiß in der Farbentafel. Dann wird es möglich sein, aus Roth und Grün einerseits, Gelb, Weiß und Schwarz andererseits zwei gleiche graugelbe Mischungen zu erzeugen, und dadurch nach der oben gegebenen Constructionsregel den Ort und die Maafseinheit des Gelb in der Farbentafel zu bestimmen. Sobald dies geschehen ist, läßt sich durch Construction in der Farbentafel oder Rechnung für jede andere Mischung aus drei von den fünf Farben Roth, Gelb, Grün, Blau, Weiß vollständig berechnen, wie dieselbe aus anderen drei zusammengesetzt werden kann, und dies am Versuche prüfen, so daß jede solche Prüfung eine Prüfung der Principien ist, auf welche die Schwerpunktsconstructions bei der Farbenmischung gegründet sind. MAXWELL hat die Versuche in guter Übereinstimmung mit dem Gesetze gefunden. Viel empfindlichere und schärfere messende Prüfungen lassen sich mit Hülfe von Spectralfarben ausführen; die Methoden für die praktische Durchführung dieser Messungen werden unten beschrieben werden.

Grundfarben. Wir haben gesehen, daß alle Verschiedenartigkeit des Lichteindrucks als die Function dreier unabhängig veränderlicher Größen betrachtet werden kann, und hatten bisher als solche Veränderlichen 1. die Lichtstärke, 2. den Farbenton und 3. die Sättigung bezeichnet oder auch 1. die Quantität Weiß, 2. die Quantität, 3. die Wellenlänge einer Spectralfarbe. Statt dieser drei Variablen kann man aber auch andere drei einführen, wie dies schon in den gegebenen Constructionsregeln geschah, indem man alle Farben als Mischungen von veränderlichen Quantitäten dreier Farben, der sogenannten drei Grundfarben, betrachtet, zu welchen man früher meistens Roth, Gelb und Blau wählte. Wenn man diese Lehre objectiv auffassen wollte, d. h. behaupten, es gäbe im Spectrum drei objective einfache Farben, durch deren Zusammensetzung man einen gleichen Eindruck auf das Auge hervorbringen könnte, wie durch jedes beliebige andere einfache oder zusammengesetzte Licht, so wäre dies unrichtig. Es giebt keine solche drei einfachen Farben, durch deren Zusammensetzung man auch nur erträglich die zwischenliegenden Farben des Spectrum nachbilden könnte. Die letzteren erscheinen immer viel gesättigter, als die zusammengesetzten Farben. Am wenigsten passen dazu Roth, Gelb und Blau, denn wenn man als Blau eine dem Farbentone des Himmels ähnliche Farbe wählt, und nicht ein dem Grünlichen sich näherndes Blau, so kann man durch Mischung dieser Farben gar kein Grün erhalten; nimmt man ein grünliches Gelb und ein grünliches Blau, so erhält man nur ein sehr weißliches Grün. Diese drei Farben konnten nur so lange gewählt werden, als man, auf die Mischung der Pig-

mentfarben vertrauend, fälschlich meinte, gelbes und blaues Licht gebe Grün. Erheblich besser geht es, wenn man als Grundfarben Violet, Grün und Roth wählt. Aus Violet und Grün kann man Blau mischen, aber freilich nicht das gesättigte Blau des Spectrum, und aus Grün und Roth kann man ein mattes Gelb zusammensetzen, was sich aber ebenfalls auf den ersten Blick von dem glänzenden Gelb des Spectrum unterscheidet.

Denken wir uns die Farben nach der oben geschilderten Methode in eine Farbentafel eingetragen, so ist aus der dort gegebenen Constructionsregel klar, daß alle Farben, welche aus drei gegebenen zu mischen sind, in dem Dreieck liegen müssen, dessen Ecken mit dem Orte der drei Grundfarben in der Farbentafel zusammenfallen. So würde in dem nebenstehenden

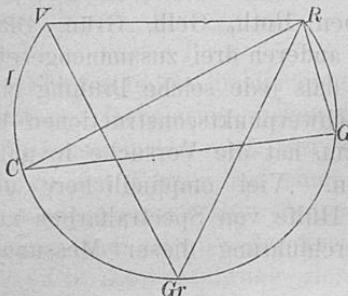


Fig. 137.

Farbenkreise Fig. 137, in welchem die Farben durch ihre Anfangsbuchstaben bezeichnet sind (I = Indigoblau, C = Cyanblau), das Dreieck RCG alle Farben umfassen, welche aus Roth, Cyanblau und Gelb zusammensetzen sind. Dabei fallen wie man sieht zwei große Stücke des Kreises weg, es würde nur sehr weißliches Violett und sehr weißliches Grün herzustellen sein. Wählten wir aber statt Cyanblau die Farbe des blauen Himmels, das Indigoblau, so würde das Grün ganz wegfallen. Das Dreieck VRGr enthält die aus Violet, Roth, Grün mischbaren Farben, und würde schon eine größere Zahl der vorhandenen Farben vertreten. Aber wie man in der Figur sieht, fehlen noch immer beträchtliche Fragmente des Kreises, übereinstimmend mit den angeführten Erfahrungen über Mischung von Spectralfarben, aus denen eben folgt, daß die Grenzkurve der Farbentafel eine von den Seiten des Dreiecks merklich abweichende krumme Linie sein müsse.

Die objective Natur dreier Grundfarben hat BREWSTER zu vertheidigen gesucht, indem er behauptete, für jeden Grad der Brechbarkeit der Lichtstrahlen existirten drei verschiedene Arten Licht, rothes, gelbes und blaues, welche nur in verschiedenen Verhältnissen gemischt seien, so daß dadurch die verschiedenen Farben des Spectrum entstanden. Die Spectralfarben seien also noch zusammengesetzt aus dreierlei qualitativ verschiedenen Lichtarten, deren Strahlen aber für jede einzelne einfache Farbe denselben Grad von Brechbarkeit hätten. Durch absorbirende farbige Medien sollte sich nach BREWSTER Licht aller drei Grundfarben in den verschiedenen einfachen Farben nachweisen lassen. Daß diese letztere Behauptung, auf welcher seine ganze Beweisführung ruht, nicht richtig sei, ist schon im vorigen Paragraphen S. 308 besprochen.

NEWTON'S Schwerpunktsconstruction, welche wir bisher angewendet haben, ist, wie die besprochene Zerlegung in Grundfarben deutlich erkennen läßt, nur ein

veranschaulichendes Bild für eine viel allgemeiner vorkommende Form des Zusammenwirkens qualitativ unterschiedener Größen, welcher, wie ebenfalls H. GRASSMANN¹ in sehr allgemeiner Weise gezeigt hat, die wesentlichen Kennzeichen der Addition zukommen. Das erste wichtige Beispiel einer additiven Verknüpfung von nicht homogenen Größen war durch GAUSS gegeben worden, indem er den complexen Größen der Algebra geometrischen Sinn unterlegte. In anderer Form erweitert, kehrt dasselbe wieder in der von B. HAMILTON entwickelten Lehre von den Quaternions.

Als Addition kann im allgemeinen jede Art der Verknüpfung physikalischer oder geometrischer Größen bezeichnet werden, deren Ergebniss eindeutig und unabhängig ist von irgend welcher Reihenfolge, in der die zu verknüpfenden Größen sich darbieten, unabhängig auch von der Reihenfolge, in welcher die einzelnen vorgeschriebenen Verknüpfungsacte nach einander ausgeführt werden. Endlich ist bei einer additiven Verknüpfung von Größen zu fordern, daß die Summe ihren Theilen gleichartig sei, d. h. daß über die Gleichheit oder Ungleichheit der Summe mit ihren Theilen oder anderen ähnlichen Summen durch dasselbe Verfahren entschieden werden kann, wie über die Gleichheit oder Ungleichheit der Theile untereinander.²

In diesem Sinne ist die Mischung zweier Farben als eine additive Verknüpfung charakterisirt. Über ihre physiologische Gleichheit entscheidet nur das Auge; gleichaussehende Lichtmischungen sind physiologisch als gleiche Farben zu betrachten; in welcher Weise jede derselben aus anders aussehenden Farben vorher zusammengesetzt worden sei, darauf kommt es nicht mehr an. Für das Endergebniss ist es gleichgültig, ob ich Roth zu Blau oder Blau zu Roth setze, wie bei der Addition $a + b = b + a$. Es kommt nicht darauf an, ob ich Roth und Grün erst zu Gelb verbinde, und dann dieses oder ein gleich aussehendes Gelb mit Violet zu Weiß verbinde; oder ob ich andererseits ebensoviel Grün und Violet erst zu Blau zusammenfüge, und dann dieses, beziehlich ein gleich aussehendes Blau, mit soviel Roth wie im ersten Falle zu Weiß. Das Resultat ist dasselbe wie bei der Addition

$$(a + b) + c = a + (b + c)$$

Endlich sind die Ergebnisse der Verbindung Mischfarben, über deren Gleichheit mit andern Mischfarben oder den ursprünglichen Farben ebenso wieder durch Vergleichung der von ihnen erregten Empfindung, durch das gleiche Aussehen zu entscheiden ist, wie bei allen farbigen Feldern. Die Mischfarbe als Summe ist eine ihren Theilen gleichartige Größe.

Alle ursprüngliche Bestimmung von physikalischen und geometrischen Größen beruht nun, wie ich l. c. zu zeigen versucht habe, darauf, daß man additive Verknüpfungsweisen derselben zu finden wisse. Sobald man diese kennt, kann man zwei gleiche Größen derselben Art zusammenfügen, und dadurch eine von doppelter, dreifacher etc. Größe herstellen. Man kann dann die Größen durch benannte Zahlen definiren, d. h. man kann sie messen.

Nun giebt es aber Größen, die erst durch mehrfache Bestimmungsstücke vollständig gegeben sind, wie z. B. die geradlinige Strecke, um welche ein Punkt aus

¹ H. GRASSMANN, Die Ausdehnungslehre von 1844. 2. Aufl. Leipzig, 1878. Darin Begriff des Schwerpunkts (Mitte eines Punktsystems) erörtert S. 42–47.

² H. V. HELMHOLTZ, „Zahlen und Messen erkenntnisstheoretisch betrachtet“ in: Philosophische Aufsätze, EDUARD ZELLER gewidmet. Leipzig. Fues. 1887.

einer ersten Lage in eine zweite fortbewegt worden ist. Es genügt nicht ihre Länge zu kennen, sondern auch ihre Richtung muß gegeben sein, was durch zwei Winkel, die sie mit bekannten Richtungen macht, geschehen kann; im Ganzen also gehören dazu drei meßbare Gröfsen. Statt dessen kann ich aber auch angeben, wenn ich meinen eigenen Körper als feststehend denke, um wieviel der Punkt nach oben, um wieviel nach rechts, um wie viel nach vorn verschoben sei. Um die neue Lage des Punktes vollständig zu geben, sind drei Bestimmungsstücke nöthig und im Allgemeinen auch genügend. Verschiebe sich der Punkt in einer Ebene, so wären zwei solche Abmessungen nöthig und genügend. Deshalb schreibt man dem Raume drei, der Ebene zwei Dimensionen zu, oder nach der von RIEMANN eingeführten Terminologiē ist der Raum eine Mannigfaltigkeit von drei Dimensionen, die Ebene eine solche von zwei Dimensionen. In diesem Sinne nun sehen wir, daß der Inbegriff aller möglichen Farben einer Mannigfaltigkeit von drei Dimensionen entspricht, die nur in einem räumlichen Volumen von drei Dimensionen, wie in LAMBERT's Pyramide so anzuordnen wäre, daß jede Farbe ihren besonderen Ort findet, und ähnliche Farben einander um so näher liegen, je ähnlicher sie sind. Dagegen wenn wir uns auf den Inbegriff der Farben von gleichem Lichtquantum beschränken, bilden diese eine Mannigfaltigkeit von zwei Dimensionen, welche man in einer ebenen Farbentafel abbilden kann. Die Gewichte werden in der Farbentafel nur zu Hülfe genommen, um die dritte unabhängige Variable auch für Constructionen in der Ebene ausdrücken zu können. Und die Schwerpunktsconstruction wird hierbei nur deshalb herbeigezogen, weil auch sie ein additiver Proceß in der Ebene ist.

Denn wenn ich zwei Massen m_1 und m_2 in der Ebene habe, und $x_1 y_1$ die Coordinaten der ersten, $x_2 y_2$ die der zweiten, ξ und ζ die ihres Schwerpunkts sind, so sind wie schon S. 328 bemerkt, diese zu finden durch die Gleichungen

$$(m_1 + m_2) \cdot \xi = m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2$$

$$(m_1 + m_2) \cdot \zeta = m_1 \cdot y_1 + m_2 \cdot y_2$$

oder wenn wir viele solche Massenpunkte haben und mit Σ die Summe aller entsprechenden Gröfsen bezeichnen

$$\xi \cdot \Sigma(m) = \Sigma(mx)$$

$$\eta \cdot \Sigma(m) = \Sigma(my)$$

Für das Resultat, den Ort des Schwerpunkt kommt es hierbei also nicht bloß auf die Gröfße jeder Masse, sondern auch auf ihren Ort in der Tafel an. Ebenso bei den Farben, wenn wir deren besondere Qualität durch den Ort in der Tafel bezeichnen.

Darstellung der Farben durch geometrische Strecken. In NEWTON's Construction wird also nur ein additiver Proceß durch einen andern bildlich dargestellt, in welchem Gröfsen von derselben Anzahl von Dimensionen sich verbinden. Dafür könnte aber jede andre additive Verknüpfung ebenso gewählt werden. Nicht selten erweist es sich als vorthellhaft, nach dem Vorbild von LAMBERT's Farbenpyramide ein rechtwinkliges Coordinatensystem zu benutzen, und die Quanta dreier Grundfarben als Coordinaten x , y , z längs der drei Axen aufzutragen, und indem wir das rechtwinklige Parallelepipeton, dessen drei Seiten x , y , z sind, vervollständigen, die dem Nullpunkte des Coordinatensystems gegenüberliegende neuentstehende Ecke als Ort der Mischfarbe anzusehen. Die vom Nullpunkt nach dieser Stelle gezogene gerade Linie würde durch ihre Länge den Lichtwerth, durch ihre Richtung die Art der Farbe anzeigen. Alle aus den drei Grundfarben mischbaren Lichter würden demnach in der einen rechtwinkligen Ecke des Raumes liegen, die zwischen

den positiven Hälften der drei Coordinataxen liegt. Wenn wir durch Punkte der Coordinataxen, welche um gleiche Distanzen c von dem Nullpunkt entfernt sind, eine Ebene legen, so schneidet diese die Grenzebenen der rechtwinkeligen Ecke in drei gleich langen geraden Linien und bildet die Basis einer dreikantigen Pyramide, deren Spitze der Nullpunkt ist; sie entspricht LAMBERT's Farbenpyramide. Die Schnittebene, so weit sie in der genannten Ecke liegt, würde die Form eines gleichseitigen Dreiecks haben, und von allen den geraden Linien, die von dem Nullpunkt ausgehen und die den verschiedenen Farben entsprechen sollen, geschnitten werden. Jeder Schnittpunkt einer dieser Linien mit der Ebene des Dreiecks würde den Ort der entsprechenden Farbe in diesem anzeigen, und zwar würde die Vertheilung der einzelnen Farben darin genau der durch Schwerpunktsconstructionen herstellbaren Ordnung entsprechen. In jeder solchen Ebene würden aber nur Farben gewisser Helligkeit angeordnet sein, welche durch die Summe der Werthe $(x + y + z)$ gegeben ist. Die Gleichung der genannten Ebene wäre nämlich

$$x + y + z = c \cdot \sqrt{3}.$$

Wenn zwei Farben, deren eine die Coordinaten x, y, z hat, die andere ξ, η, ζ , gemischt werden, so würde bei ihrer Verbindung die Mischfarbe die Coordinaten $(x + \xi), (y + \eta), (z + \zeta)$ erhalten. In *Fig. 138* ist eine solche Verbindung wenigstens für zwei Coordinaten dargestellt. Wenn die eine Farbe durch $oa = r$, die andre durch $oc = \rho$ dargestellt wird, und man ρ gleich und parallel oc von a aus nach ab aufträgt, so hat die Strecke ob die Projectionen $(x + \xi), (y + \eta), (z + \zeta)$, und repräsentirt in H. GRASSMANN's Sinne die geometrische Summe der Strecken oa und $ab = oc$. Man sieht leicht, daß die Strecke ob auch die Diagonale des Parallelogramms ist, von dem zwei Seiten in oa und oc gegeben sind. Die Art der Verknüpfung beider ist also dieselbe, wie bei der Construction der Resultante zweier zu componirenden Kräfte oder Geschwindigkeiten.

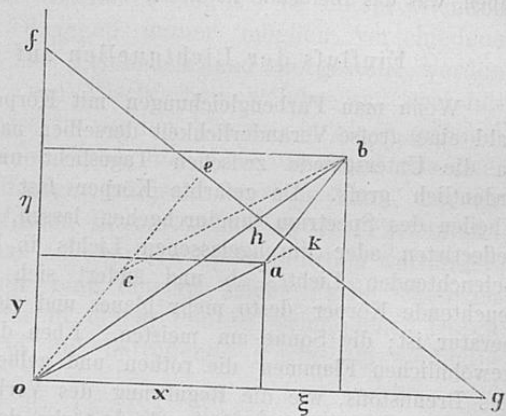


Fig. 138.

Übereinstimmung dieser Construction der Resultante mit der des Schwerpunkts.

Irgend eine Schnittfläche, die in der Linie fg (*Fig. 138*) die Zeichnung schneidet, möge von den Linien oa und oc in k und e getroffen werden, wobei die Längen ok und oe auch gleichzeitig die Gewichtseinheiten der in der Ebene fg zu construierenden Farbentafel darstellen sollen. Wie der Schwerpunkt zweier in e und k angebrachten Massen muß auch der Schnittpunkt h der Resultante ob zunächst in der geraden durch k und e gezogenen Linie liegen. Dann ergibt sich aus bekannten trigonometrischen Sätzen

$$oa : ab = \sin(oba) : \sin(bok)$$

$$r : \rho = \sin(hoc) : \sin(hoa).$$

oder

Ferner ist

$$kh : ko = \sin(hoa) : \sin(ohk)$$

$$eh : eo = \sin(eoh) : \sin(oh e)$$

Da (kho) und (eho) Nebenwinkel sind, sind ihre Sinus einander gleich. Folglich

$$\frac{eo \cdot kh}{ko \cdot eh} = \frac{\sin(hoa)}{\sin(eoh)} = \frac{q}{r}$$

$$\frac{r}{ko} \cdot kh = \frac{q}{eo} \cdot eh$$

Da die Verhältnisse $\frac{r}{ko}$ und $\frac{q}{eo}$ die Lichtmengen, gemessen durch die in der Farbentafel zu brauchenden Gewichtseinheiten darstellen, so entspricht diese letzte Bestimmung des Ortes der Mischfarbe h in der ebenen Farbentafel ganz der Regel bei den Schwerpunktsconstructions.

Übrigens gilt dieser letzte Beweis für jede in beliebiger Richtung durch drei Punkte der positiven Coordinataxen gelegte Schnittebene, welche Dreiecke von sehr verschiedenen Formen darbieten könnte, deren jedes eine mögliche Form der Farbentafel darstellen würde. Wenn man sich die geometrische Farbentafel auf einer elastischen Platte dargestellt dächte, die man in irgend einer beliebig gewählten Richtung gleichmäßig ausdehnt, würde man eine ähnliche Reihe von Gestaltveränderungen erhalten; doch würde jede dieser Farbentafeln noch richtig bleiben. Wir werden zunächst also noch zu überlegen haben, was das Bleibende in diesen Veränderungen ist.

Einfluß der Lichtquellen auf die Farbengleichungen.

Wenn man Farbengleichungen mit Körperfarben herzustellen sucht, wird man bald eine große Veränderlichkeit derselben nach der Art der Beleuchtung erkennen. Ja die Unterschiede zwischen Tageslicht und Lampenlicht sind hierbei außerordentlich groß. Da gefärbte Körper fast ausnahmslos Licht aus sehr breiten Theilen des Spectrum hindurchgehen lassen, hängt die Mischung des von ihnen reflectirten oder durchgelassenen Lichts in hohem Grade von der Mischung des beleuchtenden Lichtes ab und ändert sich mit dieser. Im Allgemeinen senden leuchtende Körper desto mehr blaues und violettes Licht aus, je höher ihre Temperatur ist; die Sonne am meisten. Eben deshalb überwiegen in dem Lichte der gewöhnlichen Flammen die rothen und gelben Strahlen, und sowohl die Substanz des Brennstoffs, wie die Regulirung des Verbrennungsprocesses haben sehr erkennbaren Einfluß auf die relative Lichtstärke der verschiedenen Spectralfarben. Auch das Sonnenlicht, welches die Atmosphäre unter wechselnden meteorologischen Verhältnissen durchzogen hat, ist nicht frei von Veränderungen seiner Mischung.

Eben deshalb ist die bequeme und leicht auszuführende Methode der Mischung auf dem Farbkreis wenig brauchbar zu genauen Messungen.

Wendet man dagegen einfaches Licht eines gut gereinigten Spectrum an, so ist man wenigstens sicher, daß das Licht derselben Wellenlänge immer dieselbe Qualität habe, welche also durch Angabe der Wellenlänge vollständig bestimmt ist. Schwieriger ist es feste Verhältnisse der Lichtmengen verschiedener Spectralfarben herzustellen, festzuhalten und zu definiren. Man kann darin zunächst nur so weit kommen, als es gelingt, eine Lichtquelle unveränderlicher Art festzuhalten.

Dazu kommt, daß in den prismatischen Spectren, welche hier vorzugsweise gebraucht werden müssen, da sie reiner und lichtstärker sind als die Diffractionsspectra, die Helligkeit der einzelnen Farbenbänder auch von der Breite, welche

dieselben im Spectrum einnehmen, und daher von dem besonderen Dispersionsverhältniß des gebrauchten Glases abhängen.

Weiteren Einfluß in derselben Richtung können absorbirende Mittel, namentlich schwache Färbungen des Glases im Prisma und in den Linsen der Fernröhre haben.

Die brechenden Medien des Auges zeigen merkliche Färbung wohl nur in krankhaften Zuständen. Aber die Färbung des gelben Flecks wirkt auf spectrales Grünblau (nahe der Linie F') sehr deutlich, und wie schon bemerkt, sehen Mischungen, die dieses Blau enthalten, im Fixationspunkte des Sehfeldes anders aus, als in kurzer Entfernung davon.

Unter diesen Umständen ist es wichtig hier diejenigen Bestimmungen anzuzeigen, die unabhängig von Intensitätsmessungen sind.

Festhaltung einzelner Farben unter Vermeidung von Intensitätsmessungen.

Zunächst ist zu bemerken, daß jede der Spectralfarben, und alle Mischungen innerhalb der beiden Endstrecken des Spectrum, welche gleichaussehend sind, wie gewisse Spectralfarben, durch die Wellenlängen dieser letzteren defintirt werden können.

Für Mischungen, welche merklich weißlicher sind als die entsprechenden Farbtöne des Spectrum, ist es dagegen immer möglich verschiedene Farbenpaare anzugeben, aus denen sie gleichaussehend hergestellt werden können. Denn da die ganze Reihe von Mischfarben, welche aus zwei bestimmten Spectralfarben zusammengesetzt werden können, in einer geraden Linie der Farbentafel liegt, so kann eine Farbe, die gleichaussehend aus zwei verschiedenen Paaren von Spectralfarben gemischt werden kann, nur im Schnittpunkte der beiden geraden Linien liegen, welche in der Farbentafel die Orte der beiden je zu einem Paar zugehörigen Spectralfarben verbindet. Zugleich ergibt sich daraus, daß nur eine einzige solche Farbe existiren kann, da sich zwei gerade Linien nur in einem Punkte schneiden. Durch die angegebene Bestimmung ist also die betreffende Farbe unzweideutig bestimmt.

So kann man also zum Beispiel die Angaben über die complementären Farben verschiedener Beobachter auf S. 317—319, ansehen als Definitionen desjenigen Weißs, welches jene Beobachter ihren Bestimmungen zu Grunde gelegt haben.

Auf diese Weise wird also ein Beobachter das Weiß eines bestimmten Tageslichts auch durch Gaslicht wieder herstellen können.

Es ist ferner zu bemerken, daß wenn man zwei Farbenpaare a_1, a_2 und b_1, b_2 und noch eine Farbe c_1 aus dem Spectrum als gegeben ansieht, die sechste Spectralfarbe c_2 , welche mit c_1 dieselbe Mischfarbe bilden kann, wie a_1 mit a_2 einerseits, und b_1 mit b_2 andererseits, fest bestimmt wäre. Sie müßte in der Farbentafel da liegen, wo die von c_1 aus durch den Ort der gemeinsamen Mischfarbe von a_1 und a_2 , beziehlich b_1 und b_2 gezogene gerade Linie die Spectralcurve schneidet.

Es wären dies Beziehungen zwischen den Farben, welche unabhängig von ihren Helligkeitsverhältnissen in der betreffenden Lichtquelle bestehen müssen. Eben deshalb wären sie auch unabhängig von der Einschaltung schwach gefärbter Medien zwischen Lichtquelle und Auge oder im Auge selbst, da solche nichts weiter bewirken, als die Helligkeitsverhältnisse zwischen den einzelnen Farben des Spectrum zu verändern.

Andererseits wären solche Messungen auch sehr geeignet Änderungen der objectiven Lichtintensität verschiedener Theile des Spectrum erkennen zu lassen; denn sobald solche einträten, würde das Mengenverhältniß der beiden Componenten beider Paare geändert werden müssen.

Curve der Spectralfarben.

Wenn man die Curve der Spectralfarben in der Farbebene darzustellen sucht, so lassen die oben S. 320 gegebenen Versuchsergebnisse schon erkennen, daß diese einen offenen Bogen darstellen wird, der in beiden Zwischenstrecken sich einer geraden Linie eng annähert, während in der Mitte eine gekrümmte Mittelstrecke bleibt, und die Endstrecken sich in einen Punkt zusammenziehen.

Ich gebe in *Fig. 139* eine von den Herren A. KÖNIG und C. DIETERICH nach ihren gemeinschaftlich ausgeführten Messungen construirte Tafel,¹ in der die Buchstaben *A* bis *H*, sowie *a* und *b* die entsprechenden FRAUNHOFER'schen Linien bezeichnen. Die Farben jenseits *B* im äußersten Roth und jenseits *G* im Violet fallen in die Endpunkte der Curve zusammen, während andererseits die Farben zwischen *C* und *E*, und noch mehr die im bläulichen Grün zwischen *b* und *F* sich sehr weit auseinanderziehen. In der That liegen hier (S. 317) die Stellen des Spectrum, wo der Farbenton sich sehr schnell ändert. Die rothe Zwischenstrecke reicht von dem Endpunkte bis etwa zur Mitte zwischen *C* und *D*, die violette umfaßt das geradlinige umgeknickte Ende der Curve. Der Knick könnte wohl davon herrühren, daß sich hier bläulichweiße Fluorescenz der Netzhaut zu dem unmittelbaren Einfluß des Lichtes gesellt, und die violetten Farben deshalb in der Richtung gegen das Weiß hin verschoben haben.

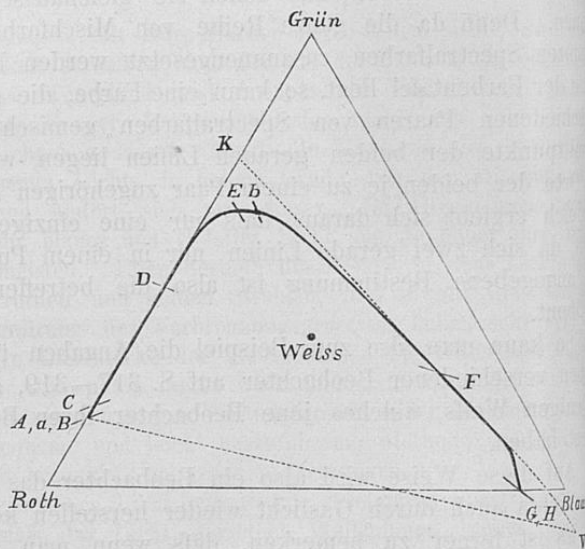


Fig. 139

¹ A. KÖNIG. *Rep. of the British Assoc.* Birmingham 1886. pag. 431. — *Naturwiss. Rundschau* Jahrgang 1886. S. 457.

Es sind zwei Dreiecke um diese Curve gelegt worden, das eine gleichseitige mit ausgezogenen Seiten beruht auf einem Versuche der Herren KÖNIG und DIETERICI, die physiologischen Grundfarben durch Vergleichung der normalen Augen mit den farbenblinden zu finden, wovon später mehr. Das andre punktirt sucht die Spectralcurve möglichst eng zu umschließen, wobei die Abweichung im Violett als verursacht durch die Fluorescenz angesehen wird. Die Ecken dieses Dreiecks *B*, *K*, *V* entfernen sich am wenigsten von den Spectralfarben. Das darin vorkommende Grün im Punkte *K* würde im Farbenton den Magnesiumlinien *b* im Sonnenspectrum entsprechen, müßte aber etwas gesättigter sein.

Allgemeine theoretische Erörterungen.

Jede Art additiver Verknüpfung irgend welcher natürlicher Größen, welche aufgefunden worden ist, kann unmittelbar zur Grundlage eines Messungssystems dieser Größen gemacht werden; so auch das Gesetz der Farbmischung. Haben wir es mit Größen aus einer Mannigfaltigkeit von einer Dimension zu thun, so genügt es dann eine bestimmte Größe dieser Art als die Maafseinheit zu wählen. Wie groß wir sie wählen, ist der Regel nach willkürlich. Wenn aber die betreffenden Größen einem Gebiete von drei Dimensionen angehören, so haben wir im allgemeinen drei willkürliche Einheiten zu wählen nicht nur der Größe nach, sondern auch der Qualität nach. Auch in den Raummessungen ist nicht nur die gewählte Längeneinheit willkürlich, sondern auch die drei Richtungen der Coordinaten, auf welche wir alle andern Lagenbestimmungen beziehen wollen. Da wir jedoch in diesem Falle denselben Längenmaafsstab an jede der Coordinatenrichtungen anlegen können, so können wir wenigstens dieselbe Längeneinheit nach allen Richtungen hin zu Grunde legen. Im Farbensystem haben wir ebenfalls eine Mannigfaltigkeit von drei Dimensionen, und müssen daher drei Einheiten willkürlich wählen. Die Willkürlichkeit der gewählten Ausgangsfarben entspricht hier der Willkürlichkeit der Coordinaten-Richtung des Raumes. Über die Möglichkeit, die Quanta der drei verschiedenen Lichter auf ein gemeinsames Grundmaafs zurückzuführen, werden wir im nächsten Paragraphen zu verhandeln haben. Es sind zunächst auch hier, wie bei den Raumcoordinaten, nebensächliche Verhältnisse oder auch hypothetische Ansichten, die uns die Wahl des einen oder andern Coordinatensystems bevorzugen lassen.

Wenn wir nun die Grundfarben und ihre quantitativen Einheiten *R*, *G*, *V* gewählt haben, dann kann der physiologische Eindruck jeder andern Farbe *F* dadurch vollkommen beschrieben werden, daß wir sagen, sie sehe so aus, wie eine Vereinigung von so und so viel Einheiten *R*, *G* und *V*. Also wenn wir mit *x*, *y*, *z* Zahlen bezeichnen

$$F = x \cdot R + y \cdot G + z \cdot V.$$

Wir erreichen dadurch zunächst ebenso viel, als wenn wir die Länge eines Stabes uns oder Andern dadurch bezeichnen, daß wir dieselbe in Centimetern ausdrücken.

Was aber hier verglichen und messend bestimmt wird, ist eine physiologische Wirkung des Lichtes auf das Auge, welche überdies noch beeinflusst wird durch allerlei individuelle und physiologische Verhältnisse, die theils schon besprochen sind, theils später noch besprochen werden sollen. Die objectiven Lichtmengen kommen hier nur als Empfindungsreize in Betracht, und haben als solche einen physikalisch meßbaren Werth. Wenn wir also z. B., was zunächst noch willkürlich

ist, als Grundfarbe gewisse Quanta Roth, Grün, Violet mit den Einheiten R , G , V gewählt haben und für gemischtes farbiges Licht F die Farbengleichung

$$F = x \cdot R + y \cdot G + z \cdot V$$

hätten, so wäre x der Rothwerth, y der Grünwerth, z der Violetwerth des Lichtes F zu nennen.

Es folgt nun aber daraus auch weiter, daß es in der Empfindung des Auges drei entsprechende Arten der Thätigkeit geben muß, die, ohne sich gegenseitig zu stören, neben einander bestehen können, und von denen alle Verschiedenheit der Farbenempfindung abhängt.

Nehmen wir an, es sei irgend ein Verfahren gefunden, sei es innere Beobachtung, die z. B. Herr E. HERING dazu für brauchbar hält, oder irgend ein anderes, um drei meßbare Größen φ , ψ , χ zu bestimmen, die zusammengenommen die Art der Empfindung des Auges vollständig definiren: so würde jedenfalls durch Beobachtung ermittelt werden können, wie die Werthe dieser Größen φ , ψ , χ abhängen von den Werthen x , y , z des einfallenden Lichts. Es würden also einmal φ , ψ und χ als drei Functionen der x , y , z , wie auch umgekehrt x , y , z als Functionen der φ , ψ , χ dargestellt werden können. Da keine zwei verschiedene Werthegruppen der x , y , z dieselbe Empfindung, d. h. dieselben Werthe der φ , ψ , χ geben, so müssen die x , y , z auch eindeutig durch die φ , ψ , χ ausgedrückt werden können. Diese die Werthe der x , y , z darstellenden Functionen der φ , ψ , χ wären also Größen, die nur von den Eigenthümlichkeiten der Empfindung abhängen und durch die Art der Empfindung bestimmt wären, denn andererseits eine gewisse Selbständigkeit der Existenz zukäme, da jede neben beiden andern, und ungestört durch die andern im Nervenapparate erregt werden, bestehen und wieder verschwinden könnte. Dieses ungestörte neben einander Bestehen ist es aber gerade, was wir verlangen müssen, wenn wir von Elementen oder Bestandtheilen der Empfindung reden sollen. Wenn wir also die x darstellende Function von φ , ψ , χ mit r , entsprechend die beiden andern mit g , v bezeichnen, so wären diese Größen r , g , v in der That als Elemente der Farbenempfindung zu bezeichnen. Aber auch allen additiven Aggregaten ersten Grades von der Form $(a \cdot r + b \cdot g + c \cdot v)$, worin a , b , c Zahlen sind — positive, oder soweit das einen Sinn haben sollte, auch negative — würden dieselbe Art ungestörten Nebeneinanderbestehens zeigen können. Welche von solchen linearen Functionen der r , g , v wir am zweckmäßigsten als Elemente wählen, bleibt zunächst noch unentschieden.

Andererseits aber giebt es keine anderen als diese linearen Functionen der r , g , v , welche, wenn zwei Lichter mit den Farbenwerthen x_1 , y_1 , z_1 und x_2 , y_2 , z_2 zusammenkommen, sich einfach addiren, und die dementsprechend als Elemente der Farbenempfindung angesehen werden könnten. Natürlich schließt dies nicht aus, daß andere Wirkungen im Bereich der Gesichtsempfindungen zu Stand kommen, die in verwickelterer Weise von den x , y , z abhängen. Eine solche Wirkung werden wir in der Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und der nach dieser bestimmten Intensität der Empfindung kennen lernen. Aber solche Größen für welche nicht die Möglichkeit auch quantitativ ungestörten Nebeneinanderbestehens erwiesen ist, werden wir, wenn wir genau reden wollen, auch nicht Elemente der Empfindung nennen dürfen.

Da die Verkennung dieses Satzes große Verwirrung in der Farbenlehre angerichtet hat, erlaube ich mir, seinen verhältnißmäßig einfachen analytischen Beweis hierher zu setzen.

Die Frage ist also, ob es irgend eine Function F der Größen x, y, z geben könne, welche addirt zu derselben Function anderer Werthe ξ, η, ζ derselben Variablen, eine Function von $(x + \xi), (y + \eta), (z + \zeta)$ gäbe. Es fragt sich also, unter welchen Bedingungen eine Gleichung

$$F(x + \xi), (y + \eta), (z + \zeta) = Fx, y, z + F\xi, \eta, \zeta$$

für beliebig wechselnde Werthe der Variablen bestehen könne.

Wenn sie für einen gegebenen Werth von x besteht, und auch für einen unendlich wenig davon verschiedenen bestehen soll, so muß die Gleichung nach x differenziert wieder eine für alle Werthe der Variablen gültige Gleichung geben.

$$\frac{dF(x + \xi)}{d[x + \xi]} = \frac{dFx}{dx}$$

Die Function $F(\xi)$, welche von x nicht abhängig ist, fällt dabei fort. Differentiirt man die letzte Gleichung ebenso, sei es nach ξ oder nach η oder nach ζ , so fällt auch die zweite Function, die von den x allein abhängt, weg, und es ergibt sich, daß sämtliche zweiten Differentialquotienten der Function $F(x + \xi)$ nach irgend welchen ihrer Variablen $(x + \xi), (y + \eta)$ oder $(z + \zeta)$ genommen gleich Null sind.

Wenn aber für eine Function von x, y, z gleichzeitig

$$\frac{d^2 F}{dx^2} = 0, \quad \frac{d^2 F}{dx \cdot dy} = 0, \quad \frac{d^2 F}{dx \cdot dz} = 0,$$

so folgt aus diesen Gleichungen nach einander, daß $\frac{dF}{dx}$ weder von x , noch von y , noch von z abhängig, also eine Constante sei. Dasselbe folgt für $\frac{dF}{dy}$ und $\frac{dF}{dz}$. Daraus folgt schließlich in bekannter Weise, daß F nur die Form haben könne

$$F = ax + by + cz,$$

wobei a, b, c von den x, y, z unabhängig sind.

Im ganzen ist aus diesen Erörterungen also zu schließen,

1. daß in irgend einem Abschnitte der leitenden Nervensubstanz unter dem Einflusse farbigen Lichts drei verschiedene, von einander unabhängige und sich gegenseitig nicht störende Elementarthatigkeiten zu Stande kommen; wir wollen sie die Elementarerregungen nennen. Ihre Größe ist den entsprechenden Farbenwerthen x, y, z des objectiven Lichts direct proportional; sie entsprechen den r, g, v der obigen Darstellung.

2. daß alle weiter nach dem Gehirn hin auftretenden Thatigkeiten, auch die eigentlich zum Bewußtsein gelangenden Empfindungen bei gegebenem Zustande der reagirenden Hirnthelle nur Wirkungen, und der Größe nach Functionen φ, χ, ψ der drei Elementarerregungen r, g, v sind.

3. daß entweder die Elementarerregungen selbst oder drei von ihnen abhängige, sich gegenseitig nicht störende Wirkungen derselben getrennt dem Centralorgan zugeleitet werden.

Über diese weiteren Thatigkeiten in den tieferen Organen wissen wir nun nichts mit Sicherheit. Gewisse Anhaltspunkte wird uns die Untersuchung der erkennbaren Unterschiede und der Nachwirkungen der Empfindung geben.

Selbstverständlich ist, da wir es in diesem ganzen Gebiete immer nur mit Wirkungen des objectiven Lichtes auf Organe des lebenden Körpers zu thun haben, daß die physiologischen Zustände dieser Organe, die Änderungen ihrer Reizbarkeit, wie sie in der Physiologie bezeichnet werden, Einfluß auf die Größe und Art der Wirkung haben, und somit die Abhängigkeit zwischen den φ, ψ, χ

einerseits und den x, y, z andererseits beeinflussen, so daß in die Gleichungen, welche diese Abhängigkeit ausdrücken, noch andere veränderliche, von den Zuständen der Organe, aber nicht von dem zur Zeit einfallenden Lichte abhängige Größen eingehen. Diese würden also dann auch in die durch q, ψ, χ ausgedrückten Werthe der r, g, v eintreten und eine gewisse Veränderlichkeit in der Größe oder Art der elementaren Vorgänge anzeigen. Änderungen in der Größe sind in der That bekannt, und werden in der Lehre von den Nachbildern besprochen werden.

Ferner ist zunächst kein Grund da anzunehmen, daß wir diese so bestimmten Elemente der Empfindung durch einen unmittelbaren Act des Bewußtseins sollten von einander scheiden können, um sie unmittelbar als Elemente zu erkennen. Der Regel nach heften wir unsre Aufmerksamkeit nur auf solche Unterschiede der Empfindungen, welche in regelmäßiger Weise mit gewissen objectiven Verhältnissen der uns umgebenden Natur zusammenhängen. Betreffs der Farben ist das Hauptziel unsrer Aufmerksamkeit die richtige Abschätzung der Körperfarben. Darin erlangen wir in der That große Sicherheit, während schon besondere Eintübung oder günstige Bedingungen für die Beobachtung dazu gehören, die Veränderungen der Körperfarben durch Luftfarben, durch die Beleuchtung, durch Contraste sicher aufzufassen. Im Gebiete der Körperfarben hat nun in der That das Weiß eine hervorragende Stellung; weißliche Farben werden am meisten gesehen. Sie bilden den Mittelpunkt der ganzen Farbenwelt, und was nicht weiß ist, erscheint nur als Abweichung von Weiß. Wir schätzen es nach der Größe dieser Abweichung (Sättigung) und ihrer Richtung (Farbenton). Diese Verhältnisse sind es auch, wie schon bemerkt, die wir in der Sprache festzulegen suchen. Dabei ist im ganzen darauf zu rechnen, daß die Sprache ungefähr gleich deutlich für die unmittelbare Empfindung hervortretende Unterschiede durch besondere Namen zu unterscheiden suchen wird.

Immerhin ist es beachtenswerth, daß dieses nur zur Bezeichnung der unmittelbar wahrzunehmenden Ähnlichkeiten und Verschiedenheiten der Farben ausgearbeitete System von Namen, wenigstens in seinen Hauptzügen, mit der in der Farbentafel oder der Farbenpyramide dargestellten Anordnung der Farben übereinstimmt, woraus es einigermassen wahrscheinlich wird, daß die bewußtwerdenden Empfindungen selbst verhältnißmäßig wenig verwickelten oder veränderten Functionen gewisser Elementarerregungen entsprechen.

Andre Forscher freilich, wie E. HERING und C. DONDERS nehmen an, daß hier neue Combinationen aus den Elementarerregungen entstehen, die unabhängig neben einander in das Bewußtsein treten und als gesondert unterschieden werden.

Hypothesen. Die aus dem Farbenmischungsgesetze zu erschließende Thatsache, daß drei von einander unabhängig verlaufende Empfindungscomponenten durch die äußere Reizung hervorgerufen werden, haben ihren bestimmteren und anschaulicheren Ausdruck in den Hypothesen erhalten, welche annehmen, daß diese verschiedenen Componenten der Empfindung in verschiedenen Theilen des Sehnervenapparats erregt und fortgeleitet werden, dann aber gleichzeitig zur Wahrnehmung gelangen und dabei, so weit sie von derselben Stelle der Netzhaut aus erregt worden sind, auch in derselben Stelle des Sehfeldes gleichzeitig localisirt werden.

Eine solche Theorie wurde zuerst von THOMAS YOUNG¹ aufgestellt. Die nähere Durchführung derselben ist wesentlich bedingt dadurch, daß ihr Autor den lichtempfindenden Nerven des Auges nur diejenigen Eigenschaften und Fähigkeiten zuschreiben wollte, welche wir für die motorischen Nerven der Thiere und des Menschen sicher kennen. Diese letzteren durch Versuche zu ermitteln haben wir viel günstigere Gelegenheit als bei den Empfindungsnerven, da wir die feinsten Veränderungen ihrer Erregung und Erregbarkeit durch die in den Muskeln erregten Contractionen und deren Veränderungen verhältnißmäßig leicht und deutlich erkennen und abmessen können. Was wir übrigens sonst über den Bau, die chemische Beschaffenheit, die Erregbarkeit, Leitungsfähigkeit, das elektrische Verhalten der sensiblen Nerven haben ermitteln können, stimmt so vollständig mit dem entsprechenden Verhalten der motorischen Nerven überein, daß fundamentale Verschiedenheiten in der Art ihrer Thätigkeit, soweit sie nicht von den mit ihnen verbundenen anderen organischen Apparaten abhängen, auf die sie ihre Wirkung ausüben, äußerst unwahrscheinlich sind. Diese Verhältnisse sind zum Theil schon in § 17 besprochen.

Nun kennen wir für die motorischen Nerven nur den Gegensatz zwischen dem Zustande der Ruhe und der Thätigkeit. Im ersteren kann der Nerv lange Zeit unverändert erhalten werden, ohne erheblichen Stoffwechsel oder Wärmeentwicklung; dabei bleibt der von diesem Nerven abhängige Muskel schlaff. Wenn man den Nerven reizt, entwickelt sich Wärme in ihm, stoffliche Änderungen, elektrische Oscillationen sind nachzuweisen, der Muskel contrahirt sich. Im ausgeschnittenen Nervenpräparat geht die Leistungsfähigkeit dabei schnell verloren, wahrscheinlich wegen des Verbrauchs der zur Thätigkeit nöthigen chemischen Bestandtheile. Unter Einwirkung des atmosphärischen Sauerstoffs, oder besser noch des sauerstoffhaltigen arteriellen Bluts stellt sich langsam die Reizbarkeit ganz oder theilweise wieder her, ohne daß diese Wiederherstellungsprocesse Zusammenziehungen des Muskels oder die mit der Thätigkeit zusammenfallenden Änderungen des elektrischen Verhaltens in Nerv oder Muskel erregen. Auch kennen wir kein äußeres Mittel, welches diesen Wiederherstellungsproceß so schnell und intensiv hervorrufen und ihn dabei auch so plötzlich eintreten und wieder aufhören lassen könnte, wie es nöthig sein würde, wenn dieser Proceß als physiologische Grundlage kräftiger und präcis eintretender Empfindung dienen sollte.

Wenn wir unsere Annahmen bei der Ausbildung der Theorie des Farbensehens auf diese den Nerven sicher zukommenden Fähigkeiten beschränken, so ist dadurch in ziemlich festen Umrissen die Theorie von TH. YOUNG gegeben.

Die Empfindung von Dunkel entspricht dem Ruhezustand des Sehnerven, die von farbigem oder weißem Licht einer Erregung desselben. Die drei einfachen Empfindungen, welche der Erregung nur eines einzigen der drei

¹ TH. YOUNG. *Lectures on Natural Philosophy*. London. 1807.

Nervenapparate entsprechen und aus denen sich alle anderen zusammensetzen lassen, müssen in der Farbentafel den drei Eckpunkten des Farbendreiecks entsprechen.

Um möglichst wenige durch objective Erregung nicht nachweisbare Farbenempfindungen anzunehmen, scheint es zweckmäßig, die Ecken des Farbendreiecks so zu wählen, daß dessen Seiten die Curven der Spectralfarben möglichst eng umschließen.

291 Dem entsprechend hat nun TH. YOUNG¹ angenommen:

1. Es giebt im Auge drei Arten von Nervenfasern. Reizung der ersten erregt die Empfindung des Roth, Reizung der zweiten die des Grün, Reizung der dritten die Empfindung des Violet.
2. Objectives homogenes Licht erregt diese drei Arten von Fasern je nach seiner Wellenlänge in verschiedener Stärke. Die rothempfindenden Fasern werden am stärksten erregt von dem Lichte größter Wellenlänge, die grünempfindenden von dem Lichte mittlerer Wellenlänge, die violetempfindenden von dem Lichte kleinster Wellenlänge. Indessen ist dabei nicht ausgeschlossen, muß vielmehr zur Erklärung einer Reihe von Erscheinungen angenommen werden, daß jede Spectralfarbe alle Arten von Fasern erregt, aber die einen schwach, die andern stark. Denken wir uns

in *Fig. 140* in horizontaler Richtung die Spectralfarben in ihrer natürlichen Reihenfolge aufgetragen, anfangend von Roth *R* bis zum Violet *V*, so können die drei Curven etwa die Erregungsstärke der drei Arten von Fasern darstellen, No. 1 die

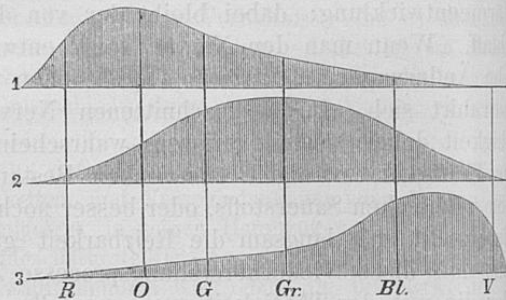


Fig. 140.

der rothempfindenden, No. 2 der grünempfindenden, No. 3 der violetempfindenden.²

Das einfache Roth erregt stark die rothempfindenden, schwach die beiden andern Faserarten; Empfindung: roth.

Das einfache Gelb erregt mächtig stark die roth- und grünempfindenden, schwach die violetten; Empfindung: gelb.

Das einfache Grün erregt stark die grünempfindenden, viel schwächer die beiden anderen Arten; Empfindung: grün.

Das einfache Blau erregt mächtig stark die grün- und violetempfindenden, schwach die rothen; Empfindung: blau.

¹ TH. YOUNG, *Lectures on Natural Philosophy*. London, 1807.

² Genauere nach Messungen ausgeführte Constructionen dieser Curven folgen unten in *Fig. 149*.

Das einfache Violet erregt stark die gleichnamigen, schwach die anderen Fasern; Empfindung: violet.

Erregung aller Fasern von ziemlich gleicher Stärke giebt die Empfindung von Weifs oder weifslichen Farben.

Vielleicht nimmt bei dieser Hypothese zunächst mancher daran Anstofs, dafs die Zahl der vorauszusetzenden Nervenfasern und Nervenendigungen verdreifacht werden mufs, im Vergleich mit der älteren Annahme, wo man jede einzelne Nervenfaser alle möglichen Farbenerregungen leiten liefs. Ich glaube aber nicht, dafs in dieser Beziehung die Annahme von YOUNG mit den anatomischen Thatsachen in Widerspruch steht; schon auf S. 264 ist eine Hypothese erörtert worden, welche die Genauigkeit des Sehens mit Hülfe einer viel kleineren Zahl von Sehnervenfasern erklärt, als die der unterscheidbaren Örter im Sehfelde ist.

Die Wahl der drei Grundfarben hat, wie schon oben bemerkt wurde, zunächst etwas Willkürliches. Es könnten beliebig jede drei Farben gewählt werden, aus denen Weifs zusammengesetzt werden kann. YOUNG ist wohl durch die Rücksicht geleitet worden, dafs die Endfarben des Spectrum eine ausgezeichnete Stellung zu beanspruchen scheinen. Würden wir diese nicht wählen, so müfste eine der Grundfarben ein purpurner Farbenton sein, und die ihr entsprechende Curve in *Fig. 140* zwei Maxima haben, eines im Roth, eines im Violet.

Der einzige Umstand, welcher direct in der Empfindungsweise sich geltend macht, und einen Anhalt für die Bestimmung der Grundfarben zu gewähren scheint, ist die anscheinend gröfsere Farbensättigung des Roth und Violet, die auch, weniger entschieden freilich, für das Grün sich noch merklich macht. Da wir die Farben um so gesättigter nennen, je mehr sie von Weifs unterschieden sind, so müssen wir erwarten, dafs grofse Sättigung namentlich denjenigen Spectralfarben zukommen müsse, die die einfachsten Farbenempfindungen am reinsten hervorrufen. In der That haben diese Farben, wenn sie sehr rein sind, selbst bei geringer Helligkeit etwas intensiv Glühendes, fast Blendendes. Namentlich giebt es manche diese eigenthümliche Verbindung von Dunklem und Blendendem zeigen. YOUNG'S Hypothese giebt dafür eine einfache Erklärung. Eine dunkle Farbe kann eine intensive Erregung eines der drei Nervenapparate geben, während entsprechend helles Weifs viel schwächere Erregung dreier Nervenapparate giebt. Der Unterschied erscheint analog dem zwischen der Empfindung von sehr heifsem Wasser auf einer kleinen Hautstelle und lauwarmem Wasser, was eine gröfsere Hautfläche trifft.

Am meisten macht mir das Violet diesen Eindruck einer tief gesättigten Farbe, aber bei der geringen Lichtstärke der eigentlich violetten Strahlen, wie sie selbst im Sonnenlicht vorkommen, und der Einmischung des Fluorescenzlichtes, kommt ihm das durch gröfsere Lichtstärke begünstigte Ultramarinblau verhältnifsmäfsig nahe. Das eigentlich reine Violet des Spectrum

ist im Laienpublicum sehr wenig gekannt, da die violetten Farbstoffe fast immer etwas zugemischtes Roth geben, oder sehr dunkel erscheinen. Eben deshalb erregen die dem Violet nahe kommenden Abstufungen des Ultramarinblau viel mehr die allgemeine Aufmerksamkeit und sind viel besser bekannt und durch einen älteren Namen, den des Blau ausgezeichnet, als das eigentliche Violet. Außerdem hat man in dem tiefen Ultramarinblau des reinsten Himmels ein höchst imponirendes, allbekanntes und constantes Muster dieser Farbe.

Ich suche hierin den Grund, warum in älteren Zeiten immer Blau als die eine Grundfarbe angesehen worden ist. Und auch die neueren Beobachter, welche Farbengleichungen aufgesucht haben, wie MAXWELL, A. KÖNIG sind zum Theil dazu zurückgekehrt. Für beide letzteren lag freilich ein bestimmter Grund in der schon oben erwähnten Krümmung der Curve der Spectralfarben im Violet.

Zu erwähnen wäre hier noch, daß die Venetianische Malerschule, die besonders durch die tiefe Farbengluth ihres Colorits wirkt, die Zusammenstellung der drei Farben Roth, Grün und Violet vorzugsweise liebt.

Ich bezweifle übrigens durchaus die von einzelnen Forschern ausgesprochene Meinung, daß in den Namen der Farben sich das Bedürfnis, die Grundempfindungen zu bezeichnen, ausgesprochen habe, und diese deshalb bei der Bestimmung Anhaltspunkte geben könnten. Unsere Voreltern hatten in den Farben ein Gebiet fließender Unterschiede vor sich. Wollten sie darin bestimmte Stufen festhalten, so mußten sie vor allen Dingen nach guten allgemein bekannten, und immer wieder zu beachtenden Mustern auffallender Färbung suchen. Die Namen für Roth führen zurück auf Sanskrit: rudhira = Blut, und auch „roth“. Davon *ῥουθρος*, rufus, ruber, roth, red u. s. w. Für „Blau“ haben die Griechen *πορφυρεος* und *κυανεος*, die sich auf das Meer zu beziehen scheinen, die Lateiner coeruleus von coelum, die Deutschen „blau“, englisch: blue, holländisch: blau, altdeutsch: blaw, die auf englisch: blow, blasen d. h. Farbe der Luft, zu führen scheinen. Die Namen für Grün führen auf die Vegetation zurück, *πρασινος* (wiesenfarbig), *ποδωδες* (lauchartig), viridis von vis, virescere; deutsch: grün, englisch: green, führen auf grow, wachsen.

Die ältesten Farbenbezeichnungen waren sehr unbestimmt; *ξανθος* scheint von goldgelb bis blaugrün gereicht zu haben. Es war offenbar eine schwere Aufgabe, dieses fließende Gebiet in festen Stufen zu fixiren. Noch jetzt wird es selbst begabten Kindern schwer, die Farbenamen zu lernen. Man darf daraus nicht auf Farbenblindheit der alten Völker schließen wollen.

Daß es unmöglich ist aus der Reihe der durch objectives Licht erregbaren Farben drei auszulesen, die als Grundempfindungen angesehen werden könnten, ist schon oben S. 320 erörtert worden. Es ist eben deshalb von den Herren A. KÖNIG und C. DIETERICI die Mittelstrecke des Spectrum unterschieden worden, deren Farben nicht mehr aus den Endfarben und

einer in ihr liegenden Spectralfarbe gemischt werden können. Die nach den Messungen derselben Beobachter entworfene Farbentafel *Fig. 139* zeigt dieselbe Thatsache in graphischer Darstellung. Eben deshalb ist für TH. YOUNG'S Theorie die Annahme nothwendig, daß im allgemeinen jede Spectralfarbe gleichzeitig, wenn auch in verschiedener Stärke, nicht bloß einen, sondern zwei oder alle drei von den drei farbenempfindenden Nervenapparaten erregt. Höchstens für die Endfarben des Spectrum, Roth und Violet, würde die Annahme der Einfachheit zulässig sein. Aber gerade beim Violet wissen wir, daß die von den violetten Strahlen hervorgerufene Fluorescenz der Netzhaut die Reinheit der Empfindung trüben muß, und es scheint mir nicht unwahrscheinlich, daß die schon von MAXWELL gefundene und auch in *Fig. 139* bemerkbare Krümmung der Linie zwischen *F* und *G* von der Fluorescenz der Netzhaut bedingt ist.

Daraus folgt nun weiter, daß es theoretisch möglich erscheinen muß, durch andere Bedingungen der Erregung Empfindungen gesättigterer Farben hervorzurufen. Daß dies auch praktisch möglich ist, und diese Forderung von YOUNG'S Theorie wirklich erfüllt werden kann, werde ich bei der Beschreibung der Nachbilder zu erörtern haben.

Die geschilderte Farbentheorie von TH. YOUNG ist der allgemeinen Theorie der Nerventhätigkeit gegenüber, wie sie von JOHANNES MÜLLER ausgearbeitet worden ist, eine speciellere Durchführung des Gesetzes von den specifischen Empfindungen. Ihren Annahmen entsprechend wären die Empfindung des Roth, des Grün, des Violet als bestimmt durch die specifische Empfindungsenergie der entsprechenden drei Nervenapparate anzusehen. Jede beliebige Art der Erregung, welche den betreffenden Apparat überhaupt erregen kann, würde in ihm immer nur seine specifische Empfindung hervorrufen können. Den Grund der besonderen Qualität dieser Empfindungen dürfen wir wohl nicht in der Netzhaut oder der Beschaffenheit ihrer Fasern, sondern in der Thätigkeit der mit ihnen verbundenen centralen Gehirntheile suchen.

Ich habe bis hierher die Auseinandersetzung dieser Theorie verhältnißmäßig abstract gehalten, um dieselbe möglichst frei von weiter gehenden hypothetischen Zusätzen zu halten. Indessen hat es andererseits große Vortheile für das sichere Verständniß solcher Abstractionen, wenn man sich möglichst concrete Bilder davon zu machen sucht, selbst wenn diese manche Voraussetzung hineinbringen, die für das Wesen der Sache nicht gerade nothwendig ist. In diesem Sinne erlaube ich mir, die folgende etwas handgreiflichere Gestalt der YOUNG'Schen Theorie vorzutragen. Daß Einwände gegen diese Zusätze das Wesen von YOUNG'S Hypothese nicht widerlegen, brauche ich wohl nicht auseinanderzusetzen.

1. In den Endorganen der Sehnervenfasern sind dreierlei Arten photochemisch zersetzbarer Substanzen abgelagert, welche für verschiedene Theile des Spectrum verschiedene Empfindlichkeit haben. Die drei Farbenwerthe der Spectralfarben hängen wesentlich von der photochemischen Reaction dieser drei Substanzen gegen das Licht ab. In den Augen der Vögel und Reptilien kommen neben farblosen

Zapfen in der That noch Stäbchen mit rothen, und solche mit gelbgrünen Öltröpfchen vor, die eine Begünstigung einzelner einfacher Lichter in der Wirkung auf das hintere Glied dieser Gebilde bewirken könnten. Bei den Säugethieren und dem Menschen ist bisher nichts Ähnliches gefunden worden.

2. Durch die Zersetzung jeder der lichtempfindlichen Substanzen wird die damit beladene Nervenfasern in den Zustand von Erregung versetzt. Es giebt nur eine Art von empfindungserregender Thätigkeit in jeder Nervenfasern, die mit Zersetzung der organischen Substanz und Wärmeentwicklung einhergeht, wie wir sie von den Muskelnerven her kennen. Diese Vorgänge in den drei Fasersystemen sind wahrscheinlich auch unter einander durchaus gleichartig. Sie wirken im Hirn nur dadurch verschieden, daß sie mit verschiedenen functionirenden Hirntheilen verbunden sind. Die Nervenfasern brauchen hier wie überhaupt nur die Rolle von Telegraphendrähten zu spielen, durch welche durchaus gleichartige electriche Ströme fließend in den damit verbundenen Endapparaten die verschiedensten Thätigkeiten auslösen oder hervorrufen können. Diese Erregungen der drei Fasersysteme bilden die oben gesonderten drei Elementarerregungen, vorausgesetzt, daß die Erregungsstärke, für welche wir noch kein allgemeingültiges Maas haben, dabei der Lichtstärke proportional gesetzt wird. Das hindert nicht, daß diese Intensität der Elementarerregung irgend welche verwickelte Function des Stoffverbrauchs oder der negativen Stromschwankung im Nerven sein könnte, welche letzteren Vorgänge etwa auch als Maas der Erregung gelegentlich verwendet werden könnten.

3. Im Hirn stehen die drei Fasersysteme mit drei verschieden functionirenden Systemen von Ganglienzellen in Verbindung, die vielleicht räumlich so aneinander gelagert sind, daß die denselben Netzhautstellen entsprechenden dicht zusammenliegen. Das scheint aus den neueren Untersuchungen über den Einfluß von Hirnverletzungen auf das Gesichtsfeld hervorzugehen.

Die neuere von Herrn E. HERING aufgestellte Modification der YOUNG'schen Hypothese, in der Gegensatz positiver und negativer Nerventhätigkeiten angenommen wird, soll weiter unten besprochen werden.

305

Methoden zur Mischung farbigen Lichts. Um das farbige Licht der Pigmente und anderer Naturkörper zu mischen, ist das einfachste Verfahren folgendes. In einiger Entfernung (30—40 cm) über einer schwarzen Tischplatte bringt man eine kleine vertical

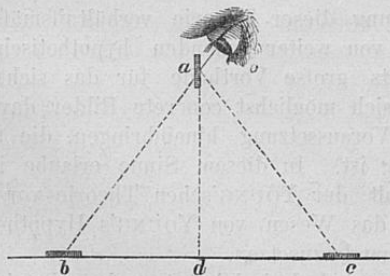


Fig. 141.

gestellte Glasplatte *a* (Fig. 141) mit ebenen und parallelen Flächen an, deren Ebene verlängert die Tischplatte in *d* schneiden möge. Indem das Auge des Beobachters schräg abwärts nach der Glasplatte *a* hinblickt, sieht er mittels des von der Platte durchgelassenen Lichtes den Theil *db* des Tisches, mittels des reflectirten Lichtes dagegen den Theil *dc* scheinbar mit *db* zusammenfallend. Legt man in gleicher Entfernung von *d* in *c* und in *b* gefärbte Oblaten oder andere gefärbte Flächen hin, so erblickt der Beobachter das Spiegelbild von *c* mit *b* zusammenfallend. Das farbige Licht von *c* schlägt an der Vorderseite der Glasfläche *a* genau denselben Weg ein, auf welchem das

farbige Licht von *b* fortgeht, und beide Lichter fallen also gemischt in das Auge *o*, das von ihm gesehene gemeinsame Bild von *b* und *c* muß also in der Mischfarbe erscheinen.

Das Intensitätsverhältniß regulirt man durch Verschiebung der beiden Oblaten. Je näher sie an d liegen, desto stärker ist das reflectirte Licht von c , desto schwächer das durchgelassene von b .

Man kann auf diese Weise auch Licht, welches durch farbige Gläser oder Flüssigkeiten gegangen ist, zur Mischung anwenden. Dazu macht man in der Platte bc Öffnungen, durch welche das Licht gelangt. So kann man auch das durch einen Spiegel reflectirte Licht des blauen Himmels mit dem von Chromgelb mischen und sich überzeugen, daßs beide, wie Ultramarin und Chromgelb, ein röthliches Weiß geben, daßs das Himmelblau also weißliches Indigblau ist, nicht aber dem weniger brechbaren Blau des Spectrum entspricht, welches wir Cyanblau genannt haben. Diese Methode hat vor den Mischungen auf dem Farbenkreisel den Vorzug, daßs die weißlichen Mischungen nicht grau, sondern weiß erscheinen.

Die Einrichtung der Farbenkreisel wird in § 22 näher beschrieben werden.

Von andern Methoden, farbiges Licht zusammzusetzen, ist noch zu erwähnen ein Versuch von VOLKMANN, der durch gefärbte Gewebe, die er dicht vor das Auge hielt, nach farbigen Flächen hinsah. Die Mischung beider Farben wird aber nicht recht gleichmäßig, und es kann auch die Durchsichtigkeit der Fäden stören, indem die Fäden theilweise wie ein farbiges Glas wirken, durch welches man eine farbige Fläche sieht. CZERMAK hat den SCHEINER'schen Versuch benutzt, indem er durch einen Schirm mit zwei engen Öffnungen sah, welche mit verschiedenfarbigen Gläsern bedeckt waren. Soweit die Objecte einfach erscheinen, erscheinen sie auch in der Mischfarbe. HOLTZMANN läßt das diffus reflectirte Licht zweier farbigen Papiere auf weißes Papier fallen. CHALLIS erwähnt Versuche, wie sie übrigens schon MILE angestellt hatte, bei denen Papiere, die mit Streifen verschiedener Farben versehen waren, aus solcher Entfernung betrachtet wurden, daßs die Streifen einzeln nicht mehr erkannt werden konnten. Endlich hat DOVE Methoden beschrieben, um Interferenz- und Absorptionsfarben zu mischen. Er benutzt dazu Spiegel, die aus farbigen Gläsern mit Silber belegt gebildet sind. Die vordere Fläche solcher Spiegel giebt polarisirtes weißes Licht, die hintere unpolarisirtes durch Absorption gefärbtes. Geht nun das so gemischte Licht durch eine Glimmerplatte und ein NICOLSches Prisma, so bleibt das letztere Licht unverändert. Das polarisirte Licht dagegen wird durch die Interferenz des ordentlichen und außerordentlichen Strahls im Krystall so gefärbt, daßs seine Farbe einer der Farbenstufen von NEWTON's Ring-systemen entspricht. Beide Arten von Licht fallen vermischt in das Auge des Beobachters.

Eine verhältnißmäßige günstige und auch leicht auszuführende Methode für die Mischung des Lichts zweier neben einander liegender farbiger Felder besteht darin, daßs man diese Grenze durch ein achromatisirtes doppelbrechendes Prisma von Kalkspath oder Bergkrystall betrachtet, so daßs die Grenzlinie in Doppelbildern auseinander geschoben wird. Zwischen den beiden Bildern der Grenze sieht man dann die Ränder beider Felder übereinandergeschoben, und die beiden Farben durch Überdeckung vereinigt. Seitlich dagegen bleiben die Farben der beiden Felder ungemischt stehen.

Für die Prüfung von GRASSMANN's Satz, daßs gleichaussehende Farben gemischt, wiederum gleichaussehende Mischungen geben, lassen sich nach einem Vorschlag von E. HERING sowohl die spiegelnde Glasplatte, wie das Kalkspathprisma sehr leicht in der Weise anwenden, daßs man mit ihrer Hilfe irgend welches andre farbige Licht über die Grenze zweier Felder der rotirenden Farbenscheiben ausbreitet, die gleich aussehen, aber verschieden zusammengesetzt sind. Die Verschiedenheit wird durch die Deckung mit andrem Licht nicht sichtbar.

Die einfachste unter den Methoden, um prismatische einfache Farben zu mischen, und gleichzeitig alle Combinationen aus je zwei solchen zu erhalten, ist die, daßs man in einem dunklen Schirme einen V-förmigen Spalt anbringt, dessen beide Schenkel wie ab und bc in *Fig. 142* unter 45° gegen den Horizont geneigt sind, und diesen Spalt, der vor einen hellen Hintergrund gestellt ist, durch ein Prisma mit senkrecht stehender

brechender Kante betrachtet. Die Spectra haben dann die Form wie in *Fig. 142* $\alpha\beta\beta, \alpha$, das Spectrum des Schenkels ab und $\gamma\beta\beta, \gamma$, das Spectrum von bc ist. In ersteren laufen die Farbenstreifen parallel ab und $\alpha\beta$, im zweiten parallel bc und wie die gestrichelten Linien. In dem mittleren dreieckigen Felde $\beta\delta\beta$, welches Spectren gemeinsam ist, schneiden alle Farbenstreifen des einen Spectrum alle R

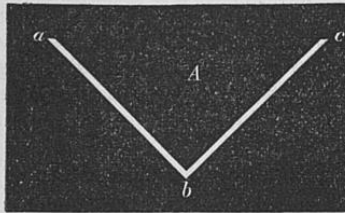


Fig. 142.

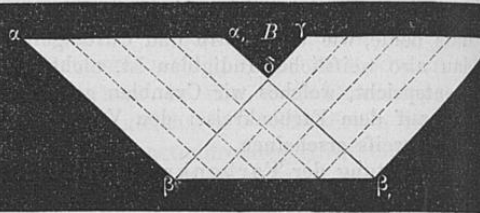


Fig. 143.

streifen des andern, und es entstehen dadurch an diesen Stellen alle aus je zweifachen Farben gebildeten Mischfarben. Wenn die Breite der Spalten unverändert ist, so kann doch das Verhältniß der Quantitäten des gemischten Lichtes geändert werden, das man das Prisma aus der senkrechten Stellung in eine geneigte bringt, wodurch die Spectra die Form wie *Fig. 144* annehmen und das eine $\beta\gamma\beta$ welchem dieselbe Lichtmenge auf einen kleineren Raum vertheilt wird, heller wird, während das andere $\alpha\beta\beta, \alpha$, dessen Flächenraum vergrößert ist, an Helligkeit verliert.

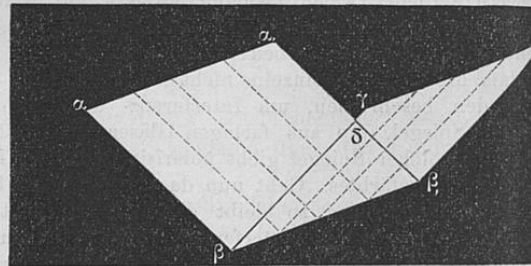


Fig. 144.

Man kann durch diese Methode die meisten der oben angeführten Resultate gewinnen. Eine genaue Beurtheilung der Mischfarben, namentlich der weißlicheren, ist aber erstens dadurch erschwert, daß die einzelnen Farben einen kleinen Raum einnehmen, selbst wenn man die Beobachtung mit einem Fernrohr führt, zweitens dadurch, daß man im Gesichtsfelde eine Menge anderer glänzender Farben daneben hat, welche durch Contrastwirkungen das Ansehen der mindertigsten Farben stark verändern.

Diese Übelstände sind bei einer zweiten Methode vermieden; für diese wird ein complicirter Apparat gebraucht, von dem *Fig. 145* eine horizontale Projection

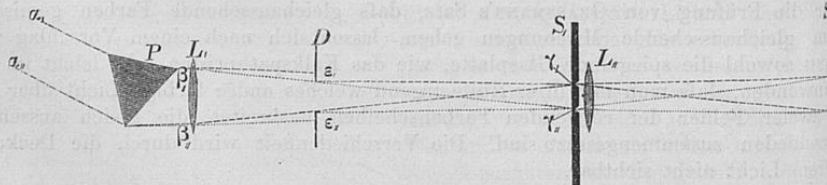


Fig. 145.

stellt. Man läßt Sonnenlicht, welches von einem Heliostaten reflectirt ist, durch einen verticalen Spalt in ein dunkles Zimmer fallen, läßt es durch ein Prisma *P* *Fig. 145* eine achromatische Linse *L*, gehen, in deren Brennpunkt ein Schirm *S*, steht, auf

vorderer Fläche ein objectives Spectrum entworfen wird. Zwischen Linse und Schirm befindet sich ein Diaphragma D mit rechteckigem Ausschnitt. Der Schirm S hat zwei verticale Spalten bei γ , und γ'' , welche von dem Lichte, das hier zu dem Spectrum vereinigt ist, zwei Farbenstreifen durchgehen lassen, während alles andere farbige Licht von dem Schirme zurückgehalten wird. Hinter diesem Schirme ist eine zweite achromatische Linse L'' , von kürzerer Brennweite angebracht, welche auf dem zweiten Schirme S'' ein Bild δ , δ'' des Diaphragma D entwirft. Die Breite des einfallenden weissen Strahlenbündels ist α, α'' ; hinter der Linse L'' sind die Grenzstrahlen der beiden verschiedenfarbigen Strahlenbündel, deren Brennpunkte mit den beiden Spalten γ , und γ'' , zusammenfallen, dadurch unterschieden, das die brechbareren gestrichelt, die weniger brechbaren punktirt sind. Die Öffnung des Diaphragma D muß so eng gemacht werden, das sie ganz von Strahlen beider Bündel ausgefüllt ist, so das von jedem Punkte der Öffnung Strahlen der betreffenden Farbe auf jeden Punkt der vordere Seite des Diaphragma weifs, so sieht man darauf das Strahlenbündel als weissen Fleck mit farbigen Rändern sich projiciren (bei ϵ , blau, bei ϵ'' , roth). Um die genannte Bedingung zu erfüllen, muß die Öffnung ganz in der weissen Mitte der beleuchteten Stelle liegen. Unter diesen Umständen ist die Öffnung des Diaphragma gleichsam das leuchtende Object, von welchem zweierlei Licht durch die Spalten des Schirms S , auf die Linse L'' , fällt. In dem Bilde δ , δ'' , welches die Linse von dem Diaphragma D entwirft, ist beiderlei Art Licht über dieselbe gleichmäfsig ausgebreitet, und diese Fläche erscheint daher in der Mischfarbe, oder wenn man eine der Spalten verdeckt, in einer der einfachen Farben.

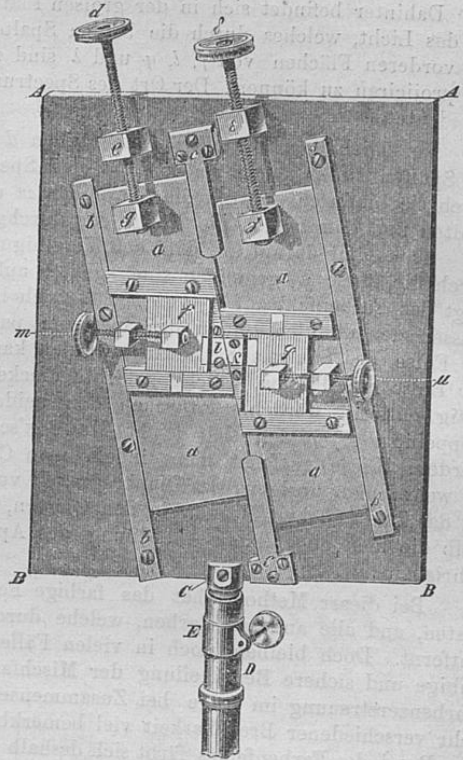


Fig. 146.

Um den Farbenton und die Intensität der gemischten Lichter nach Belieben und sehr allmählig ändern zu können, ist eine besondere Construction des Schirms S , nöthig, und ist derselbe in *Fig. 146* abgebildet. Der Schirm besteht aus der viereckigen Messingplatte $AABB$, die bei C durch einen cylindrischen Stab getragen wird. Letzterer verschiebt sich in einer gespaltenen cylindrischen Hülse D , die in der Mitte eines mit drei Stellschrauben versehenen Brettes befestigt ist. Der Schirm kann also mit seinem Träger C auf und nieder geschoben, und in jeder Höhe mittels des gespaltenen und durch eine Schraube zusammengezogenen Ringes E festgestellt werden.

Auf der Messingplatte $AABB$ sind in schräger Richtung zwei Schlitten beweglich, deren Grundlagen die Messingplatten aa und aa'' sind. Mit bb , $\beta\beta$, c und c'' sind die Schienen bezeichnet, zwischen denen sich die Platten verschieben. Diese Platten werden durch die Schrauben d und d'' bewegt, deren Mütter in die an der großen Platte $AABB$ befestigten Messingklötze e und e'' eingeschnitten sind, und deren Enden drehbar in den Klötzen g und γ befestigt sind, welche von den beweglichen Platten getragen werden.

Durch Drehung der Schrauben d und d' verschiebt man also die Platten aa und aa' parallel den Schienen, zwischen denen sie als Schlitten gehen.

Auf der beweglichen Platte aa ist nun wieder als Schlitten beweglich die Platte γ zwischen horizontalen Schienen angebracht, und durch die Schraube m zu verstellen. Ebenso auf der Platte aa' die Platte φ mit der Stellschraube μ . Zwischen den einander zugekehrten Rändern der Platten f und φ liegen noch die beiden dreieckigen ebenen, dicken Platten l und l' , jene auf aa , letztere auf aa' befestigt. Die einander zugekehrte und zugeschärfte Ränder von f und l , sowie von φ und l' bilden zwei Paare GRAVES'scher Schneiden.

Dahinter befindet sich in der großen Platte $AABB$ ein entsprechender Ausschnitt, um das Licht, welches durch die beiden Spalten gegangen ist, weiter hindurchzulassen. Die vorderen Flächen von f , l , φ und l' sind matt versilbert, um das Spectrum darauf gut projiciren zu können. Der Ort des Spectrum ist durch das kleine punktirte Rechteck angedeutet.

Verschiebt man mittels der Schrauben d und d' die Platten aa und aa' , so treten die Spalten unter einen andern Ort des Spectrum, und es gehen andere Farbentöne durch sie hindurch. Durch die Schrauben m und μ dagegen ändert man die Breite der Spalten und damit auch die Menge des durchgelassenen Lichtes.

Es kommt darauf an, daß der Vereinigungspunkt gleichfarbiger Strahlen, welche durch die Linse L , gegangen sind, genau auf der Ebene des Schirms S , liegt, sonst zeigt das Farbenfeld auf S , von rechts nach links verschiedene Farbentöne. Die Spalten müssen den dunklen Linien des Spectrum parallel sein, was durch die Stellschrauben am Fuße des Schirms S , bewirkt werden kann. Auch müssen alle Unreinigkeiten an der Linse und Prisma, welche gefärbte Flecke in dem Farbenfelde geben würden, sorgfältig entfernt werden. Zwischen den beiden einzelnen Linsen der achromatischen Doppellinse L , bilden sich leicht NEWTON'sche Ringe, die im Farbenfelde abgebildet werden. Diese entfernt man, indem man Canadabalsam zwischen die Linsen bringt. Je weiter man übrigens das Diaphragma D von der Linse L , entfernt, desto verwaschener ist das Bild solcher Flecken in den Gläsern, und desto weniger stören sie. Es ist deshalb die hier abgebildete Anordnung des Apparats besser, als die früher von mir beschriebene.

Bei dieser Methode hat das farbige Feld eine größere Ausdehnung als bei der ersten, und alle anderen Farben, welche durch Contrastwirkungen stören könnten, sind entfernt. Doch bleiben noch in vielen Fällen manche Hindernisse bestehen, die eine ruhige und sichere Beurtheilung der Mischfarbe erschweren. Es macht sich erstens die Farbenzerstreuung im Auge bei Zusammensetzungen nur zweier einfacher Farben von sehr verschiedener Brechbarkeit viel bemerkbarer als bei weißem Lichte (s. oben S. 159). Der Rand des Farbenfeldes färbt sich deshalb leicht mit einer von beiden Farben, während in der Mitte die andere überwiegt. Dann ist das Auge bei einigen weißen Mischfarben namentlich bei dem aus Roth und Grünblau zusammengesetzten Weiß, außerordentlich empfindlich gegen die kleinsten Einmischungen einer der ursprünglichen Farben, so daß die kleinsten Ungleichmäßigkeiten des Apparats und etwa vorhandene Nachbilder im Auge, namentlich bei größerer Lichtstärke, sehr stören. Endlich sind hierbei auch die Verschiedenheiten des Eindrucks zwischen Mitte und Randtheilen der Netzhaut sehr auffallend. Verhältnißmäßig am leichtesten ist es, Weiß aus Gelb und Indigo zusammenzusetzen, schwerer aus Gelbgrün und Violet oder Goldgelb und Wasserblau, am schwersten aus Roth und Grünblau. Letzteres erscheint in geringer Entfernung vom Fixationspunkte blau, wenn es auf diesem weiß ist.

Die Wellenlängen der complementären einfachen Farben habe ich in der Weise bestimmt, daß ich die Linse L , und den Schirm S , entfernte und aus einiger Entfernung die Spalten des Schirms S , durch ein Fernrohr betrachtete, vor dessen Objectiv eine Glasplatte mit feinen äquidistanten verticalen Linien angebracht war. Man sieht dann Diffractionsspectra der Spalten, deren scheinbare Entfernung von dem betreffenden

Spalte der Wellenlänge proportional ist. Man braucht also nur in derselben Weise die Entfernung der Diffractionsspectra für eine der dunklen Linien des Spectrums zu messen, deren Wellenlänge FRAUNHOFER bestimmt hat, so ergeben sich daraus leicht die Wellenlängen der beobachteten gemischten Farben.

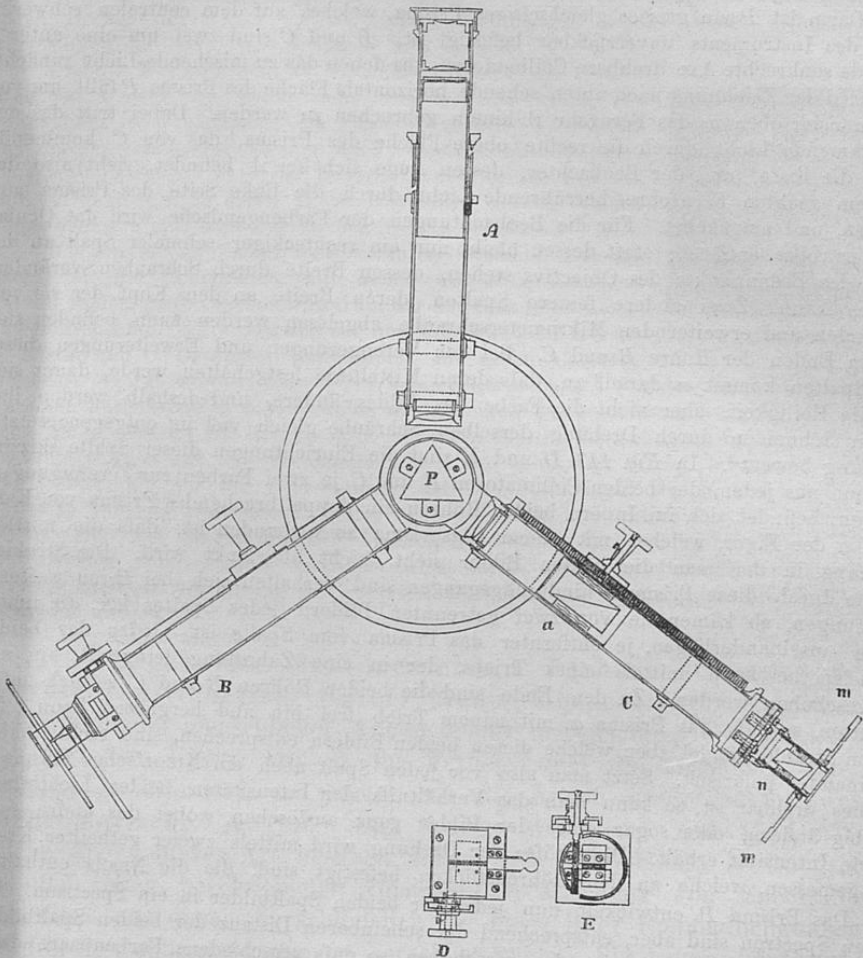


Fig. 147.

Spectrophotometer für Farbenmischung. Zu Messungen geeigneter ist eine Abänderung der Methode, bei welcher die Mischfarben nicht objectiv projectirt werden, sondern als potentielle Bilder im Sehfelde erscheinen. Sie beruht darauf, daß, wenn man ein Bild des Spectrum auf einen Schirm, der einen Spalt hat, entwirft, so daß ein sehr schmaler Streifen des Spectrum scharf abgebildet auf und durch den Spalt fällt, ein durch diesen Spalt blickendes Auge von allen Theilen der Prismenfläche nur Licht dieser Farbe kommen sieht, so daß die ganze Fläche des Prisma als ein gleichmäßiges Feld einer Farbe erscheint. Diese Methode, auf eine einzelne Farbe angewendet, ist schon auf S. 301 besprochen, und dort sind auch die Vorsichtsmaßregeln angegeben,

die zu beachten sind, um reine und gleichmäßige Felder zu erhalten. Zur Farbmischung wurde sie zuerst von MAXWELL verwendet. Ich beschreibe hier eine von mir construirte Form des Apparats,¹ die sich bei den Messungen der Herren R. SCHELSKE, A. KÖNIG und C. DIETERICI als zweckmäßig bewährt hat. Derselbe ist in horizontalem Schnitt in *Fig. 147* abgebildet.

Darin ist *P* ein großes gleichseitiges Prisma, welches auf dem centralen schweren Fufse des Instruments unverrückbar befestigt ist. *B* und *C* sind zwei um eine unterliegende senkrechte Axe drehbare Collimatoren, aus denen das zu mischende Licht zunächst auf die in der Zeichnung nach unten sehende horizontale Fläche des Prisma *P* fällt, um von diesem nach oben in das Fernrohr *A* hinein gebrochen zu werden. Dabei tritt das aus *B* kommende Licht durch die rechte obere Fläche des Prisma, das von *C* kommende durch die linke, und der Beobachter, dessen Auge sich bei *A* befindet, sieht also das aus dem rechten Fernrohre herrührende Licht durch die linke Seite des Prisma auftauchen, und umgekehrt. Für die Beobachtungen der Farbungemische wird das Ocular des Fernrohrs entfernt; statt dessen bleibt nur ein rechteckiger schmaler Spalt an der Stelle des Brennpunkts des Objectivs stehen, dessen Breite durch Schrauben verändert werden kann. Zwei andere feinere Spalten, deren Breite an dem Kopf der sie verengernden und erweiternden Mikrometerschraube abgelesen werden kann, befinden sich an den Enden der Bohre *B* und *C*. Bei den Verengerungen und Erweiterungen dieser drei Spalten kommt es darauf an, daß deren Mittellinie festgehalten werde, damit sich nur die Helligkeit, aber nicht die Farbe des Bildes ändere, und deshalb werden ihre beiden Schneiden durch Drehung derselben Schraube gleich viel in entgegengesetzter Richtung bewegt². In *Fig. 147 D* und *E* sind die Einrichtungen dieser Spalte skizzirt. Um nun aus jedem der beiden Collimatoren *B* und *C* je zwei Farben zur Vereinigung zu bringen, befindet sich im Innern beider Röhren ein doppeltbrechendes Prisma von Kalkspath *a* der Figur, welches mit einem Glasprisma so verbunden ist, daß die mittlere Richtung, in der man die beiden Bilder sieht, nicht abgelenkt wird. Die Strahlen, welche durch diese Prismen hindurchgegangen sind, verhalten sich bei ihren weiteren Brechungen, als kämen sie von zwei getrennten Bildern jedes Spaltes her, die um so weiter auseinanderliegen, je entfernter das Prisma vom Spalte ist. Jeder der beiden Doppelspalt kann mittels eines Triebes, der in eine Zahnstange eingreift, hin und her geschoben werden. Zu dem Ende sind die beiden Röhren *B* und *C* seitlich aufgeschnitten, so daß das Prisma *a* mit seinem Trieb frei hin und hergleiten kann. Die beiden Strahlenbündel aber, welche diesen beiden Bildern entsprechen, sind rechtwinkelig zu einander polarisirt. Setzt man also vor jeden Spalt noch ein Nicol'sches Prisma *n*, welches drehbar ist, so kann man das Verhältniß der Intensitäten beider Lichtbündel beliebig ändern, oder sogar eines der Bilder ganz auslöschen, wobei das andre seine größte Intensität erhält. Die Größe der Drehung wird mittels zweier getheilter Kreise *mm* gemessen, welche an den Röhrenstücken befestigt sind, die die Nicols enthalten.

Das Prisma *P* entwickelt nun jedes der beiden Spaltbilder in ein Spectrum. Die beiden Spectren sind aber, entsprechend der scheinbaren Distanz der beiden Spaltbilder, mehr oder weniger gegen einander verschoben, so daß verschiedene Farbenpaare darin zur Deckung kommen. Die Objectivlinse des Fernrohrs *A* entwirft endlich ein objectives Bild dieser beiden Spectrenpaare in der Ebene des Spaltes, der in ihrem Brennpunkte steht, und es geht also von jeder Seite des Prismas her Licht der beiden Farben durch diesen Querspalt, deren Strahlen in dem Spalt vereinigt werden. Man sieht also schließlich, durch diesen Spalt nach dem Prisma hinblickend, ein Feld von der Form *Fig. 148*. Die feine mittlere Trennungslinie entspricht der vorderen Kante des Prisma *P*, die kreisförmige seitliche Umgrenzung dem Umfange der Objectivlinse von *A*, die kleinen Bogenstücke den Grenzen der Objectivlinse von *B* und *C*. Man kann nunmehr die Färbung und

¹ Beschreibung desselben im Bericht über die wissenschaftlichen Instrumente auf der Berliner Generalausstellung im Jahre 1879. Berlin. 1880, S. 520 und von R. SCHELSKE, *Wiedemann's Annalen* Bd. 16, S. 349. 1881.

² Diese Einrichtung ist durch Herrn A. KÖNIG getroffen.

Helligkeit der beiden Felder vergleichen und sie gleich zu machen suchen; wenn sie es noch nicht sind, und so eine Farbengleichung herstellen.

In jeder der Mischfarben kann man durch Drehung des entsprechenden Rohres *B* oder *C* beide Farben gleichzeitig dem Roth oder dem Violet nähern; dagegen durch Vorwärtsschiebung des Doppelspaths *a* die eine gegen das Roth, die andre zum Violet wandern machen. Die Intensität der Componenten ändert man in genau meßbarer Weise durch Drehen des Nicols *n*, das Helligkeitsverhältniß beider Paare dagegen durch Änderungen der Spaltbreite am Ende von *B* oder *C*.

Um die Wellenlängen zu bestimmen, wurde die Ocularlinse von *A* eingesetzt. Dann sieht man bei Anwendung von Sonnenlicht im Ocularspalte die FRAUNHOFER'schen Linien der vier Spectra erscheinen, die man auch einzeln abblenden kann. Da die Wellenlängen auch der feineren Linien genau bekannt sind, so kann man in dieser Weise bestimmen, welche Wellenlänge den vier mittleren Farben des Spaltes zukommt.

Die gemessenen Intensitätsverhältnisse beziehen sich zunächst auf die Helligkeiten, mit denen die entsprechenden Farben in dem prismatischen Spectrum der angewendeten Lichtquelle erscheinen. Es waren dies bei den Versuchen der Herren A. KÖNIG und C. DIETERICI Gasflammen, für deren Constanz möglichst gesorgt wurde. Es wurden schließlichsch noch die Werthe der Helligkeiten der einzelnen Farbenstreifen dieses Lichts in diejenigen des Interferenzspectrum des Sonnenlichts umgerechnet. Die Reductionscoefficienten für die Umrechnung auf das Interferenzspectrum wurden aus den Brechungs-Indices des benutzten Prisma berechnet, hingegen die Coefficienten für die Umrechnung auf das Sonnenlicht durch besondere photometrische Messung gewonnen.¹ Unter Sonnenlicht ist hier immer das Licht verstanden, welches eine mit Magnesiumoxyd überzogene Fläche, die bei unbewölktem Himmel von directen Sonnenstrahlen getroffen wird, diffus reflectirt. Betreffs der Einzelheiten in der praktischen Ausführung der Versuche muß hier auf die Publicationen der Autoren verwiesen werden.

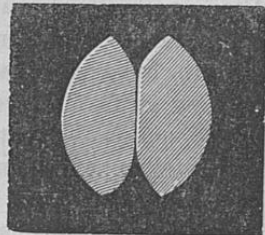


Fig. 148

Die Ergebnisse der messenden Farbmischungsversuche für die individuellen Unterschiede menschlicher Augen. Die große Mehrzahl menschlicher Augen gehört betreffs ihres Farbensinns einer und derselben Klasse an; da ihr Farbensystem die Annahme von drei Grundfarben erfordert, so nennen wir die Augen dieser Klasse normale trichromatische Augen. Die Herren A. KÖNIG und C. DIETERICI, welche Augen dieser Art besitzen, haben sehr ausgedehnte Messungsreihen mit dem eben beschriebenen Apparate zur Mischung von Spectralfarben ausgeführt, aus denen sie schließlichsch die Form ihrer Empfindlichkeitscurven für drei Elementarempfindungen berechnet haben. Sie haben dabei zunächst äußerstes Roth und äußerstes Violet als diejenigen zwei Elementarempfindungen angenommen, welche in den Endstrecken des Spectrum allein erregt werden. Als Endstrecken sind, wie oben schon bemerkt, diejenigen angesehen, deren einzelne Farbenbänder sich nur durch ihre Helligkeit, nicht durch den Farbenton unterscheiden, nämlich Roth mit Wellenlängen größer als $655 \mu\mu$ und Violet mit solchen, kleiner als $430 \mu\mu$. Die Zwischenstrecken (Orange

¹ Vergleiche A. KÖNIG, *Verhandl. d. Physik. Ges. in Berlin* vom 22. Mai 1885 und 19. März 1886. — *Gräfe's Archiv* Bd. 30(2) S. 162. 1884. und *Wied. Annalen*, Bd. 22, S. 572. 1884.

von $655 \mu\mu$ bis $630 \mu\mu$, und Blau von 475 bis $430 \mu\mu$), sind angesehen als Mischungen aus einer dritten grünen Elementarfarbe mit Roth einerseits, und Violet andererseits, so daß diese Strecken noch in die Seiten des Dreiecks hineinfallen, welches die drei Elementarfarben als Ecken hat. Dadurch wäre theoretisch, unbedingte Genauigkeit der Messungen vorausgesetzt, die Art der dritten Elementarfarbe fest bestimmt. In Wirklichkeit war der Weg ihrer Bestimmung langwieriger und nicht so direct, weil nicht alle Mischungen gleich gut zu brauchen waren. In sehr weiflichen Mischungen entfernter Farben verschwinden leicht die Unterschiede des Farbentons, und bei Mischung zu nahe benachbarter Farben bringen kleine Fehler der Beobachtung große Unterschiede in den Rechnungsresultaten hervor. Schliesslich wurde, um das Verhältniß der Intensität der verschiedenen Grundempfindungen festzustellen, angenommen, daß die drei Helligkeiten derselben, die im Weifs vereinigt sind, gleich groß seien. Das Farbdreieck wird also unter dieser Annahme ein gleichseitiges Dreieck, in dessen Mittelpunkt das Weifs gelagert ist.

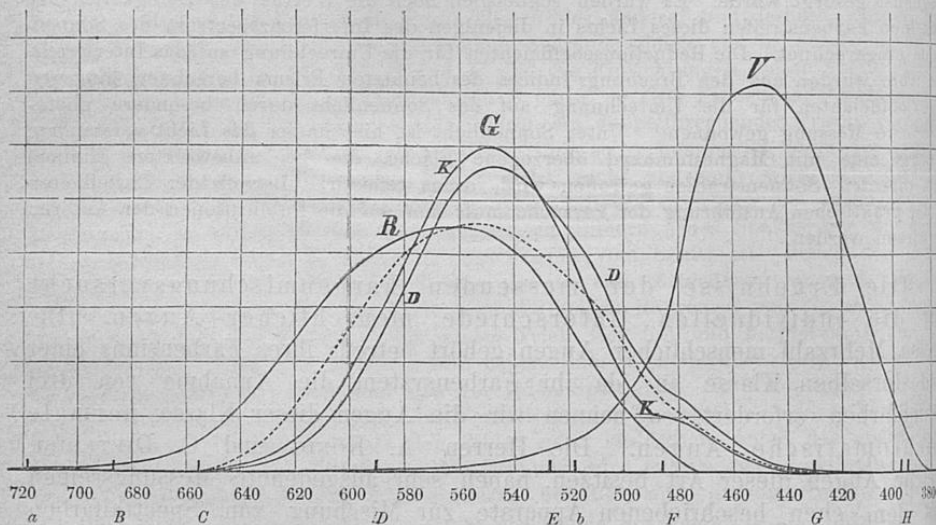


Fig. 149.

Die Endergebnisse, welche die beiden genannten Beobachter unter solchen Annahmen aus ihren Messungen berechnet haben, sind in *Fig. 149* graphisch dargestellt. Die Abscissenlinie entspricht den Wellenlängen, die unten in Milliontelmillimetern angegeben sind, während darunter FRAUNHOFER'S Linien durch ihre Buchstaben angezeigt sind. Die Curven *R* für das Gewicht der Rothempfindung und für das der Violetempfindung waren bei den beiden genannten Beobachtern hinreichend nahe übereinstimmend, daß sie in je eine Curve vereinigt werden konnten. In der Curve für Grün sind die Abweichungen etwas größer, deshalb sind die beiden Curven (*K* für Herrn

A. KÖNIG, *D* für Herrn C. DIETERICH) getrennt gezeichnet. Die Höcker am violeten Ende der Grüncurve könnten von der Absorption durch das gelbe Pigment der Netzhautgrube herrühren, welche sich vorzugsweise in der FRAUNHOFER'schen Linie *F* geltend macht. Die entsprechende Ausbuchtung in der Violetcurve ist nicht deutlich, da deren Führung überhaupt in ihren Anfängen, wo sie von andrem starken Lichte überstrahlt wird, verhältnißmäfsig unsicher bleibt.

Die punktirte Curve entspricht einer zweiten selteneren Abart der trichromatischen Augen, deren Vorkommen schon von Lord RAYLEIGH¹ und Herrn DONDERS² nachgewiesen war. Die Grüncurve nähert sich bei ihnen beträchtlich der Rothcurve, namentlich in ihrem vorderen Theile. Die Abweichung zwischen beiden Arten trichromatischer Augen zeigt sich deutlich, wenn man von ihnen das Verhältniß bestimmen läßt, in welchem spectrales Roth und Grün (etwa der Lithium- und Thalliumflamme entsprechend) zu Goldgelb (Natriumflamme) verbunden werden. Die normalen Augen nehmen dazu meist mehr als dreimal soviel Grün, als die der Minorität. Die Rothcurve der letzteren zeigte kleine Abweichungen. Hingegen war die Violetcurve innerhalb der Genauigkeit der Beobachtungen mit der normalen übereinstimmend.

Zu bemerken ist, dafs bei den Grundsätzen, die der Construction der *Fig. 149* zu Grunde liegen, die Stelle des Spectrum, wo sich die Roth- und Grüncurve schneiden, complementär sein muß zum Violet, und die Stelle, wo sich die Grün und die Violetcurven schneiden, complementär sein muß zum äußersten Roth. Die entsprechenden Wellenlängen, welche schon aus den S. 318 und 319 gegebenen Tabellen hervorgehen, ergaben sich für beide Beobachter in gleichem Werthe auch aus den Curven, worin eine Controlle für die Richtigkeit ihres Verfahrens liegt.

Dichromatische Augen. Von großem Interesse für die Theorie der Farbenempfindungen sind die Wahrnehmungen solcher Augen, welche weniger Farben als die gewöhnlichen Augen unterscheiden (Farbenblindheit, *Achromatopsia*, *Achrupsia*). Verhältnißmäfsig selten sind Augen, denen alle Farbenunterschiede fehlen, Monochromaten; häufiger sind solche, die gewisse Farbenunterschiede gut unterscheiden, andere verwechseln, Dichromaten. Schon A. SEEBECK hat nachgewiesen, dafs es zwei Klassen der letzteren giebt. Innerhalb jeder dieser Klassen machen die einzelnen Augen nahehin dieselben Verwechselungen zwischen verschiedenen Farben. Dagegen erkennt jede Klasse die meisten Verwechselungen, welche Individuen der andern Klasse gemacht haben.

Zuerst lernte man überwiegend Fälle von SEEBECK's zweiter Klasse kennen, deren Eigenart auch oft nach dem bekannten Chemiker J. DALTON,

¹ RAYLEIGH. *Nature*. Vol. XXV. p. 64. 1881. Gelesen in Section A der British Association Sept. 2. 1881.

² F. C. DONDERS. *Onderzoekingen etc.* 3. Reeks. D. VIII. 170. Auch in *Du Bois Reymond's Archiv für Physiologie*. 1884. S. 518.

der zu ihnen gehörte und zuerst eine genauere Untersuchung dieses Zustandes gab, Daltonismus (*Ancerythrophia* nach GOETHE) genannt wird. Da die englischen Naturforscher gegen diese Art, den Namen ihres berühmten Landsmannes durch einen seiner Fehler zu verewigen, Einsprüche erheben, wollen wir den Zustand Rothblindheit nennen. Individuen, bei denen dieser Zustand vollständig entwickelt ist, sehen im Spectrum nur zwei Farben, die sie meist Blau und Gelb nennen. Zum letzteren rechnen sie das ganze Roth, Orange, Gelb und Grün. Die grünblauen Töne nennen sie grau, den Rest blau. Das äußerste Roth, wenn es lichtschwach ist, sehen sie gar nicht, wohl aber wenn es intensiv ist. Sie zeigen deshalb die rothe Grenze des Spectrum gewöhnlich an einer Stelle an, wo die normalen Augen noch deutlich schwaches Roth sehen. Unter den Körperfarben verwechseln sie das Roth (d. h. Zinnoberroth und röthlich Orange) mit Braun und Grün, wobei dem normalen Auge im allgemeinen die verwechselten rothen Farbentöne viel heller erscheinen, als die braunen und grünen; Goldgell unterscheiden sie nicht von Gelb, Rosaroth nicht von Blau. Die Mischungen verschiedener Farben dagegen, welche dem normalen Auge gleich erscheinen, erscheinen meist auch den Rothblinden gleich. Schon J. HERSCHEL¹ stellt in Bezug auf DALTON'S Fall die Ansicht auf, daß alle Farben, welche er unterscheidet, aus zwei statt aus drei Grundfarben zusammengesetzt gedacht werden könnten. Diese Meinung ist später durch MAXWELL mittels seiner Methode, die Farbenmischung auf dem Farbenkreisel zur Messung zu benutzen geprüft und bestätigt worden. Für das gesunde Auge läßt sich, wie wir sahen, zwischen jeder vorkommenden Farbe, drei passend gewählten Grundfarben, ferner Weiß und Schwarz eine Farbengleichung herstellen. Bei den Rothblinden braucht man, wovon ich mich selbst überzeugt habe, außer

295 Weiß und Schwarz nur zwei Farben (z. B. Gelb und Blau), um mit jeder anderen Farbe die Farbengleichung auf der rotirenden Scheibe herzustellen. Ich benutzte bei meinen Versuchen mit Herrn M., einem jungen Polytechniker, der an physikalische Untersuchungen gewöhnt war, und sich ziemlich empfindlich gegen die Farbenunterschiede zeigte, die für sein Auge noch vorhanden waren, als Hauptfarben Chromgelb und Ultramarin.

Mit Roth (etwa dem des Siegelacks) war ihm identisch eine Mischung von 35° Gelb, 325° Schwarz, die für das normale Auge ein dunkles Olivengrün gab.

Mit Grün identisch (im Farbenton etwa FRAUNHOFER'S Linie *E* entsprechend) ergibt sich aus den Versuchen eine Mischung von 327° Gelb 33° Blau, für das normale Auge Graugelb. Mit Grau identisch 165° Gelb und 195° Blau, für das normale Auge ein schwach röthliches Grau.

Da man nun aus Roth, Gelb, Grün, Blau alle anderen Farbentöne würdigen mischen können, so ergibt sich, daß für Herrn M. alle aus Gelb und Blau gemischt werden könnten.

¹ In einem Briefe, der angeführt ist in G. WILSON, *on Colour Blindness*. Edinburgh. 1855. p. 66.

Was nun die andere Klasse der Farbenblinden, SEEBECK's erste Klasse, betrifft, so unterscheiden sie sich nach SEEBECK's Angaben von den Rothblinden dadurch, daß sie leicht und sicher über die Übergänge zwischen Violet und Roth urtheilen, die jenen gleichmäßig als Blau erscheinen. Dagegen machen sie Verwechslungen zwischen Grün, Gelb, Blau und Roth. Wenn beide Klassen denselben Farbenton mit Grün verwechseln, so wählen die Individuen dieser Klasse ein gelberes Grün als die Rothblinden. Sie zeigen keine Unempfindlichkeit gegen das äußerste Roth, und verlegen die größte Helligkeit des Spectrum in das Gelb. Auch sie unterscheiden nur zwei Farbentöne im Spectrum, die sie (wahrscheinlich ziemlich richtig) Blau und Roth nennen. Danach kann man vermuthen, daß ihr Übel in einer Unempfindlichkeit der grünempfindenden Nerven besteht.

Violetblindheit ist bisher sehr selten als dauernder Zustand gefunden worden, doch besitzt man im Santonin ein Mittel, welches einen der Violetblindheit ähnlichen Zustand hervorruft. Damit die Wirkung schnell eintrete und nicht zu lange anhalte, nimmt man 10 bis 20 Gran santoninsauren Natrons. Nach 10 bis 15 Minuten fängt die Veränderung an und dauert mehrere Stunden. Uebrigens treten dabei auch Uebelkeiten, große Müdigkeit und Gesichtshallucinationen auf, so daß ein solcher Versuch nicht ohne Beschwerde ist. Durch größere Dosen werden Thiere getödtet. Die der Wirkung des Santonins unterworfenen Personen sehen helle Objecte grüngelb, dunkle Flächen zuweilen mit Violet überzogen; das violette Ende des Spectrum verschwindet. Ihr Farbensystem ist dichromatisch, oder wenigstens annähernd so. Bei den Versuchen von E. ROSE¹ zeigte sich, daß bei mäßiger Stärke der Beleuchtung Farbleichungen mit nur zwei Grundfarben im Santoninrausch hergestellt werden konnten, aber nicht bei größerer Lichtstärke. Die hergestellten Farbleichungen blieben aber nicht längere Zeit constant, sondern der Zustand veränderte sich fortdauernd ziemlich merklich. Es waren gelbe und violette Mischfarben, die für gleich erklärt wurden.

Der Querschnitt der Sehnerven, mit dem Augenspiegel betrachtet, zeigte sich nicht gelbgefärbt, so daß keine, oder wenigstens keine merkliche gelbe Färbung der Augenflüssigkeiten vorhanden war. Dagegen waren die Blutgefäße der Netzhaut stark gefüllt.

Auch A. KÖNIG² hat Versuche über die Santonwirkung angestellt und gefunden, daß weiße Gegenstände nahehin die Farbe von der Wellenlänge 570—573 $\mu\mu$ zeigen; letztere ist die Complementärfarbe des Violet. Er bestätigt, daß selbst bei hochgesteigerten Santonwirkungen von einer vollständigen Dichromasie des Auges keine Rede ist. Während das violette Ende des Spectrum verschwand, blieb Grünblau und Blau noch erkennbar. Er findet die Erscheinungen mehr denen der Absorption durch ein grüngelbliches Glas (ein

¹ E. ROSE. *Virchow's Archiv* XVI. 233—253. (1859). — XIX. 522—536. (1860). — XX. 245—290. (1860). XXVIII. (1863) und *Gräfe's Archiv für Ophthalm.* VII. (2) 72—108. (1861).

² A. KÖNIG, *Centralblatt für praktische Augenheilkunde* 1888 Decemberheft.

dickes Uranglas) ähnlich, welches das Violet auslöscht, Blau und Blaugrün erheblich schwächt, aber diese Farben doch immerhin deutlich erkennbar läßt. Das Violetsehen auf dunklem Grunde war bei ihm nicht sehr hervortretend. Eine solche Erscheinung der Complementärfarbe auf dunklen Grunde kommt auch sonst vor, wenn man längere Zeit durch starkgefärbte Medien, z. B. ein rothes Glas, gesehen hat. Davon mehr in § 2. W. PREYER¹ sah helles Violet erscheinen, wenn er bei dunkel gehaltenem Auge Santonin nahm; fand dagegen die Auslöschung des spectralen Violets auf den gelben Fleck der Netzhaut beschränkt. A. KÖNIG² fand bei einem Kranken, der in einem Skotom der Netzhaut vollkommene Violetblindheit zeigte, den neutralen Punkt im Gelbgrün von $560,4 \mu\mu$.

295

Farbensystem der Dichromaten. Wenn man GRASMANNS Sätze über Farbenmischung auf ein Auge anwendet, welches die Farbgleichungen des trichromatischen Auges anerkennt, aber Roth mit Grün verwechselt, so folgt, daß die Farbentöne, welche es überhaupt unterscheidet, alle aus zwei anderen Farben, etwa Gelb und Blau, zu mischen seien. Denn wenn Roth und Grün identisch erscheinen, müssen nach jenen Sätzen auch alle Mischfarben aus Roth und Grün identisch erscheinen. Da gleich aussehende Farben gemischt gleich aussehende Mischfarben geben, muß ferner jede Mischung einer bestimmten Quantität Gelb mit passenden Quantitäten aller der Mischfarben aus Roth und Grün, die für das farbenblinde Auge gleiches Aussehen haben, für dieses Auge gleich aussehende Mischfarben geben. Eine der Mischfarben aus Roth und Grün ist aber für das gesunde Auge auch durch Gelb und Blau herzustellen, und kann daher für das farbenblinde Auge statt sämtlicher Mischfarben aus Roth und Grün substituirt werden. Daraus folgt, daß sämtliche Mischfarben aus Gelb, Roth und Grün, für das letztere Auge auch aus Gelb und Blau herzustellen sind, und dasselbe läßt sich ebensowohl für sämtliche Mischungen aus Blau, Roth und Grün beweisen. Da endlich alle Mischungen aus Roth, Gelb, Grün, Blau sämtliche Farbentöne für das gesunde Auge herzustellen sind, sind es für das farbenblinde alle Farbentöne aus Gelb und Blau.

Sind die Farben in der Ebene nach den Principien der Schwerpunktsconstruction geordnet, so müssen alle solche Farben, welche den Farbenblinden bei passender Lichtstärke gleich erscheinen, in einer geraden Linie liegen, da auf der Verbindungslinie zweier Farbenorte deren Mischfarben liegen, und diese von gleichem Farbenton erscheinen müssen, wenn die ursprünglichen Farben gleich aussehen. Ferner läßt sich zeigen, daß alle diese geraden Linien entweder parallel sind, oder sich in einem Punkte schneiden, und daß die diesem Schnittpunkte angehörige Farbe dem farbenblinden Auge unsichtbar sein muß.

Es erscheine dem Farbenblinden die Quantität r der in R Fig. 150 befindlichen Farbe gleich der Quantität g der in G befindlichen. Nun ist

$$r = nr + (1 - n)r.$$

¹ W. PREYER, *Pflüger's Archiv*. Bd. I. S. 303—305. 1868.

² A. KÖNIG, *Verhandl. d. Physik. Gesellsch. zu Berlin*. 1885. Nov. 6.

Mit der Menge nr der Farbe R ist gleich aussehend die Menge ng der Farbe G ; also wenn n ein ächter Bruch, ist gleich aussehend die Menge r der Farbe R mit der Mischung $(1 - n)r$ von R und ng von G . In der Farbenfläche ist diese Mischfarbe zu finden im Punkte S der Linie RG , wenn

$$RS : SG = ng : (1 - n)r \dots \dots \dots 1)$$

und die Quantität s der so gewonnenen Mischfarbe ist

$$s = ng + (1 - n)r.$$

Das Aussehen dieser Quantität s von der Farbe S ist für das farbenblinde Auge unabhängig von dem Werthe von n .

Wenn wir nun die Quantität b der Farbe B mit der Quantität s der Farbe S mischen, so erhalten wir eine Mischfarbe, deren Aussehen für das farbenblinde Auge unabhängig von der veränderlichen Größe n ist. Der Ort der Farbe sei T , ihre Menge t , so ist

$$t = b + s = b + ng + (1 - n)r$$

$$TS : BT = b : s = b : [ng + (1 - n)r] \dots \dots \dots 1a)$$

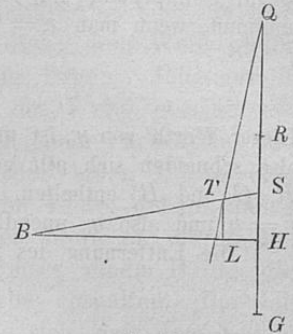


Fig. 150.

Fällen wir aus B das Loth BH auf RG und aus T das Loth TL auf BH , nennen wir

$$\begin{aligned} LH &= x & BH &= h \\ TL &= y & HG &= a \\ & & RG &= c \end{aligned}$$

so ist nach 1a)

$$\frac{x}{h} = \frac{LH}{BH} = \frac{TS}{BS} = \frac{b}{b + ng + (1 - n)r} \dots \dots \dots 1b)$$

$$\frac{y}{h - x} = \frac{TL}{BL} = \frac{SH}{BH} = \frac{SG - a}{h}.$$

Nun folgt aus 1)

$$SG = c \cdot \frac{(1 - n)r}{ng + (1 - n)r},$$

also

$$\frac{y}{h - x} = \frac{(c - a)(1 - n)r - ang}{h[ng + (1 - n)r]} \dots \dots \dots 1c).$$

wenn man aus 1b) und 1c) die veränderliche Größe n eliminiert, so erhält man eine Gleichung zwischen den rechtwinkligen Coordinaten des Punktes T , nämlich

$$0 = ybh(g - r) - x[erg + br(c - a) + abg] + bh[(c - a)r + ag] \dots 1d).$$

Da dies eine lineare Gleichung zwischen den rechtwinkeligen Coordinaten x und y ist, so liegen die betreffenden Orte T der für das farbenblinde Auge gleich aussehenden Mischfarben in einer geraden Linie. Es sei TQ diese gerade Linie, Q ihr Schnittpunkt mit der Richtung RG , so ist $QH = y_0$ der Werth, welchen y annimmt, wenn man $x = 0$ setzt

$$y_0 = \frac{(c - a)r + ag}{r - g} \dots\dots\dots$$

297 Dieser Werth von y_0 ist unabhängig von der Quantität b der zugemischten Farbe. also schneiden sich alle geraden Linien, welche gleich aussehende Mischfarben R , G und B enthalten, in demselben Punkte Q , oder sind sich parallel, wenn $r = g$ und also y_0 unendlich.

Die Entfernung des Schnittpunktes Q vom Punkte R ist

$$y_0 - c + a = \frac{cg}{r - g} = QR \dots\dots\dots$$

Mischen wir eine Quantität q der Farbe Q mit der Quantität g der Farbe G , dafs die Farbe R entsteht, so mufs sein

$$\frac{QR}{RG} = \frac{g}{q}$$

oder nach 1f) da $RG = c$

$$\frac{g}{r - g} = \frac{g}{q}$$

$$q = r - g.$$

Die Quantität der Mischfarbe R wird dann

$$r = g + q.$$

Da nun r nach der Voraussetzung dem farbenblinden Auge gleichaussehend ist mit g , die Quantität $q = r - g$ aber im allgemeinen nicht Null ist, so folgt daraus, dafs das farbenblinde Auge die Farbe Q gar nicht empfinden kann.

Der Schnittpunkt der geraden Linien, welche die gleichaussehenden Farben enthalten, fällt also in den Ort einer Farbe, welche dem farbenblinden Auge fehlt. n Aber es ist hierbei nicht ausgeschlossen, dafs diese fehlende Farbe auch dem normalen Auge fehlen könnte, und das Gewicht Null hätte. Das würde heifsen, dafs zwei der Grundempfindungen des normalen Auges dem farbenblinden durch ein Reizmittel gleich stark erregt würden. In der That ist es neuerdings wahrscheinlich geworden, dafs in dieser Richtung die Lösung des Räthfels zu suchen ist.

Die älteren Erklärungsversuche der Farbenblindheit gingen von der erstgenannten Annahme aus, dafs den dichromatischen Augen eine der Grundempfindungen fehlte. Ich habe dies in der ersten Auflage dieses Handbuchs selbst angenommen.

297 In der YOUNG'schen Hypothese könnte die dem farbenblinden Auge unsichtbare Farbe natürlich nur eine der Grundfarben sein; denn wenn alle drei Grundfarben empfunden werden, kann keine andere Farbe, die ja aus diesen

Grundfarben zusammengesetzt ist, fehlen. Wenn man nun diejenigen Farben aufsucht, welche dem Weiß (beziehlich Grau) gleich erscheinen, so werden dies Farben sein, die für das gesunde Auge entweder Farben vom Farbentone der fehlenden Grundfarbe oder von ihrer Complementärfarbe sind, in verschiedenen Graden mit Weiß gemischt. Denn alle diese dem Weiß gleich aussehenden Farben müssen auf einer geraden Linie liegen. Jede gerade Linie aber, die in der Farbenfläche durch den Ort des Weiß gezogen ist, enthält in jeder ihrer beiden Hälften Farben von gleichem Farbentone und verschiedenen Graden der Sättigung. Die Farben der einen Hälfte sind aber denen der anderen complementär. Jede solche Linie, welche gleich aussehende Farben enthält, muß aber auch, wie eben bewiesen, durch den Ort der fehlenden Grundfarbe gehen, folglich in ihrer einen Hälfte die Farben vom gleichen Farbentone mit der Grundfarbe enthalten. Bei den Versuchen, welche ich mit Herrn M. anstellte, zeigte sich, daß dem reinen Grau gleich erschien ein Roth, welches sehr nahe dem äußersten Roth des Spectrum im Farbentone entsprach (38° Ultramarin, 322° Zinnoberroth), vielleicht ein wenig nach der Seite des Purpur abwich, und ein entsprechendes, complementäres Blaugrün (59° Ultramarin, 301° Parisergrün). MAXWELL hat ähnlich gefunden für das Roth 6° Ultramarin, 94° Zinnober, für das Grün 40° Ultramarin, 60° Parisergrün. Da nun außerdem das Roth für normale Augen viel dunkler erschien als das Grau, dieses aber heller als das Grün, so wird kein Zweifel bleiben, daß das Roth und nicht das Grün der fehlenden Farbe entsprechen mußte. Die Rothblindheit würde also nach YOUNG'S Hypothese für eine Lähmung der rothempfindenden Nerven zu erklären sein.¹

Wenn nun wirklich ein dem äußersten Roth des Spectrum nahe stehendes Roth die eine Grundfarbe ist, so können die beiden anderen wenigstens nicht bedeutend von dem von YOUNG gewählten Grün und Violet abweichen.

Daraus würde nun folgen, daß die Rothblinden nur Grün, Violet und ihre Mischung, das Blau, empfinden. Das spectrale Roth, welches nur schwach die grünempfindenden, fast gar nicht die violetempfindenden Nerven zu erregen scheint, müßte ihnen danach als gesättigtes, lichtschwaches Grün erscheinen, und zwar gesättigter als uns das wirkliche Grün des Spectrum erscheint, dem schon merkliche Mengen der anderen Farben beigemischt sein müssen. Lichtschwaches Roth, welches die rothempfindenden Nerven der normalen Augen noch genügend erregt, erregt dagegen ihre

¹ So viel ich finden kann, gebührt Herrn W. PREYER (vergl. W. PREYER, *Pflüger's Archiv*, Bd. 25, S. 31, 1881; auch separat erschienen unter dem Titel: *Über den Farben- und Temperatursinn mit besonderer Rücksicht auf Farbenblindheit*. Bonn 1881) das Verdienst, zuerst auf die Priorität YOUNG'S in Betreff der Erklärung der sog. „Farbenblindheit“ durch das Fehlen oder die Lähmung einer der drei Faserarten der Netzhaut hingewiesen zu haben. YOUNG spricht die hier erwähnte Auffassung aus in einer Bemerkung, die er in dem von ihm herausgegebenen „*Catalogue of works relating to natural philosophy and the mechanical arts*“ an die von J. DALTON verfaßte Abhandlung „on some facts relating to the vision of colours (*Memoires of Lit. and Phil. Soc. of Manchester* V. 28)“ anknüpft. Die bezügliche Stelle lautet: „it is much more simple to suppose the absence or paralysis of those fibres of the retina, which are calculated to perceive red“.

grünempfindenden Nerven nicht mehr genügend, und erscheint ihnen deshalb schwarz.

Spectrales Gelb würde als lichtstarkes gesättigtes Grün erscheinen, und da es eben eine lichtstärkere und beinahe gesättigte Abstufung dieser Farbe bildet, erschiene es erklärlich, daß danach die Rothblinden den Namen der Farbe wählen, den sie von Andern dafür brauchen hören, und alle die eigentlich grünen Töne Gelb nennen.

Grün wird schon im Vergleich zu den vorigen eine Einmischung von der anderen Grundfarbe zeigen, also eine zwar lichtstärkere aber weißliche Abstufung derselben Farbe sein wie Roth und Gelb. Die größte Lichtintensität des Spectrum erscheint den Rothblinden nach den Beobachtungen von SEEBECK auch nicht wie normalen Augen im Gelb, sondern im Grünblau. In der That, wenn die Erregung der grünempfindenden Nerven, wie wir voraussetzen müssen, im Grün am stärksten ist, wird für die Rothblinden das Maximum der gesammten Erregung etwas nach der Seite des Blau fallen, weil hier die Erregung der violetempfindenden Nerven steigt. Weiß im Sinne der Rothblinden ist natürlich eine Mischung ihrer beiden Grundfarben in einem bestimmten Verhältniß, welche uns grünblau erscheint, daher sie denn auch die Übergangsstufen im Spectrum von Grün zu Blau für graue Farben erklären.

Weiter im Spectrum gewinnt die zweite Grundfarbe das Übergewicht, die sie Blau nennen, weil das Indigblau, wenn auch in ihrem Sinne noch etwas weißlich, doch durch seine Lichtstärke ihnen ein mehr in die Augen fallender Repräsentant dieser Farbe sein wird als das Violet. Sie erkennen den Unterschied im Aussehen zwischen Blau und Violet. Der von SEEBECK untersuchte H. wufste die Grenze zu zeigen, erklärte aber, er würde das Violet lieber Dunkelblau nennen. Übrigens müssen ihnen die blauen Töne ziemlich ebenso erscheinen, wie den normalen Augen, weil hier auch für diese die Einmischung des Roth sehr klein sein wird.

Da ihnen alle diese Farben des Spectrum noch gewisse, wenn auch feinere Unterschiede zeigen müssen, ist es erklärlich, daß sie bei größerer Aufmerksamkeit und Übung auch wohl lernen, sehr gesättigte Farben richtig zu benennen. Bei weißlicheren Farben aber müssen die genannten Unterscheidungsmerkmale sie im Stich lassen; da können sie sich der Verwechslung nicht entziehen.

Da es immerhin zweifelhaft erscheint, welchen Empfindungen des normalen Auges die beiden Farbenempfindungen der Dichromaten entsprechen, so hat Herr DONDERS vorgeschlagen, nach dem Sprachgebrauche der Maler die der rothen weniger brechbaren Hälfte des Spectrum entsprechende Farbe als die warme Farbe, die der blauen Hälfte als die kalte Farbe zu bezeichnen, wie auch wir im Folgenden thun wollen.

Da man jede Farbe des dichromatischen Auges aus den zwei Grundfarben des Spectrum mischen kann, so ist die Aufgabe, die Curve der

Grundempfindungen durch Messungen zu bestimmen, für diese Augen viel einfacher, als für die dreifarbigigen. Es war das schon nach einer von DONDERS vorgeschlagenen Methode durch Herrn VAN DER WEYDE¹ geschehen, und ist dann von den Herren A. KÖNIG und C. DIETERICI² ebenfalls durchgeführt worden mit geringen Abweichungen in den Resultaten, die sich aus einer etwas anderen Wahl des als normal betrachteten Weifs zu erklären scheinen.

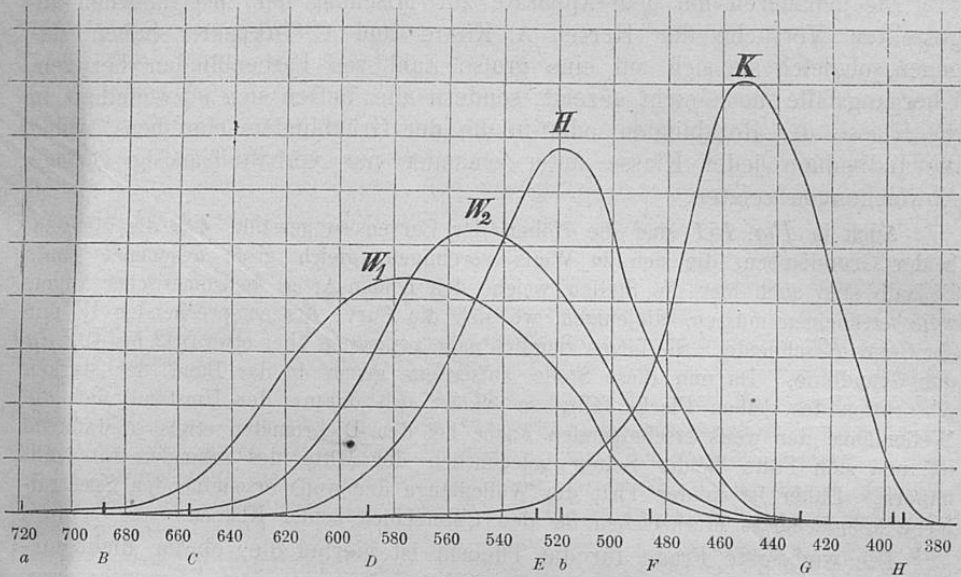


Fig. 151.

In Fig. 151 sind unter W_1 und K die Curven für die beiden Empfindungen zweier Grünblinden dargestellt (Herr W. WALDEYER und E. BRODHUN), während W_2 und K die für zwei Rothblinde (Herrn L. KRANKE und Herrn H. SAKAKY) giebt. Die Curve H endlich bezieht sich auf ein monochromatisches Auge, welches gar keine Farben und nur Helligkeiten unterscheidet. Augen der letzteren Art sind verhältnismässig selten und auch in andern Beziehungen als leidend und krank zu bezeichnen.

Die Erklärung der Dichromasie wurde bezweifelt, weil die augenärztlichen Untersuchungen eine grössere Mannigfaltigkeit von Fällen anzuzeigen schienen, als der Annahme des Mangels einer der Grundempfindungen entspricht, wenn auch die extremen Fälle, welche man als Rothblindheit oder Grünblindheit bezeichnen kann, verhältnismässig häufiger constatirt wurden, als die Übergänge zwischen beiden. Aber sowohl die scheinbar weisse Stelle

¹ J. A. VAN DER WEYDE, *Onderzoekingen gedaan in het Physiolog. Labor. d. Utrecht'sche Hoogeschool.* 3 R. D. VII. Bl. 1. 1881. — *Graefe's Archiv* Bd. 28 (1). S. 1. 1882.

² A. KÖNIG und C. DIETERICI, *Sitzungsberichte der Berl. Akademie* vom 29. Juli 1886. Seite 805.

des Spectrum fiel in verschiedene Wellenlängen hinein, als auch variierte das Roth einerseits, und Blaugrün andererseits, welches auf der Farbenscheibe dem Grau gleichaussehend erschien, während dabei doch einzelne dichromatische Beobachter eine große Sicherheit und Feinheit in der Unterscheidung derjenigen Unterschiede zeigten, die sie überhaupt erkennen konnten, zum Theil sogar eine größere Sicherheit, als die Trichromaten mit ihrem verwickelteren Farbensystem.

Die genaueren mit dem Apparate zur Mischung der Spectralfarben angestellten Versuche der Herren A. KÖNIG und C. DIETERICH haben dagegen, obgleich sie sich auf eine große Zahl von Farbenblinden bezogen, Übergangsfälle noch nicht gezeigt, sondern alle ließen sich unzweifelhaft in die Klasse der Rothblinden oder in die der Grünblinden einreihen; wobei die Individuen jeder Klasse unter einander nur verhältnißmäßig geringe Abweichungen zeigten.

Auch in *Fig. 151* sind die Höhen der Curven so gewählt, daß die Mengen beider Grundfarben, die sich zu Weiß vereinigen, gleich groß genommen sind. Deshalb sind auch hier die Stellen, welche den beiden Arten dichromatischer Augen weiß erscheinen müssen, diejenigen, wo sich die Curve des entsprechenden W mit der Curve K schneidet. Sie liegen ziemlich nahe zusammen über etwa 502 bis 492 $\mu\mu$ der Grundlinie. Da nun diese Stelle außerdem genau in das Band der starken Absorption des gelben Flecks fällt, so erklärt sich daraus der Umstand, daß die Wellenlänge der weiß erscheinenden Farbe bei den Dichromaten etwas schwankend ist, und sich Fälle beider Seiten gelegentlich der Mitte des schmalen Intervalls nähern. Daher ist in der That die Wellenlänge der weiß erscheinenden Spectralfarbe kein scharfes Merkzeichen für den Unterschied beider Klassen.¹

Die wichtigste Frage für die Theorie ist hierbei die, ob im dichromatischen Auge die Curven, welche die Abhängigkeit der drei Elementarreregungen von den Wellenlängen darstellen, unveränderlich und unverändert seien. Dies schien allerdings aus der Erfahrung hervorzugehen, daß wenigstens im Gebiete der stärker gemischten Körperfarben die Dichromaten keine Unterschiede machen zwischen Farbenpaaren, die den Trichromaten gleich erscheinen. Freilich darf man diesen Satz nur als sehr angenähert richtig betrachten. Derselbe, ganz streng genommen, würde zunächst erfordern, daß alle trichromatischen Augen in ihren Aussagen über Farbmischung unter einander übereinstimmten, was durchaus nicht der Fall ist. Jedenfalls müssen wir hierbei zunächst die zweite Klasse der trichromatischen Augen ausscheiden. Einfaches Natriumlicht und eine Mischung von Grün und Roth, die der einen Klasse gleich erscheinen würde, wird von der anderen unterschieden. Aber auch bei den Beobachtungen mit dem Leukoskop,² wo man zwei complementäre Farben, welche dickere Quarzplatten im polarisirten Licht geben, möglichst nahe gleich unter einander zu machen strebt, zeigen sich kleine Unter-

¹ A. KÖNIG. *Gräfe's Archiv für Ophthalm.* Bd. 30(2) S. 155. 1884 und *Wiedemann's Annalen* Bd. 22 S. 567. 1884.

² DIRO KITAO. *Zur Farbentehre.* Dissertation. Göttingen, 1878.

A. KÖNIG. *Wiedemann's Annalen* Bd. 17. p. 990. 1882.—*Zeitschrift für Instrumentenkunde* 1883. p. 20.

E. BRODHUN. *Wiedemann's Annalen.* Bd. 34. p. 897. 1888.

schiede bei fast allen trichromatischen Beobachtern ebenso in der Verschiedenheit der Curven der *Fig. 145* für verschiedene Beobachter. Färbung der Augenmedien würde allerdings solche Veränderungen der Curven auch hervorbringen können, weil dadurch die Lichtintensität verschiedener Theile des Spectrum in verschiedenem Maasse geändert werden würde. Aber eine so starke Absorption, wie sie vorhanden sein müßte, um den Unterschied der beiden Klassen der Trichromaten zu erklären, wo bis zu zwei Dritteln der einen Farbe bei der einen oder andern Klasse absorbiert werden müßten, würde sich nur durch eine hochgradige blaugrüne oder rosenrothe Färbung der Augenmedien erklären lassen, die sicher nicht da ist. Unter diesen Umständen kann es nicht zweifelhaft sein, daß es Fälle giebt, wo die Intensität der Erregung jeder Grundfarbe in verschiedenen Augen eine verschiedene Function der Wellenlänge des Lichts ist, und könnte hierin auch der Grund der verschiedenen Gestalt der Curven in *Fig. 149* für verschiedene Beobachter gesucht werden.

Wenn wir dabei von der Hypothese der Erregung der Netzhaut durch photochemische Zersetzungen ausgehen, so könnte man an Änderungen in der Beschaffenheit oder Mischung solcher Substanzen denken, die in den Endelementen der Netzhaut liegen, wodurch die Abhängigkeit ihrer Zersetzbarkeit von der Wellenlänge geändert werden könnte. Wie sehr eingreifende Änderungen in dieser Beziehung bei den Silbersalzen, je nach der Art der Präparation oder bei Zumischungen fremder Stoffe zu erzielen sind, haben die neueren Fortschritte der Photographie gezeigt.

Während nun die Eigenthümlichkeit der anomalen Trichromaten dadurch erklärt werden könnte, daß ihre grünempfindliche Substanz der rothempfindlichen ähnlicher geworden ist, würden sich dichromatische Augen ergeben, wenn der Unterschied beider Substanzen ganz verschwände, wobei sie entweder beide der normalen rothempfindlichen, oder beide der normalen grünempfindlichen ähnlicher würden. Die Gehirnapparate könnten dabei unverändert functioniren.

Unter diesen Umständen würde in beiden Klassen von Farbenblinden jedes Licht der normalen Endstrecke und Zwischenstrecke die Empfindung erregen, welche das normale Auge im Gelb hat, und in der Mittelstrecke würde dies Gelb durch Zumischung von Violet weißlicher werden, in der brechbareren Endstrecke nur Violet übrig bleiben. Dagegen würden sich die beiden Klassen dadurch unterscheiden, daß für die, deren Grüncurve in die Rothcurve hinübergewandert ist, die Farben des rothen Endes verhältnißmäßig lichtstark erscheinen, die des mittleren Grün dagegen lichtschwächer. Diese würden SEEBECK's Grünblinden entsprechen.

Wenn dagegen die Rothcurve zur Grüncurve hinübergewandert ist, hätten wir geringe Empfindlichkeit für das Licht des rothen Endes zu erwarten, vermehrte für das mittlere Grün. Es würde dies dem Zustande der Rothblindheit entsprechen. Dazwischen könnten Übergänge vorkommen. Doch scheinen, wie schon bemerkt, die Übergänge mindestens viel seltener zu sein, als die an beiden Grenzen liegenden Fälle.

Wenn man ein trichromatisches Auge und ein dichromatisches vergleicht von denen letzteres alle Farbengleichungen des ersteren als richtig anerkennt, und die beide NEWTON's Gesetze folgen, so würden die Schlüsse, die oben

S. 363 und 364 gezogen sind, streng richtig sein. Die dem dichromatischen Auge fehlende Grundfarbe wäre dadurch zu finden. Wie schon erwähnt, haben die älteren Farbmischungsversuche auf den rotirenden Scheiben in dieser Beziehung eine gute Übereinstimmung zwischen den Farbgleichungen der normalen Trichromaten und der Dichromaten ergeben. Diese bestätigt sich aber auch für die Mischungen von Spectralfarben in den Versuchsreihen von A. KÖNIG und C. DIETERICH. Diese haben gefunden, daß man bei der Annahme etwas anderer Grundempfindungen als der anfangs gewählten beiden Grenzfarben des Spectrum die beiden dichromatischen ziemlich gut mit denen der normalen trichromatischen Augen vereinigen kann, der älteren Hypothese entsprechend, wonach bei den Dichromaten eine der Grundempfindungen fehlen sollte. Die hierzu nöthigen Grundfarben wären, wenn wir mit \mathfrak{R} , \mathfrak{G} , \mathfrak{B} die der normalen Trichromaten bezeichnen:

$$\mathfrak{R} = \frac{R - 0,15 \cdot G + 0,1 \cdot V}{0,95}$$

$$\mathfrak{G} = \frac{0,25 \cdot R + G}{1,25}$$

$$\mathfrak{B} = V.$$

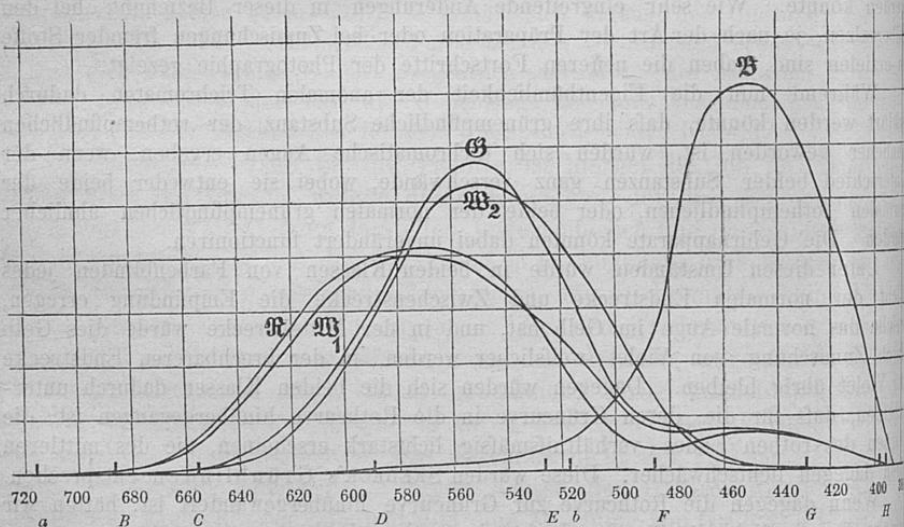


Fig. 152.

Das Roth hierfür wäre also etwas mehr zum Purpur hinüberziehend als das äußerste Roth des Spectrum. Diese Curven sind in Fig. 152 dargestellt. \mathfrak{R} , \mathfrak{G} , \mathfrak{B} wären die Curven der von den genannten Beobachtern gewählten Grundempfindungen für die normalen Trichromaten, \mathfrak{R}_1 und \mathfrak{G}_2 für die Rothblinden, \mathfrak{B}_1 und \mathfrak{B} für die Grünblinden. Die anomalen Trichromaten und die Monochromaten sind aber nicht in dieser Weise unter-

zubringen; bei ihnen müssen wirklich individuelle Änderungen in der Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Wellenlänge vorkommen. Die ersteren geben dem entsprechend auch weit abweichende Farbgleichungen. Die letzteren können überhaupt keine solche geben.

Die Darstellung des Farbendreiecks in *Fig. 139* bezieht sich auf diese letzte Art der Berechnung aus den Elementarfarben R , G und B . Es ist hierbei zu beachten, daß die beiden Endfarben des Spectrum, welche die beiden Beobachter zuerst als R und V gebraucht haben, reelle Farben sind, die nach YOUNG'S Theorie nur aus positiven Werthen der Grundfarben zusammengesetzt sein können. Ihr ursprüngliches elementares Grün ist dagegen nur eine Rechnungsgröße, welche auch negative Bestandtheile enthalten könnte. Wenn man aber negatives Roth darin annimmt, würde dieses sich von dem positiven Roth der Rothcurve abziehen können, so weit diese reicht. Jenseits ihres brechbaren Endes aber müßte dann auch positives Roth in Violet angenommen werden, damit nirgends negatives Roth übrig bliebe. Ähnlich, wenn man negatives Violet im erstgefundenen Grün annähme, müßte auch das spectrale Roth eine Zumischung von positivem Violet enthalten. In dieser Weise sind die Annahmen, die man über die Zusammensetzung der erstgewählten Elementarfarben aus Grundfarben machen könnte, doch einigermaßen eingeschränkt.

Was die Untersuchung Farbenblinder betrifft, so wird durch Fragen, wie sie diese oder jene Farbe nennen, natürlich nur außerordentlich wenig ermittelt werden, denn die Farbenblinden befinden sich in der Lage, das System von Namen, welches für die Empfindungen des normalen Auges zurecht gemacht ist, auf ihre Empfindungen anwenden zu müssen, für die es nicht paßt. Es paßt nicht nur nicht, weil es zu viele Namen für Farbentöne enthält, sondern in der Reihe der Spectralfarben bezeichnen wir Unterschiede als solche des Farbentons, die für die Farbenblinden nur Unterschiede der Sättigung oder der Lichtstärke sind. Ob das, was sie Gelb und Blau nennen, unserem Gelb und Blau entspricht, ist durchaus zweifelhaft. Deshalb erfolgen ihre Antworten auf Fragen über Farben meist langsam und verlegen, und erscheinen uns verwirrt und widersprechend.

Viel besser, aber doch noch sehr unzureichend ist die Methode von SEEBECK, den Farbenblinden eine Auswahl gefärbter Papiere oder Proben von Stickwolle zu geben mit der Aufforderung, sie nach ihrer Ähnlichkeit zusammen zu ordnen. Aber die Anzahl der Farbenproben müßte ungeheuer groß sein, wenn darin die charakteristisch verwechselten Farbentöne auch genau gerade in der nöthigen Vermischung mit Weiß, und der nöthigen Helligkeit vorkommen sollen, daß die vollständige Gleichheit für das farbenblinde Auge erzielt wird. So lange aber nur Ähnlichkeit da ist, wird man sich schwer darüber verständigen, ob die Differenz eine des Farbentons, oder der Sättigung, oder der Helligkeit ist. Man wird also nur durch Zufall einige wenige bestimmte Resultate erhalten können.

Dagegen erlaubt der nach MAXWELL'S Methode eingerichtete Farbenkreisel schnell die nothwendigen Data mit großer Genauigkeit zu erhalten, weil man sehr leicht eine Reihe von Farben durch Mischung erzeugen kann, die dem farbenblinden Auge vollkommen gleich erscheinen. Dabei ist die Hauptsache, die den Grundcharakter des Mangels bezeichnet, zu ermitteln, welche zwei Farben mit reinem

300 Grau, wie man es durch die Mischung von Weiß und Schwarz auf dem Kreise erhält, verwechselt werden. Eine davon, die dann dem farbenblinden Auge verhältnißmäßig viel dunkler als dem normalen erscheint, wäre die fehlende Grundfarbe. Dabei wird sich auch leicht ermitteln lassen, ob noch ein gewisser Rest von Empfindlichkeit für die fehlende Grundfarbe vorhanden ist.

n Sehr zweckmäßig ist auch für die schnelle Bestimmung der wesentlichen Z einer Dichromasie die zuerst von E. ROSE angewendete, schon oben S. 361 erwähnte Methode, die von einer Quarzplatte zwischen einem NICOL'schen Prisma und einem Doppelspath erzeugten complementären Farben zu vergleichen. Man läßt den Nicol so drehen, bis dem Dichromaten die beiden complementären Farben gleich erscheinen, und sieht dann zu, welche Farben er verwechselt. Sehr gut und vollständig lassen sich solche Beobachtungen auch mit dem Leukoskop machen (Siehe oben S. 368), einem Instrumente ähnlicher Art, in welchem die Dicke der eingeschalteten Quarze geändert werden und genaue Bestimmungen der Drehung des Nicol gemacht werden können. Ich hatte dieses Instrument construiren lassen, um für die von der Temperatur der Flammen herrührenden Unterschiede in der Mischung des Lichts ein Maafs zu gewinnen. Trichromaten bekommen darin bei mäfsigen Quarzdicken überhaupt keine vollkommene Uebereinstimmung der beiden complementären Farben, d. h. keine von diesen wird vollkommen weiß; doch können sie ziemlich gut so einstellen, daß keine der beiden Farben röther als die andere erscheine. Dabei zeigen sich aber auffallende individuelle Unterschiede, selbst zwischen den beiden Augen desselben Beobachters. Dichromaten dagegen stellen auf absolute Gleichheit ein, und der Winkel, um den der Nicol gedreht ist, giebt dann ein Maafs für die Art ihrer Dichromasie.¹

300 Will man die hier auseinander gesetzte Theorie prüfen, so muß man ferner bestimmen, ob jede gegebene Farbe, namentlich die Hauptfarben des Spectrum für den Farbenblinden aus zwei passend gewählten Farben zusammengesetzt werden könne.

G. WILSON hat namentlich darauf aufmerksam gemacht, wie gefährlich die Farbenblindheit auf Schiffen und Eisenbahnzügen werden könne, wo es darauf ankommt, farbige Signale zu erkennen. Er fand im Durchschnitt einen Farbenblinden unter 17,7 Personen.

Farbenblindheit der Netzhautperipherie.

n Ähnliche Abweichungen, wie bei den vollständigen Dichromaten kommen auch in der Peripherie des Gesichtsfeldes bei den normalen Trichromaten vor, und zwar am stärksten entwickelt in dem lateralen Theile der Netzhaut, der in gewöhnlicher Augenstellung das Bild des Nasenrückens empfängt. Wenn man das rechte Auge, ohne den Kopf zu drehen, stark nach rechts wendet, und nun ein Quadrat farbigen Papiers von etwa 3 bis 10 cm Seite mit ausgestrecktem linken Arm von der Seite her vorschiebt, so daß es anfängt, vor dem seitlich das Gesichtsfeld begrenzenden Nasenrückens sichtbar zu werden, so bemerkt man eine äußerste Zone, in der überhaupt keine Farben unterschieden werden, auch nicht Ultramarinblau von einem

¹ A. KÖNIG, *Centralbl. für prakt. Augenheilk.* 1884. Decemberheft.

mäßig dunklen Grau, und wo überhaupt alle Farben nur als Abstufungen der Helligkeit von bläulichem Grau erscheinen, Roth am dunkelsten. Man sieht an dieser Stelle des Sehfeldes auch die Umriss verhältnißmäßig schlecht, und erkennt nur gröfsere, namentlich bewegte Objecten. Aber der Farbeindruck fehlt doch noch an Stellen, wo man die Umriss der helleren Hand, die noch weiter nach den Grenzen des Gesichtsfeldes hin liegt als das farbige Papier, erkennen kann. Man mufs natürlich dafür sorgen, dafs die betreffenden Papiere von vorn voll beleuchtet sind, und auch, um das Erlöschen der Farben durch Nachbilder zu vermeiden, sie hin und her bewegen dem Rande des Gesichtsfeldes parallel. Der Hintergrund, auf den sie sich projiciren, mufs dunkel sein.

Weiter gegen die Mitte des Gesichtsfeldes schliesst sich daran eine Zone, in der der Unterschied von gelb und blau deutlich hervortritt, dagegen gesättigtes Roth fast schwarz oder dunkelgelbbraun, Blattgrün gelblich weifs erscheint. Zwischen diesen beiden Zonen ist für mein Auge die Grenze ziemlich scharf, ja bei schmalen Objecten scheint mir das auftauchende Gelb plötzlich etwas anders localisirt, als das vorher graue Bild hervorspringen, so dafs das Gesamtbild eine Art plötzlichen Ruckes erleidet, als ob es über eine Falte der Netzhaut spränge. Endlich noch weiter der Mitte zu tritt auch der Gegensatz zwischen Roth und Grün voll zur Erscheinung.

Auch die Herren SCHELSKE¹, AUBERT², KLUG³, J. v. KRIES⁴ haben mit geringen Abweichungen übereinstimmende Angaben gemacht. Der erstgenannte hat auch mit spectrumalem Licht beobachtet, wobei spectrumales Gelb und Blaugrün (Linie *F'*) durch grünlichere Farbentöne hindurchgingen, ehe sie farblos wurden. Er mafs auch die Winkelausdehnung, und fand für die normale Empfindung an der Nasenseite des Gesichtsfeldes 53°, an der Schläfenseite 68°, nach oben 38°, nach unten 37°. Derselbe hat auch Farbgleichungen für die rothblinde Zone der Netzhaut mittels rotirender Scheiben hergestellt, und diese dem Zustande eines dichromatischen Auges entsprechend gefunden.

Die Benennungen, welche wir den Farbeindrücken auf der Peripherie der Netzhaut geben, erklären sich am leichtesten unter der Annahme, dafs in der rothblinden Zone die rothempfindliche, photochemische Substanz der grünempfindlichen ähnlich geworden sei, in der äufsersten Zone alle drei einander gleich. Dieselben Bezeichnungen sind übrigens auch von den Patienten in denjenigen seltenen Fällen für die Farben des dichromatischen Systems angewendet worden, wo ein früher trichromatisches Auge durch Erkrankung dichromatisch wurde, oder von den beiden Augen desselben Individuum eines dichromatisch, das andre trichromatisch war.

¹ R. SCHELSKE, *Graefe's Archiv für Ophthalmol.* IX (3). S. 39.

² H. AUBERT, *Physiol. Optik.* S. 544.

³ KLUG, *Graefe's Archiv für Ophthalmol.* XXXI (1).

⁴ J. v. KRIES, *Die Gesichtsempfindungen.* Leipzig, 1882. S. 93.

Übrigens will ich dabei bemerken, daß ich diesen Umstand nicht für beweisend für die genannte Hypothese des Übergangs einer lichtempfindlichen Endsubstanz in eine andere halte, obgleich die Thatsachen sich so am leichtesten erklären lassen. Denn auch wenn eine der Grundempfindungen fehlte, würden wir lernen, welche Empfindungen in den peripherischen Theilen dem häufigsten und intensivsten Lichteindrucke, der Farbe der am hellsten erleuchteten Körper entsprechen. Dieser verkündet uns objectives Weiß: was wir davon unterscheiden können, würde dann nach der Art seines Unterschiedes von der dem Weiß entsprechenden Empfindung abgeschätzt werden. Wenn uns also eine Grundempfindung z. B. Roth, fehlt, so deuten wir den Rest wahrnehmbarer Farben als Farben einer Linie, die im Farbendreieck durch den Ort des Weiß parallel der Verbindungslinie der beiden noch erhaltenen Grundfarben gelegt ist. Diese würde, wenn Roth fehlte, von Gelb durch Weiß zu Blau gehen.

Da wir überhaupt im Stande sind, den Unterschied des dichromatischen Farbensehens in der Peripherie unserer Netzhaut mit dem trichromatischen der Mitte zu übersehen, und er durch Jahrtausende übersehen worden ist, bis die physiologische Beobachtung besonders auf diesen Punkt gerichtet wurde, können wir daran ermesen, bis zu welchem Grade unsere auf die Beurtheilung der Körperfarben gerichtete Einübung bei der Abschätzung qualitativer Unterschiede der gesehenen Objecte mitwirkt.

Farben kleiner Felder.

300 Schliesslich muß noch erwähnt werden, daß Farben vom Auge nur dann unterschieden werden, wenn sie ein Feld von gewisser Ausdehnung bedecken, und eine gewisse Menge farbigen Lichts in das Auge fällt. Je weiter das farbige Feld nach den Grenzen des Gesichtsfeldes und der Netzhaut hin liegt, desto größer muß es sein, damit seine Farbe noch erkannt werden könne. Ist das farbige Feld zu klein, so erscheint es auf hellerem Grunde grau oder schwarz, auf dunklerem Grunde grau oder weiß. Indessen kann auch die Farbe von unendlich kleinen Feldern erkannt werden, wenn die Menge des Lichts, die sie aussenden, endlich ist, wie z. B. bei den Fixsternen, deren Farben wir unterscheiden. Nach den Versuchen von AUBERT¹ erschien ein Quadrat von 1 Millimeter Seite, wenn es blau auf weißem Grunde war, in 10 Fufs Entfernung schwarz, ebenso ein rothes in 20 Fufs Entfernung. Ein gelbes und grünes verschwammen schon in 12 Fufs vollständig mit dem weißen Grunde. Auf schwarzem Grunde dagegen erschienen das grüne und gelbe Quadratmillimeter in 16 Fufs Entfernung als graue Punkte, das rothe bei 12 Fufs. Blau erschien blau, wenn es überhaupt gesehen wurde.

Nach demselben Beobachter verschwindet die Farbe von farbigen Quadraten in 200 Millimeter Entfernung im Mittel unter folgenden Abweichungswinkeln von der Gesichtslinie:

¹ H. AUBERT, *Graefe's Archiv für Ophthalmologie*. Bd. 3(2).

	Roth.				Blau.				Gelb.				Grün.			
	1.	2.	4.	8.	1.	2.	4.	8.	1.	2.	4.	8.	1.	2.	4.	8.
Seite des Quadrats.....	1.	2.	4.	8.	1.	2.	4.	8.	1.	2.	4.	8.	1.	2.	4.	8.
Weißer Grund.....	16°	19°	26°	37°	15°	22°	36°	49°	21°	31°	44°		20°	36°	44°	50°
Schwarzer Grund.....	30	32	42	53	36	48	54	72	30	32	49	47°	24	27	35	45
Mittel.....	23	26	34	45	26	35	45	61	26	32	42		22	32	40	47

Dabei ist zu bemerken, daß der Farbenton desto eher verschwindet, je stärker die Verschiedenheit der Helligkeit von der des Grundes ist, woher die Unterschiede zwischen den Resultaten auf weißem und schwarzem Grunde rühren. Das Blau war die dunkelste der von AUBERT benutzten Farben.

Ehe die Farben ganz verschwinden, erleiden sie noch eine ähnliche Änderung des Farbentons, wie bei der Vermehrung ihrer Intensität. Roth und Grün werden nämlich sehr deutlich Gelb, Blau scheint direct in Grauweiß überzugehen. Ich komme auf diese Erscheinungen noch einmal im nächsten Paragraphen zurück.

Grenzen der Genauigkeit für das Farbenmischungsgesetz.

Das Gesetz der ungestörten Superposition der Elementarerregungen ist offenbar ein verhältnißmäßig recht genauer Ausdruck eines breiten Gebietes von Erscheinungen, und hatte sich den älteren Beobachtungsmethoden gegenüber vollkommen bewährt, namentlich wo man die matteren Farbengegenstände und geringen Lichtstärken von Pigmentfarben für die Versuche benutzte. Kleinere Abweichungen sind bei diesen schon deshalb nicht sicher festzustellen, weil kleine Änderungen in der Mischung des beleuchtenden Lichtes die Farbengleichungen etwas zu verändern im Stande sind. Die neueren genau messenden Versuche mit Spectralfarben scheinen aber doch zu zeigen, daß die Genauigkeit von NEWTON'S Gesetz keine unbeschränkte ist.

Die ersten Beobachtungen dieser Art sind an Dichromaten gemacht worden, von PREYER¹, A. KÖNIG², VAN DER WEYDE³. Sie ergaben, daß die bei schwächerer Beleuchtung weiß erscheinende Farbe des Spectrum bei größerer Helligkeit gelblicher erschien, und durch eine bläulichere ersetzt werden mußte, um dem Weiß des beleuchteten Lichtes gleich zu bleiben. Farbengleichungen zwischen einer einfachen mittleren Spectralfarbe, und einem Gemisch von zwei andern hat dann Herr E. BRODHUN⁴ (grünblind) unter Herrn A. KÖNIG'S Leitung aufgestellt, und dabei ebenfalls gefunden, daß bei steigender Intensität mehr von der wärmeren Farbe genommen

¹ W. PREYER, *Pflueger's Archiv* Bd. 25. S. 31. 1881.

² A. KÖNIG, *Wiedemann's Annalen* Bd. 22. S. 561. 1884. — *Graefe's Archiv für Ophthalmol.* Bd. 30. (2). S. 155. 1884.

³ A. J. VAN DER WEYDE, *Onderzoekingen. Physiol. Labor. Utrecht. R.* (3.) D. VII. Bl. 1. 1881.

⁴ A. KÖNIG, *Sitz.-Berichte d. Akademie in Berlin*, 1887, 31. März. S. 311.

werden mußte, um die Gleichung wiederherzustellen. Die Änderungen der Lichtintensität wurden dabei in verschiedener Weise vorgenommen, um jede Änderung der Wellenlänge der verglichenen Farben auszuschließen, theils durch geänderte Stellung der Nicols, theils durch Erweiterung des Ocularspalts, theils durch die der Collimatorspalten. Diese Erweiterung der Spalten erfolgte, der Einrichtung des Apparats gemäß, immer gleichmäßig nach beiden Seiten.

Andeutungen solcher Änderungen sind auch für trichromatische Augen wahrgenommen worden von Herrn ALBERT² und A. KÖNIG³. Letzterer fand aber nur, daß die Unterschiede der Sättigung zwischen ungemischten oder fast ungemischten gelben Farbentönen und gemischten deutlicher bei schwacher Helligkeit erscheinen.

Bei der in § 18 erörterten grossen Veränderlichkeit der lichtempfindlichen Substanzen der Netzhaut erscheint eine Änderung ihrer photochemischen Zersetzbarkeit den verschiedenen Wellenlängen gegenüber nicht unmöglich. Machen wir die einfachste Annahme, auf die uns schon die Existenz der anomalen Trichromasie geführt hat, daß eine Mischung zweier photochemisch verschiedener Stoffe an den Retinalenden der Sehnervenfasern vorkommen könne, und daß von diesen beiden die eine durch Licht schneller zerstört, beziehlich langsamer hergestellt werde, so würde intensives Licht das Mischungsverhältniß und damit auch die Form der Empfindlichkeitscurve ändern können. Gerade bei Dichromaten, bei denen die eine Curve schon geändert ist, und Uebergänge zwischen den beiden extremen Formen vorzukommen scheinen, wäre eine solche grössere Veränderlichkeit der Mischung wahrscheinlicher.

Man könnte sich etwa denken, daß in einer Gruppe von Netzhauptelemenenten des normalen Auges grünempfindlicher Stoff in den rothempfindlichen regelmäßig übergeführt werde, daß in einzelnen Individuen dies nicht vollständig oder gar nicht gelingt. Diese würden rothblind sein. Wenn in anderen Individuen auch die andere Gruppe von Netzhauptelemenenten, die gegen die Umwandlung geschützt bleiben sollten, vollständig oder unvollständig in die Veränderung hineingezogen würde, so würde Grünblindheit oder anomale Trichromasie entstehen. Wenn starke Lichtwirkung einen kleinen Theil der rothempfindlichen Substanz zunächst in die grünempfindliche zurückführte, ehe diese weiter zerstört wird, würde das Maximum der Empfindlichkeit sich wieder dem Grün nähern, und dadurch der neutrale Punkt des dichromatischen Spectrum gegen das Blau hin verschoben werden.

Ich gebe diese ganz hypothetische Betrachtung hier nur, um zu zeigen, daß die angeführten Thatsachen durchaus nicht NEWTON's Gesetz aufheben; sie würden nur zeigen, daß dasselbe, ähnlich sehr vielen anderen Naturgesetzen, eine erste immerhin sehr gute und innerhalb weiter Grenzen ausreichende Annäherung an die volle Wahrheit giebt.

E. HERING's Farbentheorie.

Diese viel besprochene Theorie ist eine Modification von YOUNG's Theorie, welche durch die Wahl anderer Grundempfindungen sich dem, was sie für unmittelbare Thatsachen der inneren Beobachtung ansehen zu müssen glaubt, besser anzu-

² E. ALBERT, *Wiedeman's Annalen*. Bd. XVI. S. 129. 1882.

³ A. KÖNIG *Sitz.-Ber. d. Berl. Akad.* 1887. 31. März S. 317.

schließen versucht. Es werden darin auch drei Elementarempfindungen angenommen, die an physiologische Vorgänge in drei verschiedenen Theilen des Nervenapparats oder der „Sehsubstanz“ gebunden sind. Mindestens zwei von diesen physiologischen Processen sollen aber den Gegensatz von positiv und negativ zeigen. Die eine dieser Sehsubstanzen würde im Zustande der Erregung die Empfindung des Weiß geben, in dem der Ruhe die des Schwarz, die zweite die beiden als „Gegenfarben“ bezeichneten Empfindungen das Blau und Gelb, die dritte das zweite Paar der Gegenfarben Roth und Grün. Mit Roth bezeichnet aber Herr HERING eine Farbe, die bisher Purpur genannt wurde, die Complementärfarbe des Grünen. Man kann Elementarerregungen (das Wort in dem oben von uns definirten Sinne gebraucht) angeben, welche diesen HERING'schen Elementarempfindungen entsprächen, und aus denen sich alle anderen zusammensetzen lassen würden.

Wenn man LAMBERT's Farbenpyramide zwischen drei rechtwinkeligen Coordinaten construirt denkt, so würde die die Weißempfindung darstellende Coordinate w etwa der Axenrichtung der Pyramide entsprechen, wie schon oben erörtert:

$$u = \sqrt{\frac{1}{3}} [x + y + z]$$

Die zweite Richtung, die den Gegenfarben Roth, Grün entspricht, würde in eine durch die Axe des Weiß und des Grün gelegte Ebene fallen, die dritte in eine senkrecht gegen diese durch die Axe des Weiß gelegte. Die Entfernung von der Roth-Weiß-Ebene wäre in diesem Coordinatensystem

$$v = \sqrt{\frac{1}{2}} (x - z)$$

Positives v würde bei positivem Werthe der Wurzel der Empfindung Gelb, negatives v dem Blau entsprechen. Die Entfernung von der Grün-Weiß-Ebene wäre

$$w = \frac{1}{\sqrt{6}} [x - 2y + z]$$

So wären drei lineare Functionen der Elementarempfindungen der YOUNG'schen Theorie gewonnen, welche selbst als solche gebraucht werden könnten, und der Richtung nach den von Herrn HERING verlangten Elementarempfindungen entsprechen würden. Bei positivem Werthe der Wurzeln würde u der Weißempfindung, positives v dem Gelb, positives w dem Purpurroth entsprechen, negatives v dem Blau, negatives w dem Grünen.

Diese Gleichungen gebe ich hier nur deshalb in so bestimmter Form, um an feste Vorstellungen anzuknüpfen, da die Willkürlichkeit der zu wählenden Grundfarben x, y, z übrigens hinreichende Breite der Veränderlichkeit gewähren würde, um noch recht verschiedene Deutungen der Coordinaten u, v, w im Sinne der HERING'schen Ansicht zuzulassen. Die Werthe der Coefficienten sind so gewählt, daß die u, v, w in demselben Längenmaßstab zu messen sind, wie die x, y, z .

Wenn wir für die Werthe der x, y, z nur positive Grössen zulassen, ergibt sich zunächst aus dem Werthe von w , daß jede Art von Licht die Weißempfindung in positivem Sinne erregen muß, daß im Gegentheil keinerlei Art von objectivem

Licht die Empfindung einer der HERING'schen Gegenfarben rein erregen kann, daß also diese Empfindungen der reinen unvermischten Gegenfarben solche sind, die wir nie gehabt haben, noch jemals werden haben können, und die durch einen viel breiteren unvermittelten Sprung von Allem, was wir je empfunden haben, getrennt sind, als die von der YOUNG'schen Theorie geforderten Farbenempfindungen, welche etwas über das Gebiet der objectiven Farben hinausreichen. Letzteren können wir, wie wir in der Lehre von den Nachbildern sehen werden, durch besondere Behandlung einzelner Netzhautstellen uns wenigstens annähern, während diese selben Methoden das Gegentheil des nach der HERING'schen Theorie zu erwartenden Erfolgs hervorruft, wenn man sich seinen hypothetischen reinen Farbenempfindungen zu nähern versuchen möchte.

Ganz in Übereinstimmung mit meiner in diesen Gleichungen dargestellten kurzen Zusammenfassung seiner Theorie nimmt denn auch Herr HERING an, daß weißes Licht nur die weißempfindende Sehsubstanz erregt, und diese immer in positive Thätigkeit versetzt, gelbes Licht daneben auch die Blau-Gelb empfindende Substanz erregt, blaues Licht dieselbe ebenfalls, aber in entgegengesetzter Weise. Wenn beide Lichter sich gerade im Gleichgewicht halten, haben sie dagegen keine Wirkung auf die blaugelbe Sehsubstanz¹. Gleiches gilt für die Erregungen der rothgrünen Sehsubstanz durch rothes und grünes Licht.

Die Empfindung der Helligkeit identificirt Herr HERING mit der Weißempfindung. Er behauptet deshalb folgerichtig, daß mit der reinen Blau- oder Gelbempfindung keine Empfindung von Helligkeit verbunden sei. Ich muß gestehen, daß ich persönlich mir keine Anschauung bilden kann von einer Farbe, die nicht irgend einen Grad von geringerer oder größerer Helligkeit hätte, und finde deshalb eine solche Abstraction nicht recht verträglich mit einem System, welches sich in letzter Instanz auf die unmittelbaren Aussagen innerer Anschauung berufen zu dürfen glaubt, und sich dadurch den andern überlegen meint.

Intensitätsunterschiede indessen in den reinen Empfindungen der Gegenfarben müssen vorkommen können, wenn diese auch nicht Empfindungen verschiedener Helligkeit sind. Bei der Vergleichung gleich hellen gesättigten und weißlichen Blaus würde nach HERING die Weißempfindung in beiden gleiche Intensität haben, die Blauempfindung aber größere in dem gesättigten Blau.

Als die physiologische Grundlage der entgegengesetzten Empfindungen betrachtet Herr HERING die entgegengesetzten Prozesse des organischen Stoffwechsels, die Zersetzung der organischen Masse bei ihrer Thätigkeit (*Dissimilierung*) und die Wiederherstellung (*Assimilierung*) derselben unter dem Einfluß des Blutlaufs und des im Blute aufgespeicherten, schwach gebundenen Sauerstoffs. Welche Farbe übrigens in der blaugelb, beziehlich rothgrün empfindenden Substanzen der Assimilierung, welche der Dissimilierung entspreche, bleibt unentschieden. Die physiologischen Unwahrscheinlichkeiten dieser Annahme sind zum Theil schon oben erwähnt, theils werden wir in der Lehre von den Nachbildern darauf zurückkommen.

Diese Annahme doppelter Nervenwirkung hat Herr E. HERING ursprünglich auch auf die weiß-schwarz empfindende Sehsubstanz übertragen. Indessen bleibt er hier insofern mit der bisherigen Nervenphysiologie in Übereinstimmung, als in dieser Substanz

¹ Es war dies ein Punkt, den Herr HERING in den älteren Darstellungen seines Systems zweifelhaft gelassen hatte, so daß nicht klar war, ob er drei oder sechs unabhängige Variable zählte; nach den neuerdings von ihm gegebenen Erklärungen darf das im Text Gesagte wohl als zugegeben betrachtet werden.

alles Licht nur Dissimilierung und die Empfindung von Weiß erregen soll, andererseits Mangel des Lichts nur Assimilierung d. h. Wiederherstellung der Erregbarkeit. Daß während dieses letzteren Vorganges eine Empfindung der Dunkelheit wirklich besteht, darüber sind wir alle einig. Hier ist die Differenz nur eine theoretische. Nach der älteren und auch von mir vertretenen Meinung, müssen wir, um wahrzunehmen, daß es zur Zeit in einer bestimmten Richtung des Sehfeldes hell sei, auch unterscheiden können, daß zu anderer Zeit diese Wahrnehmung fehle. Diese Wahrnehmung, daß eine Empfindung, die da sein könnte, zur Zeit nicht da sei, enthält immerhin eine Aussage über den jetzigen Zustand des Organs, der von allen Empfindungen irgend welches einfallenden Lichtes unterschieden ist, und in diesem Sinne bezeichnen wir ihn auch als eine Empfindung, nämlich die von „Dunkel“. Herr HERING glaubt dagegen, daß auch die Empfindung von Schwarz ihren besonderen physiologischen Erregungsgrund haben müsse, und sucht ihn in der Assimilierung innerhalb der weiß-schwarzen Sehsubstanz.

Aus der gegebenen Darstellung wird der Leser zunächst entnehmen, daß Herrn HERING'S Theorie, wenn man über ihre physiologischen Bedenken fortsehen will, alle bisher besprochenen Thatsachen der Farbmischung ebenso gut, aber auch nicht besser zu erklären vermag, wie TH. YOUNG'S Theorie. Sie ist ja von dieser nur durch die besondere Wahl der Elementarerregungen unterschieden und diese ist, wie wir erörtert, wenn man negative Werthe derselben zuläßt, den bisher besprochenen Thatsachen gegenüber so gleichgültig, wie die Wahl der Coordinatenrichtungen bei einem Problem der analytischen Stereometrie.

Was Herr E. HERING gegen TH. YOUNG'S Theorie einzuwenden hat, reducirt sich in seiner neuesten Darstellung¹ auf Folgendes: „An der Theorie von YOUNG-HELMHOLTZ wirkt von vornherein die Annahme der drei farbigen Grundempfindungen abstoßend, weil dieselben gar nicht aufzeigbar sind (?), und bekanntlich je nach Bedürfnis (?) bald diese, bald jene Farbentöne als diesen Grundempfindungen entsprechend angenommen werden.“ Hierzu ist schon bemerkt, daß man sich den Grundempfindungen der YOUNG'schen Theorie, soweit sie nicht zu den objectiven Farben gehören, in der That durch die Methode partieller Netzhautermüdung viel mehr annähern kann, als den reinen HERING'schen Gegenfarben. Dann haben allerdings verschiedene Bearbeiter der YOUNG'schen Theorie verschiedene Annahmen über die drei Grundfarben gemacht und verschiedenes Gewicht auf Thatsachen gelegt, die auf die Entscheidung hindeuteten; daß aber nach Bedürfnis gewechselt worden sei, ist eine ungerechtfertigte Verdächtigung. Vorhandene Zweifel einzugestehen ist jedenfalls besser als sich in dogmatischer Sicherheit wiegen.

Herr HERING fährt fort: „Wenn die den drei Urvalenzen entsprechenden Erregungen eine physiologisch so ausgezeichnete Stellung einnehmen würden, so sollte man doch meinen, daß auch die zugehörigen Empfindungen etwas Besonderes haben müssten.“ Das haben sie, wie ich meine, in der hervortretenden Gluth der Farbensättigung, wofür wiederum die Theorie der Gegenfarben keinen Erklärungsgrund giebt.

Weiter: „Gelb macht z. B. viel mehr den Eindruck einer einfachen oder Grundempfindung als Violet; und doch soll letzteres eine Grundempfindung, ersteres aber ein Gemisch aus gleichzeitiger Roth- und Grünempfindung, oder wenigstens irgendwie

¹ E. HERING, *Über Newton's Gesetz der Farbmischung* (Jahrbuch „Lotos“, Bd. VII. Prag. 1887.) (S. 70 der Separatausgabe.)

das Ergebniss des gleichzeitigen Bestehens der diesen beiden Grundempfindungen entsprechenden Principalerregungen sein.“ Welch trügerisches Mittel die angebliche innere Anschauung in solchen Dingen ist, zeigt am besten das Beispiel von zwei solchen Autoritäten, wie GOETHE und Sir D. BREWSTER, die beide glaubten, im Grün das Blau und Gelb zu sehen, aus denen sie es, getäuscht durch die Erfahrungen an Malerfarben, gemischt glaubten.

Weiter: „HELMHOLTZ sagt ganz richtig: »Soviel ich sehe, giebt es bisher kein anderes Mittel, eine der Grundfarben zu bestimmen, als die Untersuchung der Farbenblinden.« Dies Mittel hat sich bekanntlich für die YOUNG'sche Theorie nicht bewährt.“ Das wäre, selbst wenn es richtig wäre, immerhin kein Grund gegen die Zulässigkeit der Theorie. Gerade die Theorie der Farbenblindheit scheint, wie wir noch sehen werden, ein besonders schweres Kreuz der HERING'schen Theorie werden zu sollen, während die bisher genau constatirten Thatsachen der Rothblindheit und Grünblindheit sich verhältnißmäfsig leicht und vollständig unter die beiden Erklärungsformen der YOUNG'schen Theorie einreihen lassen.

Endlich: „Auch die drei Faserarten, welche übrigens, wie HELMHOLTZ selbst schon bemerkte, für die Theorie nicht unentbehrlich sind, wurden bisher vergebens gesucht.“ Dies trifft HERING's Theorie genau ebenso, wie YOUNG's.

Der Leser wird sich leicht überzeugen, dafs diese Einwendungen ohne alles Gewicht sind.

Dazu kommt nun noch eine Reihe von angeblichen Widersprüchen und Ungenauigkeiten, die er in GRASSMANN's und meiner Erklärung von NEWTON's Farbmischungsgesetz, zum Theil auch bei Herrn v. KRIES entdeckt haben will (l. c. § 34), die, auch wenn sie begründet wären, keineswegs gegen YOUNG's Theorie sprechen würden sondern nur gegen deren Interpreten. Hier aber scheint mir die Unklarheit auf Seiten unseres Gegners zu liegen.

Diese Einwürfe gehen davon aus, dafs bei Mischungen einer gesättigten Farbe mit Weifs zuweilen auch der Farbenton der Mischfarbe geändert erscheine. Rothweifs z. B. mehr dem Rosenroth, Blauweifs dem Violet sich nähere, und dafs andererseits bei grosser Lichtintensität die Spectralfarben in der oben beschriebenen Weise theils weifslicher, theils gelblicher erscheinen.

Wenn man aber von denjenigen Elementarerregungen redet, die auf Grund von NEWTON's Gesetz einzig mit Sicherheit diesen Namen verdienen, da sie ungestört neben einander bestehen können: so ist nur diejenige Empfindung sicher als entsprechend der Coexistenz einer weissen und einer rothen Elementarempfindung anzuerkennen, welche durch gleichzeitige Einwirkung des entsprechenden weissen und rothen Lichts zu Stande kommt. Der Begriff der Elementarerregung ist hierbei natürlich nicht in dem engeren Sinne von YOUNG's Hypothese, sondern in dem oben erörterten weiteren Sinne genommen, wo darunter auch lineare Verbindungen von Grundempfindungen verstanden sind. Von anderen als diesen superponirbaren Elementen im Gebiete der Farbeempfindung wissen wir überhaupt nichts; und wollen wir einen festen Sinn für unsere Farbenbezeichnungen behalten, so müssen wir diese so durchführen, wie ich oben auseinandergesetzt, und wie ich es in meinen früheren Schriften schon immer gethan, wie es auch H. GRASSMANN jedenfalls gemeint hat.

Dabei können nun abweichende Schätzungen des Unterschieds zwischen einer weifslichen und mehreren gesättigten Farben vorkommen, welche nicht immer die wirklich mit Weifs gemischte Farbe als die der weifslichen Farbe ähnlichste erscheinen lassen; und wenn man ohne genügende Erfahrung über Farbmischung

nur nach der Ähnlichkeit der Empfindung schätzen soll, welche Farbe mit Weiß gemischt sei, kann man sich irren. Wir werden darüber bei den Unterschiedsempfindlichkeiten zu handeln haben. Weiter zeigt es sich, daß die Farben von sehr hoher Lichtstärke kleinere Unterschiede in der Empfindung zeigen, als die mittlerer Lichtstärke, wofür wir ebenfalls den Grund, und zwar aus YOUNG'S Theorie nachweisen werden. Sie erscheinen also einander und dem Weiß ähnlicher; das drücken wir dadurch aus, daß wir sie weißlicher nennen, als die lichtschwächeren Farben derselben Art. Ich habe aber schon oben erwähnt, daß die Unterschiedsempfindungen nicht mehr in die Reihe der reinen Superpositionerscheinungen gehören, wie sich im nächsten Paragraphen zeigen wird.

Dessen ungeachtet sind die lichtstarken einfachen Farben immer noch so gesättigt, als Farben ihrer Lichtstärke sein können, und es ist nicht nöthig, *oder wenn man festen Wortsinn behalten will, nicht zulässig, sie als weniger gesättigt zu bezeichnen. Vielmehr ist nur zu sagen, daß die Empfindung für Unterschiede des Farbentons bei hoher Lichtstärke ebenso undeutlicher wird, wie dies für die verschiedenen Grade der Lichtstärke selbst schon längst constatirt ist.

Wenn die Weißempfindung, und die Empfindungen der Gegenfarben in der HERING'schen Theorie wirklich den Namen von Elementen oder Bestandtheilen der Empfindung verdienen sollen, was er doch offenbar meint, da er ihnen einzelne besondere „Sehsubstanzen“ anweist, so muß er sie entweder als die aus dem additiven Gesetz folgenden Elementarerregungen anerkennen, oder es sind ganz hypothetische Vorgänge, von deren gesonderter Existenz und Superponirbarkeit niemand etwas weiß. Dann bedeutet seine Polemik gegen GRASSMANN und mich nur, daß wir zu einer Zeit, wo seine Hypothese noch nicht erfunden war, nicht im Sinne seiner Hypothese geredet haben.

Die Vorzüge seiner eigenen Hypothese scheint Herr HERING hauptsächlich darin zu suchen, daß sie sich dem in der Sprache fixirten System von Namen, die sich, wie ich oben erörtert, wesentlich auf das System der Körperfarben beziehen, näher anschließt. Diesem Umstande verdankt sie in der That eine gewisse Gemeinfalslichkeit und Popularität. Er selbst nimmt an, daß diese Namen einer unmittelbaren Wahrnehmung der einfachen Empfindungselemente durch eine Art innerer Anschauung entsprungen seien, und glaubt durch diese auch sehr sichere unmittelbare Kenntniß der reinen Rothempfindung, Weißempfindung u. s. w. zu haben.

In seiner Veröffentlichung von 1887 hat er sogar die Möglichkeit discutirt, statt drei oder sechs einfacher Empfindungsprocesse deren noch mehr, vielleicht unendlich viele anzunehmen und eine entsprechende Menge von „Urvalenzen“ für die einzelnen objectiven Lichtarten. Die geometrischen Darstellungen solcher Wirkungen giebt er dabei immer in solcher Weise, daß thatsächlich alle diese Valenzen von drei unabhängigen Variablen abhängen. Dagegen über diese unabhängigen Variablen, die eigentlich das Wichtigste für den ganzen Zusammenhang des Gebietes sind, giebt er so gut wie keinen Aufschluß, er sucht sie nur möglichst aus der physiologischen Sphäre zu entfernen. Ich selbst weiß mir diese ganze Reihe von Vorstellungen nur etwa so zu interpretiren, daß eine beliebige Anzahl von „Sehsubstanzen“ im Gehirn angenommen werden könnte, deren Erregungsstärke für jede eine besondere Funktion der drei Elementarerregungen wäre, jede unabhängig von den Erregungen der übrigen Sehsubstanzen, und jede für sich auch directer Wahrnehmung durch das Bewußtsein zugänglich.

Ich glaube nicht, daß es in diesem Buche nöthig ist, sich eingehender mit so hypothetischen Ansichten zu beschäftigen.

Für die Farbenblindheit namentlich beansprucht Herr HERING den Ruhm, das Verständniß derselben eröffnet zu haben.

Alle Dichromasie sucht er auf ein einziges Schema zu reduciren; die roth-grüne Sehsubstanz soll unempfindlich geworden sein. Die Unterschiede zwischen Rothblinden und Grünblinden sucht er auf verschiedene Färbungen der Augenmedien, theils des gelben Flecks der Netzhaut, theils der Krystalllinse zurückzuführen. Die letzteren kommen höchstens bei kranken oder sehr alten Leuten vor, und sind auch da wohl bei übrigens brauchbaren Augen nie von der Stärke, daß sie erhebliche Abweichungen in der Helligkeit verschiedener Theile des Spectrum hervorbringen könnten.

Die Färbung des gelben Flecks der Netzhaut macht sich in einem sehr beschränkten, aber allerdings wichtigen Theile des Sehfeldes geltend, und in einem schmalen Bande des Spectrum, wie oben bemerkt ist. Die wichtigsten Beobachtungen über die Abhängigkeit des Rothwerths und des Grünwerths von der Wellenlänge beziehen sich dagegen auf Farben, die der Absorption durch das gelbe Pigment nicht in merklichem Grade unterliegen. Im ganzen macht sich deshalb diese Pigmentirung auch nur bei solchen Versuchen subjectiv geltend, wo die Strahlen aus der Nähe der Linie *F* eine hervortretende Rolle spielen, wie bei der oben S. 354 erwähnten Mischung dieses Blaus mit Roth, welche, wenn sie im Fixationspunkte weiß erscheint, schon in geringer Entfernung von demselben das Blau überwiegend zeigt. Es erscheint schon nach den bis jetzt vorliegenden Thatsachen sehr unwahrscheinlich, daß sich die HERING'sche Theorie der Dichromasie durchführen lasse. Indessen sind weitere Beobachtungen in dieser Richtung doch noch wünschenswerth. Der Einfluß, den die Färbung des gelben Flecks im individuellen Auge hat, wird sich durch Vergleichung von Farbmischungen auf und dicht neben dem Centrum des Sehfeldes abschätzen lassen, und sicher wird sich constatiren lassen, wo ein solcher Einfluß besteht, wo nicht.

306

Die Lehre von der Farbmischung ging von den Erfahrungen der Maler über Mischung der Pigmente aus. Schon PLINIUS erwähnt, daß die älteren griechischen Maler mit vier Farbstoffen alles darzustellen gewußt hätten, während man zu seiner Zeit deren viel mehr besäße, und doch nicht so viel wie jene leistete. Und doch ist auch in dem berühmten Gemälde der Aldobrandischen Hochzeit aus der Römerzeit der Aufwand von Farbstoffen sehr klein, wie DAVY's chemische Untersuchungen zeigten.¹ LEONARDO DA VINCI nennt außer Schwarz und Weiß, welche jedoch nicht im eigentlichen Sinne Farben wären, vier einfache Farben, nämlich Gelb, Grün, Blau und Roth; sonst fordert er noch an einer anderen Stelle für die Malerei Orange (*lionato*) und Violet (*morello, cioè pavonazzo*). Daß LEONARDO das Grün stets als einfache Farbe zählt, obgleich er weiß, daß es gemischt werden kann, widerspricht eigentlich seiner Definition der einfachen Farben als solcher, die nicht gemischt werden können. Sollte er bemerkt haben, daß das ungemischte Grün viel lebhafter ist als das gemischte? Die nachher gewöhnlich angenommenen drei Grundfarben Roth, Gelb und Blau findet man schon vor NEWTON's Untersuchungen, als eine damals allgemein anerkannte wissenschaftliche Thatsache erwähnt in einem Versuch zur Classification der Farben und Farbstoffe von WALLER. Darin, daß man drei Grundfarben ausreichend findet, liegt schon die Anerkennung der

¹ H. DAVY, *Gilbert's Annalen*. LH, 1.

Thatsache, daß die Beschaffenheit des farbigen Lichtes eine Function nur dreier Variablen ist, auf die Wahl der Grundfarben, welche erst viel später WÜNSCH und THOMAS YOUNG zu ändern suchten, hatten die Erfahrungen über gemischte Pigmente den entschiedensten Einfluß. Man meint aus Gelb und Blau Grün zusammensetzen zu können. Das ist richtig, wenn man es auf die Pigmente bezieht, aber nicht für farbiges Licht.

NEWTON setzte zuerst farbiges Licht zusammen, und zwar das des prismatischen Spectrum, benutzte aber daneben für Aufstellung der Regel der Farbenmischung die Mischung farbiger Pulver, und legte auf die Abweichungen zwischen beiden, die ihm nicht ganz entgangen zu sein scheinen, kein großes Gewicht, da ihm die experimentellen Hilfsmittel noch fehlten, die Sache genauer zu verfolgen. Er erwähnt, daß aus *subflavum* und *cyaneum* (d. h. gründlich Gelb und Cyanblau) nur ein weißliches Grün zu erzeugen sei. NEWTON stellte auch zuerst einen genaueren Ausdruck des Gesetzes der Farbenmischung hin, indem er es auf die oben besprochene graphische Darstellung und Schwerpunktconstructions zurückführte. Sein Gesetz entsprach den vorliegenden experimentellen Erfahrungen, eine genauere Prüfung hat er nicht versucht. Seine Darstellung des Systems der Farben auf einem Kreise war eine Erweiterung des Systems dreier objectiver Grundfarben; über das Ungenügende des letzteren Systems spricht er sich aber nirgends aus.

307

Dagegen kehrten die späteren Physiker bei ihren Versuchen, das System der Farben zu ordnen, meist zum System der drei Grundfarben zurück, so LE BLOND 1735, DU FAY 1737, TOBIAS MAYER 1758, J. H. LAMBERT 1772, D. R. HAY, J. D. FORBES. Ihre Farbensysteme sind praktisch ausgeführt meist in der Weise, daß sie bestimmte Pigmente nach bestimmten Gewichtsverhältnissen mischten. MAYER brauchte Zinnober, Königsgelb, (chromsaures Bleioxyd) und Bergblau (Kobaltglas), LAMBERT Carmin, Gummigutt, Berlinerblau (Eisencyanürcyanid). Letzterer bestimmte auch die Sättigungsverhältnisse dieser Farbstoffe, indem er die Gewichtsmengen bestimmte, in denen je zwei gemischt werden müssen, um eine Mischfarbe hervorzubringen, welche gleich weit von den Farben ihrer beiden Bestandtheile entfernt sei. Er mußte nehmen von Carmin 1 Theil, von Berlinerblau, 3 Theile, von Gummigutt 10 Theile. Letztere Gewichte wählte er dann als Maßeinheiten bei Anfertigung der Mischungen. Übrigens fallen die Mischungen so weit von einander entfernter Farbstoffe immer ziemlich unansehnlich und grau aus.

Neuere Beobachtungen, welche unter Umständen, wo Mischung farbigen Lichts zu erwarten war, von den bisherigen Regeln abweichende Resultate lieferten, machten 1829 PLATEAU am Farbenkreisel, VOLKMANN 1838 an Zerstreuungsbildern, ohne aber dadurch zu einer näheren Untersuchung des Widerspruchs geführt zu werden. Ich selbst wurde durch Versuche über Mischung der Spectralfarben zu der Erkenntniß geführt, daß Mischung des Lichts und Mischung von Pigmenten verschiedene Resultate gebe, und erörterte die Gründe davon. Ich hatte hierbei die Mischung der Spectralfarben mittelst des *v*förmigen Spaltes benutzt und nur aus Gelb und Indigoblau Weiß erhalten, nicht aus irgend welchen anderen Paaren von Spectralfarben. Dies widersprach dem Mischungsgesetz von NEWTON und veranlaßte GRASSMANN zu einer ausführlichen Erörterung der Principien von NEWTON's Mischungsgesetz. Die Untersuchung der gemischten Spectralfarben nach einer besseren Methode, welche ich ausführte, hob die scheinbaren Widersprüche gegen NEWTON's Regel auf, so weit sie sich auf die Anwendbarkeit der Schwerpunktsconstructions beziehen; dagegen mußte ich freilich die Kreisform des Farbenfeldes GRASSMANN gegenüber für unerwiesener erklären. Endlich sind die Principien von NEWTON's Mischungsgesetz experimentell geprüft worden 1857 durch MAXWELL.

TH. YOUNG's Theorie der Farbenempfindungen ist wie so vieles, was dieser bewunderungswürdige Forscher seiner Zeit voraneilend geleistet hatte, unbeachtet liegen geblieben, bis ich selbst und MAXWELL wieder auf sie aufmerksam machten. Man begnügte sich mit der Annahme, daß der Sehnerv verschiedenartiger Empfindungen fähig sei,

ohne weiter nach dem Grunde zu suchen, warum das System dieser Empfindungen eben ein solches sei, wie es das Auge darbietet.

Bald nach der Veröffentlichung der ersten Auflage dieses Buches erschien die
 n Farbentheorie von E. HERING.¹

309

§ 21. Von der Intensität der Lichtempfindung.

Die Intensität des objectiven Lichts ist gleich zu setzen der lebendigen Kraft der Ätherbewegung, und diese bei einfarbigem, geradlinig polarisirtem Lichte proportional dem Quadrate der grössten Geschwindigkeit der Äthertheilchen. Wenn Licht aus verschiedener Quelle oder von verschiedener Polarisationsrichtung zusammentrifft, wird die Gesamt-Intensität gleich der Summe der einzelnen Intensitäten.

Wir wollen zunächst untersuchen, wie die Intensität der Lichtempfindung sich verhält, wenn die Intensität des objectiven Lichts sich verändert, ohne daß die Farbe geändert wird. Wir können diese Verhältnisse an weißem Lichte studiren; einfaches Licht verhält sich nicht wesentlich anders.

Zunächst ist nachzuweisen, daß die kleinsten wahrnehmbaren Abstufungen der Lichtempfindung nicht gleichen Differenzen der objectiven Helligkeit (S. 209) entsprechen. Man beleuchte eine weiße Tafel mit einem schwachen Lichte, welches die Helligkeit h erzeuge, und stelle einen Körper auf, der auf die Tafel einen Schatten wirft, so daß innerhalb der Grenzen des Schattens die Tafel von jenem ersten Lichte nicht getroffen wird. Dann bringe man ein zweites Licht hinzu von der Helligkeit H , welche dadurch verändert werden kann, daß man dies zweite Licht der Tafel nähert und entfernt. Dann ist die objective Helligkeit im Schatten H , außerhalb des Schattens $H + h$. Ist nun die Helligkeit H sehr gering, so wird das Auge den Schatten erkennen, d. h. die Helligkeit H von der $H + h$ unterscheiden. Aber der Versuch lehrt, daß, wie groß auch h sein mag, doch stets eine gröfsere Helligkeit H existirt, bei welcher der Schatten unsichtbar wird, bei welcher die Differenz h der objectiven Helligkeit also nicht mehr eine wahrnehmbare Steigerung der Empfindung hervorbringt.

310

Ein Licht von der Stärke des Mondlichts wirft einen wahrnehmbaren Schatten auf weißes Papier. Bringt man eine gut brennende Lampe nahe an das Blatt, so verschwindet der Schatten. Wiederum verschwindet der Schatten, den das Lampenlicht wirft, wenn man die Sonne auf das Papier scheinen läßt. Ja, die Helligkeit einer Flammenfläche einer gut brennenden Lampe mit ringförmigem Dochte ist für das Auge kaum noch von der doppelten Helligkeit zu unterscheiden. Es sind solche Flammen hinreichend durchsichtig, wie man das leicht erkennt, wenn man ihr lichtschwaches Spiegelbild in einer unbelegten Glastafel betrachtet und dann eine zweite Flamme

¹ E. HERING. *Sitzungsber. der Wiener Akad.* vom 15. Mai 1874.

— *Zur Erklärung der Farbenblindheit.* *Lotos, Neue Folge* I. 1880. Prag.

— *Kritik einer Abhdlg. von Donders.* *Lotos, Neue Folge* II. 1882. Prag.

— *Individuelle Verschiedenheiten des Farbensinnes.* *Lotos, Neue Folge* VI. Prag. 1835.

— *Newton's Gesetz der Farbenmischung.* *Lotos, Neue Folge* Bd. VII. Prag. 1837.

— *Pflüger's Archiv* Bd. XLI S. 20. 1887. Bd. XLII S. 488. 1888.

hinter die erste schiebt. Man erkennt dann die zweite in ihren Umrissen ganz genau. Sieht man aber mit bloßem Auge nach den beiden Flammen hin, so erkennt man die zweite wenigstens durch den hellsten Theil der ersten nicht mehr, oder höchstens nachdem man durch längeres Hinsehen die Intensität der Empfindung abgestumpft hat. Ebenso wenig erkennt man so leicht mit bloßem Auge, daß der Rand der Flammenfläche, wo man der Länge nach durch die glühende Gasschicht hindurchsieht, ein sehr viel intensiveres Licht, als die Mitte hat, wo man die kleinste Tiefe der glühenden Schicht vor sich hat. Auch dies wird ebenfalls leicht sichtbar, wenn man die Flamme in einem unbelegten Glase gespiegelt betrachtet. Dahin gehört ferner auch die Thatsache, daß die Sterne bei Tage verschwinden, daß Bilder hinter einer Glasplatte verschwinden, wenn die Glasplatte spiegelt u. s. w.

Während wir bisher die Differenz der Helligkeit constant erhielten, und nur den absoluten Werth der ganzen Helligkeit veränderten, können wir auch die Differenz in demselben Verhältniß wachsen lassen, wie die Helligkeit wächst. Man bringe auf einer durchsichtigen Glastafel eine Zeichnung mit sehr verdünnter schwarzer Tuschfarbe an, oder lasse sie mit einem schwachen Hauch von Lampenrufs anlaufen, und zeichne darin; oder besser, man suche ein photographisches auf durchsichtigem Glase ausgeführtes Bild, was theils sehr zarte, theils stärkere Schatten hat, und halte eine solche Zeichnung vor einen hellen Grund von immer steigender Helligkeit. Man wird finden, daß bei geringer Helligkeit des Grundes sehr zarte Schatten unsichtbar sind, bei größerer sichtbar werden, dann bei immer steigender Helligkeit eine ziemliche Zeit hindurch ungefähr denselben Grad von Deutlichkeit erhalten, endlich aber wieder anfangen zu verschwinden. Je stärker der Schatten in der Zeichnung ist, desto kleiner ist die Helligkeit, wo er anfängt sichtbar zu werden, und desto größer ist die Helligkeit, welche angewendet werden muß, damit er wieder verschwinde. Nun ist die objective Helligkeit des Schattens um einen ganz bestimmten Theil der ganzen Helligkeit kleiner, als die Helligkeit der lichten Stellen. Nennen wir letztere H , so können wir die Helligkeit des Schattens gleich $(1 - \alpha)H$ setzen, wo α einen für dieselbe Stelle der Zeichnung constanten ächten Bruch bezeichnet, so daß also die Differenz der Helligkeit zwischen der betreffenden Stelle der Zeichnung und dem hellen Grunde, welche αH ist, mit der Helligkeit H gleichzeitig größer und kleiner wird. Trotzdem also bei steigender Helligkeit die Unterschiede der absoluten Helligkeit zwischen den verschiedenen beschatteten Theilen der Zeichnung größer werden, entsprechen diesen Unterschieden nicht mehr wahrnehmbare Unterschiede der Empfindung. Daraus geht also hervor, daß es gewisse mittlere Grade der Lichtstärke geben muß, innerhalb welcher das Auge am empfindlichsten ist für eine Veränderung der Helligkeit um kleine Bruchtheile ihrer Größe. Es sind dies die von uns gewöhnlich beim Lesen, Schreiben, Arbeiten gebrauchten, unserem Auge angenehmsten und bequemsten Grade der Helligkeit. Aber

innerhalb weiter Grenzen, etwa von derjenigen Beleuchtung ab, bei welcher man ohne Schwierigkeit lesen kann, bis etwa zu der Helligkeit einer von den directen Sonnenstrahlen getroffenen weissen Fläche ist die Grösse der Empfindlichkeit nahezu constant, wie sich denn überhaupt der Werth continuirlich veränderlicher Functionen in der Nähe ihres Maximum verhältnissmässig wenig zu verändern pflegt. Es geht dies schon für die gewöhnliche Beobachtung aus dem Umstande hervor, dass man Gemälde und Zeichnungen, welche mannigfaltige Abstufungen des Schattens darbieten, ziemlich gleich gut bei Kerzenlicht und bei starkem Tageslicht erkennt, dass nur ausnahmsweise bei starker Beleuchtung neue Gegenstände und Schattenstufen darauf sichtbar werden, die man nicht schon bei schwacher Beleuchtung gesehen hätte. Ebenso erwähnt schon FECHNER, dass wenn man durch verdunkelnde graue Gläser nach hellen Gegenständen, z. B. dem Himmel mit hellen Wolken hinsieht, dadurch keine Abstufungen des Schattens verschwinden, die man vorher gesehen hätte, oder neu sichtbar werden. In den meisten Fällen ist dies richtig, für sehr zarte Schatten jedoch nicht.

311 Dasselbe ergeben genauer die photometrischen Messungen. Es hat sich bei diesen Messungen im Allgemeinen gezeigt, dass bei sehr verschiedenen Graden der Helligkeit die Differenz der Helligkeit, welche noch unterschieden werden konnte, nahe denselben Bruchtheil der ganzen Helligkeit bildete. Die Grösse dieses Bruchtheils ist von BOUGUER und FECHNER in der Weise aufgesucht worden, dass dieselben eine weisse Tafel mit zwei gleichen Kerzenflammen beleuchteten, und einen Stab davor aufstellten, der nun zwei Schatten auf die Tafel warf. Das eine Licht wurde dann so weit entfernt, bis der entsprechende Schatten aufhörte sichtbar zu sein. Ist a die Entfernung des näheren Lichts von der Tafel, b die Entfernung des entfernteren, so verhält sich die Beleuchtungsstärke der Tafel durch beide Lichter wie $a^2:b^2$. BOUGUER fand, dass das eine Licht etwa 8mal, FECHNER mit Hülfe von VOLKMANN und anderen Beobachtern, dass es ungefähr 10mal so weit, als das andere entfernt sein müsse, damit der Schatten verschwinde, so dass BOUGUER also $\frac{1}{64}$ der Lichtstärke, FECHNER's Freunde dagegen $\frac{1}{100}$ noch unterscheiden konnten. ARAGO bemerkte, dass bei Bewegung des Objects noch feinere Unterschiede erkannt werden konnten, und kam unter günstigsten Bedingungen bis auf $\frac{1}{131}$. MASSON wendete zur Prüfung rotirende weisse Scheiben mit kleinen schwarzen Sektoren an. Er fand, dass bei schwachem Gesicht zuweilen nur Unterschiede von $\frac{1}{50}$ erkannt wurden, bei guten Augen zuweilen aber noch weniger als $\frac{1}{120}$. Indessen erfordern die Messungen mit den rotirenden Scheiben grosse Vorsicht; darüber später mehr. Er fand ausserdem, dass die Grenze der

Empfindlichkeit auch für instantane Beleuchtung durch den elektrischen Funken von der Lichtstärke ziemlich unabhängig ist. Bei dieser Beleuchtung werden nämlich, wenn sie stark genug ist, die schwarzen und weissen Sektoren für einen Augenblick sichtbar. Läßt man nun die rotirende Scheibe dauernd von einer Lampe mit der Helligkeit L beleuchten und dann auch von einem elektrischen Funken mit der Helligkeit l , so hat man für einen Augenblick am Orte der weissen Sektoren die Helligkeit $L + l$, am Orte der schwarzen nur die Helligkeit L , und man wird die Sektoren nur erkennen, wenn $L + l$ von L unterschieden werden kann. Veränderte man die Entfernung beider Lichtquellen von der Scheibe, so mußten L und l proportional verändert werden, um an der Grenze der Empfindlichkeit des Auges zu bleiben, woraus denn folgt, daß dasselbe Gesetz wie für constantes Licht, auch für die Wahrnehmbarkeit instantaner Lichtunterschiede gilt.

FECHNER hat die Thatsache, daß innerhalb eines großen Intervalls der Helligkeit die kleinsten wahrnehmbaren Differenzen der Lichtempfindung (nahehin) constanten Bruchtheilen der Helligkeit entsprechen, zur Aufstellung eines allgemeineren Gesetzes benutzt, welches er als ein psychophysisches bezeichnet, und welches auch in anderen Gebieten der Sinnesempfindungen sich bewährt. So erscheinen uns namentlich Differenzen der Tonhöhe als musikalisch gleich groß, wenn die Differenzen der Schwingungsdauer gleiche Theile der ganzen Schwingungsdauer betragen. Ähnlich verhält es sich ferner nach E. H. WEBER'S Untersuchungen mit unserer Fähigkeit, die Differenzen von Gewichten und Lineargrößen zu erkennen. Wir messen nun die Tonhöhe durch den Logarithmus der Schwingungszahl, so erscheint es passend die Empfindungsstärke ähnlich zu messen, indem wir in diesem wie in jenem Falle gleich deutlich wahrnehmbare Unterschiede dH der Empfindungsstärke E als gleich groß ansehen. Dann wäre also innerhalb weiter Grenzen der objectiven Helligkeit H nahehin

$$dE = A \cdot \frac{dH}{H}$$

wo A eine Constante ist. Daraus folgt durch Integration

$$E = A \cdot \log H + C,$$

wo C eine zweite Constante bezeichnet. Wenn wir für die Helligkeit h die Empfindungsstärke gleich e setzen, wird die letztere Gleichung:

$$E - e = A \cdot \log \frac{H}{h}.$$

FECHNER hat gezeigt, daß diese Art, wie das Auge Helligkeiten mißt, auch bei der Aufstellung der Sterngrößen einen bestimmenden Einfluß geübt hat. Die Größenklassen der Sterne hat man bestimmt nach dem Eindruck, den sie auf das menschliche Auge machen, zunächst ohne photometrische Messungen der objectiven Lichtmenge. Erst in neuerer Zeit sind letztere hinzugekommen, und erlauben nun die objective Lichtmenge mit der ange-

nommenen Größenklasse zu vergleichen. FECHNER hat eine solche Vergleichung nach den photometrischen Bestimmungen von J. HERSCHEL und STEINHEIL ausgeführt, und findet die Größenklasse G ausgedrückt, für HERSCHEL'S Messungen durch die Formel

$$G = 1 - 2,8540 \log H$$

313 für STEINHEIL'S Messungen durch

$$G = 2,3114 - 2,3168 \log H,$$

welche Formeln mit den oben aufgestellten in Übereinstimmung sind, wenn man bemerkt, daß die Größenklassen steigen, wenn die Lichtmengen fallen, und ebenso findet sich sehr genügende Übereinstimmung zwischen den Formeln und den Beobachtungen. Auch für die Messungen von STRUVE hat FECHNER eine hinreichende Übereinstimmung mit seinem Gesetze nachgewiesen. Dasselbe Gesetz ist übrigens auch von BABINET¹ ausgesprochen, welcher die Zahl, die dem Coefficienten von $\log H$ in FECHNER'S Formel entspricht, zu 2,5 angiebt, nach Beobachtungen von JOHNSON und POGSON.

Daß das hier aufgestellte Gesetz für die Empfindungsstärke nicht bei sehr kleinen und nicht bei sehr großen Helligkeiten gilt, erklärt FECHNER durch den Einfluss von störenden Nebenumständen. Bei sehr geringen Helligkeiten muß sich nämlich der Einfluss des subjectiven Eigenlichts des Auges merklich machen. Neben der Reizung durch äußeres Licht ist immer noch eine Reizung durch innere Einflüsse vorhanden, deren Größe wir gleich setzen können der Reizung durch ein Licht von der Helligkeit H_0 . Dann wird also genauer der Ausdruck für die kleinsten wahrnehmbaren Stufen der Empfindungsstärke

$$dE = A \frac{dH}{H + H_0}$$

oder

$$dH = \frac{1}{A} (H + H_0) dE,$$

woraus folgt, daß die Steigerung der Helligkeit etwas größer sein muß, um wahrgenommen zu werden, als wenn H_0 gleich Null wäre, und namentlich wird der Unterschied für kleine Werthe von H bedeutend werden.

n Die Übereinstimmung mit den Beobachtungen wird allerdings durch diese Annahme von FECHNER erheblich verbessert, und läßt sich bis zu viel geringeren Helligkeiten verfolgen, aber vollständig wird sie nicht weder für die höchsten noch für die niedrigsten Helligkeiten. In der That giebt auch die innere Erregung der Netzhaut keine gleichmäßige Lichtempfindung, sondern das sogenannte Eigenlicht der Netzhaut erscheint in ganz dunklem Grunde immer als ein fleckiger, ungleichmäßiger Lichtschimmer, der theils breitere, theils aber auch ganz feinkörnige hellere und dunklere Flecken und

¹ BABINET. *Comptes rendus*. Tome 44. p. 358. 1857.

Zeichnungen zeigt. Ja, was man für gewöhnlich überhaupt von dem Eigenlicht wahrnimmt, sind eigentlich nur diese Differenzen seiner Helligkeit, während die gleichmäßige Empfindung des Grundes, die vielleicht garnicht so schwach ist, nicht wahrgenommen wird, so lange sie nicht anderweitig verändert wird. In dieser Beziehung sind die Erfahrungen über die Verdunkelung des dunkelsten Gesichtsfeldes durch den absteigenden elektrischen Strom (S. 245) von Wichtigkeit. Ich werde weiter unten den Einfluß einer solchen ungleichmäßigen Beleuchtung discutiren. Die Versuche von FECHNER und VOLKMANN, mit Hülfe der besprochenen Form des FECHNER'schen Gesetzes die Intensität des Eigenlichtes zu finden, halte ich für verfrüht. Auch haben sie offenbar viel zu kleine Werthe ergeben.

Die Fleckigkeit des Eigenlichts macht sich auch sehr geltend, wenn man versucht, kleine, durch schwache Beleuchtungsunterschiede hervorgehobene Objecte zu erkennen. Man wird dieselben in vielen Fällen nicht von Flecken des Eigenlichts zu unterscheiden wissen. Hat dagegen das Object bei derselben äußeren Beleuchtung eine gröfsere Ausdehnung im Gesichtsfelde, so wird man auf einer solchen gröfseren Fläche trotz der Flecken leichter erkennen können, dafs ihre mittlere Helligkeit einen kleinen Überschufs über die mittlere Helligkeit des benachbarten Grundes hat, und dafs die scheinbare Lage des helleren Flecks im Raume bei Bewegungen des Auges unverändert bleibt. Gröfsere Objecte erkennt man also bei kleinen Beleuchtungsunterschieden leichter als kleinere. So kann man z. B. bei schwacher Beleuchtung oft genug nicht mehr lesen, trotzdem man den Umrifs der weifsen Seite des Buchs, und vielleicht auch die einzelnen Zeilen ganz wohl erkennt. Ich finde es dann meist möglich, wenigstens die gröbereren Züge des Lichtstaubs, die ich beim Schliefsen der Augen im dunklen Felde vor mir habe, auch auf dem Papiere zu erkennen.

Übrigens ist zu bemerken, dafs die Hypothese von dem netzförmigen Zusammenhange der Nervenenden in der Netzhaut, die ich auf S. 264 erörtert habe, ebenfalls die Wahrnehmung kleiner örtlicher Unterschiede von der Wahrnehmung der Intensitätsdifferenz der Erregungen benachbarter Nervenfasern abhängig macht, und zu dem Schlusse führt, dafs bei abnehmender Empfindlichkeit für Bruchtheile der Lichtintensität auch die Feinheit der Unterscheidung der Örter im Gesichtsfelde beeinträchtigt werden mufs.

Wegen der Existenz des Eigenlichts mufs nun immer eine bestimmte objective Beleuchtungsstärke eintreten, um selbst im Gegensatze gegen einen gänzlich unbeleuchteten Grund überhaupt wahrgenommen zu werden. Noch kleinere Grade der Helligkeit üben keine wahrnehmbare Wirkung auf die Netzhaut aus. Diese kleinste unterscheidbare Beleuchtung hat FECHNER die Reizschwelle genannt. Wahrnehmbar sind nur Helligkeiten, welche über die Reizschwelle hinausgehen.

Die kleine Zunahme der Helligkeit dH dagegen, welche nöthig ist, um

bei der Helligkeit H die erste wahrnehmbare Zunahme dieser Helligkeit zu bewirken, nennt er die Unterschiedschwelle.

314 Die Abweichung von dem Gesetze an der oberen Grenze könnte man mit FECHNER wohl darauf schieben, daß das Organ zu leiden beginnt. Die inneren Veränderungen im Nerven, welche den Eindruck des Reizes auf das Gehirn übertragen, können eben eine bestimmte Größe nicht überschreiten, ohne das Organ zu schädigen, und jeder Wirkung des Reizes ist daher eine obere Grenze gesetzt, welcher ein Maximum der Empfindungsstärke entsprechen muß.

Übrigens ist denn doch zu bemerken, daß diese Umstände, welche es auch sein mögen, die an der oberen und unteren Grenze der Helligkeit die Gültigkeit von FECHNER'S Gesetz stören, auch in den mittleren Graden der Helligkeit ihren Einfluß bei genauer Beobachtung geltend machen, was natürlich nicht verhindert, daß jenes Gesetz als eine erste Annäherung an die Wahrheit stehen bleibt. Allerdings sind die meisten Gemälde, Zeichnungen und Photographien von den gewöhnlich vorkommenden Gegenständen der Darstellung gleich gut bei sehr verschiedenen Graden der Lichtstärke zu erkennen. Aber, wie oben bemerkt, findet man in Photographien Schattenabstufungen, die nur bei einer bestimmten und eng begrenzten Lichtstärke ganz deutlich hervortreten. Dazu gehören namentlich Landschaftsbilder, in denen sehr ferne im Nebel halb verschwimmende Bergketten dargestellt sind, am auffallendsten aber war es mir bei einigen stereoskopischen Photographien von Alpenlandschaften auf Glas, in denen sich Theile der Firnmeere oder ganz mit Schnee bedeckte Bergspitzen zeigen. Solche Schneeflächen sehen bei Lampenlicht oder mäßig starkem Tageslicht wie einförmige weiße Flächen aus, während sie gegen den hellen Himmel gekehrt noch zarte

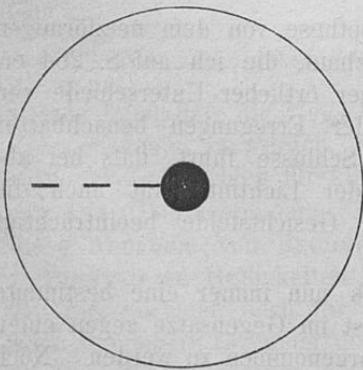


Fig. 153.

Schatten zeigen, die eine Modellirung der weißen Flächen andeuten, und die bei noch stärkerem Lichte wieder verschwinden. In Photographien kann man so zarte Schatten natürlich nur durch Zufall finden, in Gemälden oder Zeichnungen kann man sie nicht erwarten, dagegen geben die rot irenden Scheiben ein leichtes Mittel ab, sehr zarte Schatten zu erzeugen, deren Lichtstärke in jedem gewünschten Verhältniß zur Helligkeit des weißen Grundes steht, wie sie denn auch MASSON schon zu photometrischen Versuchen gebraucht hat. Leicht zu erhalten sind solche Schatten, wenn man der Scheibe die Zeichnung wie in Fig. 153

gibt. Man zieht längs eines oder zweier Radien mit einer Ziehfeder einen unterbrochenen Strich, dessen Theile alle die gleiche Dicke haben. Bei der Rotation der Scheibe geben diese schwarzen Striche graue

Kreise auf der Scheibe. Ist d die Breite der Striche, r die Entfernung eines Punktes eines schwarzen Strichs vom Mittelpunkte der Scheibe, so ist die Helligkeit h des grauen Streifens, der bei der Rotation entsteht, wenn wir die Helligkeit der Scheibe gleich 1 setzen

$$h = 1 - \frac{d}{2r\pi}$$

Die grauen Streifen unterscheiden sich also desto weniger von der Helligkeit der Scheibe, je größer r ist; die inneren sind dunkler, die äusseren heller und man erhält eine Folge sehr zarter Abstufungen. Beim Versuche hat man nur zu untersuchen, wie weit die Ränder der grauen Streifen noch zu erkennen sind. Man erkennt sie besser, wenn man mit dem Blicke zu den verschiedenen Stellen eines Kreises hin- und hergeht, als wenn man eine Stelle fixirt; im letzteren Falle verschwinden die schwächeren Kreise schnell wieder, auch wenn man sie vorher gesehen hat. Doch erkennt man sie gewöhnlich auch nicht gleich beim ersten Hinsehen nach der Scheibe, sondern man muß letztere erst eine Zeitlang aufmerksam betrachten. Übrigens muß, man darauf achten, daß die Scheibe schnell genug umläuft, damit die grauen Kreise ganz continuirlich erscheinen, und nicht flimmern; auch sind schnelle Bewegungen des Blicks zu vermeiden, welche die Striche sichtbar machen. Auf der flimmernden Scheibe erkennt man auch die schwächeren Kreise, weil die Verdunkelung sich dann nicht mehr gleichmäfsig auf die ganze Zwischenzeit von zwei Vorübergängen des schwarzen Streifens vertheilt, sondern unmittelbar nach dem Vorübergange größer, nachher schwächer ist, als sie bei gleichmäfsiger Vertheilung sein sollte. Es scheint mir deshalb nothwendig, diese Messungen von Unterschiedsschwellen nur an Scheiben auszuführen, die viel schneller umlaufen, als zur Beseitigung des Flimmerns nöthig ist. Ich habe deshalb auch nicht mehr volles Vertrauen in meine eigenen früheren Messungen, die ich in der ersten Auflage dieses Werkes mitgetheilt habe, da ich mit dem gebrauchten Apparate die vollkommene Gleichmäfsigkeit der Ringe nur noch eben erreichen konnte. Ich fand damals, daß ich an hellen Sommertagen am Fenster bei Bewegung des Blicks noch einen Rand scharf sehen konnte, wo der Unterschied der Helligkeit $\frac{1}{133}$ war, und verwaschen erschien mir auch noch ein Rand von $\frac{1}{150}$, auf Augenblicke sogar einer von $\frac{1}{167}$ Unterschied. Mühsamer und anstrengender erschienen die Wahrnehmungen bis zu $\frac{1}{150}$ bei directer Sonnenbeleuchtung der Scheibe. In der Mitte des Zimmers konnte ich zu derselben Zeit nur Ränder von $\frac{1}{117}$ Unterschied wahrnehmen, den von $\frac{1}{133}$ nur selten und unbestimmt.

Daselbe Verhältniß ist später durch andre Beobachter bestätigt worden. Sehr deutlich zeigt es sich in den Versuchen von Herrn EBBINGHAUS.¹ Derselbe hatte sich eine Reihe von grauen Papieren hergestellt, welche 53 verschiedene, möglichst gleich breit gemachte Helligkeitsstufen zwischen Schwarz und Weiss darstellten. Die objectiven Helligkeiten wurden mit Hilfe des Farbenkreisels zahlenmäsig bestimmt, und dann suchte der Beobachter Paare von Papierscheibchen dieser Art aus verschiedenen Gegenden der Scala, welche ihm gleich große Unterschiede zu haben schienen. Auch hierbei fand sich, daß die objectiven Helligkeitsunterschiede an den Enden der Scala größer ausfielen, als in der Mitte. Zum Beispiel bei einem Versuch, die ganze Scala in sieben subjectiv gleiche Helligkeitsstufen zu theilen, ergaben sich die Quotienten von je zwei auf einander folgenden Helligkeiten von unten nach oben in folgender Reihe

2,25; 2,11; 2,05; 1,77; 1,72; 1,68; 1,98.

Wir werden dieselbe Thatsache bestätigt finden bei den später zu erwähnenden Versuchen der Herren A. KÖNIG und E. BRODHUN über die Unterschiedsempfindlichkeiten für das Licht der Spectralfarben.

Für die objective Wahrnehmung der uns umgebenden Gegenstände ist das WEBER'sche Gesetz von großer Wichtigkeit, namentlich für die richtige Auffassung der Modellirung ihrer Oberfläche. Wenn diese Fläche Wölbungen, schwache Vorsprünge oder Vertiefungen hat, so verrathen sich diese in der Regel durch entsprechende Abänderungen der Helligkeit. Die dem Licht zugekehrten Theile der Oberfläche sind heller beleuchtet, als die mehr oder weniger seitwärts gewendeten, geschweige denn die abgekehrten. Wenn die beleuchtende Fläche sehr ausgedehnt ist, wie der Tageshimmel, sind diese Unterschiede von Schatten und Licht oft sehr zart, und doch geben sie einen sehr deutlichen Eindruck der Form der Fläche, wie man besonders an guten Gemälden und Photographien erkennen kann, wo nur dieses Hilfsmittel zur Bezeichnung der Raumform der dargestellten Gegenstände übrig geblieben ist. Ebenso sind die Schlagschatten von großer Wichtigkeit, da sie ein untrügliches Zeichen dafür geben, daß der Schatten werfende Körper von der Richtung der Lichtquelle aus gesehen, sich vor der den Schatten empfangenden Fläche befindet. Auch die Schlagschatten können auf sehr zarte Andeutungen zurückgeführt sein, wenn die Lichtquelle sehr ausgedehnt ist.

Nun wird bei allen diesen Beschattungen die Lichtintensität der hellsten Theile in den beschatteten um einen gewissen Bruchtheil vermindert, welcher bei unveränderter Lage und Form der Lichtquelle unabhängig ist von der Intensität der Lichtquelle. Daraus folgt also, daß innerhalb des sehr breiten Gebietes der Lichtstärken, für welche in hinreichender Annäherung das psychophysische Gesetz gilt, die Deutlichkeit der Wahrnehmung dieser Schatten und daher auch die Deutlichkeit der Modellirung der Ober-

¹ H. EBBINGHAUS, *Sitzungsber. d. Akad. d. Wiss. zu Berlin*. Sitzung vom 1. Dec. 1887. S. 995.

flächen fast unabhängig ist von der absoluten Lichtstärke. Wesentlich darauf beruht es, daß ein geschickter Maler auf den verhältnißmäßig schwach beleuchteten Flächen eines in einem Zimmer hängenden Gemäldes sowohl den Eindruck der von grellem Sonnenlicht wie von schwachem Mondlicht beschienenen Gegenstände gut nachahmt, obgleich er weder so hohe Lichtstärken anwenden kann, wie die Wirklichkeit bei ersterem, noch so tiefe Dunkelheit, wie sie sie bei letzterem zeigt.

Nähert sich die Lichtstärke aber ihrer oberen oder unteren Grenze, wo die Unterschiedsschwellen, die gleich deutlicher Empfindung entsprechen, wachsen, so wird die Unterscheidung der zarten Schatten, und damit auch die der Modellirung der Oberflächen undeutlicher. Diejenige mittlere Helligkeit also, welche die größte Feinheit in der Wahrnehmung kleinster Helligkeitsunterschiede gewährt, ist auch diejenige, bei der wir die feinste Wahrnehmung der Modellirung der uns gegenüberstehenden Körperoberflächen haben.¹

Noch in anderer Beziehung kommt es auf die Helligkeit für die Deutlichkeit des Sehens an, nämlich bei der Unterscheidung sehr kleiner Objecte. Oben ist schon erwähnt, daß die Unterscheidung kleiner Gegenstände, z. B. der Buchstaben eines Buches mühsamer wird bei sehr großen, wie bei sehr kleinen Helligkeiten, während sie in breiten Stufen mittlerer Helligkeit gleich leicht merklich ist. Der Unterschied bleibt bestehen, auch wenn man durch eine Öffnung sieht, die enger ist als die Pupille, und man dadurch die breiteren Zerstreungskreise, die bei weiter Pupille in schwacher Beleuchtung, wie die Diffractionerscheinungen und entoptischen Bilder, die bei enger Pupille in starkem Licht entstehen könnten, unverändert erhält. Sehr feine dunkle Objecte auf hellem Grunde erscheinen überhaupt nur als feine schattige Flecke, selbst wenn sie sich auf einem einzelnen Zapfen des Netzhautcentrum abbilden. Sobald ihr optisches Bild kleiner ist, als der Querschnitt des Zapfens, wird durch das dunkle Bild nur ein Bruchtheil des Lichtes für diesen Zapfen weggenommen, und es kommt also darauf an diese Verminderung um einen Bruchtheil wahrzunehmen. Ganz ähnlich verhält es sich übrigens auch unter der Annahme des communicirenden Geflechts von Nervenverästelungen (s. S. 264).

Dadurch erlangen die Abstufungen der Helligkeit und ihre Wahrnehmbarkeit eine große praktische Wichtigkeit auch für die Wahrnehmung der Formen und örtlichen Unterschiede im Gesichtsfelde, und wir sind deshalb vielfach gezwungen auf die Helligkeit der Beleuchtung zu achten, und wissen auch immer unmittelbar, ob sie zu groß oder zu klein für das Sehen feiner Objecte sei, und durch welche Art der Änderung wir sie bequemer machen könnten. Dadurch ist also auch ein bestimmter Grad der

¹ Vergleiche: H. HELMHOLTZ, *Populäre wissenschaftliche Vorträge*. Braunschweig 1876. Heft III, No. 3, *Optisches über Malerei: Helligkeitsstufen*; später wieder abgedruckt in des Autors „*Vorträge und Reden*“ Bd. I. Braunschweig. 1884.

Helligkeit, die des deutlichsten Erkennens der Körperformen, als ausgezeichnet vor allen andern charakterisirt. Er ist allerdings nicht sehr scharf abzugrenzen, weil innerhalb breiter Abstufungen der Helligkeit das Verhältniß $dH:H$ nur sehr kleine Unterschiede zeigt; auch ist die subjective Stärke der Empfindung zeitweilig durch die Wirkung vorausgegangenen Lichts großen Veränderungen unterworfen. Indessen wird sich bei dauerndem Verweilen in gleichmässig heller Umgebung doch immer wieder der gleiche Zustand des Auges für jeden Grad der Beleuchtung, und somit auch dieselbe Empfindungsstärke herstellen müssen.

Es scheint mir wünschenswerth, diese Verhältnisse durch kurze Namen zu bezeichnen. Je kleiner für eben noch wahrnehmbare Empfindungsunterschiede das Verhältniß $dH:H$ ist, desto deutlicher erkennen wir die Objecte. Ich werde mir erlauben das umgekehrte Verhältniß $\frac{H}{dH}$ als die Klarheit der Beleuchtungsstärke H zu bezeichnen, und diejenige Beleuchtung, bei welcher diese Gröfse ein Maximum wird, die Lichtstärke größter Klarheit, oder klarste Beleuchtung zu nennen.

316

Täuschungen, die auf dem FECHNER'schen Gesetze beruhen. Durch die oben nachgewiesene Abhängigkeit der Empfindungsstärke von der Lichtstärke erklärt sich eine Thatsache, die mir aufgefallen ist, daß nämlich in dunklen Nächten helle Gegenstände verhältnißmässig zu ihrer Umgebung viel heller erscheinen, als bei Tage, sodafs man sich zuweilen der Voraussetzung nicht erwehren kann, sie seien selbstleuchtend. Bei sehr geringen Lichtstärken können wir nämlich die Empfindungsstärke der Lichtstärke proportional setzen, bei starker Beleuchtung dagegen ist die Empfindung für hellere Objecte relativ schwächer. Da wir nun gewöhnt sind, die Helligkeit der uns bekannten Objecte bei starker Beleuchtung zu vergleichen, so erscheinen uns bei schwacher Beleuchtung die hellen Gegenstände relativ zu hell, die dunkeln zu dunkel. Diesen Umstand benutzen auch die Maler in Mondscheinlandschaften, um den Eindruck schwacher Beleuchtung hervorzubringen. Sie heben die lichten Stellen viel greller heraus, als wenn sie Tageslicht darstellen.

321

Daraus, daß die Empfindungsstärke der objectiven Lichtstärke nicht proportional ist, erklärt sich nun weiter eine Reihe von Thatsachen, welche man bisher unter dem Namen der Irradiation zusammengefaßt hat, und welche das Gemeinsame haben, daß stark beleuchtete Flächen größer erscheinen, als sie wirklich sind, während die benachbarten dunklen Flächen um eben soviel kleiner erscheinen.

Die Erscheinungen selbst sind nach der Form der betrachteten Figuren sehr mannigfaltig, sie sind im allgemeinen am leichtesten sichtbar und am stärksten, wenn die Accommodation des Auges für den betrachteten Gegenstand nicht genau paßt, einerlei ob dieselbe zu fern oder zu nah ist, oder ob man das Auge mit einer Glaslinse, concav oder convex, bewaffnet, welche

gute Accommodation unmöglich macht. Aber die Irradiation fehlt auch nicht ganz, wenn die Accommodation genau ist, und ist auch dann bei sehr hellen, namentlich kleinen Gegenständen deutlich zu bemerken, bei kleinen Gegenständen offenbar deshalb, weil deren Größe durch die schmalen Zerstreuungskreise relativ mehr vergrößert wird, als die größerer Gegenstände, gegen deren Dimensionen die Breite so schmaler Zerstreuungskreise, wie sie das gut accommodirte Auge liefert, verschwindet.

1) Helle Flächen erscheinen vergrößert. Die Größe von engen Löchern und Spalten, durch welche helles Licht fällt, beurtheilen wir niemals richtig, sie erscheinen uns immer breiter, als sie wirklich sind, auch bei schärfster Accommodation. Ebenso erscheinen auch die Fixsterne als kleine helle Flächen, selbst wenn man sie durch ein Brillenglas betrachtet, welches genaue Accommodation möglich macht. In einem Gitter aus feinen dunkeln Stäben mit Zwischenräumen, welche genau ebenso breit sind wie die Stäbe, (gewöhnliche Drahtgitter zu Interferenzversuchen) erscheinen vor einem hellen Hintergrunde die Zwischenräume stets breiter als die Stäbe. Kommt ungenaue Accommodation hinzu, so sind die Erscheinungen viel auffallender und werden auch an größeren Objecten sichtbar. *Fig. 154* zeigt ein weißes Quadrat auf schwarzem Grunde und ein schwarzes auf weißem Grunde.

Bei starker Beleuchtung und unzureichender Accommodation wird das weiße größer erscheinen, obgleich beide genau gleich groß sind.

2) Nahe liegende helle Flächen fließen zusammen. Ein feiner Draht, welchen man zwischen das Auge und die

Sonnenscheibe oder eine helle Flamme hält, verschwindet, indem die beiden hellen Flächen, die im Gesichtsfelde neben ihm liegen, von beiden Seiten herübergreifen und zusammenfließen. Bei Mustern, die aus schwarzen und weißen Quadraten ähnlich dem eines Schachbretts zusammengesetzt sind, wie *Fig. 155*, fließen durch die Irradiation die weißen Felder an den Ecken zusammen, und trennen die schwarzen.

PLATEAU hat Felder von der Art wie *Fig. 155* auch zur Messung der Breite der Irradiation benutzt. Aus einem dunkeln Schirme waren die weißen Felder ausgeschnitten und von hinten erleuchtet, von den beiden schwarzen Feldern war eines durch eine Schraube horizontal verschiebbar, und wurde so eingestellt, daß dem Beobachter die beiden mittleren verticalen Grenzlinien in eine zusammenzufallen schienen. Für größere Entfernungen waren die

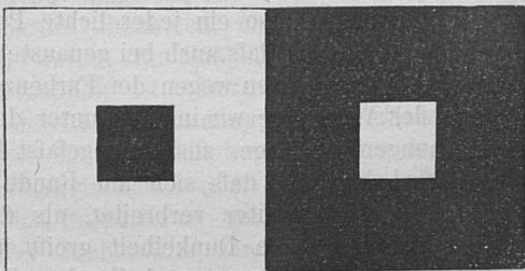


Fig. 154.

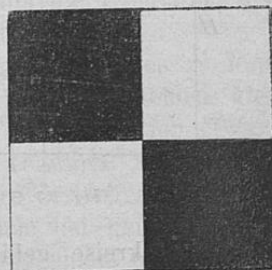


Fig. 155.

schwarzen Felder aus Brettchen, für kleinere aus Stahlplättchen verfertigt. Der Fehler, welcher bei der Einstellung begangen war, bezeichnete die Breite der Irradiation.

3) Gerade Linien werden unterbrochen. Wenn man die Kante eines Lineals zwischen das Auge und eine helle Lichtflamme oder die Sonne hält, so erscheint das Lineal an der Stelle, wo der helle Körper darüber hervorblickt, einen Ausschnitt zu haben, wie *Fig. 156* darstellt.

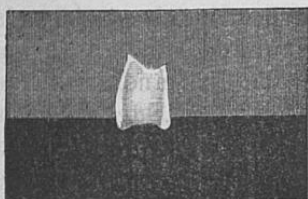


Fig. 156.

Ich mache für den letzteren Fall gleichzeitig darauf aufmerksam, daß wenn der helle Körper eine Lampenflamme mit cylindrischem Dochte ist, der Einschnitt an den Rändern der Flamme, welche, wie oben erwähnt, eine gröfsere absolute Helligkeit haben, tiefer erscheint als in der Mitte der Flamme, trotzdem das Auge die gröfsere Helligkeit der Ränder nicht als solche empfindet.

Alle diese Erscheinungen reduciren sich darauf, daß die Ränder heller Flächen im Gesichtsfelde sich gleichsam vorschoben und über die benachbarten dunkleren Flächen übergreifen. Sie greifen desto mehr über, je ungenauer die Accommodation ist, je gröfsere Zerstreuungskreise also ein jeder lichte Punkt der Fläche im Auge entwirft. Nun wissen wir aber, daß auch bei genauster Accommodation die Zerstreuungskreise nicht ganz fehlen wegen der Farbenzerstreuung und der übrigen Abweichungen des Auges, die wir in § 14 unter dem Namen der monochromatischen Abweichungen des Auges zusammengefaßt haben. Durch diese Zerstreuungskreise wird bewirkt, daß sich am Rande des Netzhautbildes einer hellen Fläche das Licht weiter verbreitet, als das geometrische Bild der Fläche reicht, aber auch die Dunkelheit greift über den Rand des Bildes, d. h. das Licht fängt schon innerhalb des Randes, wo es noch seine volle Stärke haben sollte, an abzunehmen. Es sei in *Fig. 157 c* ein Punkt des Randes einer hellen Fläche, *bg* eine senkrecht gegen den Rand gezogene gerade Linie. Senkrecht gegen dieselbe seien Coordinaten aufgetragen, welche der objectiven Helligkeit in den entsprechenden Punkten von *bg* proportional sind. Wäre das Bild der Fläche vollkommen genau, so würde die gebrochene Linie *adcg* die Grösse der Helligkeit ausdrücken. Von *b* bis zum Rande der Fläche bei *c* würde nämlich die Fläche die volle Helligkeit *H* haben, von *c* ab nach *g* zu die Helligkeit Null.

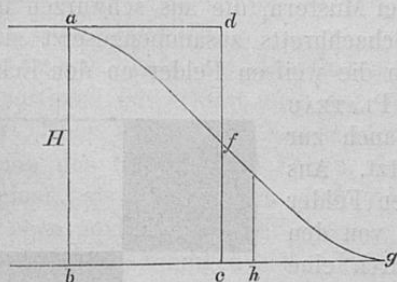


Fig. 157.

Wenn durch Mangel der Accommodation Zerstreuungskreise gebildet werden, so nimmt dagegen, wie oben S. 167 gezeigt ist, die Helligkeit ab wie die Curve *afg*. Es greift dabei sowohl

Zerstreuungskreise gebildet werden, so nimmt dagegen, wie oben S. 167 gezeigt ist, die Helligkeit ab wie die Curve *afg*. Es greift dabei sowohl

das Helle über das Dunkle über in *cg*, als das Dunkle über das Helle in *ad*, und soviel Licht sich über den Rand hinaus verbreitet, muß natürlich innerhalb des Randes der hellen Fläche entzogen werden. So lange wir nur die objective Helligkeit berücksichtigen, würden also die hellen Flächen durch die Zerstreuungskreise nicht vergrößert erscheinen können. Im Gegentheil die Fläche, welche die volle Helligkeit zeigt, ist durch die Zerstreuungskreise kleiner geworden, wenn auch die Fläche, welche überhaupt Licht empfängt, größer geworden ist. Berücksichtigen wir nun aber, daß die Lichtempfindung für die höheren Stufen der objectiven Helligkeit garnicht oder wenig verschieden ist, so folgt daraus, daß die Verminderung des Lichts innerhalb der Fläche weniger bemerkt werden wird, als die Erleuchtung vorher dunkler Stellen jenseits ihres Randes, sodaß also für die Empfindung die Ausbreitung des Hellen allein, und nicht die des Dunkels vergrößert erscheinen muß. Am auffallendsten wird die Erscheinung sein, wenn die Fläche hell genug ist, daß innerhalb der Zerstreuungskreise die Lichtempfindung schon ihr Maximum erreicht. Wäre das z. B. in *Fig. 157* bei *h* der Fall, so würde die scheinbare Helligkeit bei *h* nicht mehr von der vollen Helligkeit im Innern der Fläche zu unterscheiden sein. Die volle Helligkeit der Fläche würde also bis *h* zu reichen scheinen und auch jenseits *h* erst sehr langsam abnehmen, ehe sie bei *g* ganz verschwindet. Daraus erhellt auch, warum für das zu Stande kommen der Irradiation große Helligkeit vortheilhaft ist. Desto näher nämlich an *g* liegt die Stelle, wo das Maximum der Lichtempfindung erreicht wird. Daraus erklärt sich auch, warum bei gesteigerter Helligkeit des Grundes, selbst wenn die Empfindung dieser Helligkeit dabei nicht weiter steigen kann, doch die Irradiation noch wächst. Proportional der Ordinate *H* wachsen nämlich bei gesteigerter objectiver Lichtstärke sämtliche Ordinaten der Curve *ag*, und desto näher an *g* rückt also auch die Ordinate, welche der für das Maximum der Empfindung genügenden Helligkeit entspricht. Messende Versuche über den Einfluß der Helligkeit hat PLATEAU ausgeführt, und dabei gefunden, daß die Größe der Irradiation nicht proportional der Helligkeit wächst, sondern in einem geringeren Maasse, und bei steigender Helligkeit sich asymptotisch einem Maximum nähert, wie es auch aus unserer Erklärung folgt.

Es ergibt sich ferner aus dieser Theorie, warum die Irradiation desto breiter wird, je größere Zerstreuungskreise sich bilden.

Da bei den meisten Personen die Zerstreuungskreise eines zu fernem Punkts nach der Höhe größer sind, als nach der Breite, erscheinen kleine helle Quadrate auf dunklem Grunde in einer für die Accommodation etwas zu großen Entfernung perpendicular verlängert, und schwarze Quadrate auf weißem Grunde horizontal verlängert. Perpendicularäre Verlängerung größerer Quadrate sehen übrigens die meisten Personen auch bei genauer Accommodation. Nach den Versuchen von A. FICK¹ erschien einem geübten, nicht

¹ A. FICK. *Hente und Pfeuffer's Zeitschrift für rationelle Medicin.* Neue Folge II. S. 83.

kurzsichtigen Auge bei 4500^{mm} Abstand ein Rechteck von 22 Mm. horizontaler und 20 Mm. verticaler Seite als Quadrat, eines von 21 Mm. horizontaler und 20 Mm. verticaler Seite als vertical verlängertes Rechteck. Es ist dies eine Erscheinung anderer Art, die bei weissen wie schwarzen Rechtecken gleichmäfsig eintritt, und später in der Lehre vom Augenmafs § 28 behandelt werden soll.

In anderen Augen, denen ein ferner Lichtpunkt dreistrahlig erscheint, machen sich auch in den andern Fällen von Irradiation drei Hauptrichtungen bemerklich, in denen sie am stärksten ist, wie es JOSLIN¹ beschreibt.

Ich habe in dem Vorstehenden den Namen der Irradiation nur auf diejenigen Fälle angewendet, wo man nicht die Zerstreuungskreise als solche wahrnimmt, sondern wo sich scheinbar die Fläche, welche die volle Beleuchtungsstärke hat, vergrößert. Indessen ist vielfältig der Name der Irradiation auf die Bildung der Zerstreuungskreise überhaupt angewendet worden, auch wo man diese als lichtschwächere Theile des Bildes erkennt. Es ist aber wohl unnöthig, auf diese Fälle einen besonderen neuen Namen anzuwenden. Es können übrigens auch durch die Zerstreuungskreise neue Begrenzungslinien entstehen, welche das Object in veränderter Gröfse erscheinen lassen, ohne dafs die Lichtstärke noch einen besonderen Einfluß hätte. Namentlich hat VOLKMANN² gefunden, dafs sehr feine schwarze Fäden auf weifsem Grunde ebenso wie weifse auf dunklem Grunde für breiter gehalten werden, als sie sind, während die bisher betrachtete Art der Irradiation immer nur das Hellere vergrößert. VOLKMANN benutzte Fäden von 0,0445 Mm. Dicke in 333 Mm. Entfernung vom Auge, welche demgemäfs dem Auge viel kleiner erscheinen mußten, als die kleinsten wahrnehmbaren Distanzen. Er hatte ein Schraubenmikrometer so einrichten lassen, dafs die Fäden langsam einander genähert werden konnten, und stellte dem Experimentirenden die Aufgabe, die Fäden so zu stellen, dafs der Zwischenraum ebenso breit sei, wie die Fäden. Alle Individuen machten aber den Zwischenraum zu breit, und zwar auch, wenn er hell war, und die Fäden dunkel. VOLKMANN giebt davon die Erklärung, dafs man statt der schmalen schwarzen Streifen breitere Zerstreuungsbilder derselben sehe, denen man dann den mittleren hellen Zwischenraum gleich mache. Er benutzt deshalb auch diese Messungen, um die Breite der Zerstreuungsbildchen bei guter Accommodation zu bestimmen. Er selbst machte den Zwischenraum im Mittel gleich 0,207 Mm., während die Dicke der Fäden, denen derselbe gleich sein sollte, nur 0,0445 Mm. betrug, und berechnet daraus die Breite des Zerstreuungsbildes auf der Netzhaut gleich 0,0035 Mm., bei anderen Personen bei hellem Hintergrund schwankt diese letztere Gröfse zwischen 0,0006 und 0,0025. Diese Gröfsen sind kleiner als die kleinsten sichtbaren Abstände (0,0044 Mm.) und als die Zapfen des gelben Flecks

¹ Vergl. J. PLATEAU. *Pogg. Ann.* Bd. 51a. S. 107. 1842.

² VOLKMANN. *Berichte der sächsischen Ges. d. Wiss.* 1857. S. 129—148.

(0,0045 bis 0,0054), sodafs möglicher Weise die letzteren die Breite des schwarzen Bildes bestimmen haben können. Dafs so grofse Unterschiede in den Einstellungen vorkamen, darf bei einer so subtilen Aufgabe wohl nicht wundern.

Aber auch schwarze Streifen von erkennbarer Breite, welche bei so ungenügender Accommodation betrachtet werden, dafs die Zerstreuungskreise viel breiter sind, als die Streifen, erscheinen breiter als sie sind. Dies scheint mir auf der Vertheilung des Lichts in dem Zerstreuungskreise zu beruhen. Es sei *Fig. 158 ab* der Durchschnitt eines Papierblatts, auf welches eine schwarze Linie gezeichnet ist, die hier im Querschnitt als Punkt *c* erscheint.

Es mögen durch mangelhafte Accommodation Zerstreuungskreise vom Radius *fc* entstehen, so wird die Curve der Lichtstärke, in der die einzelnen Punkte der Linie *ab* im Netzhautbilde erscheinen, nach den in § 13 entwickelten Principien und abgesehen von den Störungen durch Asymmetrie der Linse ausgedrückt durch die Linie $\alpha\varphi\gamma\delta\beta$. Hier erleidet nun die Lichtstärke bei φ und δ einen

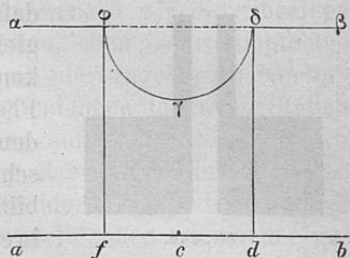


Fig. 158.

plötzlichen Abfall, und diese Stellen erscheinen deshalb als Grenzlinien. Wäre die Linie *c* weiß auf schwarzem Grunde, so würde $\alpha\beta$ als Abscissenlinie zu nehmen sein, und die negativen Ordinaten der Curve $\varphi\gamma\delta$ würden die Lichtstärke ausdrücken; auch dann haben wir bei *f* und *d* einen plötzlichen Abfall der Lichtstärke. Davon übrigens, dafs solche Linien, in denen der Differentialquotient der Lichtstärke unendlich groß wird, als Grenzlinien erscheinen, kann man sich mittels der rotirenden Scheibe überzeugen. Wenn man

eine weiße Scheibe mit einem runden kreisförmigen Flecke, wie *Fig. 159*, rotiren läßt, so erscheint der schwarze Fleck bei schneller Bewegung wie ein grauer Kreis, dessen Lichtintensität durch eine ganz ähnliche Curve wie $\alpha\varphi\gamma\delta\beta$ *Fig. 158* auszudrücken sein würde, wie aus den im folgenden Paragraphen zu entwickelnden Gesetzen hervorgeht. Der graue Kreis erscheint dabei ganz scharf begrenzt an beiden Seiten, und in seinem Innern bemerkt man kaum die ungleichen Grade der Helligkeit; der Streifen erscheint vielmehr fast gleichmäßig grau gefärbt. Übrigens mischen

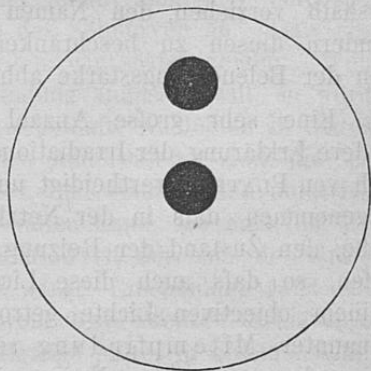


Fig. 159.

sich in die Zerstreuungsbilder schmaler schwarzer Streifen meist mehr oder weniger die Doppelbilder ein, welche durch Asymmetrie der Linse entstehen (*Fig. 85, S. 172*), wobei die Lichtvertheilung im Zer-

streuungsbilde zwar verändert wird, aber doch jedenfalls die gröfsere Breite des Bildes bestehen bleibt.

326 Sobald der schwarze Streifen nicht mehr sehr schmal ist gegen die Breite der Zerstreungsbilder, so nimmt auch die Helligkeit an seinem Rande allmählig ab, wie in *Fig. 157*, und dann erscheinen seine Ränder verwaschen grau, seine Mitte schwarz. Man erkennt alsdann das Vorhandensein von Zerstreungskreisen und die Täuschung schwindet. Der Unterschied zeigt sich sehr auffallend in einem von VOLKMANN angegebenen Versuche. Man betrachte die *Fig. 160* aus solcher Entfernung, dafs die Accommodation

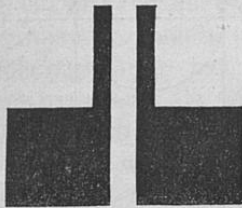


Fig. 160.

beträchtlich mangelhaft ist, so wird man finden, dafs der mittlere weisse Streifen, der überall gleiche Breite hat, eine keulenförmige Gestalt bekommt, indem das zwischen den breiten schwarzen Flächen stehende Ende breit wird, das zwischen den schmalen schwarzen Streifen stehende dagegen schmaler wird und gleichsam den Griff der Keule bildet. Zwischen den breiten schwarzen Flächen breitet sich der weisse Streifen durch die gewöhnliche Art der Irradiation aus. Die schmalen schwarzen Streifen dagegen verwandeln sich in breitere graue, und beeinträchtigen dadurch die Breite des zwischen ihnen liegenden mittleren Weifs. PLATEAU hat ähnliche Phänomene beschrieben, daraus aber geschlossen, dafs die Irradiation zweier benachbarter weisser Ränder sich gegenseitig beschränke.

Diese zuletzt beschriebenen Phänomene der Ausbreitung dunkler Streifen sind deshalb einfache Fälle von Zerstreungsbildern, unabhängig von der Beleuchtungsstärke und von dem Gesetze der Empfindungsstärke. Ich würde deshalb vorziehen, den Namen der Irradiation nicht auf sie anzuwenden, sondern diesen zu beschränken auf diejenigen Fälle, wo die Erscheinung von der Beleuchtungsstärke abhängt.

Eine sehr grofse Anzahl von Physikern und Physiologen hat eine andere Erklärung der Irradiationserscheinungen angenommen, welche namentlich von PLATEAU vertheidigt und ausführlich durchgeführt ist. Danach wird angenommen, dafs in der Netzhaut eine erregte Nervenfasern die Fähigkeit habe, den Zustand der Reizung auch in den benachbarten Fasern hervorzurufen, so dafs auch diese Lichtempfindung veranlassen, obgleich sie von keinem objectiven Lichte getroffen werden. Es würde dies ein Fall sogenannter Mitempfindung sein. Dergleichen Mitempfindungen kommen bei anderen sensiblen Nerven vor. Viele Personen empfinden z. B. Kitzel in der Nase, wenn heftiges Licht in ihr Auge fällt, empfinden ein kaltes Überlaufen in der Haut des Rumpfes, wenn sie kreischende oder quiet-schenden Töne hören. In diesen und anderen Fällen kann die Übertragung der Reizung von der primär erregten Nervenfasern auf die andere

erst innerhalb der Centralorgane geschehen, da der Sehnerv mit den sensiblen Nerven der Nase (*Nervus trigeminus*) und der Hörnerv mit den Hautnerven des Rumpfes keine andere anatomische Communication hat, als durch die Centralorgane. Übrigens kommen dergleichen Mitempfindungen immer nur in ziemlich vereinzelt Beispielen vor, und die angeführte Deutung derselben kann nicht als fest begründet angesehen werden, weil möglicherweise auch reflectorische Entladungen nach den absondernden Drüsen der Nase oder den Gefäßmuskeln der Hautgefäße ähnliche Empfindungen mittelbar hervorrufen könnten. Dafs in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle die Erregung einer sensiblen Faser nicht auf andere Fasern übertragen wird, geht schon aus der allgemeinen Erfahrung hervor, wonach wir die einzelnen Eindrücke, welche auf unsere Sinnesorgane geschehen, eben isolirt empfinden können. Wird eine Hautstelle gestochen, dadurch die zugehörige Nervenfasern erregt, so würden ausgebreitete Schmerzempfindungen in vielen Stellen der Haut entstehen müssen, wenn die Überleitung auf andere Nervenfasern regelmäfsig und constant vorkäme. Wir würden dann die primär erregte Stelle von den secundär erregten nicht sicher unterscheiden können. In der Regel empfinden wir nun Reizung einer einzelnen Hautstelle eben nur in der gereizten Stelle, und etwa ihrer allernächsten Nachbarschaft, den ziemlich grofsen Empfindungskreisen der Haut entsprechend. Es treten also keine Mitempfindungen ein. Wenn aber der örtliche Schmerz sehr heftig ist und sehr lange dauert, so treten allerdings auch Schmerzen in den benachbarten Theilen ein, welche gewöhnlich als Mitempfindungen gedeutet werden, aber freilich auch von der Ausbreitung der schmerzerregenden Schädlichkeit oder der Entzündung herrühren können. PLATEAU erinnert auch an die Thatsache, dafs, wenn das Bild eines auf weifses Papier gezeichneten schwarzen Flecks auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fällt, in der entsprechenden Stelle des Gesichtsfeldes nur Weifs empfunden wird, und nimmt auch hier eine Ausbreitung der Erregung über die Eintrittsstelle des Sehnerven an. Dafs aber diese Erscheinung ganz anderer Art ist, werden wir später zeigen. Wenn man also die Irradiation im Auge als Mitempfung auffassen will, so würde diese Ansicht sich doch nur auf selbst noch zweifelhafte Analogien in andern Theilen des Nervensystems stützen müssen. Andererseits sind die Erscheinungen der Irradiation im Auge alle der Art, dafs immer auch objectives Licht auf die Theile der Netzhaut fällt oder fallen kann, wo man die Mitempfung vermuthet. Die Stärke der Irradiation ist durchaus der Gröfse der Zerstreungskreise proportional und die ganze Erscheinung läfst sich mit allen ihren Einzelheiten aus anderen wohl festgestellten Erklärungsprincipien herleiten, sodafs ich es für ungerechtfertigt halte, in einem solchen Falle neue Principien von zweifelhafter Richtigkeit zu Hülfe zu nehmen.

Wenn man die peripherischen Enden der Sehnervenfasern als netzförmig verästelt ansieht, wie es wahrscheinlich die der Tastnerven in der Haut sind, so würde die Reizung einer punktförmigen Stelle allerdings eine Anzahl benachbarter Nervenfasern erregen können, und wenn die Erregung

auch der etwas entfernten das Maximum der Empfindung erreichte, würde der ganze Umkreis, so weit dies geschieht, gleichmäßig beleuchtet erscheinen. Das wäre nicht im eigentlichen Sinne Mitempfindung, denn die mitempfindenden Fasern wären alle auch vom Reize mitgetroffen. Durch das Gesetz der Unterschiedsschwellen würde aber die Localisation ungenau, welche in der erwähnten Hypothese davon abhängt, daß das Verhältniß, in welchem die Erregungsstärke der verschiedenen Fasern steht, richtig abgeschätzt wird. Diese Hypothese würde also in der That eine von der Ausbreitung objectiven Lichts unabhängige Art der Irradiation geben.

Unterschiedsschwellen verschiedener Farben. Von den Herren A. KÖNIG und E. BRODHUN¹ sind neuerdings auch Versuchsreihen angestellt worden über die Größe der Unterschiedsschwellen bei verschieden farbigem Lichte. Es hat sich dabei gezeigt, daß wenn man eine passende Wahl der Beleuchtungseinheiten für die verschiedenen Spectralfarben trifft, der Gang der Unterschiedsschwellen in ihrer Abhängigkeit von den absoluten Lichtstärken für grössere Intensitäten nur kleine unsichere Unterschiede zeigt. Dagegen zeigt sich bei den geringeren Beleuchtungsstärken ein beträchtlicher Unterschied zwischen den brechbaren und weniger brechbaren Farben. Bei den ersteren, den blauen Farben sind alsdann viel kleinere Unterschiede der objectiven Lichtstärke wahrnehmbar als bei den rothgelben Farben.

Ich gebe hier Figur 161 f. S., welche von den genannten Autoren nach ihren Beobachtungen construirt worden ist, und den Unterschied für die schwächeren Intensitäten stark hervortreten läßt. Zu dem Ende sind als Abscissen horizontal nicht die Werthe der Lichtstärken, die in Ziffern darunter angegeben sind, sondern deren Logarithmen aufgetragen, und als Ordinaten die Größen $\frac{dr}{r}$ (auch in Ziffern angegeben), welche nach dem FECHNERSchen Gesetze constant sein sollten, und je höher sie ausfallen, desto grössere Unempfindlichkeit des Auges für schwache Beleuchtungsunterschiede anzeigen. Der Zweig I der Curve bezieht sich auf die hohen Beleuchtungsstärken, II auf die blaue Hälfte des Spectrum, die Wellenlängen 505 $\mu\mu$ bis 430 $\mu\mu$ zusammenfassend, III auf die rothgelbe, zwischen den Wellenlängen 670 $\mu\mu$ und 575 $\mu\mu$.

Die Ausführung dieser Versuche geschah in folgender Weise:

Als Lichtquelle diente entweder ein sog. Triplex-Gasbrenner oder für die grösseren Intensitäten ein LINNEMANNsches Zirconlicht.

Ein bilateraler Spalt S_1 , dessen Breite durch eine Mikrometerschraube bestimmt werden konnte, stand im Brennpuncte einer Linse L_1 von 10 cm Durchmesser. Das somit fast parallel gemachte Strahlenbündel wurde in einem mit zimmtsaurem Äthyläther gefüllten Flüssigkeitsprisma P von entsprechender Größe dispergirt und dann durch die achromatische Objectivlinse L_2 eines grossen astronomischen Fernrohrs zu einem Spectrum wieder vereinigt, welches von der Lithiumlinie (670 $\mu\mu$) bis zur G-Linie (430 $\mu\mu$) eine Ausdehnung von ungefähr 20 cm

¹ ARTHUR KÖNIG und EUGEN BRODHUN, Experimentelle Untersuchungen über die psychophysische Fundamentalförmel in Bezug auf den Gesichtssinn. *Sitzungsberichte d. Akad. zu Berlin*. 26. Juli. 1888.

hatte. In der Ebene dieses Spectrum war ein rechteckiger Spalt S_2 von etwa 5 mm Breite und 7 mm Höhe aufgestellt, und hinter diesem ein Doppelpath, dessen Hauptschnitt vertical und zwar senkrecht zu jener Spalteebene stand. Durch diesen Doppelpath hindurch wurde nun der Spalt S_2 mittelst eines kurzen astronomischen Fernrohrs betrachtet, in dessen Ocular O ein NICOLSches Prisma N_2 eingesetzt war. In Folge der geringen Breite des Spaltes im Vergleich zu der ganzen Ausdehnung des Spectrum war selbst in denjenigen Theilen desselben, wo der Farbenton am schnellsten wechselt, keine Farbdifferenz seiner beiden Ränder wahrzunehmen. Die Einstellung auf die sechs benutzten Wellenlängen geschah, indem an einer Scala die Lage der hauptsächlichsten FRAUNHOFERSchen Linien des

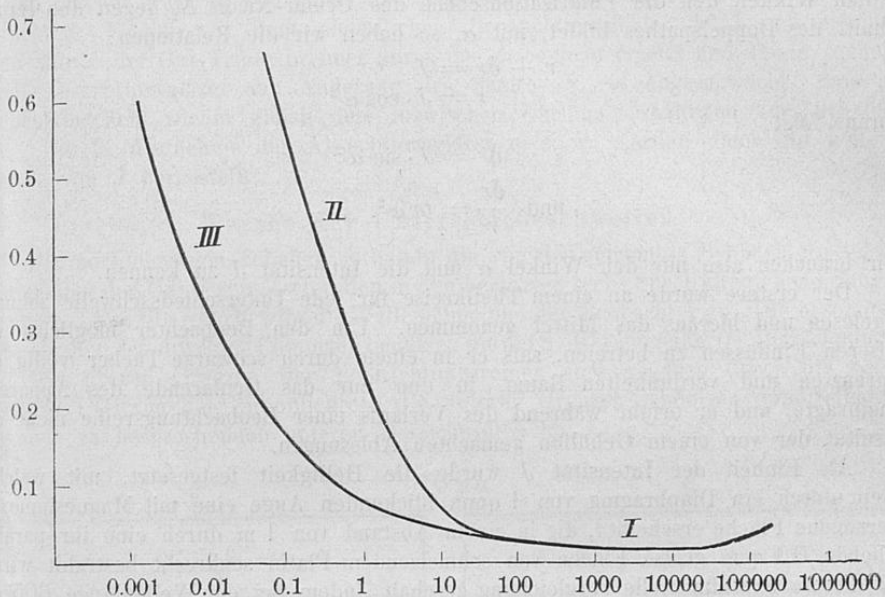


Fig. 161.

Spectrum bestimmt wurde und man dann den Spalt S_2 (nebst den mit ihm fest verbundenen Oculartheilen des Apparates) an den durch Interpolation bestimmten entsprechenden Scalentheil stellte. Die Spalthöhe von S_2 war der Größe des Doppelpathes so angepaßt worden, daß die beiden durch den letzteren erzeugten Bilder gegen einander um die halbe Spalthöhe verschoben waren, man also drei Rechtecke von gleicher Größe vertical übereinander sah. Das untere wurde aber durch ein geeignetes Ocular-Diaphragma abgeblendet. Jedes dieser Rechtecke hatte eine scheinbare Höhe von ungefähr 3° und eine scheinbare Breite von $4\frac{1}{3}^{\circ}$. Stand der Hauptschnitt des Ocularnicol N_2 parallel dem Hauptschnitte des Doppelpathes, so erschienen beide Rechtecke gleich hell, bei einer Drehung des Nicol um 90° war hingegen das obere Rechteck gänzlich ausgelöscht, während das untere, durch Übereinanderlagerung entstandene, seine Intensität unverändert beibehalten hatte. Es setzt dieses freilich voraus, daß das den Spalt S_2 erleuchtende Spectrallicht unpolarisirt oder in einer Ebene polarisirt ist, welche mit dem Hauptschnitt

des Doppelspathes einen Winkel von 45° bildet. Da das erstere nun in Folge der Reflexion an den Flächen des Flüssigkeitsprismas P nicht der Fall ist, so wurde unmittelbar vor den rechteckigen Spalt S_2 nach der Linse L_2 hin ein anderes NICOLsches Prisma N_1 eingeschaltet, dessen Polarisationssebene die erforderliche Neigung hatte. Man konnte nun durch Drehen des Ocular-Nicol N_2 das obere Rechteck von der constant bleibenden Intensität des unteren Rechteckes ab bis zum Verschwinden in meßbarer Weise verdunkeln, während die Grenze beider Felder durch kein andres Markzeichen als der Helligkeitsunterschied angezeigt war. Eine Einstellung zur Bestimmung der Unterschiedsschwelle bestand darin, das man das obere Rechteck eben merklich gegen das untere verdunkelte. Bezeichnen wir dann die Intensität des bei dieser Einstellung constant bleibenden unteren Rechteckes mit J , den Winkel, den die Polarisationssebene des Ocular-Nicols N_2 gegen den Hauptschnitt des Doppelspathes bildet, mit α , so haben wir die Relationen:

$$r + \delta r = J$$

$$r = J \cdot \cos \alpha^2$$

woraus folgt

$$\delta r = J \cdot \sin \alpha^2$$

$$\text{und } \frac{\delta r}{r} = \operatorname{tg} \alpha^2.$$

Wir brauchen also nur den Winkel α und die Intensität J zu kennen.

Der erstere wurde an einem Theilkreise für jede Unterschiedsschwelle zehnmal abgelesen und hieraus das Mittel genommen. Um den Beobachter möglichst von äußeren Einflüssen zu befreien, saß er in einem durch schwarze Tücher völlig abgegrenzten und verdunkelten Raum, in dem nur das Oculare des Apparates hineinragte, und er erfuhr während des Verlaufs einer Beobachtungsreihe nicht das Resultat der von einem Gehülfen gemachten Ablesungen.

Als Einheit der Intensität J wurde die Helligkeit festgesetzt, mit welcher einem durch ein Diaphragma von 1 qmm blickenden Auge eine mit Magnesiumoxyd überzogene Fläche erscheint¹, die in einem Abstand von 1 m durch eine ihr parallel stehende 0,1 qcm große Fläche von schmelzendem Platin senkrecht bestrahlt wird.² Die directe experimentelle Vergleichung geschah, indem bei der Wellenlänge $605 \mu\mu$ die Spaltbreite bestimmt wurde, welche zur Herstellung einer etwa 200 solcher Einheiten enthaltenden Helligkeit auf der durch das erwähnte kleine astronomische Fernrohr betrachteten Fläche des unteren Rechteckes erforderlich ist. Diese ziemlich hohe Helligkeit wurde gewählt, damit hierbei das später ausführlicher erwähnte PURKINJESCHE Phaenomen keine Fehlerquelle mehr bilden konnte. Die geringe Abweichung (nur etwa $2^0/_{00}$) des Mittelwerthes der von beiden Beobachtern gemachten Bestimmungen war zwar vielleicht ein glücklicher Zufall, gewährt aber doch einige Gewähr für die Berechtigung solcher Helligkeitsschätzungen verschieden gefärbter Felder. Später zu erwähnende Helligkeitsbestimmungen, welche Herr BRODHUN für die beiden Farbensysteme in dem Interferenzspectrum desselben auch hier benutzten Gasbrenners gemacht hatte, ermöglichten mit Benutzung der experimentell ermittelten Dispersionsverhältnisse in dem Flüssigkeitsprisma eine Berechnung der zur Herstellung derselben Helligkeitseinheit an den übrigen in Betracht kommenden Spectralregionen erforderlichen Spaltbreiten.

¹ Vergl. A. KÖNIG, *Grüfes Archiv* Bd. 30 (2) S. 161. 1884 und *Wied. Ann.* Bd. 22. S. 572. 1884.

² Diese Beleuchtung entspricht etwa der von 1,5 englischen Normalkerzen aus gleicher Entfernung.

Die Reihenfolge der Intensitäten J , welche bei jeder Spectralfarbe hergestellt wurde, war nach aufwärts 1, 2, 5, 10, 20 u. s. w., nach abwärts 0.5, 0.2, 0.1, 0.05 u. s. w., wobei um immer eine möglichst gleiche Reinheit des Spectrum zu haben und von der Ungenauigkeit der Mikrometerschraube des Spaltes S_1 thunlichst unabhängig zu sein, Rauchgläser von genau bestimmten Absorptionscoefficienten zwischen dem Spalte S_1 und der Linse L_1 eingeschaltet wurden und der Spalt S_1 nur soviel geändert wurde, als zur genauen Herstellung der genannten Stufenfolge der Intensitäten erforderlich war.

Bei der höchsten durch den Gasbrenner erreichbaren Intensität wurde dann ein kleines schmales an dem Spalte S_2 angebrachtes totalreflectirendes Prisma mit Spectrallicht derselben Wellenlänge, welches durch ein anderes seitwärts aufgestelltes Prisma erzeugt war, so hell erleuchtet, dass seine ebenfalls durch dasselbe Ocular betrachtete Fläche mit dem eigentlichen Beobachtungsfelde gleich hell erschien. Dann wurde der Gas-Triplexbrenner durch das Zirconlicht ersetzt und dieses zunächst durch Absorptionsgläser und Änderung des Spaltes S_1 so abgeschwächt, daß das Beobachtungsfeld wieder gleich dem inzwischen constant erhaltenen Vergleichsfelde war. Durch Wegnahme der Absorptionsgläser u. s. w. wurden dann die höheren Werthe von J hergestellt.

Werthe der Unterschiedsschwellen.

Die nachfolgenden Tabellen enthalten die von den genannten Beobachtern bei der Bestimmung der Unterschiedsschwellen in den benutzten sechs Spectralregionen erlangten Resultate. Die Überschrift gibt die Wellenlänge und den Beobachter an. Die besonderen Überschriften der einzelnen Columnen benutzen die auf S. 404 eingeführten Bezeichnungen.

Die oberen Grenzen der Beobachtungsreihen sind gegeben durch die höchst mögliche Leistung des Zirconlichtes; die unteren Grenzen schliesen unmittelbar an die noch zu besprechenden unteren Reizschwellen an.

K.

670 $\mu\mu$

B.

$\frac{J}{r+\delta r}$	α	$r = J \cos \alpha^2$	$\delta r = J \sin \alpha^2$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{r}{\tan \alpha^2}$
50000	8°20'	48950	1050	0.0215
20000	7 16	19680	320	0.0163
10000	7 10	9844	156	0.0158
5000	7 38	4912	88	0.0180
2000	7 24	1967	33	0.0169
1000	7 29	983	16.9	0.0172
500	8 10	490	10.1	0.0206
200	8 31	196	4.40	0.0224
100	9 50	97.1	2.92	0.0300
50	11 11	48.1	1.88	0.0391
20	12 10	19.1	0.89	0.0465
10	14 50	9.35	0.655	0.0701
5	17 38	4.54	0.459	0.101
2	24 27	1.66	0.343	0.207
1	30 31	0.742	0.258	0.347
0.5	37 50	0.312	0.188	0.603

$\frac{J}{r+\delta r}$	α	$r = J \cos \alpha^2$	$\delta r = J \sin \alpha^2$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{r}{\tan \alpha^2}$
50000	8°33'	48895	1105	0.0226
20000	7 47	19634	367	0.0187
10000	7 19	9838	162	0.0165
5000	7 2	4925	74.9	0.0152
2000	7 25	1967	33.3	0.0169
1000	7 41	982	17.9	0.0182
500	8 22	489	10.6	0.0216
200	8 38	195	4.51	0.0230
100	9 21	97.4	2.64	0.0271
50	10 26	48.4	1.64	0.0339
20	11 44	19.2	0.827	0.0431
10	13 23	9.46	0.536	0.0566
5	16 41	4.59	0.412	0.0898
2	23 27	1.68	0.317	0.188
1	32 20	0.714	0.286	0.401
0.5	41 41	0.279	0.221	0.793

K.

605 $\mu\mu$

B.

$\frac{J}{r+\delta r}$	α	$r = J \cos \alpha^2$	$\delta r = J \sin \alpha^2$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha^2}$
200000	11°55'	191500	8500	0.0445
100000	8 56	97590	2410	0.0247
50000	8 6	48900	1100	0.0203
20000	7 46	19635	365	0.0186
10000	7 21	9836	163	0.0166
5000	7 14	4921	79	0.0161
2000	7 43	1964	36	0.0184
1000	8 5	980	19.8	0.0202
500	8 25	489	10.7	0.0219
200	8 39	195	4.5	0.0231
100	9 36	97.2	2.78	0.0286
50	11 12	48.1	1.89	0.0392
20	12 25	19.1	0.92	0.0485
10	14 18	9.39	0.610	0.0650
5	18 44	4.48	0.516	0.115
2	23 23	1.68	0.315	0.187
1	27 25	0.788	0.212	0.269
0.5	31 45	0.362	0.138	0.383
0.2	35 13	0.133	0.0665	0.498

$\frac{J}{r+\delta r}$	α	$r = J \cos \alpha^2$	$\delta r = J \sin \alpha^2$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha^2}$
200000	13°10'	189620	10377	0.0547
100000	10 30	96680	3321	0.0343
50000	7 50	49070	929	0.0189
20000	7 0	19703	297	0.0151
10000	7 2	9850	150	0.0152
5000	6 49	4918	70.4	0.0143
2000	7 12	1969	31.4	0.0160
1000	7 28	983	16.9	0.0172
500	7 43	491	9.01	0.0184
200	8 38	195	4.51	0.0230
100	8 47	97.7	2.33	0.0239
50	9 26	48.7	1.34	0.0276
20	10 34	19.3	0.673	0.0348
10	13 4	9.49	0.511	0.0539
5	16 11	4.61	0.388	0.0842
2	24 17	1.66	0.338	0.204
1	27 38	0.785	0.215	0.274
0.5	29 13	0.381	0.129	0.313
0.2	32 13	0.143	0.0568	0.397
0.1	37 47	0.0625	0.0375	0.601

K.

575 $\mu\mu$

B.

$\frac{J}{r+\delta r}$	α	$r = J \cos \alpha^2$	$\delta r = J \sin \alpha^2$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha^2}$
100000	10°23'	96750	3250	0.0336
50000	9 16	48700	1300	0.0266
20000	8 14	19590	410	0.0209
10000	7 41	9821	179	0.0182
5000	7 25	4917	83.0	0.0169
2000	7 41	1964	36.0	0.0182
1000	7 49	981	18.5	0.0188
500	8 9	491	9.00	0.0205
200	8 40	195	4.50	0.0232
100	9 27	97.3	2.69	0.0277
50	10 19	48.4	1.61	0.0331
20	11 19	19.2	0.770	0.0400
10	13 58	9.42	0.582	0.0618
5	17 20	4.56	0.444	0.0974
2	21 41	1.73	0.273	0.158
1	24 20	0.830	0.170	0.204
0.5	27 12	0.395	0.104	0.264
0.2	31 8	0.146	0.0535	0.365
0.1	39 0	0.0604	0.0396	0.656

$\frac{J}{r+\delta r}$	α	$r = J \cos \alpha^2$	$\delta r = J \sin \alpha^2$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha^2}$
100000	11°22'	96120	3884	0.0404
50000	8 35	48885	1114	0.0228
20000	7 29	19706	339	0.0172
10000	7 25	9833	167	0.0169
5000	7 19	4919	81.1	0.0165
2000	7 15	1968	31.9	0.0162
1000	6 42	986	13.6	0.0138
500	7 22	492	8.22	0.0167
200	7 35	196	3.48	0.0177
100	8 33	97.8	2.21	0.0226
50	8 31	48.9	1.10	0.0224
20	9 59	19.4	0.601	0.0310
10	11 12	9.62	0.377	0.0392
5	15 35	4.64	0.353	0.0778
2	22 44	1.70	0.299	0.176
1	24 53	0.823	0.177	0.215
0.5	28 44	0.384	0.116	0.301
0.2	30 0	0.150	0.0509	0.333
0.1	36 36	0.0644	0.0355	0.551

K.

505 $\mu\mu$

B.

$\frac{J}{r+\delta r}$	α	$\frac{r}{J \cos \alpha^2}$	$\delta r = J \sin \alpha^2$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha^2}$
20000	7°59'	19610	390	0.0197
10000	7 44	9819	181	0.0184
5000	7 17	4920	80.0	0.0163
2000	7 37	1965	35.0	0.0179
1000	7 48	982	18.4	0.0188
500	8 0	490	9.70	0.0197
200	8 29	196	4.40	0.0222
100	8 59	97.6	2.44	0.0250
50	9 8	48.7	1.26	0.0258
20	9 55	19.4	0.59	0.0306
10	10 58	9.64	0.362	0.0375
5	12 46	4.76	0.244	0.0513
2	14 50	1.87	0.131	0.0701
1	16 28	0.920	0.0804	0.0874
0.5	17 33	0.454	0.0455	0.100
0.2	19 23	0.178	0.0220	0.124
0.1	21 26	0.0866	0.0133	0.154
0.05	25 21	0.0408	0.00917	0.224
0.02	30 5	0.0150	0.00503	0.336
0.01	31 23	0.00729	0.00271	0.372
0.005	34 34	0.00339	0.00161	0.475

$\frac{J}{r+\delta r}$	α	$\frac{r}{J \cos \alpha^2}$	$\delta r = J \sin \alpha^2$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha^2}$
20000	7°17'	19678	322	0.0163
10000	6 52	9857	143	0.0145
5000	7 4	4924	75.5	0.0154
2000	7 2	1970	30.0	0.0152
1000	7 7	985	15.3	0.0156
500	7 0	493	8.42	0.0151
200	7 46	196	3.65	0.0186
100	7 57	98.1	1.91	0.0195
50	8 34	48.9	1.11	0.0227
20	8 45	19.5	0.462	0.0232
10	10 21	9.68	0.323	0.0333
5	11 40	4.80	0.204	0.0426
2	13 22	1.89	0.107	0.0565
1	17 1	0.914	0.086	0.0937
0.5	19 29	0.444	0.0556	0.125
0.2	21 32	0.173	0.0269	0.156
0.1	23 38	0.0839	0.0161	0.191
0.05	25 4	0.0410	0.00897	0.219
0.02	25 25	0.0163	0.00368	0.226
0.01	26 58	0.00794	0.00206	0.259
0.005	31 4	0.00367	0.00133	0.363

K.

470 $\mu\mu$

B.

$\frac{J}{r+\delta r}$	α	$\frac{r}{J \cos \alpha^2}$	$\delta r = J \sin \alpha^2$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha^2}$
2000	7°41'	1964	36.0	0.0182
1000	7 25	983	16.7	0.0169
500	7 47	491	9.20	0.0187
200	8 28	196	4.30	0.0221
100	8 38	97.7	2.25	0.0230
50	9 7	48.7	1.25	0.0257
20	10 16	19.4	0.64	0.0328
10	11 7	9.63	0.372	0.0386
5	12 26	4.77	0.232	0.0486
2	15 30	1.86	0.143	0.0769
1	17 16	0.912	0.0881	0.0966
0.5	18 3	0.452	0.0480	0.106
0.2	20 53	0.175	0.0254	0.146
0.1	21 47	0.0862	0.0138	0.160
0.05	23 59	0.0417	0.00826	0.198
0.02	27 12	0.0158	0.00418	0.264
0.01	32 33	0.00710	0.00189	0.407
0.005	33 14	0.00350	0.00150	0.429

$\frac{J}{r+\delta r}$	α	$\frac{r}{J \cos \alpha^2}$	$\delta r = J \sin \alpha^2$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha^2}$
2000	6°50'	1972	28.4	0.0144
1000	6 40	986	13.5	0.0137
500	7 23	492	8.25	0.0168
200	7 52	196	3.75	0.0191
100	8 7	98.0	1.99	0.0203
50	9 19	48.7	1.31	0.0269
20	10 15	19.4	0.734	0.0327
10	11 17	9.62	0.383	0.0398
5	11 49	4.79	0.209	0.0438
2	12 40	1.90	0.0962	0.0505
1	14 49	0.935	0.0654	0.0700
0.5	16 28	0.460	0.0402	0.0874
0.2	19 42	0.177	0.0227	0.128
0.1	21 7	0.0870	0.0130	0.149
0.05	23 36	0.0420	0.00801	0.191
0.02	25 41	0.0162	0.00376	0.231
0.01	28 53	0.00767	0.00233	0.304
0.005	32 4	0.00359	0.00141	0.392

$J = \frac{r}{r + \delta r}$	α	$r = J \cos \alpha^2$	$\delta r = \sin J \alpha^2$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha^2}$
1000	7°40'	982	17.8	0.0181
500	8 24	489	10.7	0.0218
200	8 58	195	4.90	0.0249
100	9 2	97.5	2.46	0.0253
50	9 29	48.6	1.36	0.0279
20	10 41	19.3	0.690	0.0356
10	11 29	9.60	0.396	0.0413
5	12 50	4.75	0.247	0.0519
2	14 10	1.88	0.120	0.0637
1	15 47	0.926	0.0740	0.0799
0.5	18 6	0.452	0.0483	0.107
0.2	19 58	0.177	0.0233	0.126
0.1	21 45	0.0863	0.0137	0.159
0.05	24 37	0.0423	0.00771	0.210
0.02	28 13	0.0155	0.00447	0.288
0.01	29 56	0.00751	0.00249	0.331
0.005	33 58	0.00344	0.00156	0.454
0.002	37 27	0.00126	0.000739	0.587

$J = \frac{r}{r + \delta r}$	α	$r = J \cos \alpha^2$	$\delta r = J \sin \alpha^2$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha^2}$
2000	7°14'	1968	31.8	0.0161
1000	7 54	981	18.9	0.0192
500	8 16	490	10.3	0.0211
200	8 52	195	4.75	0.0243
100	9 18	97.4	2.61	0.0268
50	10 32	48.3	1.67	0.0346
20	11 23	19.2	0.780	0.0405
10	11 59	9.57	0.431	0.0450
5	13 5	4.74	0.256	0.0540
2	14 41	1.87	0.128	0.0687
1	16 25	0.920	0.0799	0.0868
0.5	17 34	0.454	0.0455	0.100
0.2	20 18	0.176	0.0241	0.137
0.1	22 3	0.0859	0.0141	0.164
0.05	24 10	0.0416	0.00838	0.201
0.02	26 25	0.0160	0.00396	0.247
0.01	27 8	0.00792	0.00208	0.263
0.005	30 34	0.00371	0.00129	0.349

In den folgenden Tabellen sind die von denselben Beobachtern erhaltenen Werthe der Unterschiedsschwellen für weisses Licht in derselben Anordnung aufgeführt.

K.

Weiss.

B.

$J = \frac{r}{r + \delta r}$	α	$r = J \cos^2 \alpha$	$\delta r = J \sin^2 \alpha$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha}$
1000000	10°43'	965420	34580	0.0358
500000	9 23	436710	13290	0.0273
200000	9 17	194795	5205	0.0267
100000	7 57	98087	1913	0.0195
50000	7 30	49148	852	0.0173
20000	7 32	19656	344	0.0175
10000	7 33	9827	173	0.0176
5000	7 37	4912	87.7	0.0179
2000	7 40	1964	35.6	0.0181
1000	7 36	983	17.5	0.0178
500	7 53	491	9.41	0.0192
200	8 29	196	4.35	0.0222
100	9 48	97.1	2.90	0.0298
50	10 12	48.4	1.57	0.0324
20	11 15	19.2	0.761	0.0396
10	12 19	9.54	0.455	0.0477
5	13 41	4.72	0.280	0.0593
2	17 2	1.83	0.172	0.0939
1	19 20	0.890	0.110	0.123
0.5	23 28	0.421	0.0793	0.188
0.2	28 1	0.156	0.0441	0.283
0.1	31 32	0.0726	0.0274	0.377
0.05	34 50	0.0337	0.0163	0.484
0.02	39 49	0.0118	0.0082	0.695

$J = \frac{r}{r + \delta r}$	α	$r = J \cos^2 \alpha$	$\delta r = J \sin^2 \alpha$	$\frac{\delta r}{r} = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha}$
1000000	11° 2'	963370	36630	0.0380
500000	10 23	483760	16240	0.0336
200000	9 47	194225	5775	0.0297
100000	8 20	97900	2100	0.0215
50000	7 55	49051	949	0.0193
20000	7 7	19693	307	0.0156
10000	7 16	9840	160	0.0163
5000	7 10	4922	77.8	0.0158
2000	7 39	1965	35.4	0.0180
1000	7 45	982	18.2	0.0185
500	8 27	489	10.8	0.0221
200	8 30	196	4.37	0.0223
100	8 35	97.8	2.23	0.0228
50	9 20	48.7	1.32	0.0270
20	10 20	19.4	0.643	0.0332
10	12 4	9.56	0.437	0.0457
5	13 0	4.75	0.253	0.0533
2	16 48	1.83	0.167	0.0912
1	18 49	0.896	0.104	0.116
0.5	22 8	0.429	0.0710	0.165
0.2	26 8	0.161	0.0385	0.241
0.1	29 55	0.0751	0.0249	0.331
0.05	35 8	0.0334	0.0166	0.495
0.02	39 4	0.0121	0.00794	0.659

Versuch einer Theorie des Einflusses der fleckigen Vertheilung des Eigenlichts der Netzhaut auf die Gröfse der Unterschiedsschwellen.

Es sei α die objective Lichtstärke, welche nöthig wäre, um dieselbe Stärke der Erregung in einem Flächenstück der Netzhaut hervorzubringen, wie sie im Eigenlicht derselben sich zu erkennen giebt. Da das letztere fleckig erscheint, wird α auf verschiedenen Stellen der Netzhaut verschiedene Werthe haben müssen. Der Flächenraum derjenigen dieser Membranstellen, deren Eigenlicht dem Intervall α bis $(\alpha + d\alpha)$ entspricht, sei $g \cdot d\alpha$, worin g im allgemeinen eine Function von α sein wird.

Wir wollen zunächst Bezeichnungen einführen für zwei Integrale. Es sei a der höchste vorkommende Werth von α . Wir setzen

$$\int_0^a g \cdot d\alpha = A \dots\dots\dots \} 1$$

Es ist das offenbar der Werth des Flächenstücks der Netzhaut, auf welches sich unsere Rechnung bezieht. Wir setzen ferner

$$\int_0^a g \cdot \alpha \cdot d\alpha = A \cdot J \dots\dots\dots \} 1 a$$

Die Gröfse J bezeichnet hiernach den mittleren Werth, den die Intensität α für die ganze Ausdehnung der Fläche A hat.

Die Empfindungsstärke dE für den Helligkeitsunterschied dr bei der objectiven Lichtstärke r betrachten wir als Summe aller Einzelwirkungen, die den einzelnen Helligkeitsstufen $d\alpha$ entsprechen, und setzen nach FECHNER's Gesetz

$$dE = dr \cdot \int_0^a \frac{g \cdot d\alpha}{\alpha + r} \dots\dots\dots \} 2$$

Um diese Integration auszuführen, führen wir statt α eine neue Variable ε ein indem wir setzen

$$\alpha = J + \varepsilon$$

Da α von 0 bis a steigen kann, kann ε von $(-J)$ bis $(a-J)$ steigen. Indem wir diesen Werth von α in die Function g einsetzen, stellen wir diese als Function von ε dar.

Wir schreiben dem entsprechend die Gleichung 2)

$$dE = dr \int_{-J}^{a-J} \frac{g \cdot d\varepsilon}{J + r + \varepsilon} \dots\dots\dots \} 2 a$$

Da die Grenzen der Integration immer dieselben bleiben, wollen wir sie nicht mehr bezeichnen.

Nun ist identisch

$$\frac{1}{J+r+\varepsilon} = \frac{1}{J+r} - \frac{\varepsilon}{(J+r)^2} + \frac{\varepsilon^2}{(J+r)^2 \cdot (J+r+\varepsilon)}$$

was leicht zu verificiren ist. Wenn wir dies einsetzen in die Gleichung 2a, erhalten wir

$$dE = \frac{dr}{J+r} \int g \cdot d\varepsilon - \frac{dr}{(J+r)^2} \int g \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon + \frac{dr}{(J+r)^2} \int \frac{g \cdot \varepsilon^2 \cdot d\varepsilon}{J+r+\varepsilon} \dots \quad \left. \vphantom{\frac{dr}{J+r}} \right\} 2b$$

Das erste Integral ist dasselbe wie das der Gleichung 1 und hat also den Werth A. Das zweite

$$\int g \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon = \int g \cdot (\alpha - J) \cdot d\alpha$$

Das wird mit Berücksichtigung von (1) und (1a)

$$\int g \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon = JA - J \cdot A = 0.$$

Der ganze Werth von dE reducirt sich also auf folgenden Ausdruck:

$$\begin{aligned} dE &= A \frac{dr}{J+r} + \frac{dr}{(J+r)^2} \cdot \int \frac{g \cdot \varepsilon^2 \cdot d\varepsilon}{J+r+\varepsilon} \dots \dots \dots \left. \vphantom{\frac{dr}{(J+r)^2}} \right\} 2c \\ &= \frac{A \cdot dr}{J+r} + \frac{dr}{(J+r)^2} \int \frac{g (\alpha - J)^2 \cdot d\alpha}{\alpha + r} \end{aligned}$$

Da in dem letzteren Integrale alle Factoren in Nenner und Zähler nothwendig positiv sind, so ist der Werth des Integrals jedenfalls positiv. Dieser zweite Summande im Werthe von dE verschwindet bei großen Werthen von r gegen den ersten, welcher dem FECHNERSchen Gesetze bei gleichmäßiger Intensität J des Eigenlichts entspricht. Für kleine objective Lichtstärken r dagegen vergrößert das zweite Glied den Werth von dE in merklicher Weise, d. h. die Wahrnehmung des Unterschieds dr wird deutlicher, als sie nach dem FECHNERSchen Gesetz für die Intensität des Eigenlichts J sein sollte, und der Schwellenwerth dr kann also kleiner gemacht werden, ohne ununterscheidbar zu werden.

Das in (2c) noch vorkommende Integral hat dieselbe Form wie das in (2a) enthaltene, mit dem einzigen Unterschiede, daß die zusammengesetztere Function

$$g \cdot \varepsilon^2 \cdot d\varepsilon = g (\alpha - J)^2 \cdot d\alpha$$

unter dem Integralzeichen an Stelle von $g \cdot d\varepsilon$ getreten ist. Man kann das neue Integral gerade wie das frühere behandeln, indem man setzt

$$\int g \cdot (\alpha - J)^2 \cdot d\alpha = A_2$$

$$\int g \cdot (\alpha - J)^2 \cdot \alpha \cdot d\alpha = A_2 J_2,$$

worin J_2 wiederum dem Mittelwerth der Function α über die ganze Fläche genommen, aber für eine andre Vertheilung der Werthe, wie sie durch $g (\alpha - J)^2$ gegeben ist, bezeichnet. Dabei werden die mittleren Werthe einflußlos, da für sie

$$\alpha - J = 0.$$

So erhält man

$$dE = \frac{A \cdot dr}{J+r} + \frac{A_2 dr}{(J+r)^2 \cdot (J_2+r)} + \frac{dr}{(J+r)^2 (J_2+r)^2} \int \frac{g \cdot (\alpha - J)^2 (\alpha - J_2)^2 \cdot d\alpha}{\alpha + r}$$

Auch das neue Integral ist nothwendig positiv. Man kann so weiter gehen, und es läßt sich auch zeigen, daß die entstehende unendliche Reihe convergent

sein muß selbst für kleine Werthe von r . Daß sie für größere Werthe von r schnell convergiren muß, ist leicht ersichtlich. Da die Reihe der verschiedenen A und J durch lauter positive Integrale gegeben wird, müssen sie auch alle positiv sein.

Bei dem bisher gewonnenen Material von Thatsachen wird es genügen, daß wir uns auf die ersten zwei Glieder dieser Reihe beschränken, um zu zeigen, in welchem Sinne die gemachten Annahmen das einfache FECHNERSche Gesetz verändern. Setzen wir also

$$dE = dr \cdot \left\{ \frac{A}{J+r} + \frac{A_2}{(J+r)^2 (J_2+r)} \right\}$$

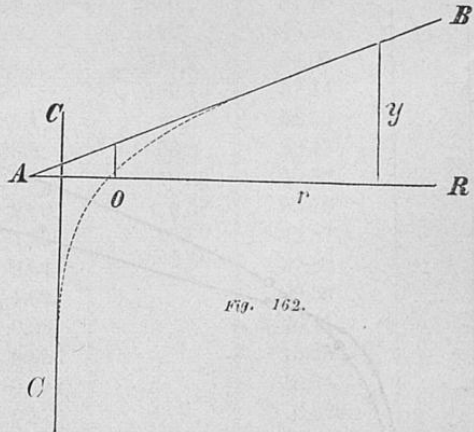
so ergibt dies

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dE} &= (J+r) \left[\frac{(J+r)(J_2+r)}{A(J+r)(J_2+r)+A_2} \right] \\ &= \frac{J+r}{A} \left[1 - \frac{A_2}{A(J+r)(J_2+r)+A_2} \right] \\ &= \frac{J+r}{A} - \frac{A_2}{A^2(J_2+r) + \frac{A_2 A}{J+r} \dots \dots \dots} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\frac{dr}{dE}} \right\} 2f$$

Im Nenner des zweiten Gliedes, welches an sich schon klein ist, wird sich das Glied mit r im Nenner für nicht zu kleine r ebenfalls vernachlässigen lassen. Dann bleibt nur stehen

$$\frac{dr}{dE} = y = \frac{J+r}{A} - \frac{A_2}{A^2(J_2+r)}$$

Betrachten wir hierin r und y als rechtwinkelige Coordinaten, so ist dies die Gleichung einer Hyperbel, deren eine Asymptote der y Axe parallel, von dieser um J_2 nach der negativen Seite hin abstehend, verlaufen würde. In Fig. 162 ist diese theoretische Curve dargestellt. O ist der Anfangspunkt der Coordinaten, längs der horizontalen Axe OR sind die Werthe der r aufgetragen, senkrecht dazu die Werthe der y , welche den Unterschiedsschwellen proportional sind, hier aber vergrößerten Maßstab haben, um die Zeichnung deutlicher zu halten. AB und CC sind die beiden Asymptoten der Hyperbel, deren über OR liegendes Stück den den Beobachtungen entsprechenden Theil der Curve darstellen würde. Indessen stellt die Hyperbel, wie oben bemerkt, nur eine abgekürzte Art der theoretischen Formel dar. In der



That würde die vollständigere Formel eine etwas niedere Führung der Curve dicht bei O bedingen, und in der That lassen auch die Beobachtungen eine Abweichung in diesem Sinne erkennen. Doch ist hier in dem Gebiete der schwachen Lichtstärken die Genauigkeit der Beobachtungen wohl kaum zureichend, um noch ein weiteres

Glied der Formel zu bestimmen. Die Versuche zeigen außerdem, daß hier Abweichungen zwischen den verschiedenen Farben bestehen, und wahrscheinlich wird außerdem hier das Gesetz durch Mischung verschiedener Grundfarben noch verwickelter.

Die Lage der Asymptote AB indessen scheint nach den genannten Beobachtern für alle Farben ziemlich dieselbe zu sein, während die Lage der zweiten Asymptote und der Abstand des Scheitels der Hyperbel vom Scheitelpunkt der Asymptoten (d. h. Mittelpunkt der Hyperbel) variiren würden, so weit eben die Hyperbeln überhaupt einen annähernden Ausdruck für den Gang der Function zu geben vermögen.

Ich gebe hier noch in Fig. 163 die nach den Beobachtungen von den genannten Beobachtern construirten Curvenformen für das spectrale Roth (Wellenlänge $670 \mu\mu$), wobei die Ordinaten im zehnfachen Maafsstabe der Abscissen aufgetragen sind. Die Curve K gilt für das trichromatische Auge des Herrn A. KOENIG, B für das dichromatische Auge des Herrn E. BRODHUN. Die Punkte und kleinen Kreise entsprechen den wirklich ausgeführten Beobachtungen. Die Ähnlichkeit mit hyperbolischen Bögen ist augenfällig, namentlich in der Curve B. Aber man würde geneigt sein die zweite Asymptote der Curve nicht gerade abwärts, sondern schräg geneigt zu ziehen.

Abweichend von der Deutung, welche die genannten Beobachter ihren Curven gegeben haben, würde nach den unsrer Formel zu Grunde gelegten Voraussetzungen die mittlere Stärke des Eigenlichts der Strecke ΔO (Fig. 162) entsprechen, welche nach der Rechnung gegen 50 der photometrischen Einheiten betragen würde, nach denen die Beobachter gerechnet haben. Daß die Strecke, die sie als Stärke des Eigenlichts deuten, verhältnißmäfsig zu klein ist, selbst im Vergleich zu den Flecken des Eigenlichts, ist für meine Augen unzweifelhaft. Es wäre noch erst zu ermitteln, ob etwa das Lebensalter hierin große Verschiedenheiten bedingt. Ich selbst kann keinen größeren Einfluß des Lichtstaubs auf meine Sehschärfe erkennen, als ich seit jeher gekannt habe.

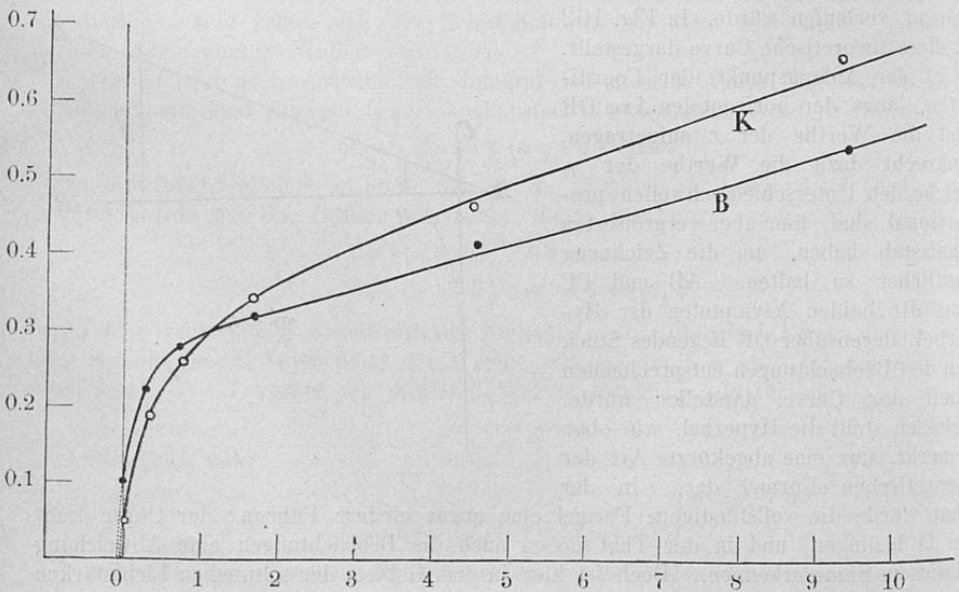


Fig. 163.

Abweichungen für hohe Lichtstärken.

Die Abweichungen von FECHNERS Gesetz, die für hohe Werthe der Lichtstärke r entstehen, können wir in der Formel ausdrücken, indem wir dem ersten und größten Gliede der Gleichung (2f) noch einen mit r steigenden Factor im Nenner hinzusetzen, wie ich dies schon in der ersten Ausgabe dieses Buchs gethan. Setzen wir also:

$$dE = \frac{A \cdot dr}{(J + r)(1 + \varepsilon r)} + \frac{A_2 \cdot dr}{(J + r)^2 (J_2 + r)} \dots \dots \dots 3$$

Darin soll ε eine verhältnißmäßig kleine Größe sein, welche für alle Farben gleichen Werth zu haben scheint, so weit bisher die messenden Beobachtungen reichen. Da die letzteren nur für die schwächeren Grade der Blendung ausführbar sind, indem bei höheren Graden der Zustand des Auges zu schnell sich ändert, so läßt sich in der mathematischen Formulirung höchstens ein Correctionsglied angeben, was die kleinen Abweichungen der Beobachtungen einigermaßen richtig darstellt.

Ich gebe in der folgenden Tabelle einen Vergleich der Ergebnisse dieser Formel mit den auf spectrales Roth bezüglichen Beobachtungen von Herrn A. KOENIG.¹ Bei

Höhere Lichtstärke ($r + dr$)	Unterschiedsschwelle dr für Roth von der Wellenlänge $670 \mu\mu$		Mittelwerthe für 6 beob- achtete Farben	Maafs der Klarheit $\frac{r}{dr}$
	beobachtet	berechnet		
200000		7158,2	8500	27,94
100000		2684	2830	37,26
50000	1050	1080	1150	46,30
20000	320	370	371,2	54,05
10000	156	175	169,75	57,14
5000	88	85,4	82,5	58,55
2000	33	33,8	36,5	59,17
1000	16,9	17,6	18,02	56,82
500	10,1	9,30	9,57	53,76
200	4,40	4,36	4,50	45,87
100	2,92	2,64	2,59	37,88
50	1,88	1,69		29,59
20	0,89	0,98		20,41
10	0,655	0,656		15,25
5	0,459	0,457		10,94
2	0,343	0,316		6,329
1	0,258	0,255		3,921
0,5	0,188	0,240		2,083
0,06	0,060	0,217		1,000

¹ A. KÖNIG und E. BRODHUN. *Sitzungs Ber. d. Akad. zu Berlin*. 1888. 26. Juli. S. 922

der Rechnung ist $A=60,8825$ der Einheiten der Lichtstärke r gesetzt, $J=74,3933$, $J_2=25$, ferner $A_2=2,5119$. A und $\frac{1}{\varepsilon}=150000$. Um ein Maafs für die relative

Präcision der Beobachtungen zu geben, die bei Bestimmungen der kleinsten wahrnehmbaren Unterschiede sich nie sehr weit treiben läßt, habe ich in der vorletzten Columnne für die grösseren Lichtstärken, bei denen die verschiedenen Farben nach dem Urtheil der beiden Beobachter keine regelmässigen Differenzen der Unterschiedsschwellen zeigen, noch die Mittel der Werthe für die sechs durchgemessenen Farben hingesetzt. Die unterste Reihe der Tabelle bezieht sich auf die Reizschwelle. Hier ist eine grössere Abweichung vorhanden; aber auch die Abweichung der darüber stehenden Zahl ist vielleicht nicht zufällig, sondern durch die Vernachlässigung der kleineren Glieder unserer Reihe bedingt.

Die letzte Columnne giebt aus den nach der Formel berechneten Werthen das Maafs der Klarheit nach der oben gegebenen Definition dieses Begriffs.

In der letzten Columnne zeigt sich das Maximum der Klarheit bei der Lichtstärke 2000, aber von 500 bis 20000 weicht es höchstens um ein Zehntel von diesem Maximum ab, also innerhalb eines Gebiets dessen obere Grenze die untere 40 mal an Lichtstärke übertrifft.

Bei dieser Lage des Maximum hat das mit A_2 multiplicirte Glied der Formel 3 kaum noch Einfluss, und man kann die Lage des Maximum allein aus dem ersten Gliede bestimmen. Nach der Definition ergibt sich der Werth der Klarheit K

$$K = \frac{r}{dr} = \frac{Ar}{(J+r)(1+\varepsilon r)} = \frac{A}{1-\varepsilon J} \left[\frac{1}{1+\varepsilon r} - \frac{J}{J+r} \right]$$

Um das Maximum zu bestimmen, müssen wir den Differentialquotienten von K nach r gleich Null setzen.

$$0 = \frac{dK}{dr} = \frac{A}{1-\varepsilon J} \left[\frac{J}{(J+r)^2} - \frac{\varepsilon}{(1+\varepsilon r)^2} \right]$$

Dies giebt das Maximum für

$$r = \sqrt{\frac{J}{\varepsilon}}$$

Dieser Rechnung nach würde das Maximum der oben berechneten Reihe bei $r=3022$ liegen und den Werth 59,50 haben. Der Werth der Empfindlichkeit ist hier merklich kleiner als man bei anderen Vergleichsmethoden erreicht zu haben glaubte, vielleicht weil die Felder nicht sehr gros waren.

Die Messungen der Unterschiedsschwellen für weisses Licht welche von denselben Beobachtern ausgeführt wurden¹ und oben schon angeführt sind, ergaben ganz entsprechende Resultate, so dafs die Messungen für Weiss in den

¹ A. KÖNIG und E. BRODHUN, Experimentelle Untersuchungen über die psychophysische Fundamentalformel. Zweite Mittheilung. *Sitzungsberichte der Akademie zu Berlin* 1889. 27. Juni.

höheren Graden der Lichtstärke denselben Gang einhielten, wie für die Spectralfarben, soweit diese übereinstimmende Unterschiedsschwellen gaben, für die schwächeren Beleuchtungen dagegen zwischen die Werthe der rothgelben und blauvioletten Farben hineinfließen. Da Herr BRODHUN das Blaugrün weiß erscheint, so zeigte sich also kein wesentlicher Unterschied in dem Verhalten dieses einfachen Weißs gegen das zusammengesetzte Weißs.

Die unteren Reizschwellen geben diejenigen Beleuchtungsstärken an, welche eintreten müssen um überhaupt das Vorhandensein einer objectiven Beleuchtung im Vergleich mit dem ganz dunklen Grunde des objectiven Feldes zu erkennen. Ich bemerke hier sogleich, daß dabei die räumliche Ausdehnung des beleuchteten Feldes einen sehr erheblichen Einfluß ausübt, worüber wir unten noch weiter handeln werden, daß auch Bewegungen der Objecte, namentlich solche, welche der Beobachter mit eigener Hand willkürlich hervorbringt, kleinere Unterschiede der Beleuchtung erkennbar machen, als sie bei ruhendem Objecte erfordert werden. Man kann zuweilen noch Nachts in einem ganz verdunkelten Schlafzimmer, wo von ruhenden Objecten nichts mehr zu erkennen ist, nicht einmal Spalten der Fenstervorhänge, durch welche Sternenlicht eindringen könnte, sondern scheinbar nur der Lichtstaub des dunklen Gesichtsfeldes erscheint, noch zuweilen Bewegungen der Hand des Beobachters oder des mit einem weißen Hemd bekleideten Arms erkennen, und sich durch Schluß der Augenlider doch überzeugen, daß es sich nicht um ein bloß subjectives Phänomen handelt. Doch ist zu bemerken, daß gelegentlich auch Täuschungen der letzteren Art vorkommen, wenn man dem bewegten Gliede unwillkürlich mit den Augen folgt, und zufällig Flecken des Eigenlichts da sind, die eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Bilde des Objects haben, und mit den Augen sich scheinbar im Raume fortbewegen und dem reellen Objecte folgen.¹

Die Angaben der Herren A. KÖNIG und E. BRODHUN beziehen sich auf dieselben für die Unterschiedsschwellen gebrauchten Einheiten der Lichtstärke und beleuchtete Felder der dort gebrauchten Ausdehnung. Sie sind folgende:

Untere Reizschwellen.

λ	KÖNIG	BRODHUN
670 $\mu\mu$	0,060	0,11
605	0,0056	0,011
575	0,0029	0,0055
505	0,00017	0,00035
470	0,00012	0,00013
430	0,00012	0,00014
—	—	—
Weißs	0,00072	0,00073

¹ H. v. HELMHOLTZ, die Störung der Wahrnehmung kleinster Helligkeitsunterschiede durch das Eigenlicht der Netzhaut, *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*. Bd. I. S. 5. 1890.

Photometrie. Die hier besprochene Fähigkeit des Auges kleine Unterschiede der Lichtstärke im Gesichtsfelde zu erkennen ist nun die Grundlage für die messende Vergleichung verschiedener Lichtstärken von Flächen. Wir können hierbei absehen von allen Methoden, wobei Strahlungsintensitäten nicht durch ihre Wirkung auf die Netzhaut sondern durch andre physikalische oder chemische Wirkungen verglichen werden z. B. durch Wärmeentwicklung, durch Änderung des galvanischen Widerstandes von Selen, durch Photographie u. s. w. Diese gehören nicht in die physiologische Optik. Auf den bisher immer noch sehr schwierigen Gebrauch solcher anderer Methoden sind wir übrigens nur in dem Falle angewiesen, wo es sich um Verfolgung solcher Strahlen handelt, die das Auge gar nicht, oder nur sehr schwach afficiren, und also auch nicht in engerem Sinne als Licht bezeichnet werden können.

Für die sichtbaren Strahlen schliessen wir aus der Gleichheit ihrer Wirkung auf beliebige Stellen der Netzhaut auf Gleichheit der objectiven Lichtstärke derselben. Genau kann eine solche Gleichheit nur für gleichfarbiges Licht vorhanden sein. Wir werden demgemäss hier auch zunächst von der photometrischen Vergleichung gleichfarbigen Lichtes (isochromatische Photometrie) handeln und dann erst zu der Frage übergehen, in wie weit Vergleichungen der Helligkeit verschiedenfarbigen Lichtes (heterochromatische Photometrie) möglich sind.

Das Auge kann immer nur die Gleichheit zweier hellen Felder anerkennen, und nicht ohne weitere objective Hilfsmittel das Quantitätsverhältniß verschieden grosser Lichtmengen bestimmen.

Wir brauchen also, wenn letzteres verlangt wird, noch ein optisches Verfahren, welches die Intensität des helleren Lichtes so weit und zwar in bekanntem Verhältniß herabsetzt, bis beide zu vergleichenden Helligkeiten gleich geworden sind. Dazu können, je nach der Natur der Aufgabe, außerordentlich verschiedene optische Methoden verwendet werden. Aber auch deren Discussion gehört wesentlich der rein physikalischen Optik an, so daß eine kurze Aufzählung der gewöhnlich praktisch gebrauchten hier genügen wird.

1) Änderung der Beleuchtung durch Änderung der Entfernung zwischen Lichtquelle und Object. Dies ist die älteste Methode ausgehend von BOUGUER.¹ Sie stützt sich auf den Satz, daß bei ungestörter Ausstrahlung des Lichts von einem leuchtenden Punkte in geradlinigen Strahlen die Helligkeit eines normal von den Lichtstrahlen getroffenen Flächenstücks umgekehrt dem Quadrat der Entfernung von dem leuchtenden Punkte proportional ist. LAMBERT² machte die Methode viel leichter und geschickter, indem er von zwei nicht ganz in derselben Richtung stehenden Lichtquellen dieselbe weisse Fläche nahehin senkrecht beleuchten ließ, vor diese einen verticalen Stab brachte, welcher zwei dicht neben einander liegende Schatten entwarf, und dann die stärkere Lichtquelle so weit entfernte, bis die beiden Schatten gleich hell waren. Diese Methode ist sehr viel

¹ PIERRE BOUGUER, *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*. Paris 1729. 1760. Lateinische Übersetzung. Wien 1762.

² JOHANN HEINRICH LAMBERT, *Photometria s. de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrarum*. AUG. VINDEL. 1760.

und sehr lange gebraucht worden. Es ist leicht zu sehen, daß hierbei der eine Schatten nur von der einen Lichtquelle, der andre von der andern Licht empfängt. Als Schatten erscheinen sie nur, weil der umgebende Grund gleichzeitig von beiden Lichtern beleuchtet wird, und deshalb heller erscheint. Dies ist übrigens ein Hinderniß für eine sehr feine und sichere Vergleichung der Helligkeit beider Schatten, da durch die Nähe stärkeren Lichtes in großer Ausdehnung die Pupille verengert und das Auge geblendet wird.

Bei der Anwendung derselben sind außerdem gewisse Vorsichtsmaßregeln zu beachten, wenn man genaue Resultate zu erhalten wünscht. Erstens muß man dafür sorgen, daß alles andre Licht ausgeschlossen sei, namentlich auch alles von den Wänden und andern Gegenständen reflectirte, welches die beiden zu vergleichenden Flächenstücke verschieden stark beleuchten könnte. Zweitens paßt die Regel vom umgekehrten Quadrat der Entfernung streng nur für leuchtende Punkte, annähernd gut für leuchtende Körper, deren Dimensionen im Vergleich zur Entfernung der beleuchteten Fläche verschwinden. Daraus folgt aber, daß die Methode nur mit Nutzen auf kleine Lichtquellen von großer Helligkeit angewendet werden kann, welche trotz ihrer geringen Ausdehnung doch viel Licht aussenden. (Geometrische Betrachtungen, die sich auf die Theorie dieser Beleuchtungen beziehen, siehe oben S. 206—215).

Hat von einem Punkte der letzteren aus gesehen der leuchtende Körper eine merkliche scheinbare Größe im Gesichtsfelde, so können auch nicht mehr alle Strahlen desselben senkrecht die Fläche treffen. Man würde dann nur durch Integration die Gesamtwirkung berechnen können, müßte zur Ausführung dieser Rechnung aber die Lichtstärke jedes Theils der Oberfläche des leuchtenden Körpers oder aber die jedes Flächenelements seiner perspektivischen Projection auf eine dem beleuchteten Punkte concentrische Kugel kennen.

Für einfache geometrische Formen wie z. B. kreisrunde Scheiben, oder cylindrische gerade Drähte (Kohlenfäden in Glühlampen) läßt sich eine solche Rechnung zuweilen durchführen.

2) Eine andre wichtige Methode zur Verminderung der Helligkeit in bekanntem Verhältniß ist bei polarisirtem Lichte anwendbar. Geht Licht durch zwei linear polarisirende Apparate hinter einander z. B. durch doppeltbrechende Prismen oder durch NICOLSche Prismen, so ist die Intensität des austretenden Lichts dem Quadrat des Cosinus des Winkels, den die Hauptschnitte der beiden Polarisatoren mit einander bilden, proportional. Dieses Verfahren ist unter Anderem schon erwähnt S. 357 bei der Beschreibung des Farbenmischungsapparates für Spektralfarben und S. 403 der Methode zur Bestimmung der Unterschiedsschwellen verschiedener Farben.

3) Schwächung des Lichts durch AUBERTS Episkotister. Letzterer besteht aus einer schnell umlaufenden kreisrunden Doppelscheibe. Die beiden an einander gelegten Scheiben, welche sie zusammensetzen, sind in eine gleiche Anzahl von gleich breiten Sektoren getheilt, die abwechselnd ausgeschnitten und stehen geblieben sind, nach Art der schon mehrfach erwähnten MAXWELLSchen Farbenscheiben. Wenn 40 oder mehr helle und dunkle Sektoren in der Secunde das einfallende Lichtstrahlenbündel durchschneiden, erscheinen die durch dasselbe gesehenen lichten Objecte dem Auge des Beschauers dauernd gleichmäßig hell, aber ihre Helligkeit ist vermindert in dem Verhältniß in dem die Winkelbreite je eines durchsichtigen Sektors zu der Summe der Winkelbreiten eines hellen und eines undurchsichtigen Sektors steht. Das Nähere über diese Methode im nächsten Paragraphen.

Wir kommen nun zu dem von den physiologischen Fähigkeiten des menschlichen Auges abhängigen Theile der photometrischen Methoden.

Aus dem, was oben über die Unterschiedsstufen der Helligkeit gesagt ist, erhellt zunächst, daß man die kleinsten Bruchtheile der ganzen Lichtstärke nur bei derjenigen Helligkeit, die dem Maximum der Klarheit entspricht, wahrnehmen können. Diese wird also die größte Genauigkeit in der Vergleichung erreichen lassen; größere oder geringere Helligkeit wird unvortheilhafter sein. Insonderheit sind ungeeignet eine Reihe älterer Methoden, bei denen man zu ermitteln suchte, welche Dicke einer absorbirenden Substanz man anwenden mußte, um das Licht ganz verschwinden zu machen, weil diese von dem sehr unsicheren Werthe der kleinsten Reizschwelle abhängen.

Eine fernere wesentliche Bedingung ist die, daß die beiden Felder, deren Helligkeit verglichen werden soll, dicht an einander stoßen, mit scharf accommodirbarer, scharfer Grenzlinie, die durch nichts andres Sichtbares als durch den Unterschied der Helligkeit bezeichnet sein darf. Jede noch so feine helle oder dunkle Linie, die die Grenze markirt, macht die Vergleichung weniger sicher.

LAMBERTS oben erwähnte Methode mit den zwei Schatten desselben Stabes entspricht dieser Forderung ziemlich gut. Wenn man den Stab in solcher Entfernung von dem weißen Schirm, diesem parallel, hält, daß die zwei Schatten, welche die beiden Lichter entwerfen, sich gerade berühren, so schließsen sich die beiden Schattenfelder ziemlich gleichmäßig an einander. Damit sie es aber vollständig thun, würden beide Lichtquellen vom Stabe aus gesehen ganz gleiche scheinbare Breite im Gesichtsfelde haben müssen, was selten zutreffen wird. Auch würden die beiden Schattengrenzen nicht ganz scharf gezeichnet sein, sondern durch Halbschatten in Hell übergehen. Ferner ist die helle Umgebung störend, deren Beleuchtung doppelt so stark, als die der beiden zu vergleichenden Schatten ist, weil sie das Auge etwas blendet.

Noch vollkommener wurde das Verschwinden der Grenzlinie durch R. BUNSENS¹ Photometer erreicht. Ein Papierblatt, auf dem mit heißem Wachs oder Paraffin ein Fettfleck gemacht ist, wird von vorn und hinten beleuchtet. Der nicht gefettete Theil des Papiers wirft nahehin alles Licht, was an der vordern Seite darauf fällt, zurück, und läßt nur sehr kleine Mengen von der hintern Seite durchscheinen. Umgekehrt der Fettfleck. Bei einem gewissen Verhältniß der Entfernungen beider Lichter wird der Fettfleck gerade so hell erscheinen, wie das ungefettete Papier, indem genau ebenso viel von dem hintern Lichte im Flecke nach vorn dringt, als vom vorderen Lichte verloren geht, während es seinen Weg nach hinten fortsetzt. Dann wird der Fleck unsichtbar. Bringt man das hintere Licht näher heran, so erscheint er heller als der Rest des Papiers, dunkler dagegen, wenn man dasselbe Licht entfernt. Das Verhältniß, in welchem die beiden Beleuchtungen stehen müssen, um den Fettfleck unsichtbar zu machen, ergibt sich, wenn man mit zwei gleichen Kerzen die Versuche anstellt, und das Verhältniß ihrer Entfernungen vom Papier ermittelt, die den Fleck verschwinden machen. Zur Prüfung ihrer Gleichheit vertauscht man die beiden Kerzen und wiederholt die Messung.

Das BUNSENSche Photometer ist viel gebraucht worden, namentlich für die technischen Lichtmessungen. Es findet aber bei demselben der nachtheilige Umstand statt, daß der Fettfleck ein Gemisch beider Beleuchtungen zeigt, die verglichen werden sollen und nur der ungefettete Rand, wenn er ganz undurchsichtig ist, die

¹ Pogg. Ann. Bd. 63. S. 578.

Wirkung des vorderen Lichtes allein. Denn, wenn wir auch in dem letzteren günstigsten Falle mit A die Helligkeit des von vorn beleuchteten dunkleren Randes bezeichnen, mit a die geringere Helligkeit, welche der Fettfleck bei Beleuchtung von vorn vor dunklem Hintergrunde zeigt, mit B aber seine Helligkeit, wenn er nur durch das hintere Licht beleuchtet ist; so ist der Unterschied beider Helligkeiten

$$A - (B + a) = (A - a) - B$$

Aber die beiden Helligkeiten $(A - a)$ und B , deren Unterschied wahrgenommen werden soll, sind beide noch gleichmäÙig überdeckt von der gemeinsamen Helligkeit a , wodurch die Wahrnehmung ihres Unterschieds erschwert wird.

Es ist leicht einzusehen, daÙ man gröÙere Genauigkeit in der Vergleichung erreichen muÙ, wenn das zweite Feld eine Helligkeit zeigt, die nur von der hinteren Lichtquelle abhängt. Diese Aufgabe lieÙ sich mittels des von den Herrn LUMMER und E. BRODHUN¹ construirten Photometers lösen, in welchem die totale Reflexion benutzt wird, um die beiden beleuchteten Flächen von einander zu scheiden.

Zur Erläuterung des von den genannten Autoren benutzten Princips gehen wir von der Fig. 164 aus. Es seien ll und $\lambda\lambda$ diffus leuchtende Flächen, A und B sei eine derartige Combination zweier rechtwinkliger Glasprismen, daÙ an gewissen Stellen (pq und hi) der Hypotenusenfläche des Prismas B das von λ kommende Licht nach O reflectirt wird, während es an den übrigen Stellen (qh) durch das Prisma hindurch nach r geht. Das Umgekehrte soll bei den von l ausgehenden Strahlen in Bezug auf die Hypotenusenfläche des Prismas A stattfinden. Accommodirt ein bei O befindliches Auge auf die Fläche $pghi$, so erblickt es also den Theil qh derselben mit dem Lichte von l , den Theil pq und hi mit dem Lichte von λ erleuchtet. Bei einem gewissen IntensitätsverhältniÙ der Felder l und λ wird $pghi$ als eine vollständig gleichmäÙig helle Fläche erscheinen.

Geeignete Prismencombinationen lassen sich in folgender Weise herstellen:

1. Die beiden Prismen A und B sind bei qh mittels einer Substanz vom Brechungsindex des Glases zusammengekittet, während bei pq und hi die Hypotenusenflächen durch Luft getrennt sind. Um die Grenze zwischen den beiden Feldern im Moment der Gleichheit zum Verschwinden zu bringen, ist es nothwendig A und B möglichst fest an einander zu pressen. Diese Combination bietet die Möglichkeit, auch von r aus das Verschwinden zu beobachten, so daÙ gleichzeitig zwei Personen einstellen können. Gleichheit der Felder findet hier statt, wenn l und λ dieselbe Intensität besitzen.

2. Die Hypotenusenfläche des Prismas B wird versilbert und an der Stelle qh die Silberschicht entfernt; hierauf werden die beiden Prismen mit geeignetem Kitt verbunden. Die Metallreflexion bewirkt, daÙ die Gleichheit der Felder nur bei ungleicher Helligkeit von l und λ herbeigeführt wird. Durch Auskratzen der verschiedensten Figuren kann man die Gestalt der Felder variiren.

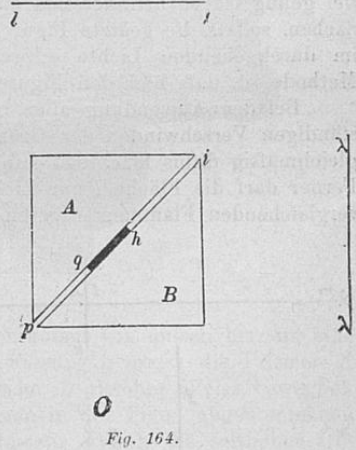


Fig. 164.

¹ O. LUMMER und E. BRODHUN, Photometrische Untersuchungen. Zeitschrift für Instrumentenkunde. 1889. S. 41.

3. Die Hypotenusenfläche des Prismas *A* ist nicht eben, sondern kugelförmig geschliffen und an die ebene Hypotenusenfläche von *B* angepresst (Fig. 165). Bei genügend starkem Druck entsteht eine kreisrunde Berührungsfläche bei *m*; alle auf diese Fläche auftreffenden Strahlen gehen vollständig durch sie hindurch, welches auch ihr Einfallswinkel sein mag. Ist es der Winkel der totalen Reflexion, so sieht man bei Abbildung der Lichtquelle *l* in der leuchtenden Hypotenusenfläche von *B* einen schwarzen elliptischen Fleck mit allmählig heller werdendem Rande. Bei kleinerem Einfallswinkel lagern sich um diesen dunklen Fleck als Centrum die NEWTON'schen Interferenzringe.

Fig. 165.

Bei Anwendung stärker gekrümmter Kugelflächen wird der Rand des elliptischen Flecks zwar ausreichend scharf, aber gleichzeitig damit tritt eine solche Verkleinerung des Flecks ein, daß die an demselben auftretende Beugungserscheinung das Phänomen stört.

4. Die kugelförmige Oberfläche des Prismas *A* wird bei *cd* (Fig. 166) eben angeschliffen und gegen die ebenfalls ebene Hypotenusenfläche des Prismas *B* gepresst. Der in diesem Falle auftretende, elliptisch erscheinende Fleck hat durchaus scharfe Ränder und verschwindet bei Gleichheit der Felder vollständig. Diese Combination genügt sehr gut allen Anforderungen.

5. Die beiden Prismen werden auf ihrer ganzen Hypotenusenfläche gegen einander eben abgeschliffen. Dann wird irgend eine Zeichnung in die Fläche des Prisma *A* eingätzt und wiederum das Prismenpaar innig aneinander gepresst. Wenn die Ätzung tief genug ist, so befindet sich an den geätzten Stellen Luft zwischen den Hypotenusenflächen, sodafs die geätzte Figur im reflectirten Lichte hell auf schwarzem Grunde und im durchgehenden Lichte schwarz auf hellem Grunde erscheint. Der Vorzug dieser Methode ist, daß hier den Figuren jede gewünschte Form gegeben werden kann.

Bei der Anwendung aller beschriebenen Prismencombinationen müssen zum vollständigen Verschwinden der Grenze zwischen den beiden Feldern die Flächen λ und λ' gleichmäßig diffus leuchtend sein, also etwa beleuchtete Papiere, Milchglasplatten u. s. w. Ferner darf die Fläche λ nur Licht von der einen, λ' nur Licht von der andern der zu vergleichenden Flammen erhalten.

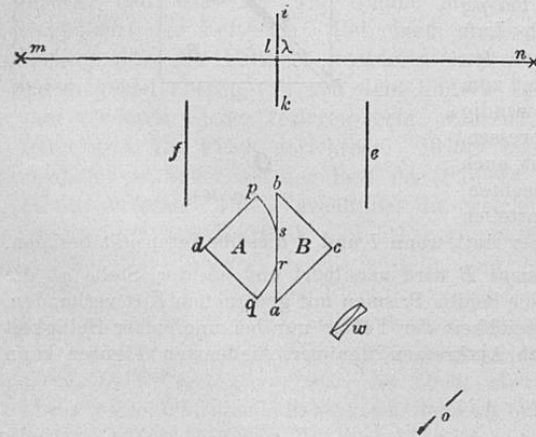


Fig. 167.

Es kam noch darauf an, unter Benutzung einer der angegebenen Prismencombinationen ein für die praktische Lichtmessung geeignetes Photometer herzustellen, welches also, ebenso wie das BUNSEN'sche, auf einer geraden Photometerbank verschiebbar sein mußte. Die Autoren wählten die in Fig. 167 skizzierte Anordnung. Lothrecht zur Axe der Photometerbank steht der Schirm *ik*, welcher gar kein Licht hindurch läßt und dessen beide Seiten von den Lichtquellen *m* bzw. *n* erleuchtet werden. Das diffuse, von den Schirmseiten λ und λ' ausgehende Licht fällt auf die Spiegel *e* bzw. *f*, welche es senkrecht auf die Kathetenflächen *cb* und *dp* der Prismen *B* und *A* werfen. Der

Beobachter bei o blickt durch die Lupe w senkrecht zu ac und stellt scharf auf die Fläche $arsb$ ein.

Figur 168 giebt eine perspectivische Ansicht des nach dieser Anordnung in der physikalisch technischen Reichsanstalt ausgeführten Photometers. Die vertikale messingene Säule s trägt die Metallschiene b , auf welcher die Säulchen s_1 und s_2 aufgeschraubt sind. In den oberen Theilen der letzteren sitzen die Schrauben m_1 und m_2 , in deren Enden konische Pfannen eingedreht sind. Diese Pfannen bilden das Lager für die horizontale Axe a des Photometergehäuses h . Am Gehäuse ist bei w das Rohr r mit der verschiebbaren Lupe angebracht. Im Innern des Gehäuses liegen die Prismencombination $A B$, die beiden Spiegel, von welchen nur der eine f zu sehen ist, und der Photometerschirm P . Letzterer sitzt im Rahmen n_1 , dessen Fußplatte auf dem Boden des Gehäuses h verschiebbar und feststellbar ist; der Schirm kann behufs Erneuerung oder Drehung um 180 Grad aus dem Rahmen n_1 entfernt werden. Jeder der Spiegel e und f ist mit Hülfe

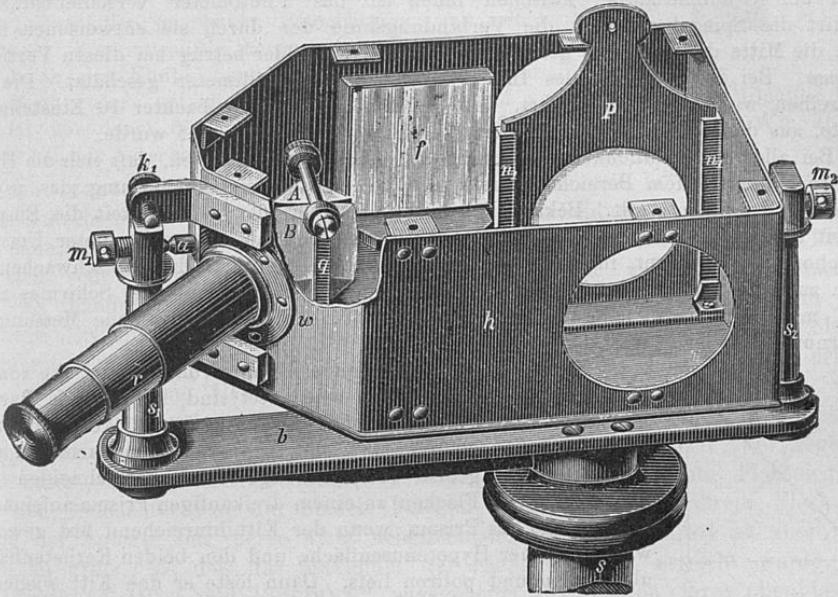


Fig. 168.

je zweier durch den Boden von h hindurchreichender Schrauben von außen her um eine horizontale sowie um eine verticale Axe drehbar. Die Fassung q preßt die Prismen A und B innig aneinander und ruht auf einer Platte, welche in gleicher Weise beweglich ist wie der Rahmen n_1 . Das Gehäuse h wird durch einen in der Figur abgenommenen Deckel mit Schlitz für den Griff des Schirmes P geschlossen. Durch die seitlichen Öffnungen kann Licht zum Papier von P gelangen. Bei der dargestellten Lage des Photometergehäuses wird ein als Anschlag dienender, in Fig. 168 nicht sichtbarer Schraubenkopf k_2 durch eine an der Säule s_1 verschiebbare Hülse fest an die Säule angeedrückt. Nach Drehung der Axe des Gehäuses um 180 Grad dient ein zweiter Schraubenkopf k_1 als Anschlag. Die auf einem Schlitten der Photometerbank angebrachte Säule s kann auf und ab bewegt und um eine verticale Axe gedreht werden.

Der zu den Versuchen benutzte Schirm bestand aus doppelten Lagen Papier, welche durch ein Stanniolblatt getrennt sind. Man taucht das Papier in Wasser, trocknet es mit Fließpapier und klemmt es noch feucht zwischen die beiden Metallplatten des Schirms P . Auf diese Weise erhält man einen vollkommen undurchsichtigen Schirm mit gut ebenen und diffus reflektierenden Flächen. Dasselbe erreicht man durch eine Gyps-

platte oder eine beiderseitig matt weiß angestrichene Metallplatte. e und f sind ausgesuchte, ebene, mit Quecksilberamalgam belegte Spiegel, welche von demselben Stück geschnitten sind. Statt derselben können natürlich auch total reflectirende Prismen benutzt werden. Vor der Lupe ist in gewisser Entfernung ein Diaphragma angebracht, welches größer als die Pupille sein muß. Dem Gesichtsfelde kann man dadurch eine scharfe Umgrenzung von gewünschter Form geben, daß man die äußeren Theile der Hypotenusenfläche von B mit Asphaltlack bestreicht.

Man konnte bei diesem Photometer eine Änderung von 1,5% der Intensität einer Lichtquelle ohne Weiteres deutlich wahrnehmen; der mittlere Fehler einer Einstellung bleibt unter 0,5%. Bei den Versuchen zur Prüfung der Genauigkeit wurden als Lichtquellen die Spiegelbilder einer und derselben von Accumulatoren gespeisten Glühlichtlampe, welche hinter der Mitte der Bank, fest mit ihr verbunden, in Höhe des Photometerschirmes aufgestellt war, verwendet. Die Spiegel sitzen auf der Bank zu beiden Seiten der Glühlichtlampe; zwischen ihnen ist das Photometer verschiebbar. Man orientirt die Spiegel so, daß die Verbindungslinie der durch sie entworfenen Bilder durch die Mitte des Schirmes geht. Der Abstand der Bilder betrug bei diesen Versuchen 2600 mm. Bei der Ablesung des Index wurden Zehntelmillimeter geschätzt. Die Versuchsreihen wurden so ausgeführt, daß Jeder der beiden Beobachter 10 Einstellungen machte, aus denen der mittlere Fehler einer Einstellung berechnet wurde.

Bei allen Empfindlichkeitsbestimmungen wurde darauf gesehen, daß sich die Helligkeit der Felder in dem Bereich befand, in dem mit großer Annäherung das psychophysische Grundgesetz gilt. Bekanntlich nimmt bei geringerer Helligkeit die Empfindlichkeit unseres Auges schnell ab. Bei praktischen Lichtmessungen ist dieser Umstand, wie schon oben erwähnt, insofern sehr störend, als man es mit sehr lichtschwachen Einheiten zu thun hat. Um mit ihnen eine genügende Beleuchtung des Schirmes zu erzielen, muß man sie so nahe an das Photometer bringen, daß die genaue Messung der Entfernung schwierig wird.

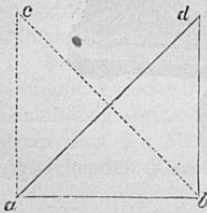


Fig. 169.

Nahe und enge Aneinanderstellung von Flächen, die von verschiedenen Lichtquellen her beleuchtet sind, hat Herr E. BRÜCKE¹ in anderer Weise erzielt, indem er aus gleich dicken, und nicht zu dicken nahezu planparallelen schlierenfreien farblosen Glasplatten gleich große rechtwinkelige Dreiecke schneiden ließ, diese mit ihren Flächen zu einem dreikantigen Prisma aufeinanderkittete, und das Prisma, wenn der Kitt hinreichend fest geworden war, an seiner Hypotenusenfläche und den beiden Kathetenflächen abschleifen und poliren ließ. Dann löste er den Kitt wieder auf und reinigte die einzelnen Dreiecke und legte sie in ein besonders

dazu hergestelltes Gestell Fig. 170 trocken übereinander, daß je eine Kathete ab jedes Dreiecks in die dem Beobachter zugekehrte Vorderebene der Glasmasse fiel, die

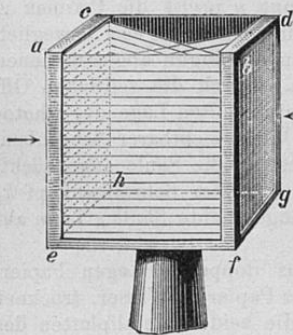


Fig. 170.

Hypotenusen je zweier auf einanderfolgender Dreiecke ad und bc sich dagegen rechtwinkelig schnitten, wie es Fig. 169 darstellt.

Die Seitenflächen des Gestells $ache$ und $bdfg$ sind mit durchscheinendem Papier geschlossen und durch die zu vergleichenden Lichter beleuchtet. Der Beobachter sieht an der Vorderseite abwechselnde Streifen der einen und andern Beleuchtung, die von den Hypotenusenflächen gespiegelt sind, und versucht durch Entfernen und Annähern der Lichter dieselben gleich zu machen. Für gleichfarbige Beleuchtung würde dies ausreichen. Für Vergleichung verschieden gefärbter Lichter nimmt er dann noch Verringerung der scheinbaren Größe der Streifen zu Hülfe, indem er entweder in größere Ent-

¹ E. BRÜCKE, „Über zwei einander ergänzende Photometer“ in *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 1890. Januar.

fernung geht, dabei für vollkommen gute Accommodation durch Brillengläser sorgend, oder das streifige Feld durch einen umgekehrten Operngucker in verkleinertem Bilde betrachtet. So sucht er zu ermitteln, bei welchem Verhältniß der Beleuchtungen der Unterschied der Streifen bei verhältnißmäßig größter scheinbarer Größe des Bildes verschwindet.

Ein ähnlich construirter Apparat, der aber nur zwei dickere Prismen *Fig. 171* enthält, dient dazu bei denselben Beleuchtungen Versuche über die Erkennbarkeit kleiner Objecte anzustellen, die an den beiden Seitenflächen des Gestells angebracht sind z. B. Zeichnungen mit feinen Linien oder feine Gewebe.

LEONHARD WEBER¹ hat ebenfalls ein Photometer angegeben bei dem eine Nebeneinanderstellung der von zwei Lichtquellen gegebenen Beleuchtungen mit wenig sichtbarer Trennungslinie hergestellt ist. Diese wird nur durch die Kante eines total reflectirende rechtwinkligen Prisma gebildet; die hellen Felder sind von transparenten Milchglasplatten gebildet, von denen die eine direct, die andere reflectirt gesehen wird. Wir kommen darauf bei der heterochromatischen Photometrie zurück.

Contrastphotometer. Die Aufgabe des Beobachters bei diesen Photometern ist zu entscheiden, ob die Deutlichkeit der Unterscheidung von zwei gleichzeitig und nahe neben einander unter übrigens gleichen Umständen gesehenen Feldern, die sich sehr wenig von ihrem Grunde unterscheiden, gleich oder verschieden sei. Es handelt sich also darum zwei sehr kleine Lichtunterschiede in Bezug auf ihre Erkennbarkeit mit einander zu vergleichen. Das Princip dieser Methode ist zuerst angewendet worden von Herrn FR. RÜDORFF,² und derselbe erkannte auch die überlegene Genauigkeit dieser Methode, der älteren gegenüber, welche auf Ununterscheidbarkeit einstellt. RÜDORFF stellte das mit einem Fettfleck versehene senkrechte Blatt eines BUNSENSchen Photometers zwischen zwei gegen das Blatt unter einem passenden Winkel geneigte ebenfalls senkrechte Planspiegel, so daß der Beobachter jede der beiden Flächen des Papiers mit ihrem Fleck in je einem der Spiegel sah, beide dicht neben einander. Der Contrast ist aber hierbei meist zu groß, als daß das Maximum der Empfindlichkeit erreicht wurde. Erst die durch LUMMER und BRODHUN³ angegebene Modification ihres oben beschriebenen Photometers erlaubt die Größe des Unterschieds zu verändern und die vortheilhaftesten Bedingungen für jeden Beobachter herauszusuchen. Für sehr geübte Beobachter ist ein kleinerer Unterschied der Beleuchtung (2 bis 3 %) am vortheilhaftesten, als für ungeübte (3,5 %).

Die genannten Beobachter brauchten wiederum zwei mit den Hypotenusenflächen an einander gelegte rechtwinkelige Prismen, und die gleiche Beleuchtungsweise, wie in ihrem vorher beschriebenen Apparate, wo auf Gleichheit der Helligkeit der beiden Flächenheile eingestellt wird. Für das Contrastphotometer ist 1) die durch Sandgebläse eingätzte Figur der einen Hypotenusenfläche abweichend, nämlich nach neuester Angabe entsprechend der *Fig. 172*. Die punctirten Flächenstücke sind geätzt, und geben totale Reflexion des gespiegelten Lichts, die leeren sind in optischem Contact mit dem andern Prisma und zeigen das durchgehende Licht.

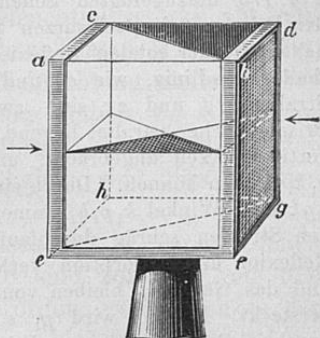


Fig. 171.

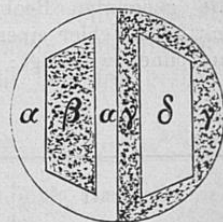


Fig. 172.

¹ L. WEBER, Mitteilung über einen photometrischen Apparat in *Wiedemann's Annalen*. XX. 326.

² FR. RÜDORFF, „Über das BUNSENSche Photometer“, *Pogg. Ann. Jubelband*. S. 234.

³ O. LUMMER und E. BRODHUN, „Photometrische Untersuchungen II“ in *Zeitschrift für Instrumentenkunde*. December 1889.

2) Um kleine veränderliche Differenzen der Lichtstärke zu erreichen, sind auf jeder Seite zwei verticale drehbare Glasplättchen hinzugefügt, nach dem in dem Grundriss *Fig. 173* hinzugefügten Schema. *ah* ist ein Horizontalschnitt der Hypotenusenflächen der Prismen; die schwarzen Stellen zeigen die Orte des optischen Contacts an, die hellen die der totalen Reflexion. In Folge dessen gehen Strahlen durch das Prisma, theils geradlinig, wie *cc* und *dd*, theils reflectirt, wie *ee* und *ff*. In den Weg der Strahlen *ff* und *cc* sind zwei ebene Glasplättchen *ph* und *p₁h₁* angefügt, den Prismenflächen parallel liegend, mit dünner Luftschicht dazwischen; in *p* und *p₁* sind zwei verticale Axen angebracht, um welche sich andre Glasplatten derselben Art *pk* und *p₁k₁* drehen können. Durch eine Gelenkverbindung *klp₁* wird bewirkt, das der Winkel *hpk* dem Winkel *k₁p₁h₁* immer gleich bleibt. Da die beiden Platten *kp* und *k₁p₁* von den Strahlen schräg durchlaufen werden, so geht in ihnen etwas mehr Licht durch Reflexion und Absorption verloren, als in *ph* und *p₁h₁*. Die Ränder der Glasplatten und das Gelenk *p* bleiben von *O* her gesehen hinter dem total reflectirenden Streifen γ versteckt. Ebenso wird *p₁* so gelegt, das sein Spiegelbild hinter dem vollkommen durchsichtigen Streifen erscheinen müßte, aber wegen mangelnder Reflexion nicht erscheint. Die Mittelfelder β und δ unterliegen nur dem schwächeren Lichtverluste an den senkrecht durchstrahlten Glasplatten *ph*, die Randfelder dagegen $\alpha\alpha$, und $\gamma\gamma$, dem stärkeren Verluste durch die schräg gestellten Platten *pk*. Ist das Photometer also auf Gleichheit der symmetrisch liegenden Felder eingestellt, so erscheinen beide Mittelfelder etwas heller als die Randfelder. Kommt aber ein Helligkeitsunterschied zwischen dem durchgelassenen und total reflectirten Licht hinzu, so addirt sich derselbe im einen Felde, im andern subtrahirt er sich zu und von der Helligkeitsdifferenz der Mittelfelder. Diese wird auf der einen Seite deutlicher, auf der andern undeutlicher.

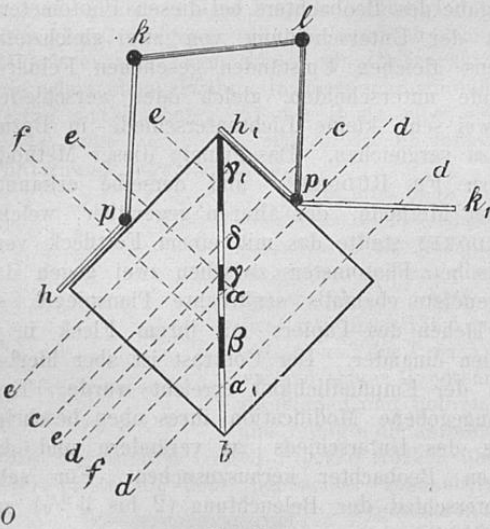


Fig. 173.

Bei geringerem Contrast als 3% sind die Einstellungen, da sie dem Schwellenwerth zu nahe liegen zu ermüdend. Bei 18% Contrast ist die Empfindlichkeit schon entschieden geringer als beim Gleichheitsphotometer, wo, wie oben erwähnt, der mittlere Fehler sich auf etwa 0,5% beläuft. Farbenunterschiede stören das Contrastphotometer mehr als das Gleichheitsphotometer.



Um einen Begriff von der Genauigkeit der Einstellungen zu geben, haben die genannten Beobachter Messungen mit verschiedenen Contrasten angestellt, und die mittleren Fehler einer Einstellung aus je 20 hinter einander angestellten Beobachtungen berechnet, wie folgt:

Contrast	3 %	3,5 %	7 %	10 %	18 %
Mittlerer Fehler einer Einstellung	0,24 %	0,22 %	0,39 %	0,43 %	0,81 %

Abhängigkeit der Sehschärfe von der Beleuchtungsintensität.

Ich habe schon oben (S. 255 und 264) erwähnt, daß die Erkennbarkeit kleiner Gesichtsobjecte in hohem Grade von der Beleuchtungsstärke abhängt. Diese Thatsache ist seit langer Zeit bekannt. Schon TOBIAS MAYER (1754) beobachtete, daß die Sehschärfe bei schwacher Beleuchtung abnimmt, bei steigender Beleuchtung dagegen zunimmt, bis Blendung eintritt, wo sie wieder geringer wird. Bei der Wichtigkeit, welche in neuerer Zeit die Messungen der Sehschärfe für die Augenheilkunde erreicht haben, sind diese Studien vielfach wieder aufgenommen worden.

Neuere methodische Bestimmungen der Sehschärfe in verschiedenen Spectralfarben bei wechselnder Beleuchtungsstärke sind zunächst von den Herren MACÉ DE LÉPINAY und NICATI¹ gemacht worden, wobei sich in der That herausstellte, daß auch die Sehschärfe in den blauen Farben bei geringer Lichtstärke dieselbe Überlegenheit zeigt, wie die scheinbare Helligkeit. Dasselbe Resultat wurde von Herrn W. UHTHOFF² bestätigt für eine viel breitere Abstufung der Lichtstärken, als seine Vorgänger angewendet hatten.

Für seine Versuche mit Spectralfarben hat sich derselbe ein großes mit der Farbe gleichmäßig gefülltes Feld nach der in *Fig. 128* S. 301 skizzirten Methode verschafft, indem er das Glasprisma durch ein viel größeres Flüssigkeitsprisma ersetzte, welches mit dem stark dispergirenden zimmtsauen Äthyloxyd gefüllt war. Vor der hellen farbigen Fläche war eine verschiebbare Glastafel mit den von SNELLEN neuerdings für die ärztlichen Prüfungen der Sehschärfe (S. 264) eingeführten Gesichtszeichen angebracht. Es sind dies Häkchen von der Form  und , welche vor dem hellen Grunde liegen, und von einem Assistenten gedreht werden können. Sie werden ohne Wissen des Beobachters mit ihrer Öffnung bald nach oben, oder unten, rechts oder links gekehrt, und der Beobachter muß danach angeben, wie sie stehen. Als Einheit der Sehschärfe gilt es, wenn er dies für das erste Zeichen unter einem Gesichtswinkel von 4'40'', für die zweiten unter einem von 5' thun kann. Dieser Einheitswinkel, dividirt durch den Sehwinkel, unter dem die Unterscheidung möglich ist, giebt den Werth der Sehschärfe. Da bei verschiedenen Lichtstärken gearbeitet werden sollte, wurde der Einfluß der Pupillenweite beseitigt, indem der Beobachter durch eine Öffnung von 1,06 mm Durchmesser sah. Die Helligkeit wurde durch bilaterale Erweiterung des Spaltes erreicht, der das Licht zum Prisma eintreten ließ. Die Beleuchtung kam von einem Triplex-Gasbrenner.

Die Versuche ergaben für alle Farben das gemeinsame Resultat, daß die Sehschärfe bei kleiner Lichtstärke mit dieser letzteren sehr schnell steigt, dann bei steigender Beleuchtung in eine Periode immer langsamerer Zunahme übergeht. Ein Maximum der Sehschärfe wurde bei den ersten mit Gaslicht angestellten Versuchen nicht erreicht.

Indessen hat derselbe Beobachter vereint mit Herrn A. KÖNIG³ die

¹ J. MACÉ DE LÉPINAY et W. NICATI, *Ann. d. chim. et de phys.* Sér. 5. T. 24. p. 289. 1881 und T. 30. p. 145. 1883.

² W. UHTHOFF, Über das Abhängigkeitsverhältniß der Sehschärfe von der Beleuchtungsintensität. *Graefe's Archiv.* Bd. XXXII. (1.) S. 171 und XXXVI. (1.) S. 33.

³ In der zweiten der oben citirten Abhandlungen und in *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane.* Bd. I. S. 155.

Versuche noch fortgesetzt unter Anwendung von Zirkonlicht, um das Maximum der Sehschärfe zu erreichen, und später auch als Gesichtsubject Stäbchengitter angewendet, (wie in § 18 S. 257—259 oben). Sie bekamen dabei fast gleiche maximale Sehschärfen für alle Farben, deren kleine Unterschiede als zufällig erscheinen, namentlich da sie bei beiden Beobachtern entgegengesetzt im Sinne waren. Für die Gesamtbreite von einem schwarzen und einem hellen Bande fanden sie den Gesichtswinkel:

W. U.:	Maximum (Roth und Violett)	56',5
„	Minimum (Gelb und Gelbgrün)	53',2
A. K.:	Minimum (Roth)	63',4
„	Maximum (Gelb und Violett)	66',9

Diese Zahlen sind mit denen der letzten Columnne der Tabelle auf S. 259 vergleichbar.

Die von Herrn W. UTHOFF nach seinen Messungen entworfenen Curven, welche die Sehschärfe als Function der Helligkeit darstellen, sind in ihrem Verlaufe den andern ziemlich ähnlich, welche A. KÖNIG und E. BRODHUN für die Unterschiedsschwellen der Lichtstärke entworfen haben (*Fig. 163*, S. 412). Die Curven für die blauen Farben unterscheiden sich, wie dort, durch einen viel flacher gewölbten Übergang aus dem schnell in den langsam steigenden Theil der Curve.

Leider ist die Reduction dieser Curven der Sehschärfe auf Lichteinheiten von nahelin gleicher Helligkeit, wie sie die Herren A. KÖNIG und E. BRODHUN gebraucht haben, nicht mit wünschenswerther Genauigkeit zu vollziehen. Annähernd kann man es erreichen durch Benutzung der Angaben, welche Herr E. BRODHUN in seiner später zu besprechenden Dissertation über die Vertheilung der Helligkeit im Spectrum einer ähnlichen Gasflamme gemacht hat, die übrigens auch für das trichromatische Auge des Herrn A. KÖNIG ausreichend gut passten. Es sind dies, wie in den Tabellen S. 405 bis 408, Lichteinheiten, die in gleicher, und hinreichend großer Anzahl genommen allen Farben nahe gleiche Helligkeit geben. Ich gebe in der folgenden Tabelle UTHOFFS Zahlen in dieser Umrechnung, indem ich die von ihm angegebenen Lichtstärken, die zunächst gleichen Spaltbreiten entsprachen, mit Coëfficienten multiplicirt habe, die den von BRODHUN angegebenen Helligkeiten der einzelnen Regionen des durch ein Glasprisma entworfenen Spectrum einer gleichartigen Flamme entsprechen. Bei der geringen Genauigkeit, welche dies Verfahren gewähren kann, habe ich die Unterschiede der Dispersion des zimmtsauren Äthyloxyds und des Glases vernachlässigen zu dürfen geglaubt.

Am unsichersten ist der Coëfficient für das Violett, da dieser nur durch Extrapolation gewonnen ist. Im Ganzen aber zeigt diese Zusammenstellung, daß wenn wir die UTHOFFSchen Messungen auf Lichteinheiten beziehen, die bei größerer Intensität gleich hell erscheinen die kleineren Grade der Sehschärfe im Violett und Blau schon bei viel geringen Lichtmengen erreicht werden, als im Gelb und Roth, daß aber bei höheren Beleuchtungsstärken die Unterschiede zwischen benachbarten Farben viel geringer werden, beziehlich verschwinden. Leider fehlen für die blauen Farben die höheren Intensitäten, und der Gang der Zahlen zeigt noch mancherlei Unregelmäßigkeiten, die bei allen solchen Beobachtungen über die Grenze der Wahrnehmbarkeit nicht überraschen können. Wir finden durchgehend die Sehschärfe

Tafel der Sehschärfen für verschiedene Farben und Helligkeiten.

Wellenlänge	670 $\mu\mu$	605 $\mu\mu$	575 $\mu\mu$	505 $\mu\mu$	470 $\mu\mu$	430 $\mu\mu$
Coëfficient	2,04	9,15	6,95	0,532	0,0567	0,0084
Sehschärfe	Helligkeit					
0,13	—	—	—	0,0266	—	—
0,14	—	—	—	—	0,00567	—
0,18	—	—	—	—	—	0,00168
0,23	—	—	—	—	0,01134	—
0,24	—	—	0,3475	—	—	—
0,35	—	—	—	0,0532	—	0,00504
0,39	—	—	—	—	—	0,00672
0,40	—	0,4575	—	—	—	—
0,41	—	—	—	—	0,02268	—
0,48	—	—	—	—	—	0,00840
0,61	—	—	—	—	0,03402	—
0,67	—	—	—	0,1064	—	—
0,73	—	—	—	—	—	0,0168
0,74	—	—	—	—	0,0454	—
0,76	0,204	—	—	—	—	—
0,84	—	—	—	—	0,0567	—
0,90	—	—	—	—	—	0,0336
0,94	—	—	—	0,1596	—	—
1,02	—	—	—	—	—	0,0504
1,03	—	—	—	—	0,1134	—
1,10	—	—	—	—	—	0,0672
1,12	0,408	—	—	—	—	—
1,18	—	—	—	0,2128	—	0,0840
1,24	—	0,915	—	—	—	—
1,26	—	—	—	—	0,2268	—
1,29	—	—	—	0,266	—	—
1,32	—	—	1,0425	—	—	—
1,34	—	—	—	0,2592	—	—
1,38	—	—	—	—	0,3462	—
1,39	0,612	—	—	—	—	—
1,45	—	—	—	—	0,4536	—
1,56	—	—	—	—	0,5670	—
1,59	—	—	2,085	—	—	—
1,60	—	—	—	0,3456	—	—
1,64	0,820	—	—	0,4788	—	—
1,65	—	1,830	—	—	—	—
1,69	1,224	—	—	0,5532	—	—
1,79	1,428	—	—	—	—	—
1,80	1,632	—	—	—	—	—
1,83	—	3,66	—	—	—	—
1,84	2,04	—	2,78	—	—	—
1,91	—	—	3,475	—	—	—
1,93	—	—	—	1,064	—	—
1,94	4,08	—	—	—	—	—
1,98	—	5,49	4,17	2,66	—	—
1,99	—	7,32	—	—	—	—
2,03	10,20	—	—	4,156	—	—
2,05	—	—	—	5,32	—	—
2,08	—	—	5,56	—	—	—
2,09	16,32	—	—	—	—	—

Sehschärfe	670 $\mu\mu$	605 $\mu\mu$	575 $\mu\mu$	505 $\mu\mu$	470 $\mu\mu$	430 $\mu\mu$
2,10	—	9,15	—	—	—	—
2,12	—	—	6,95	—	—	—
2,17	—	—	13,90	—	—	—
2,21	—	—	20,85	—	—	—
2,25	—	36,60	27,80	—	—	—
2,29	—	—	41,70	—	—	—
2,31	—	—	55,60	—	—	—
2,32	—	54,90	—	—	—	—
2,35	—	73,20	—	—	—	—
2,37	—	91,50	—	—	—	—

wachsend, wo die Empfindlichkeit für Unterschiede der Lichtstärke (d. h. die Klarheit), wächst und umgekehrt. Die einzige durchgehende Abweichung liegt in dem Verhältniß zwischen dem Roth einerseits, Gelb und Gelbgrün andererseits, in dem die letzteren und nicht Roth sich als diejenigen Farben zeigen, die bei niedriger Intensität die geringsten Sehschärfen geben, während andererseits die Klarheit nach den Versuchen von A. KÖNIG und E. BRODHUN für die geringen Helligkeiten gerade im Roth verhältnißmäßig am kleinsten ist, und sich dieses am meisten von den blauen Farben entfernt, die das PURKINJESCHE Phänomne zeigen.

Der ganze Gegenstand ist zu neu, als daß sich entscheiden ließe, wie viel individuelle Abweichungen hier mit sprechen. Bestimmteres wird sich erst sagen lassen, wenn derselbe Beobachter bei denselben Beleuchtungen Sehschärfen und Helligkeiten verglichen hat.

Vergleichung verschiedener Farben betreffs ihrer Helligkeit.

Daß man auch verschiedene Farben in Bezug auf ihre Helligkeit vergleichen kann, ist im Vorigen mehrfach erwähnt worden. Aber die Sicherheit und Genauigkeit einer solchen Vergleichung erweist sich als eine viel geringere, als diejenige, welche bei Vergleichung von Lichtern derselben Farbe erreicht werden kann. Selbst schon bei den sehr geringen Unterschieden des Farbentons, wie sie bei praktisch photometrischen Messungen von Flammen verschiedener Temperatur und von elektrischen Glühlampen verschiedener Stromdichtigkeit vorkommen ist die Störung sehr merklich. Sollen gar Lichter von sehr weit abweichendem Farbentone mit einander verglichen werden, so wächst die Unsicherheit und Verlegenheit der Beobachter in hohem Grade. Sehr erhebliche Unterschiede der Helligkeit zwischen ganz verschiedenen Farben werden allerdings ohne Zweifel und Schwanken anerkannt. Namentlich kann es nicht zweifelhaft sein, daß wenn die eine Farbe als die Summe aus der andern und einem andersfarbigen Summanden anzusehen ist, die Summe immer heller als jeder der Theile erscheint. Das zeigt sich, sobald man auf irgend einem farbig beleuchteten Felde einen Fleck noch mit andersfarbigem Licht beleuchtet.

Beobachter, die sich in dergleichen Beobachtungen viel geübt haben, kommen schließlichs zu etwas größerer Sicherheit, die allerdings auch durch eine Art von festerer Gewöhnung, oder größere Aufmerksamkeit auf ver-

schiedene unterstützende Nebenwirkungen gewonnen werden könnte. Auffallend ist die größere Sicherheit, welche hierbei dichromatische Beobachter zeigen, bei denen ja übrigens auch die Aufgabe eine viel einfachere ist; wenigstens hat sich Herr E. BRODHUN in dieser Beziehung seinen Mitbeobachtern durchaus überlegen gezeigt, selbst in der Vergleichung solcher Farben, die auch seinem grünblinden Auge ungleich erscheinen.

Ich selbst muß gestehen, daß ich über eine große Unsicherheit in diesen Vergleichen nie hinausgekommen bin, obgleich ich in der Vergleichung sehr kleiner Farbenunterschiede bei gleicher Helligkeit, und sehr kleiner Helligkeitsunterschiede bei gleicher Farbe andern Beobachtern nicht nachzustehen glaube.

Zunächst ist nun hier eine Thatsache zu erwähnen, die auch ungeübten Beobachtern leicht wahrnehmbar wird, und die jetzt unter dem Namen des PURKINJESCHEN Phänomens bezeichnet zu werden pflegt, da sie von diesem Autor zuerst erwähnt worden ist, und welche zeigt, daß bei verschiedenen Farben die Empfindung der Helligkeit eine verschiedene Function der absoluten Lichtstärke ist. Wählt man zwei verschiedene farbige Felder, die bei starker Lichtintensität gleich hell erscheinen, und reducirt man die Lichtstärke beider in gleichem Verhältniß, z. B. auf ein Zehnthel, so wird man finden, daß bei dieser geringeren Lichtstärke die blauen Farben entschieden heller erscheinen als die rothen oder grünen. PURKINJE¹ bemerkt dementsprechend, daß Blau bei schwächstem Licht erkannt wird, Roth erst bei stärkerem. Sodann hat DOVE² darauf aufmerksam gemacht, daß wenn man die scheinbare Helligkeit von Flächen, die mit verschiedenen Farben überzogen sind, bei verschiedener Intensität derselben Beleuchtung vergleicht, bald die eine, bald die andere heller aussieht. Im allgemeinen überwiegen bei großer Beleuchtungsstärke die weniger brechbaren rothen und gelben Farben, bei geringerer die blauen und violetten. Wenn ein rothes und ein blaues Papier bei Tageslicht gleich hell aussehen, so erscheint bei Einbruch der Nacht das blaue heller, das rothe oft ganz schwarz. Ebenso findet man, daß in Gemäldesammlungen bei sinkendem Abend (einen trüben Himmel und fehlende Abenddämmerung vorausgesetzt) die rothen Farben zuerst schwinden, die blauen am längsten bleiben. Auch in der dunkelsten Nacht, wenn alle anderen Farben fehlen, sieht man noch das Blau des Himmels.

Noch auffallender habe ich diese Erscheinungen gefunden, wenn man prismatische Farben vergleicht. Wenn man den in *Fig. 145* S. 352 abgebildeten Apparat zur Mischung von Spectralfarben benutzt, und vor das Feld, welches mit den beiden Farben beleuchtet ist, ein senkrecht Stäbchen hält, so wirft dies zwei verschiedenfarbige Schatten, da die beiden beleuchtenden verschiedenfarbigen Strahlenbündel von etwas verschiedenen Richtungen, nämlich von den beiden Spalten des letzten Schirmes (*S'* in *Fig. 145*)

¹ PURKINJE, *Zur Physiologie der Sinne*. Bd. II. S. 109. 1825.

² DOVE, Über den Einfluß einer weißen Beleuchtung auf die relative Intensität verschiedener Farben. *Berl. Monatsber.* 1852. S. 69—78. — *Pogg. Ann.* LXXXV. 397—408.

herkommen. Wäre also z. B. Violett und Gelb gemischt, so würde der violette Spalt einen Schatten werfen, der nicht mehr von Violett, wohl aber von Gelb beleuchtet ist, also gelb erscheint. Der andre Spalt würde einen violetten Schatten werfen. Macht man nun den Spalt, der das Violett durchläßt breiter, so wird das Violett, also auch der violette Schatten lichtstärker, und man kann durch passende Regulirung der beiden Spalten leicht erreichen, daß der violette Schatten dem Auge etwa ebenso hell erscheint, wie der gelbe. Wenn man nun den einfachen Spalt des ersten Schirmes, durch welchen das vom Heliostaten reflectirte Licht zum Prisma tritt, erweitert oder verengt, so verstärkt oder schwächt man die ganze Lichtmasse, die in den Apparat tritt, und zwar alle ihre farbigen Lichter in gleichem Verhältnisse. Dabei zeigt sich, daß schon bei einer geringen Verstärkung des gesammten Lichts das Gelb heller, bei einer geringen Schwächung dagegen dunkler als Violett erscheint. Dieser Unterschied ist viel geringer, wenn man zwei Farben aus der weniger brechbaren Hälfte des Spectrum nimmt, größer wenn beide aus der brechbareren Hälfte sind, am größten, wenn man sie von den Enden des Spectrum nimmt.

Genauer ist diese Erscheinung an Spectralfarben für seine grünblinden Augen dann von Herrn E. BRODHUN¹ verfolgt worden, der die unmittelbaren Vergleichen der Helligkeit, wie schon erwähnt, mit verhältnißmäßig großer Sicherheit ausführte und in dieser Richtung sehr geübt ist. Da die verglichenen Felder in meinem Farbenmischapparate nicht sehr groß sind, war bei 25maliger Wiederholung gleichartiger Messungen der mittlere Fehler der einzelnen Beobachtung für die Vergleichung von

roth mit roth	3,0 ‰
blau mit blau	3,3 ‰
blau mit roth	5,8 ‰

wodurch die relative Sicherheit der Beobachtungen charakterisirt ist. Bei den Versuchen wurde mein Farbenmischapparat (*Fig. 147* S. 355) benutzt, wobei aber in beiden Feldern neben einander einfache Spectralfarben erschienen. Durch Änderung der Breite des einen Spalts wurde gleiche Helligkeit auf beiden Seiten erzeugt, und die Breite beider Spalten abgelesen, der Versuch 10mal wiederholt. Dann wurde der bisher unveränderte Spalt ebenfalls verändert, und das ganze Verfahren bei diesem veränderten Grade der Helligkeit wiederholt. Auch wurden absorbirende Gläser zu Hülfe genommen, um zu kleine Spaltbreiten zu vermeiden. Ebenso mußten zu große vermieden werden, um nicht verschiedenartige oder verschieden helle Theile des Spectrum zusammen zu mischen. Man erhielt auf diese Weise für verschiedene Farbenpaare Zahlen für die Spaltbreiten, welche gleichen Helligkeiten beider Farben entsprachen.

Dabei hat sich nun herausgestellt, daß wenn man oberhalb einer gewissen Helligkeit bleibt, die Spaltbreiten gleicher Helligkeit für alle Farbenpaare einander nahe proportional wachsen, daß bei Verminderung der Helligkeit aber schließlic die Spalten für die blauen Farben verhältnißmäßig stärker verengt werden müssen, als die für die weniger brechbaren Farben, um die gleiche Helligkeit zu erhalten.

¹ EUGEN BRODHUN, *Beiträge zur Farbenlehre*. Inaug. Diss. Berlin 1887.

Wenn die Vergleichung mit rothem Licht von $670 \mu\mu$ Wellenlänge geschah, zeigte sich bei $600 \mu\mu$ (orange) noch keine Abweichung von der Proportionalität, bei $570 \mu\mu$ (gelb) eine verhältnißmäßig geringe, dagegen von $540 \mu\mu$ (grün) ab bis $450 \mu\mu$ dieselbe in steigendem Maße, so daß eine Abweichung von 15 % vorkam bei den Spaltbreiten b des Lichts von $670 \mu\mu$

gegen Licht, dessen $\lambda = 570 \ 540 \ 510 \ 490 \ 470 \ 450$

$b = 20 \ 30 \ 36 \ 20 \ 75 \ 68$

Bei den kleineren Helligkeiten des violetten Lichts (Spaltbreite für $670 \mu\mu = 10$) steigt aber die Abweichung bis auf 126 %

Die durch Spaltbreite 16 ausgedrückte Helligkeit ist gleich der, welche man erhält, wenn eine normalweiße Fläche in einem halben Meter Entfernung durch eine SIEMENSSche Platinglühlampe (d. h. eine schmelzende blanke Platinfläche von $(\frac{3}{2})^2 \pi \ 9$ qmm. Oberfläche beleuchtet und eine rechteckige Öffnung von 1,98 mm. Höhe und 0,77 mm. Breite betrachtet wird.

Herr A. KÖNIG glaubte anfangs für sein trichromatisches Auge dasselbe Resultat zu finden, daß nämlich bei hinreichend hohen Graden der Helligkeit gleich helle Farben bei Verdoppelung ihrer Lichtstärke gleich hell blieben. Bei neuerer auf höhere Helligkeiten ausgedehnten Versuchen¹ zeigten sich aber die dem PURKINJESchen Phänomen entsprechenden Abweichungen bis zu den höchsten Helligkeiten hinauf wenn auch an Größe stark abnehmend. Dagegen fand sich bei einem Rothblinden (Herrn Dr. RITTER.) eine obere Grenze, wie bei dem grünblinden Herrn BRODHUN.

Die Versuche der Herren MACÉ DE LÉPINAY² und NICATI haben ebenfalls kein Verschwinden von PURKINJES Phänomen an der oberen Grenze der Lichtstärke angezeigt; die Frage ist bei ihnen aber nicht sicher entschieden, da sie eine Berechnungsweise angewandt haben, welche direkte Anwendbarkeit von FECHNERS Gesetz für alle Lichtstärken und Farben voraussetzt.

Übrigens zeigen die erwähnten neueren Beobachtungsreihen von A. KÖNIG die Curven der relativen Helligkeitswerthe der Spektralfarben, welche regelmäßig mit der Helligkeit des Grün der Wellenlänge 535 (Grün) verglichen wurden, den durch PURKINJES Phänomen bedingten sehr verschiedenen Gang. Bei schwächstem Licht lag das Maximum durchgehend bei $\lambda = 535$, bei starkem Licht ging es vor bis 615 im Orange. Übrigens zeigten selbst einige normale Trichromaten erhebliche Abweichungen im Gange der Curve, während A. KÖNIG, eine trichromatische Dame und der grünblinde Herr E. BRODHUN ziemlich übereinstimmende Curven gaben. Der rothblinde Herr RITTER zeigte eine viel geringere Helligkeit im Roth. — Bei niedrigsten Helligkeiten stimmten die Curven der verschiedenen Beobachter unter einander und auch mit einigen der beobachteten Monochromaten ziemlich gut überein.

Die Beobachtungen der beiden Dichromaten, denen sich die von Herrn A. KÖNIG innerhalb der zuerst gebrauchten begrenzteren Skala der Lichtstärken anschlossen, schienen es möglich zu machen für alle Farben Lichteinheiten solcher Art zu finden, welche in gleicher und genügend hoher Anzahl genommen gleiche Helligkeiten darstellen. Nun zeigt sich allerdings jetzt, daß eine ganz scharfe Bestimmung solcher

¹ A. KÖNIG, Über den Helligkeitswerth der Spektralfarben bei verschiedener absoluter Intensität in „Beiträge zur Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane.“ *Festschrift für H. e. Helmholtz.* Leopold Voss. Hamburg. 1891. S. 309. Auch separat erschienen.

² J. MACÉ DE LÉPINAY et W. NICATI, *Ann. d. Chimie et de Phys.* 5. Série. t. 24. p. 289. 1881 und t. 30¹ 145. 1883.

Lichteinheiten wenigstens für trichromatische Augen nicht möglich ist, selbst innerhalb der geringen Genauigkeitsgrade, welche die heterochrome Photometrie überhaupt zulässt. Da aber mehrere Reihen von Messungen nach solchen Einheiten ausgeführt worden sind, ist es wünschenswerth sie zu benennen. Ich habe dafür einstweilen den Namen der äquivalenten Lichteinheiten oder Einheiten gleicher Helligkeiten vorgeschlagen.

Die schon angeführten Untersuchungen von A. KÖNIG und E. BRODHUN über die Unterschiedsschwellen der Spectralfarben sind nach solchen äquivalenten Einheiten berechnet, während bei den Untersuchungen von A. KÖNIG und C. DIETERICI über die Vertheilung der Grundempfindungen im Spektrum nach ganz andern Einheiten gerechnet ist. Lichtquanta der gewählten Elementarfarben sind nämlich als gleich gesetzt worden, wenn sie zusammen Weiß gaben. Das sind also Quanta von gleicher färbender Kraft. Wir wollen die hiernach bestimmten Einheiten als colorimetrische oder Farbeinheiten bezeichnen. Für Mischfarben würde dies colorimetrische Lichtquantum der Summe der entsprechenden Quanta der gewählten drei Grundfarben entsprechen.

Dafs diese beiden Arten von Lichteinheiten zu einander ein sehr verschiedenes Verhältnifs haben, ergab sich schon aus meinen ersten Mischungsversuchen mit Spectralfarben (S. 319 und 331), die ich unter Anwendung des Doppelspaltes angestellt hatte,² die damals gefundenen Verhältnisse der Helligkeiten waren:

	Bei starkem Licht:	Bei schwachem Licht:
Violett zu Grüngelb	1 : 10	1 : 5
Indigo zu Gelb	1 : 4	1 : 3
Cyanblau zu Orange	1 : 1	1 : 1
Grünblau zu Roth	1 : 0,44	

Neuere Bestimmungen dieser Verhältnisse ergeben sich aus den Beobachtungen, welche A. KÖNIG und E. BRODHUN über die scheinbare Helligkeit der verschiedenen Theile des Spektrum gemacht haben, da beide für ihre Augen auch die Farbgleichungen der Spectralfarben bestimmt hatten. Für das dichromatische Auge von BRODHUN stimmen die gefundenen Helligkeiten erträglich gut mit einer linearen Formel; dies gilt natürlich nur für so hohe Helligkeiten, die der Anzahl ihrer äquivalenten Lichteinheiten entsprechen. Waren K und W die Quanta der kalten und warmen Farbe (spektrales Violett und Roth) deren Mischung gleichaussehend der Spektralfarbe war, so konnte ihre Helligkeit J gesetzt werden

$$J = 1,018 \cdot W + 0,03915 \cdot K$$

woraus folgt, dafs die Helligkeiten complementärer Mengen der beiden Farben sich wie 26 : 1 verhalten.

Die Abweichungen zwischen Beobachtung und Rechnung waren hierbei wenigstens nicht viel gröfser, nämlich bis 6 % reichend, als die mittleren Fehler der Helligkeitsvergleichen sehr differenter Farben überhaupt. Übrigens beziehen sich die

¹ H. Helmholtz, Pogg. Ann. Bd. 94. S. 19.

Beobachtungszahlen auf das Spectrum des Gaslichts, welches nicht als unveränderlich angesehen werden kann.

Die entsprechenden Beobachtungen für das trichromatische Auge von A. KÖNIG ergeben für die Helligkeit gleicher Farbenwerthe von Violett und Roth das Verhältniß 1 : 13,7, während die Helligkeit des von ihm supponirten elementaren Grün so gering erschien, daß bei der verhältnißmäßig größeren Ungenauigkeit der Mischungs- wie der Helligkeitsverhältnisse im trichromatischem Auge eine Bestimmung nicht gewonnen werden konnte. Im Roth und Gelbgrün des Spectrum von der Wellenlänge $670 \mu\mu$ bis $545 \mu\mu$, wo der Einfluß des Violett beginnt, war die Helligkeit, so weit erkennbar, sogar nicht erheblich von der Proportionalität mit der des Roth allein abweichend. Zu bemerken ist dabei, daß dieses supponirte elementare Grün, wie *Fig. 139* S. 340 zeigt, weit jenseits der Curve der Spectralfarben liegt, und daß also diese letzteren nur kleine Bruchtheile desselben enthalten, die, wenn sie nicht erheblich heller sind als gleiche Farbenquanta des Violett, sich unter den Unregelmäßigkeiten der Beobachtungszahlen leicht verstecken konnten. Bei einem Rothblinden (Dr. RITTER) fiel die Helligkeitscurve des Spectrum ziemlich genau mit der Grüncurve zusammen.

Um übrigens das von Herrn BRODHUN seiner Rechnung zu Grunde gelegte Gesetz für die Helligkeit gemischter Farben auch an andern Farben von großem Unterschied des Farbentons zu prüfen, ersuchte ich Herrn E. BRODHUN, der durch sein dichromatisches Farbensystem in dieser Hinsicht begünstigt ist, directe Helligkeitsvergleichen am Farbenkreisel zu machen. Er verglich zunächst die Helligkeit von zwei rothen und zwei blauen Papieren mit Grau, welches auf dem Farbenkreisel aus einem hellen Grau und Schwarz gemischt wurde. Dann stellte er Farbengleichungen her zwischen einem Roth und einem Blau einerseits, Grau und Schwarz andererseits, und verglich den durch diesen Versuch gefundenen Werth des Grau mit dem aus den ersten Bestimmungen berechneten. Es fand sich:

$$1) \text{ Helles Roth } R_h = \frac{160}{360} \text{ Grau,}$$

$$2) \text{ dunkles Roth } R_d = \frac{110}{360} \text{ „}$$

$$3) \text{ helles Blau } B_h = \frac{60}{360} \text{ Grau,}$$

$$4) \text{ dunkles Blau } B_d = \frac{25}{360} \text{ „}$$

Farbengleichungen, beobachtet:

$$\text{I. } 121 \text{ Gr.} = 127 B_h + 233 R_h, \text{ berechnet} = 125 \text{ Gr.}$$

$$\text{II. } 118 \text{ Gr.} = 95 B_d + 265 R_d, \text{ „} = 125 \text{ Gr.}$$

$$\text{III. } 98 \text{ Gr.} = 94 B_h + 266 R_d, \text{ „} = 97 \text{ Gr.}$$

$$\text{IV. } 97 \text{ Gr.} = 70 B_d + 290 R_h, \text{ „} = 94 \text{ Gr.}$$

Die Übereinstimmung mit dem linearen Gesetz ist hierbei eine verhältnißmäßig gute.

Vergleichung der Helligkeit sehr wenig unterschiedener Farben.

Bei dieser großen Unsicherheit der directen Vergleichung der Helligkeiten sehr verschiedenartiger Farben, von der ich namentlich mich selbst persönlich nicht frei machen kann, habe ich versucht einen andren Weg einzuschlagen, der auf der Vergleichung sehr ähnlicher Farben beruht. Diese ist, wie schon die langjährige Erfahrung bei photometrischen Messungen lehrt, verhältnißmäßig viel sicherer und leichter auszuüben, und ich durfte hoffen durch Verfolgung eines continuirlichen Übergangs zwischen verschiedenen Farben, die alle auf gleiche Helligkeit gebracht wurden, bessere Helligkeitsgleichungen zwischen den Endfarben zu gewinnen.

Ich ging dabei aus von dem Grundphänomen, welches in der Photometrie benutzt wird, wenn es sich darum handelt zwei etwas verschieden gefärbte Lichter ihrer Helligkeit nach zu vergleichen. Wenn man die Lichtstärke des einen von ihnen allmählig verändert, so werden sie selbstverständlich niemals ganz gleich, aber man gelangt doch zu einer Einstellung, bei welcher der genannte Unterschied ein Minimum der Deutlichkeit erreicht. Man pflegt das Verhältniß der Lichtstärken, welches dieser Einstellung entspricht, photometrisch als das Verhältniß gleicher Helligkeit zu betrachten.

Ich habe es mir nun zunächst zur Aufgabe gestellt, diese Einstellung auf das Minimum der Erkennbarkeit des Unterschiedes bei einer Reihe von Mischfarben, die aus denselben Farbelementen durch Mischung auf der Farbenscheibe erhalten wurden, durchzuführen. Die eine Mischfarbe, und zwar die etwas dunklere, blieb dabei unverändert, die andre erlitt kleine Veränderungen in ihrer Helligkeit und Mischung, indem man sehr schmale schwarze Sektoren sich einschieben liefs, um sie ein wenig dunkler zu machen, bis man die Grenzen der Ringe, in denen sich diese Farben zeigten, möglichst schwer erkennbar gemacht hatte, wobei sie dann auch gleich hell erschienen. Die dazu erforderlichen Verhältnisse wurden notirt.

Die Farbenmischungen füllten abwechselnd fünf concentrische Ringe auf der Scheibe. Die Kreisscheiben waren aus farbigen Papieren von möglichst gesättigter Farbe, aber nicht glänzender Oberfläche geschnitten; sie waren längs eines Radius gespalten nach der Methode von MAXWELL, um die Winkel beliebig ändern zu können. In umstehender Figur 174 sind die hervorstehenden Ränder der gespaltenen Scheiben abgebildet, wie sie auf deren vorderer Fläche sichtbar waren. Am oberen Umfange der Figur ist jeder vorliegenden Scheibe ein etwas kleinerer Radius gegeben, um sichtbar zu machen, wie sie zwischen einanderliegen. In Wirklichkeit waren die Scheiben hier durch congruente Kreislinien von gleichem Radius begrenzt.

Die Scheibe von etwas hellerer Farbe *R* und die schwarze haben einen einfachen radialen Einschnitt, erstre bei *bb*, letztre bei *dd*. Dagegen hat die Scheibe von dunklerer Farbe *B* eine mit zinnenförmigen Vorsprüngen versehene Grenzlinie zwischen *aa* und *cc*. Ersteres ist ein Radius, letzteres aber ist eine Parallele zu diesem Radius, so daß die Winkelwerthe der Bögen zwischen *aa* und *cc* für die inneren Kreise größer werden, als für die äußeren. Die schwarze Scheibe wurde ebenfalls so eingelegt, daß ihre Grenzlinie *dd* nicht genau die Lage eines Radius hatte, sondern parallel dem dicht daneben liegenden Radius *aa* lag, und somit der

schwarze Streifen, der im Grunde der zinnenartigen Ausschnitte hervorsah, überall dieselbe Breite hatte, und überall die Höhe der Zinnen um den gleichen Bruchtheil verkleinerte. Die Lage des Radius b konnte beliebig um fast den ganzen Umfang verschoben werden, mit Ausschluss des von den Zinnen eingenommenen Streifens, so daß man jede der beiden Farben R und B fast rein erscheinen lassen konnte, oder nach Wahl alle möglichen Abstufungen ihrer Mischung. Zu der durch die beiden zwischen den Radien bb und aa liegenden Sektoren bestimmten Farbmischung kam dann in den bis cc reichenden Vorsprüngen des Feldes B ein kleiner

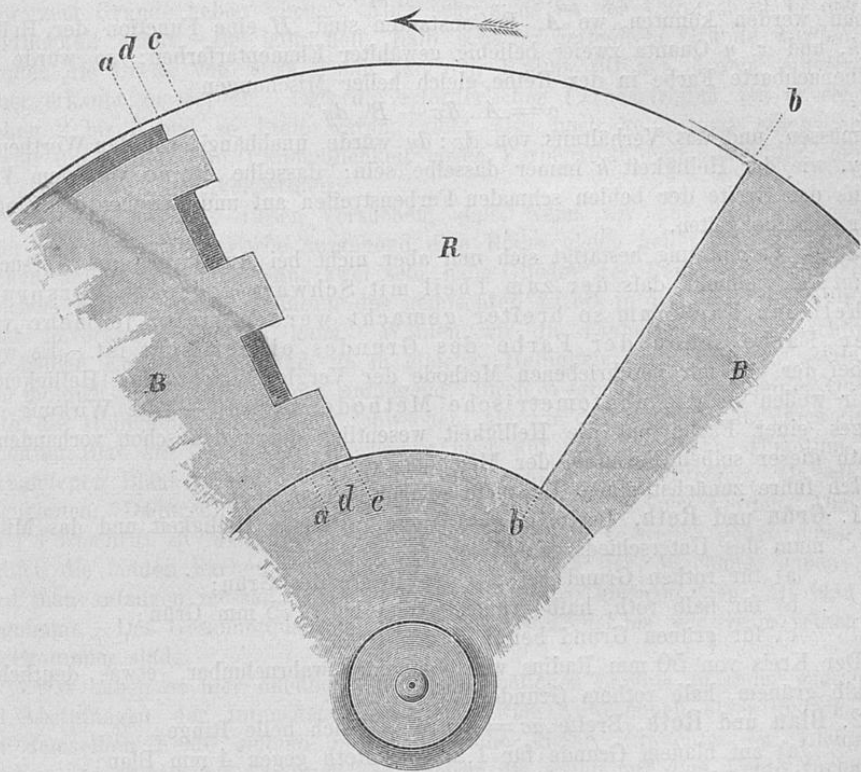


Fig. 174.

Bogen von dieser Farbe hinzu, dafür wurde ein gleicher Bogen von R weggenommen. In den Ausschnitten der Zinnen dagegen wurde nur ein schmaler Streifen $aa\ dd$ von der Farbe R durch Schwarz weggenommen. Wenn die Farbe B etwas dunkler war, war da, wo sie zwischen aa und cc statt R auftrat, etwas Helligkeit verloren; um diesen Verlust für die andre Mischung zu compensiren, mußte auch hier etwas von der Farbe R durch Schwarz fortgenommen werden. Die Breite dieses schwarzen Streifens konnte verändert werden. Die Grenzen zwischen den äußeren Ringen, wo die Winkelwerthe der Zinnen am kleinsten sind, sind natürlich am undeutlichsten. Ich fand es vortheilhaft, gleichzeitig mehrere Grenzen von verschiedenen kleinen Abstufungen der Deutlichkeit vor Augen zu haben, um bei den Ver-

gleichungen diejenige herauszusuchen, die eben der Grenze des Wahrnehmbaren am nächsten stand.

Wenn ein festes Verhältniß der Helligkeit zwischen den beiden Farben B und R auch unter diesen Umständen bestände, so müßte sich auch ein festes Verhältniß zwischen den beiden kleinen Bögen ac und ad finden lassen, welches in den Ringen von verschiedenem Farbenton immer wieder gleiche Helligkeit herstellte, unabhängig von dem Verhältniß der beiden großen Sektoren R und B .

Nähme man also z. B. an, daß Lichter gleicher Helligkeit, aber verschiedenen Farbentons durch Mischung von zwei Grundfarben nach der Formel

$$H = A \cdot x + B \cdot y$$

gegeben werden könnten, wo A, B Constanten sind, H eine Function der Helligkeit h , und x, y Quanta zweier beliebig gewählter Elementarfarben: so würde für eine benachbarte Farbe in der Reihe gleich heller Mischungen

$$o = A \cdot dx + B \cdot dy$$

sein müssen, und das Verhältniß von $dx : dy$ würde, unabhängig von den Werthen x und y , wie der Helligkeit h immer dasselbe sein; dasselbe würde von dem Verhältniß der Breite der beiden schmalen Farbstreifen auf und zwischen den Zinnen unsrer Scheibe gelten.

Diese Vermuthung bestätigt sich nun aber nicht bei Ausführung des Versuchs. Es zeigt sich vielmehr, daß der zum Theil mit Schwarz gedeckte Vorsprung der helleren Farbe um so breiter gemacht werden muß, je mehr von seiner Farbe schon der Farbe des Grundes eingemischt ist. Es wird also bei der von mir beschriebenen Methode der Vergleichung zweier Helligkeiten — wir wollen sie die photometrische Methode nennen — die Wirkung des Zusatzes einer Farbe auf die Helligkeit wesentlich durch den schon vorhandenen Vorrath dieser selben Farbe in der Mischung geschwächt.

Ich führe zunächst einige Beispiele solcher Versuche an:

1. **Grün** und **Roth**, Breite $ac = 4,5$ mm. Gleiche Helligkeit und das Minimum des Unterschieds erhielt ich

- a) für rothen Grund bei 2,5 mm Breite des Grün;
- b) für halb roth, halb grünen Grund bei 2,75 mm Grün;
- c) für grünen Grund bei 3,75 mm Grün.

Der Kreis von 50 mm Radius war eben noch wahrnehmbar, etwas deutlicher bei halb grünem, halb rothem Grunde.

2. **Blau** und **Roth**, Breite $ac = 4$ mm. Gleich helle Ringe

- a) auf blauem Grunde für 1,25 mm Roth gegen 4 mm Blau;
- b) auf halb rothem, halb blauem Grunde 1,75 mm Roth;
- c) auf rothem Grunde 3 mm Roth.

Bei a und b war der Kreis von 60 mm Radius schwach zu erkennen, bei c nur der von 50 mm.

3. **Blau** und **Grün**, Breite der Ausschnitte 5,5 mm. Gleich helle Ringe

- a) auf blauem Grunde, bei 1,5 mm Grün gegen 5,5 mm Blau;
- b) auf halb blauem, halb grünem Grunde 1,75 mm Grün;
- c) auf grünem Grunde 2,25 mm Grün.

Sichtbar war der Kreis von 50 mm Radius, aber sehr schwach, am schwächsten bei c .

Es zeigt sich ohne Ausnahme, daß der Streifen von veränderlicher Breite auf gleichfarbigem Grund breiter genommen werden muß als auf gemischtem Grunde, und auf diesem breiter als auf dem Grunde der ungemischten andern Farbe.

Die Reihe der Helligkeiten der drei gewählten Farben ist offenbar:

Grün $>$ Roth $>$ Blau.

Bei den stärkeren Helligkeitsdifferenzen mit Blau sind die Ringe auf dem helleren Grunde weniger sichtbar; bei der schwächeren Differenz Roth Grün sind die Ringe auf den reineren Farben weniger sichtbar, als auf dem Gemisch.

Da aber die gebrauchten Pigmentfarben überhaupt gemischtes Licht aus fast allen Gegenden des Spectrums geben, ist es nicht auffallend, daß sie sich theilweise immer gegenseitig schwächen, und daß die zackige Figur jeder Farbe auf dem farbigen Felde der andern Farbe nicht ganz so deutliche Ringe giebt, wie sie auf schwarzem Grunde geben würde. Aber sehr groß ist der Unterschied in der Empfindlichkeit nicht. Bei halb hell, halb schwarz getheiltem Grunde würden helle Streifen die Breite von etwa 2 mm für den Radius 60 mm haben müssen, um sicher erkannt zu werden. Daß die erforderlichen Farbenstreifen bei unsren Versuchen 2 bis 3 mal so breit waren, giebt also noch keineswegs einen sicheren Beweis dafür, daß die Empfindlichkeit gegen Farbenabstufungen erheblich geringer ist, als die für Helligkeitsstufen.

Es folgt nun aus diesen Versuchen, daß, wenn wir auf diesem Wege von einer sehr gesättigten Farbe ausgehend eine Reihe gleich heller gemischter Farben suchen, indem wir immer nur zwei sehr nahe Glieder der Reihe mit einander vergleichen, das gesammte Quantum des gemischten Lichts in der Reihe solcher Farben nicht unverändert bleiben kann. Wählen wir die Einheiten für die Lichtquanta der beiden Endfarben so, daß sie in gleicher Helligkeit erscheinen, so werden wir von möglichst gesättigtem Roth anfangend, durch Wegnahme eines kleinen Quantum Roth die Helligkeit viel weniger schwächen, als wir durch den Zusatz eines gleichen Quantum Blau sie verstärken, da letzres noch auf kein merkliches Quantum schon vorhandenen Blaus stößt. Wir müßten also weniger Blau zusetzen, als wir Roth wegnehmen. Dadurch wird die Summe der Lichtquanta kleiner werden. Dies wird beim Fortschritt zu Mischungen mit immer mehr Blau so weiter gehen müssen, bis endlich die beiden Farben nahe gleiche Quantität in der Mischung haben; dann wird man anfangen müssen, Blau in größerer Menge hinzuzusetzen, als man Roth wegnimmt. Das Gesamtquantum wird wieder steigen, bis wir beim reinen Blau angekommen sind.

Wir haben es hier offenbar mit einem ähnlichen Einfluß zu thun, wie er sich bei Abstufungen der Intensität ohne gleichzeitige Anwesenheit einer andern Farbe auf demselben Felde geltend macht. Gleiche kleine Zuwächse der Lichtmenge machen um so weniger Eindruck, je größer die schon auf dem Felde vorhandene Lichtmenge gleicher Art ist. In jenen Fällen messen wir den Eindruck ab an der Deutlichkeit der Wahrnehmung des Schattens, hier vergleichen wir zwei die Helligkeit steigernde Abstufungen zweier Farben auf demselben Grunde mit einander.

Diese Beobachtungen zeigen, daß bei den verhältnißmäßig viel sichereren photometrischen Vergleichen sehr ähnlicher Farben sich wesentlich abweichende Resultate von der unmittelbaren Vergleichung sehr verschiedener Farben ergeben.

Ich bemerke noch, daß ich die meisten Versuche mit den rotirenden Scheiben bei Tageslicht wolkigen Himmels dicht am Fenster angestellt habe. Ich habe sie aber an sonnigen Tagen auch unter directer Sonnenbeleuchtung mit demselben Erfolge wiederholt. Dies, sowie der Umstand, daß bei Roth und Grün der Erfolg derselbe war, wie bei den beiden andern Paaren, schließt den Einfluß des Phänomens von PURKINJE aus. Denn bei Grün und Roth war die dunklere Farbe

diesem Einfluß weniger unterworfen, als die hellere, bei den anderen beiden Paaren dagegen mehr.

Es zeigt sich hierbei durchgehends, daß die Steigerung der Helligkeit, welche durch Zusatz einer bestimmten Quantität farbigen Lichts hervorgerufen wird, geringer ist auf einer gleichfarbigen Fläche, als auf einer von sehr abweichender Farbe.

Versuche mit prismatischen Farben.

Um diese Thatsache in noch anderer Weise zu prüfen, habe ich noch einige Versuche mit prismatischen Farben ausgeführt, Versuche, die bei methodischer Durchführung wohl noch wichtige Ergebnisse erwarten lassen. Ich stellte nämlich ein Spektroskop mit Objectiv- und Ocularspalt so auf, daß ich das Feld desselben gleichmäßig mit lichtstarkem Violett des Sonnenlichts gefüllt sah. Um das durch Diffusion in den Gläsern zerstreute weiße Licht aus dem Felde größtentheils zu beseitigen, diente die Einschaltung eines blauen Glases zwischen Heliostatenspiegel und erstem Spalt. Die Helligkeit dieses Violett wurde so groß gemacht, als es ohne merkliche Störung seiner Reinheit anging; doch blieb es bequem erträglich für das Auge und blendete nicht. Gleichzeitig wurde von der dem Beobachter zugekehrten Seite des Prisma rothes Licht reflectirt, welches in zwei getrennten Bündeln durch eine Glasplatte und ein LUMMERSches Photometer gegangen war. Das letztere Instrument wurde so eingestellt, daß man den Helligkeitsunterschied der beiden Lichtfelder beim Ausschluß des violetten Lichtes noch gerade erkennen konnte. Dann wurde das violette Licht zugelassen, so dass beide Arten von Licht gleichzeitig im Felde sichtbar waren. Der Erfolg war in der That der erwartete; die schwache Unterschiedsstufe des rothen Lichts war kaum weniger gut erkennbar, wenn sich das Feld mit Violett überdeckte als vorher. Wenn man dagegen das ganze Feld mit Licht aus dem rothen Theile des Spectrum überdeckte, war schon eine rothe Beleuchtung von merklich geringerer Helligkeit, als das Violett gehabt hatte, ausreichend, um die Sichtbarkeit der Figur aus dem Photometer gänzlich aufzuheben. Auch Gelb und Grün tilgten die Sichtbarkeit des Unterschiedes der rothen Felder bei ziemlich mäßigen Helligkeiten. Eine genauere Vergleichung der entsprechenden Helligkeitsstufen der verschiedenen Farben konnte mit den zur Zeit vorhandenen Apparaten noch nicht durchgeführt werden.

Ich bemerke hierbei noch, daß man vollkommene Unabhängigkeit der Wahrnehmbarkeit der schwachen Farbenstufen des Roth von der übergedeckten andern Farbe nicht erwarten darf, da mancherlei schon besprochene und noch weiter zu besprechende Erscheinungen zeigen, daß auch die Endfarben des Spectrum nicht je einer unvermischten Grundfarbe entsprechen. Aber der sehr große Unterschied, den ähnliche und weit verschiedene Farben hierbei erkennen lassen, tritt bei den beschriebenen Versuchen doch sehr deutlich hervor.

Die hier besprochene verhältnismäßige Unabhängigkeit der Deutlichkeit eines Farbenunterschieds von der Zumischung sehr heterogener Farben dehnt sich aber nicht auf hohe Lichtstärken aus, welche das Gefühl der Blendung hervorbringen. Daß bei diesen die Empfindung für die Unterschiede der Lichtqualität stumpfer wird, habe ich schon im § 19, Seite 284, 285, hervorgehoben. Bei höchster erreichbarer Lichtstärke gehen alle prismatischen Farben in kaum noch unterschiedenes gelbliches oder bläuliches Weiß über.

Da dabei die größten Unterschiede des Farbentons nahehin vollständig verschwinden, kann es nicht zweifelhaft sein, daß auch die von weniger verschiedenen Farben bei viel mäßigerer Helligkeit verschwinden, was beim Gelb und Grün in der That sehr leicht geschieht. Daher wird jede gleichmäßige Überdeckung jedes Felderpaars von geringem Farbenunterschiede, aber großer Helligkeit mit andersfarbigem, gleich starkem Licht der Unterscheidung nachtheilig sein.

Aus den Untersuchungen der Herren A. KOENIG und BRODHUN über die Unterschiedsschwellen geht für diese das Gleiche hervor. Wenn wir zwei verschiedene Lichtstärken von Roth r und $(r + dr)$, und zwei solche b und $b + db$ von blauem Licht haben, und alle an der oberen Grenze des Gebiets liegen, wo FECHNER'S Gesetz gilt, und $dr : r = db : b$ ist, so daß die Unterschiede dr und db gleich deutlich empfunden werden, so wird eine paarweise Vereinigung dieser Beleuchtungen $(r + b)$ und $(r + b + dr + db)$ zwei Helligkeiten geben, deren Unterschied nach den genannten beiden Beobachtern, welches auch die beiden Farbenpaare sein mögen, undeutlicher ist, als der von r und $(r + dr)$, so wie der gleiche von $(b + db)$. Also hat Zusatz der Farbe r und $(r + dr)$ der Wahrnehmung ihres Unterschiedes geschadet, trotzdem wir hier zu dem lichtstärkeren Blau auch lichtstärkeres Roth gesetzt haben.

Daß die neu hinzukommende Farbe, je nach ihrer Lichtstärke, bald einen sehr geringen, bald einen sehr deutlich erkennbaren Einfluß auf die Unterscheidbarkeit schon bestehender kleiner Abstufungen einer anderen Farbe hat, kann einen besonderen physiologischen Grund haben. Wir wissen aus den Untersuchungen über die Erregungen des Nervensystems im Allgemeinen und aus denen über die lichtempfindlichen Substanzen des Auges insbesondere, daß dieselben durch Erregung verändert und unter dem Einfluß des arteriellen Bluts wieder in ihre normale Beschaffenheit und Leistungsfähigkeit zurückgeführt werden. Wir dürfen daraus schließen, daß Licht bestimmter Art, welches nur eine einzige der lichtempfindlichen Substanzen zersetzt, auch nur deren eigene Leistungsfähigkeit beeinträchtigt, und die der nicht erregten benachbarten Nervenapparate ungestört läßt, so lange dadurch keine wesentliche Verminderung des der betreffenden Netzhautstelle zur Verfügung stehenden arteriellen Sauerstoffs eintritt. Sobald letzteres aber geschieht, wird auch die Thätigkeit benachbarter Nerven-elemente gestört werden können, die aus denselben Capillaren ihren Sauerstoff beziehen. Dies würde dem entsprechen, was wir im Auge wahrnehmen. Bei mäßigem Licht finden wir, daß die Feinheit der Empfindung einer Grundfarbe nur unwesentlich, unter reinen Bedingungen vielleicht gar nicht, gestört wird durch gleichzeitige kräftige Erregung einer andern Grundfarbe in derselben Netzhautstelle. Bei starkem Licht, welches den zugeführten Sauerstoffvorrath schneller verzehrt, tritt eine solche Störung durch die zweite Grundfarbe dagegen deutlich ein.

Der Begriff der Helligkeit. Ich suche hier zunächst zusammenzustellen, was man über die verschiedenen Fälle der Vergleichung der Helligkeit zweier belichteter Felder Gemeinsames aussagen kann.

1) Die Helligkeit ist eine Größe, von der ein gewisser Grad jedem Lichteindruck des Auges beizulegen ist. Die Helligkeit hat den wesentlichen Charakter einer Größe, dadurch daß man der Regel nach (Ausnahmen vorbehalten, wo man sich der Gleichheit nähert) bestimmt erklären kann: „Die Helligkeit des Feldes A ist größer, als die des Feldes B “, und es scheint

auch eine ausnahmslos richtige Regel zu sein, daß wenn zu einer gegebenen farbigen Beleuchtung eine zweite anders farbige deselben Feldes hinzukommt, die Summe beider eine größere Helligkeit hat, als jede einzelne.

Dagegen ist zu bemerken, daß die Anerkennung der Gleichheit zweier Helligkeiten verschiedenfarbigen Lichtes auffallend unsicher ist, ja daß die letzten Arbeiten von Herrn A. KÖNIG es zweifelhaft machen, ob nicht weitgehende Differenzen in der Helligkeitsschätzung selbst zwischen normalen trichromatischen Augen vorkommen, wenn auch einzelne Gruppen von Beobachtern sich finden, deren Aussagen ziemlich gut mit einander übereinstimmen.

Die eigentlich charakteristische Definition der Gleichheit zweier Größen, daß nämlich zwei, die einer dritten gleich sind, unter sich gleich sind, werden wir auf Helligkeiten höchstens in der Form anwenden können: „Wenn $A > B$, und $B > C$, so ist $A > C$ “.

Ich persönlich muß wiederholt erklären, daß ich mir ein Urtheil über Gleichheit von heterochromen Helligkeiten kaum zutraue, höchstens über Größer und Kleiner in extremen Fällen. Aber ich gebe zu, daß man von zwei verschiedenfarbigen Feldern das eine immer so viel verdunkeln kann, daß kein Zweifel bleibt: nun sei das andere heller.

Sicher fühle ich mich in der Beurtheilung des Unterschiedes fast nur in dem Falle, wo die eine Beleuchtung die Summe ist von der andern und einer hinzugekommenen dritten. Ist die Menge dieser dritten klein gegen die erste, so giebt sie zwar nur einen kleinen Helligkeitsunterschied, aber auch nur einen kleinen Farbenunterschied.

Für mich selbst habe ich durchaus den sinnlichen Eindruck, daß es sich bei heterochromen Helligkeitsvergleichen nicht um Vergleichung einer Größe, sondern um das Zusammenwirken von zweien, Helligkeit und Farbengluth, handelt, für die ich keine einfache Summe zu bilden weiß, und die ich auch wissenschaftlich noch nicht definiren kann.

Ich sehe mich also bei diesem Gegenstande vielfach darauf beschränkt zu referiren, was vertrauenswürdige Beobachter berichten.

2) Eine erheblichere Sicherheit der Vergleichung zweier Helligkeiten ist nur bei einander sehr ähnlichen Farben möglich, aber auch bei solchen nie so groß, wie bei ganz gleichen. Ob aber bei diesen Vergleichungen ähnlichster Farben nicht Ermüdungserscheinungen des Auges Einfluß gewinnen, die wir bei den Nachbildern besprechen werden, bleibt fraglich.

3) Wenn die Farbenwerthe zweier Lichtgemische einander vollkommen gleich sind, haben sie genau dasselbe Aussehen und auch genau dieselbe Helligkeit. Man kann daraus schliessen, daß die Helligkeit eine Function der drei Farbenwerthe eines Lichtgemisches sei und daß GRASSMANN'S Satz: Gleich aussehende Lichter gemischt geben gleich aussehende Mischungen“, auch noch dahin erweitert werden kann: „Gleich aussehende Paare von Lichtern gemischt geben gleiche Helligkeit der Mischung.“

Aber die Helligkeiten sind nicht mehr lineare Functionen der Farben-

werthe: dem widerspricht PURKINJE'S Phänomen. Auch dürfen wir nicht den Satz aufstellen: „Gleich helle Lichter addirt, geben gleich helle Mischungen“. Denn gleich helles Roth und Blau verdoppelt, geben das Roth heller als das Blau.

Nur an der unteren Grenze der Lichtstärken, wo die Verschiedenheit der Farben verschwindet, ist anzunehmen, daß die Helligkeit oder eine Function derselben einen linearen Ausdruck durch die Farbenwerthe zulasse.

Da die Helligkeit keine lineare Function der Farbenwerthe sein kann, folgt, daß sie eine Empfindung sei, die auf einer verwickelteren Art des Zusammenwirkens der drei elementaren Farbeneindrücke beruht.

Daß ein solches Zusammenwirken der in das Auge einfallenden Lichtmengen stattfindet, zeigen ganz zweifellos die motorischen Erscheinungen am Auge, die von der Helligkeit abhängen. Die auffallendste und regelmäßigste derselben ist die Wirkung auf die Pupille, wobei ein Zusammenwirken sämtlicher Lichtmengen, die in beide Augen eingefallen sind, zu Stande kommt, am stärksten aber verhältnißmäßig diejenigen wirken, welche die gelben Flecke der beiden Netzhäute getroffen haben. Durch die photographische Abbildung der Iris des menschlichen Auges bei Magnesiumblitzen ist von Herrn CL. DU BOIS-REYMOND¹ nachgewiesen worden, daß eine Adaptirung der Pupille bis zu den geringsten Lichtstärken hinab stattfindet; sie ist in absoluter Dunkelheit so weit, daß die Iris hinter dem Cornealrande verschwindet. Diese Regulirung der Pupillenweite hat in hohem Grade den Charakter organischer Zweckmäßigkeit. Bei den höchsten Helligkeiten ist die Pupille eng, und das Auge wird gegen den Einfluß überflüssig starken und schädlichen Lichtes geschützt. Andererseits kommt in Betracht, daß mit engeren Lichtkegeln im Allgemeinen schärfere Netzhautbilder zu erzielen sind. Wir haben aber oben schon gesehen, daß die Sehschärfe, so weit sie von der Empfindungsweise der Netzhaut abhängt, mit abnehmender Beleuchtung abnimmt. Es ist also, wenn auch bei schwachen Beleuchtungen möglichst viel erkannt werden soll, nothwendig, eine bestimmte Ausgleichung zu treffen zwischen der optischen Bildschärfe, die durch die Verengerung der Pupille verbessert wird und dem Durchmesser der Pupille, welcher die Lichtmenge und dadurch die Sehschärfe bestimmt. Dadurch ergibt sich hier schon, daß Farben, welche bei gleicher Verminderung der objectiven Lichtmenge größere Sehschärfe zeigen, was, wie oben erwähnt, wahrscheinlich wesentlich mit feinerer Stufenempfindlichkeit zusammenhängt, bei etwas engerer Pupille noch mit Vortheil gebraucht werden können, und also reflectorisch auf die Pupille wie hellere Farben wirken müßten.

Nun wäre es nach physiologischen Gesetzen allerdings nicht nothwendig, daß wir diese Empfindung, die zu der Reflexbewegung der Iris Anlaß giebt, fühlen müßten. In der That aber fühlen wir bei sehr großen Lichtinten-

¹ CL. DU BOIS-REYMOND, Über Photographien der Augen bei Magnesiumblitz. *Archiv für Physiologie*. 1888. S. 394 u. 395. *Verhandl. d. Physiologischen Gesellschaft zu Berlin*. 23. März 1888.

sitäten doch einen Lichtschmerz, der auch willkürliche Muskeln, die der Augenlider und einige des Gesichts, reflectorisch zur Abwehr bestimmt. Dieser Schmerz ist nicht von der gesammten Lichtwirkung auf beide Sehfelder abhängig, wie der Reflex auf die Iris, sondern ist localisirt, und ist um so unangenehmer, je mehr Licht auf ein kleines Stück der Netzhaut vereinigt ist. Wir suchen deshalb unsere künstliche Beleuchtung so einzurichten, daß wir die Flammen oder elektrisch glühenden Kohlenfäden unserer Leuchtapparate mit transparenten Hüllen umgeben, welche verhindern, daß ein scharfes optisches Bild der Lichtquelle vom Auge direct gesehen wird. Das Licht der Lichtquelle erscheint uns dann vielmehr gleichmäßig über die größere Fläche des durchscheinenden Schirms verbreitet. Gute Schirme dieser Art, z. B. matt geschliffene weiße Gläser, lassen nichts von dem Lichte der Lichtquelle verloren gehn, sie vertheilen es nur über eine größere Fläche.

Übrigens findet doch auch für diese Art des Lichtschmerzes bis zu einem gewissen Grade eine Addition der verschiedenen Flächenstücke der Sehfelder statt. Wenn ein heller dünner Wolkenschleier über beschneiten Flächen oder auch nur über hellen Steinflächen im Hochgebirge liegt, ohne daß irgend eine einzelne Stelle des Bildes gerade blendend hell erschiene, kann doch der Anblick der ausgebreiteten lichten Umgebung nach kurzer Zeit höchst quälend werden.

Die störenden Veränderungen, welche durch starke Beleuchtung in der Netzhaut vorübergehend hervorgerufen werden, werden wir in den nächsten Paragraphen noch zu besprechen haben. Der Lichtschmerz charakterisirt sich in diesen Fällen als ein organisches Schutzmittel, was uns zur Wahrung der Integrität des Organs aufruft.

Da der Lichtschmerz wohl ausnahmslos eine gleichzeitig vorhandene Lichtempfindung begleitet, die die spezifische Modalität der Gesichtsempfindungen hat, so erscheint er uns als ein untrennbarer Theil von dieser. Wenn er aber als Schmerz fühlbar wird, hat er mehr den Charakter einer Tastempfindung, des Kopf- oder Augenschmerzes. Er kann sich übrigens in Krankheitszuständen, z. B. während eines Anfalls von Hemikranie zu verhältnißmäßig schwachen Lichteindrücken gesellen.

Die Frage nach der Modalität der Schmerzempfindung ist übrigens für sämtliche Gebiete der Physiologie noch nicht klar erledigt. Schmerzempfindende Nerven kommen allen blutführenden Geweben des Körpers zu, auch den motorischen Nervenstämmen und denen der höheren Sinnesnerven, welche letzteren, durchschnitten, neben der spezifischen Erregung auch noch Tastschmerz erregen.

Indessen kann diese Frage hier unerledigt bleiben. Es genügt uns hier, zu wissen, daß die Spuren einer solchen Empfindung, die sich bei hoher Intensität zu Schmerz steigern kann und durch die Auslösung von Schutzvorrichtungen eine wichtige Rolle spielt, im Auge deutlich erkennbar vorhanden sind. Ihre Scheidung von den anderen spezifischen Empfindungen des Auges können wir nicht glatt durchführen, weil wir überhaupt nur solche Empfindungs-

aggregate rein von einander zu scheiden im Stande sind, deren objective Erregungsmittel wir von einander trennen und einzeln auf unsere Sinne wirken lassen können. Nun wird durch alles objective Licht, welches aus Spectralfarben zusammengesetzt ist, nothwendig ein Gemisch von Empfindungen der drei Grundfarben erregt. Es enthalten also nothwendig alle Lichtempfindungen ein wechselndes, aber nie ganz fehlendes Quantum der Empfindung von Weifs, zu der sich dann noch ein oder zwei andere Farbenempfindungen gesellen können. Durch diesen gemeinsamen Bestandtheil sind sie unmittelbar als verwandte Empfindungen schon charakterisirt. Dazu kommt nun die Empfindung des gemeinsam zum Schutze drängenden Schmerzes, die ja möglicher Weise, wenn auch in niederem Grade und wenig bestimmt in ihren Intensitätsstufen, bei allen Lichtstärken vorhanden sein kann, die noch zur Regulirung der Pupillenweite Veranlassung geben.

Die drei Urempfindungen der Netzhaut haben wir in den früheren Abschnitten unserer Untersuchung als drei unabhängig neben einander bestehende Empfindungsweisen kennen gelernt. Ein in ihrem Wesen gegründetes gemeinsames Maafs ihrer Intensitäten haben wir bis jetzt nicht gefunden. Das Maafs, was wir vielfach angewendet haben, indem wir solche Quanta der drei Grundfarben gleich grofs setzten, die zusammen das Weifs der Sonne ergaben, war nur durch Hereinziehung eines äußeren Objects gegeben.

Mit Berücksichtigung der Blendungserscheinungen gewinnen wir nun aber einen neuen Vergleichspunct zwischen ihnen. Quanta der Grundfarben, welche gleichen Grad des Lichtschmerzes erregen, bekommen dadurch eine bestimmte Größenbeziehung zu einander. Ist die organische Zweckmäßigkeit des Auges richtig durchgearbeitet, so werden Helligkeiten von gleichem Lichtschmerz gleich nachtheilig für das Auge und seinen Gebrauch sein. Wenn wir hierbei an der unteren Grenze des Gebiets der blendenden Helligkeiten bleiben, so werden wir zu erwarten haben, dafs, wenn der Eindruck der Helligkeit dem Lichtschmerz entspricht, gleich helle Quanta verschiedener Farben die Empfindung der Helligkeitsstufen gleich stark beeinträchtigen. Diese Erwartung hat sich in der That bei den auf S. 402 bis 408 angeführten Versuchen der Herren A. KÖNIG und E. BRODHUN bestätigt.

Von der Gröfse der unterscheidbaren Helligkeitsstufen hängt aber auch die Gröfse ab, die wir als Klarheit (s. S. 394) bezeichnet haben. Bei gleicher Klarheit werden wir gleich feine Modulirungen der Körperoberfläche durch Beschattung erkennen können, und auch die Sehschärfe für kleine Objecte ist offenbar der Hauptsache nach dadurch ebenfalls mitbestimmt.

Daraus ergibt sich nun für die oben gegebene Voraussetzung über den Sinn des Begriffes der Helligkeit, dafs wir erwarten dürfen, bei gleicher Helligkeit auch gleich viel sehend zu erkennen. Hierin liegt offenbar die wichtigste praktische Bedeutung der Helligkeit.

Wenn wir nun abwärts steigen von der Helligkeit, welche dem Maximum der Klarheit entspricht, so nimmt die Klarheit immer mehr ab, ebenso die Sehschärfe. Beide aber nehmen in den brechbaren Farben viel langsamer

ab, als in den rothen und gelben. Dementsprechend erscheinen uns die ersteren bei gleicher Abnahme der objectiven Lichtstärke auch heller, als die letzteren (PURKINJE'S Phänomen).

In dieser Beziehung würde es also mit den bekannten Thatsachen gut übereinstimmen, wenn man den Satz aufstellen wollte: Heller erscheint uns von zwei verschiedenfarbigen Beleuchtungen diejenige, in der wir mehr feine Einzelheiten erkennen können, oder wissen, dafs wir sie bei Anstellung des Versuchs würden erkennen können. Diese Auffassung würde auch die eigenthümliche Unsicherheit in der Schätzung der Helligkeit erklären, nur läfst sie sich nicht bis zu den Helligkeiten ausdehnen, die dem Maximum der Klarheit nahe kommen, weil da innerhalb grosser Breite der Lichtstärken die Klarheit dieselbe bleibt. Und in noch höheren Helligkeiten würde die Klarheit wieder abnehmen.

Wir können also in diesen Gebieten bei unserer Erklärung wenigstens für grosse Helligkeiten ein hinzukommendes neues Empfindungselement, den Lichtschmerz, nicht entbehren. Andererseits wäre die Annahme zur Zeit nicht zu widerlegen, dafs dieses andere Empfindungselement auch bei den niederen Lichtstärken nicht ganz fehlte, und, wenn auch nicht deutlich unterscheidbar, doch in dem Gesamteindruck des Auges mitwirkte. Sollte eine zweckmäfsige Regulirung der Pupillenweite davon abhängen, so würde es, wie schon oben bemerkt, für blaues Licht die Pupille stärker verengen, als für rothes, d. h. diese Empfindung der regulirenden Innervation, welche mit der der Helligkeit zusammenfiel, müfste PURKINJE'S Phänomen hervorrufen.

Im Augenblick würde es mir verfrüht erscheinen, zwischen beiden Möglichkeiten entscheiden zu wollen.

E. BRÜCKES oben auf S. 422 erwähntes heterochromes Photometer, in welchem der Unterschied zweier Farben dadurch verkleinert werden soll, dafs man die scheinbare Gröfse der gefärbten kleinen Felder immer kleiner macht, und nun untersucht, bei welchem Grade der Beleuchtung die Zeichnung am ehesten verschwindet, führt bei der Anwendung auf sehr differente Farben eigenthümliche Schwierigkeiten durch die Farbenzerstreuung im Auge herbei. Eine von zwei Farben sehr differenter Brechbarkeit erscheint immer in Zerstreuungsbildern und breitet ihr Licht auch auf die anders gefärbten Felder aus. Von zwei nahehin gleich hellen Farben erscheint deshalb die schärfer gesehene heller, und je nach der Accommodation konnte ich in einem System gleichbreiter rother und blauer Streifen bald die rothen, bald die blauen heller sehen. Genau die mittlere Accommodation einzuhalten, bei der beide Farben gleiche Zerstreuungskreise geben, ist mir bei sehr feinen Streifen nicht gelungen.

Beziehungen zwischen Farbenempfindlichkeit und Helligkeitsempfindlichkeit. Bei den bisher besprochenen Untersuchungen über die wahrnehmbaren Abstufungen der Empfindungen hat man nur Helligkeitsabstufungen von Farben berücksichtigt, deren physikalische Qualität unverändert blieb. Aber dieselbe Fähigkeit des Auges, welche uns dies möglich macht, mufs uns nach TH. YOUNG'S Hypothese auch in den Stand setzen den Unterschied zwischen zwei ungleich gemischten Farben zu erkennen, indem sie uns lehrt, dafs verschiedene Quanta der Grundfarben in

beiden stecken. Wenn die eine Farbe mehr Roth enthält, die andere mehr Blau, und die Empfindungen dieses Roth und Blau elementare, neben einander coexistirende Empfindungen sind: so würde der Unterschied des Farbentons zwei gleich heller Mengen dieser Farben constatirt sein, sobald wir eben erkennen können, daß solche Unterschiede des Gehalts an Urfarben zwischen beiden vorhanden sind.

Es entsteht also die Frage: Können wir die Unterscheidung der verschiedenen Farbtöne auf die Unterscheidung der Intensitätsabstufungen der drei Urfarben in den verglichenen Farben begründen? Zeigt sich dabei derselbe Grad von Empfindlichkeit wie für Helligkeitsstufen, oder etwa ein größerer oder kleinerer?

Es tritt dabei nur eine neue Complication dadurch ein, daß mindestens zwei, unter Umständen auch drei verschiedenartige Empfindungsunterschiede gleichzeitig vorkommen und zusammenwirken, um die beiden Felder unterscheidbar zu machen. Über die Art dieses Zusammenwirkens gleichzeitiger Empfindungsunterschiede verschiedener Art können wir nun nur eine wahrscheinliche Hypothese zu finden suchen und deren Berechtigung an ihren Resultaten prüfen.

Nennen wir dE_1 , dE_2 , dE_3 die Größe (Deutlichkeit) der Empfindungsunterschiede für die Elementarempfindungen, und dE die Deutlichkeit des resultirenden Unterschiedes, so ist zunächst klar, daß dE nicht verschwinden kann, wenn nicht gleichzeitig:

$$dE_1 = dE_2 = dE_3 = 0.$$

Denn wenn auch nur eine dieser Größen von Null verschieden ist, wird ein Unterschied der beiden Felder wahrnehmbar sein, der durch keine Combination mit qualitativ unterschiedenen anderen Empfindungen ausgeglichen werden kann.

Die einfachste Form der Functionen, welche diese Eigenschaft haben, ist diejenige, wo dE eine nothwendig immer positive homogene Function zweiten Grades von den Größen dE_1 , dE_2 und dE_3 ist.

Da wir hier übrigens nur mit verschwindend kleinen Unterschieden zu thun haben, werden wir Glieder höherer Ordnung der kleinen Größen nicht zu berücksichtigen haben.

Wenn wir nun, im Sinne der Young'schen Theorie weitergehend, voraussetzen, daß hierbei nur die Bewußtseinsacte sich verbinden und gegenseitig verstärken, indem ein objectiver Unterschied derselben Felder durch zwei oder drei von einander unabhängige und verschiedenartige Eindrücke angezeigt wird, so werden wir aus der oben bezeichneten Function zweiten Grades die Producte der dE_1 , dE_2 und dE_3 wegzulassen haben. Deren Existenz würde nämlich anzeigen, daß die Art und Richtung der physiologischen Reize Einfluß auf die Endwirkung hätte, da je zwei der Producte ihr Vorzeichen ändern würden, wenn eine der Größen dE_1 dasselbe änderte. Unsere jetzt festgehaltene Hypothese bezweckt im Gegentheil, auszudrücken, daß es

bei der gegenseitigen Unterstützung dieser Eindrücke nur auf die Existenz und den Grad der Einwirkung auf die Aufmerksamkeit ankommt. Dies beschränkt uns also auf die Annahme

$$dE^2 = dE_1^2 + dE_2^2 + dE_3^2 \dots \dots \dots \} 4$$

Die Coëfficienten müssen gleich Eins gesetzt werden, da, wenn zwei der drei Gröfsen rechts gleich Null gesetzt werden, dE der Dritten gleich werden mufs.

Ich bemerke bei dieser Formel, dafs sie anzeigt, dE könne über die Schwelle treten, auch wenn dE_1 , dE_2 und dE_3 etwas darunter sind, (jedes einzelne aber $> V^{1/3} = 0,57735$ vom Schwellenwerth). Wenn aber die Werthe der drei Variablen sehr verschieden werden, verliert sich der Einfluss der kleineren auf das Resultat mehr und mehr, da die Quadrate kleiner ächter Brüche noch kleinere ächte Brüche sind.

Allgemeinerer Ausdruck für FECHNERS Gesetz. Wir haben nunmehr die Gröfsen dE_1 , dE_2 , dE_3 durch ihre ihnen nach FECHNERS Gesetz zukommenden Werthe zu ersetzen. Da es für viele Fälle genügt, den einfachsten und ältesten Ausdruck dieses Gesetzes einzusetzen, in anderen wünschenswerth wird, etwas weitergehende Annäherungen zu erreichen, so setze ich

$$\left. \begin{aligned} dE_1 &= X \cdot \frac{dx}{x} \cdot \frac{1}{1 + lx + my + nz} \dots \dots \dots \\ dE_2 &= Y \cdot \frac{dy}{y} \cdot \frac{1}{1 + lx + my + nz} \dots \dots \dots \\ dE_3 &= Z \cdot \frac{dz}{z} \cdot \frac{1}{1 + lx + my + nz} \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} 4a$$

Die Gröfsen X , Y , Z sollen Functionen von x , y , z bedeuten, von denen wir wissen, dafs sie bei hohen Werthen der Lichtstärken x , y , z nahin constant werden. Der letzte Factor in jeder Reihe bezeichnet den Einfluss der Blendung, entsprechend dem auf S. 412 in Gleichung 3 gebrauchten Factor $\frac{1}{1 + \epsilon r}$. Nur war dieser Blendungsfactor hier in anderer Weise zu gestalten, da nach den Versuchen von A. KÖNIG und E. BRODHUN die Dämpfung für die verschiedenen Spectralfarben von dem Maximum ihrer Stufenempfindlichkeit ab für alle gleichmäfsig nahelin in demselben Verhältnisse wächst, und der betreffende Factor also gleiche Form für alle Farben haben mufs. Dafs ein solcher gemeinsamer Grad der Dämpfung möglich ist durch intensive Verzehrung des arteriellen Sauerstoffs habe ich schon oben erörtert. Da nach den genannten Beobachtern gleicher Grad der Dämpfung mit gleicher Helligkeit zusammenfällt, so würde $(lx + my + nz)$ auch eine Gröfse sein, die bei hohen Helligkeiten Function der Helligkeit ist.

Übrigens ist hier wie oben zu bemerken, dafs dieser Factor nur für kleine Grade der Blendung den Gang der Function ausdrücken soll.

Gesetz der Intensitätsabstufungen für verschiedene Farben
abgeleitet.

Wenn wir eine zusammengesetzte Farbe nur in ihrer Lichtstärke ändern, steigern wir alle ihre Bestandtheile um denselben Bruchtheil $d\epsilon$, und wir haben also zu setzen:

$$dx = x \cdot d\epsilon, \quad dy = y \cdot d\epsilon, \quad dz = z \cdot d\epsilon.$$

Dann wird nach unserer Hypothese

$$dE = \frac{d\epsilon}{1 + lx + my + nz} \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \dots \dots \dots \} \bar{5}$$

Für grofse Intensitäten, wo, wie bemerkt,

$$X = Y = Z = k$$

einer Constanten k gleich werden, erhalten wir

$$dE = \frac{k \cdot d\epsilon}{1 + lx + my + nz} \sqrt{3} \dots \dots \dots \} \bar{5a}$$

was den Beobachtungen über den gleichmäfsigen Gang der Gröfse E bei allen Farben für hohe Lichtstärken entspricht.

Für mäfsigere Lichtstärken können wir in erster Annäherung setzen

$$X = \frac{kx}{A + x}, \quad Y = \frac{ky}{B + y}, \quad Z = \frac{kz}{C + z}$$

wo A, B, C die Constanten bezeichnen, welche wir oben als die mittleren Werthe der Grundfarben des Eigenlichts gedeutet haben.

Unter dieser Voraussetzung wird

$$\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = k \sqrt{\left(\frac{x}{A + x}\right)^2 + \left(\frac{y}{B + y}\right)^2 + \left(\frac{z}{C + z}\right)^2} \} \bar{5b}$$

Die drei Brüche, die unter dem Wurzelzeichen addirt sind, können jeder für sich von Null bis + 1 steigen. Der höchste Werth der Wurzelgröfse, welcher eintritt, wenn alle drei Grundfarben hell genug in der Mischfarbe sind, um den Einflufs des Eigenlichts unmerklich zu machen, giebt

$$\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = k \sqrt{3} = k \cdot (1,7320) \dots \dots \dots \} \bar{5c}$$

Dagegen wird die Gröfse

$$\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2},$$

welche als Factor in dem oben gegebenen Ausdruck für das Mafs der Empfindlichkeit vorkommt, kleiner werden für geringere Lichtstärken einzelner oder aller

Grundfarben, und zwar wird der Werth dieses Factors am meisten beeinträchtigt werden, wenn die größeren unter den Werthen x, y, z auch durch die größeren unter den Werthen A, B, C dividirt werden. Der kleinste unter den drei letzteren Werthen C gehört dem Blau z an, während Roth und Grün nahe gleiche größere Werthe A, B zu haben scheinen. Dem entspricht die größere Stufenempfindlichkeit bei den lichtschwachen blauen Farben, die also auch von unsrer Formel angezeigt wird.

Ähnlichste Farben.

Wenn wir zwei sehr wenig verschiedene Farben haben, von denen der einen die Farbenwerthe der Grundfarben x, y, z , der anderen $x + dx, y + dy$ und $z + dz$ zukommen, und wir die erstere in ihrer Intensität um den Bruchtheil ϵ vermehren, so sind die Unterschiede in den Bestandtheilen der so vermehrten ersten und der zweiten Farbe $(dx - \epsilon x), (dy - \epsilon y)$ und $(dz - \epsilon z)$. Die Empfindung ihres Unterschiedes wird also nach unserer Hypothese:

$$dE = \sqrt{X^2 \cdot \left(\frac{dx - \epsilon x}{x}\right)^2 + Y^2 \cdot \left(\frac{dy - \epsilon y}{y}\right)^2 + Z^2 \cdot \left(\frac{dz - \epsilon z}{z}\right)^2} \dots \} 6$$

Wenn wir nun ϵ so bestimmen wollen, daß dE ein Minimum werde, ist zu setzen

$$\frac{\delta (dE^2)}{\delta \epsilon} = 0 \dots \dots \dots \} 6a$$

Dies giebt

$$- 2 X^2 \frac{(dx - \epsilon x)}{x} - 2 Y^2 \frac{dy - \epsilon y}{y} - 2 Z^2 \frac{dz - \epsilon z}{z} = 0$$

oder

$$\epsilon \left[X^2 + Y^2 + Z^2 \right] = X^2 \cdot \frac{dx}{x} + Y^2 \cdot \frac{dy}{y} + Z^2 \cdot \frac{dz}{z} \dots \dots \} 6b$$

Der Werth von dE findet sich unter diesen Umständen

$$dE^2 = \left\{ X^2 \left(\frac{dx}{x}\right)^2 + Y^2 \left(\frac{dy}{y}\right)^2 + Z^2 \left(\frac{dz}{z}\right)^2 \right\} - \epsilon \left\{ X^2 \frac{dx}{x} + Y^2 \frac{dy}{y} + Z^2 \frac{dz}{z} \right\} 6c$$

Wenn wir den Werth von ϵ aus Gleichung (6b) hineinsetzen, giebt dies

$$dE^2 = \frac{X^2 \cdot Y^2 \cdot \left(\frac{dx}{x} - \frac{dy}{y}\right)^2 + Y^2 \cdot Z^2 \cdot \left(\frac{dy}{y} - \frac{dz}{z}\right)^2 + Z^2 \cdot X^2 \cdot \left(\frac{dz}{z} - \frac{dx}{x}\right)^2}{X^2 + Y^2 + Z^2} \dots \dots \} 6d$$

Für den Fall, daß alle drei Farben hell genug sind, um $X = Y = Z = k$ setzen zu können, giebt dies

$$dE^2 = \frac{k^2}{3} \left[\left(d \log n. \frac{x}{y} \right)^2 + \left(d \log n. \frac{y}{z} \right)^2 + \left(d \log n. \frac{z}{x} \right)^2 \right] \dots \dots \} 6e$$

Dieser Ausdruck ist unabhängig von dem Maafs, in welchem die Quanta x , y , z gemessen sind. Die vorausgehende Gleichung (6d) setzt nur voraus, dafs beziehlich X , Y , Z in denselben Maafsen wie x , y , z ausgedrückt sind.

Die Gleichung (6d) beziehlich (6e) würde die Gröfse des Farbenunterschiedes ausdrücken zwischen zwei Farben von verschiedenem Farbenton, die man durch passende Regulirung ihrer Helligkeit einander möglichst ähnlich gemacht hat.

Es liegen nun Beobachtungen an Spectralfarben, angestellt von den Herren A. KÖNIG und E. BRODHUN, vor, welche die nöthigen Data liefern, um die hier aufgestellte Formel mit Beobachtungen zu vergleichen. Die genannten beiden Herren hatten, wie schon früher angeführt, ein System von Messungen über die Resultate der Mischungen von Spectralfarben angestellt, aus denen sich die Zusammensetzung dieser aus drei passend gewählten Grundfarben, die sie mit R , G , V bezeichneten, berechnen liefs (S. 337—371. Zahlenangaben folgen weiter unten). Aus diesen lassen sich die Differenzen der Grundfarben berechnen, die zwei dicht neben einander liegenden Spectralfarben entsprechen. Auferdem haben dieselben Beobachter eine Reihe von Messungen der Empfindlichkeit des Auges für die Farbenunterschiede neben einander liegender Spectralfarben angestellt.¹ Sie haben dies so ausgeführt, dafs beide Felder meines Farbenmischapparats für Spectralfarben ähnliche Farben zeigten und der Beobachter sie dann auf Farbgleichheit einzustellen suchte. Der Fehler der Einstellung nach Wellenlängen berechnet, wurde notirt, und aus je 50 Einstellungsversuchen der mittlere Fehler berechnet.

Ich benutze hierbei nur diese letzten Beobachtungsreihen der genannten Beobachter, weil die früheren, welche Herr A. KÖNIG zusammen mit Herrn C. DIETERICH angestellt hat² nicht mit derselben Sorgfalt gegen den Einflufs von Helligkeitsunterschiede der verglichenen Farben geschützt waren.

Abgesehen von der oben schon erwähnten Aufgabe, die Empfindlichkeit gegen Helligkeitsunterschiede mit der gegen Farbenunterschiede zu vergleichen, würde die von mir formulirte hypothetische Erweiterung des psychophysischen Gesetzes, wenn sie sich durchgängig bewährt, Eines für die Theorie der Farbeempfindungen leisten können, wozu bisher noch gar kein sicherer Anhalt gegeben war, nämlich die Feststellung der wirklichen drei physiologisch einfachen Farbeempfindungen.³

Wir haben gesehen, dafs NEWTONS Farbenmischungsgesetz die ganze Mannigfaltigkeit der möglichen Farbeempfindungen zwar auf drei neben einander bestehende Erregungsweisen des Sehnervenapparates zurückzuführen erlaubt, aber ganz oder fast ganz unbestimmt läfst, welche Farbeempfindungen diesen drei elementaren Erregungen entsprechen. Denken wir uns nach NEWTONS Regel die Spectralfarben und ihre Mischungen in eine Farbentafel eingetragen, so würden die Orte der drei Grundfarben in der YOUNG'schen Theorie nur der einzigen Beschränkung unterliegen, dafs das zwischen ihnen construirte Dreieck sämtliche Spectralfarben in sich fassen muß; wenn wir dagegen mit Hrn. E. HERING negative Erregungswerthe zulassen wollten, würden gar keine Beschränkungen in der Wahl der drei Urempfindungen gegeben sein.

¹ E. BRODHUN, *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*. Bd. III. S. 89. 1892 und *Verhandlungen der Physiologischen Gesellschaft zu Berlin* 1885—1886. No. 17 u. 18.

² A. KÖNIG und C. DIETERICH, *Wied. Annalen d. Physik*. XXII. S. 579. 1884 und *Gräfe's Archiv für Ophthalmologie*. Bd. 30. (2.) S. 171. 1884.

³ Diese Untersuchung ist kürzlich veröffentlicht in *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*. Bd. II. S. 1—30. Bd. III. S. 1—20.

Dieses Problem erschien mir wichtig genug, um seine Lösung, so gut es eben mit den bisher vorliegenden, in vieler Beziehung unzureichenden Beobachtungen angeht, zu versuchen, auch wenn man nur hoffen durfte, eine vorläufige angenäherte Lösung zu erhalten. Gleichzeitig wird sich ja dabei zeigen müssen, ob auch die Beobachtungen über die Farbenempfindlichkeit des trichromatischen Auges sich so weit unserer psychophysischen Hypothese fügen, als es bei den bestehenden Fehlergrenzen der Beobachtungen zu erwarten ist.

In letzterer Beziehung erinnere ich hier zunächst an die zur Zeit noch bestehenden Unzulänglichkeiten der Beobachtungen. Große Genauigkeit ist überhaupt bei allen Messungen der Grenze, wo irgend eine Erscheinung noch wahrnehmbar ist, ehe sie ganz verschwindet, der Regel nach nicht zu erreichen. Hier handelt es sich um die Wahrnehmung des Farbenunterschiedes benachbarter Spectralfarben. Dabei, wie in fast allen ähnlichen Fällen, spielen allerlei uncontrollirbare Abänderungen in dem Zustande unserer Nervenapparate und psychischen Thätigkeiten mit, welche sich schliesslich in dem abweichenden Gange der Messungsergebnisse zu erkennen geben.

Die Vergleichen des Farbentons sind zwar in den letzten Messungsreihen der Hrn. A. KÖNIG und E. BRODHUN¹ mit gleich hell erscheinenden Farben durchgeführt worden, und wir dürfen wohl annehmen, daß die beiden Beobachter sich zu diesem Zwecke die günstigsten Helligkeiten herzustellen gesucht haben. Solche würden in den Gültigkeitsbereich des normalen FECHNERSchen Gesetzes fallen, wo die wahrnehmbaren Helligkeitsstufen der absoluten Lichtstärke proportional sind. Aber selbst, wenn sie dies für die sämtlichen Spectralfarben haben einhalten können, ist es fraglich, ob nicht Abweichungen von dieser einfachsten Form des FECHNERSchen Gesetzes da eintreten konnten, wo einer oder zwei der elementaren Farbeindrücke in der Gesamtfarbe sehr schwach vertreten waren, z. B. bei sehr gesättigten Farben, deren schwache andersfarbige Einmischungen den Farbenunterschied bedingen. Hier konnten sich solche Abweichungen von dem genannten Gesetz geltend machen, wie sie bei geringen Helligkeiten eintreten. In der That werden wir Abweichungen dieser Art zwischen Rechnung und Beobachtung begegnen. Wären Angaben über die absoluten Lichtstärken der verglichenen farbigen Felder gegeben worden, so würden wir die von dem genannten Umstand bedingte grössere Unempfindlichkeit gegen die betreffenden Farbenunterschiede berechnen können; sehr groß können allerdings diese Abweichungen unter den Verhältnissen des Farbedreiecks, die wir finden werden, nicht sein, da fast alle Spectralfarben sich als stark gemischt aus den Grundfarben ergehen werden.

Die Zahlenwerthe, welche die thatsächliche Unterlage für die bezeichnete Rechnung bilden, sind bei verschiedenen, von einander unabhängigen Untersuchungen gewonnen worden, die ohne Rücksicht auf den gegenwärtig vorliegenden Zweck durchgeführt wurden. Wäre Letzteres der Fall gewesen, so hätten einige Erleichterungen der Rechnung und eine wesentliche Sicherung ihrer Genauigkeit erreicht werden können. Namentlich wird die Rechnung erschwert und die Genauigkeit der Ergebnisse dadurch erheblich beeinträchtigt, daß einerseits die Bestimmungen der Mischungsverhältnisse der Farben und die Bestimmungen der Sehschärfe für Farbenunterschiede andererseits nicht durchgängig für dieselben Wellenlängen gemacht sind,

¹ E. BRODHUN, *Verhandl. der physiol. Gesellschaft zu Berlin*, 1885—1886. No. 17 u. 18. — Eine ausführlichere Mittheilung über diese Beobachtungsreihen in *Zeitschrift f. Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*. Bd. III. S. 89. 1892.

so dafs die Zahlen für die Mischungsverhältnisse, die in der Rechnung gebraucht werden, zum Theil schon durch Interpolation gefunden werden mußten. Vollends konnten die gleichzeitig gebrauchten Werthe der nach den Wellenlängen genommenen Differentialquotienten der Farbenwerthe im Spectrum überhaupt nur durch Interpolation gefunden werden, und gerade an einigen Stellen, wo diese Differentialquotienten sich sehr schnell ändern, wären engere Intervalle für die Beobachtungen höchst wünschenswerth gewesen.

Da die von Hrn. A. KÖNIG gefundenen Zahlen, welche selbst schon die Umrechnung von dem prismatischen Spectrum des Gaslichtes auf das Interferenzspectrum des Sonnenlichtes mit Hilfe einer empirischen Formel erlitten hatten, unverkennbare kleine Unregelmäßigkeiten der nach ihnen construirten Intensitätscurven der Elementarfarben erkennen liefsen, schien es am besten, eine graphische Interpolation zu Grunde zu legen, wie eine solche übrigens der genannte Autor in den von ihm und C. DIETERICI veröffentlichten Curven selbst angewendet hat. Diese Interpolation ist von Hrn. Dr. SELL, der den grössten Theil der höchst langwierigen Rechnungen durchgeführt hat, gemacht worden, und zwar zu einer Zeit, wo weder er noch ich übersehen konnten, welchen Einfluß auf die erhofften Rechnungsergebnisse die Führung der Curve haben würde.

Für 18 Wellenlängen lagen ausreichende Beobachtungen vor. Wenn man annehmen durfte, dafs durchgängig die einfache erste Form des FECHNERSchen Gesetzes als gültig betrachtet werden durfte, waren sechs Parameter zu suchen, mit deren Hilfe sich für alle diese Wellenlängen nahehin gleiche Werthe für das Maafs der Empfindlichkeit des Auges hätten ergeben müssen. Die Gleichungen, aus denen die Parameter gefunden werden mußten, waren sechsten Grades nach jedem von ihnen, also nur durch allmähliche Annäherungsrechnungen lösbar. Es liefsen sich jedoch Regeln über den Sinn der Änderungen der Werthe der Empfindlichkeit für die einzelnen Wellenlängen bei Änderungen der einzelnen Parameter finden, welche als Leitfaden für die Rechnung dienen konnten.

Die Rechnung konnte schliesslich überhaupt nur so weit fortgesetzt werden, bis die übrigbleibenden Differenzen zwischen Rechnung und Beobachtung keinen regelmässigen Gang mehr erkennen liefsen, oder wenigstens keinen, der sich nicht schon aus den bekannten Abweichungen vom FECHNERSchen Gesetze hätte erklären lassen. Die grofse Arbeit, welche es gemacht hätte, die Differenzen durch Rechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate noch zu verkleinern, schien mir gegenüber der ungenügenden Genauigkeit der zu Grunde liegenden Beobachtungen, welche künftig unschwer werden verbessert werden können, nicht gerechtfertigt.

Da diese Untersuchung einen Zusammenhang nachzuweisen sucht zwischen Gröfsen, für die ein solcher bisher durchaus nicht bekannt war, und die, wenn die von uns vorausgesetzte Abhängigkeit oder eine analoge zwischen ihnen nicht bestände, ebensogut im Verhältnisse von 1 : 100 oder 1 : 1000 hätten stehen können, statt einander annähernd gleich zu sein, so wird es immerhin als ein vorläufiges Resultat zu betrachten sein, wenn dieselben, trotz aller besprochenen ungünstigen Verhältnisse, nur im Verhältnifs von 1 : 1,5 von ihrem Mittelwerthe abweichen.

Für die hier durchzuführende Rechnung begnügen wir uns mit der einfachsten Form des FECHNERSchen Gesetzes, in dem wir die oben mit X, Y, Z bezeichneten Gröfsen und den Blendungsfactor alle gleich Eins setzen; wir setzen also

$$\left. \begin{aligned} dE_1 &= k \cdot \frac{dx}{x} \\ dE_2 &= k \cdot \frac{dy}{y} \dots\dots\dots \\ dE_3 &= k \cdot \frac{dz}{z} \end{aligned} \right\} 7$$

Es ergibt sich also

$$dE = k \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{x}\right)^2 + \left(\frac{dy}{y}\right)^2 + \left(\frac{dz}{z}\right)^2} \dots\dots\dots \left. \right\} 7a$$

Um die Wahrnehmbarkeit der Farbenabstufungen auf die der Helligkeitsabstufungen zurückzuführen, wenden wir diese Gleichung zunächst auf den Fall an, wo nur die Lichtstärken zweier Farben gleicher Qualität verglichen werden, also die Intensitäten aller drei Grundfarben in der einen Lichtmenge die in der anderen um einen gleichen Bruchtheil übertreffen. Wir setzen daher

$$dx = \varepsilon \cdot x, \quad dy = \varepsilon \cdot y, \quad dz = \varepsilon \cdot z,$$

worin ε einen kleinen ächten Bruch bezeichnet. Dies ergibt wie in (5c)

$$dE = k \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{3} = k \cdot \varepsilon \cdot 1,7320 \dots\dots\dots \left. \right\} 8$$

Der Werth von k ist, je nach der Methode der Beobachtung, verschieden groß zu nehmen. Der aus den Principien der Wahrscheinlichkeitsrechnung hergeleitete theoretische Werth von k bei solchen Beobachtungen, wo man ε als den mittleren Fehler bestimmt hat, ist 1,8238 mal so groß zu nehmen, als wenn ε den kleinsten Fehler bedeutet, den man in 10 Fällen immer noch wahrnehmen konnte.

Ersteres ist bei KÖNIGS und BRODHUNS Messungen der Empfindlichkeit für Farbenunterschiede, letzteres bei denen der beiden genannten Beobachter für Helligkeitsstufen geschehen.

In einer Arbeit von Hrn. UHTHOFF¹ ist dieses Verhältniß empirisch bestimmt. Es schwankt zwischen den Werthen 1,25 und 2,44 und beträgt im Mittel 2,025, was mit der theoretischen Ableitung des Werthes ausreichend stimmt.

Bestimmung ähnlichster Farbenpaare. Die oben gegebene Gleichung (6c) ergibt, wenn wir die angeführten Vereinfachungen vornehmen, den Werth des Empfindungsunterschieds wenn er durch passende Regelung der Lichtstärke auf sein Minimum gebracht ist.

$$\frac{dE^2}{k^2} = \frac{1}{3} \left\{ \left(\frac{dx}{x} - \frac{dy}{y} \right)^2 + \left(\frac{dy}{y} - \frac{dz}{z} \right)^2 + \left(\frac{dz}{z} - \frac{dx}{x} \right)^2 \right\} \dots\dots \left. \right\} 8a$$

¹ W. UHTHOFF, Über die Unterschiedsempfindlichkeit des normalen Auges gegen Farbentöne im Spectrum. *Gräfe's Archiv*. Bd. XXXIV. (4). S. 1. 1888.

oder wenn wir mit $d\lambda$ den durch die Beobachtungen gefundenen mittleren Fehler der Wellenlänge λ bezeichnen

$$\frac{dE}{k} = \frac{\delta\lambda}{V^{\frac{2}{3}}} \sqrt{\left(\frac{1}{x} \cdot \frac{dx}{d\lambda} - \frac{1}{y} \cdot \frac{dy}{d\lambda}\right)^2 + \left(\frac{1}{y} \cdot \frac{dy}{d\lambda} - \frac{1}{z} \cdot \frac{dz}{d\lambda}\right)^2 + \left(\frac{1}{z} \cdot \frac{dz}{d\lambda} - \frac{1}{x} \cdot \frac{dx}{d\lambda}\right)^2} \quad 8b$$

Die x, y, z hängen nun mit den Elementarfarben R, G, V , welche zur Angabe des Farbenwerthes der verschiedenen Spectralfarben von den Hrn. A. KÖNIG und C. DIETERICI gebraucht sind, nach NEWTONS Gesetz durch lineare homogene Gleichungen zusammen, deren Coefficienten aber zunächst noch unbekannt sind. Bezeichnen wir diese Werthe mit

$$\left. \begin{aligned} x &= a_1 \cdot R + b_1 \cdot G + c_1 \cdot V \\ y &= a_2 \cdot R + b_2 \cdot G + c_2 \cdot V \dots\dots\dots \\ z &= a_3 \cdot R + b_3 \cdot G + c_3 \cdot V \end{aligned} \right\} 9$$

so ist zunächst zu bemerken, daß je einem der Coefficienten in jeder Horizontalreihe ein willkürlicher Werth gegeben werden kann, da

$$\frac{dx}{x}, \frac{dy}{y} \text{ und } \frac{dz}{z}$$

ihre Werthe nicht ändern, wenn jeder der GröÙen x, y, z ein willkürlicher constanter Factor hinzugefügt wird. Sonst ist die Wahl der Coefficienten im Sinne von YOUNGS Theorie nur der einen Beschränkung unterworfen, daß die Werthe von R, G, V , welche den Spectralfarben angehören, keine negativen Werthe von x, y, z geben dürfen. Das wird nie der Fall sein können, wenn sämtliche Coefficienten a, b, c positive Werthe haben. Wenn aber negative Werthe vorkommen, wird man prüfen müssen, ob alle Spectralfarben positive x, y, z ergeben.

Übrigens wird man von jedem System von Coefficienten der $[x, y, z]$, was der letzteren Bedingung Genüge leistet, zu anderen der $[x_1, y_1, z_1]$ übergehen können, indem man setzt

$$\begin{aligned} x_1 &= x + fy + gz \\ &\text{etc.} \end{aligned}$$

Wenn die f und g positiv sind, wird auch das neue System für die Spectralfarben keine negativen Werthe ergeben.

Es kommt nun zunächst darauf an, sechs Verhältnisse der Constanten in den Gleichungen 9 so zu bestimmen, daß die Werthe von dE aus den Gleichungen 8b alle einander möglichst gleich werden. Dann würde nachher der berechnete Grad der Empfindlichkeit zu vergleichen sein mit dem, der für Helligkeitsunterschiede mittelst der Gleichung 8 gefunden ist.

Die Werthe der Constanten, die uns bis jetzt in unseren Berechnungsversuchen am besten zu genügen schienen, waren

$$\left. \begin{aligned} x &= 0,7964 \cdot R - 0,3515 \cdot G + 0,555 \cdot V \dots\dots\dots \\ y &= 0,2612 \cdot R + 0,3483 \cdot G + 0,3930 \cdot V \dots\dots\dots \\ z &= 0,250 \cdot R + 0,125 \cdot G + 0,625 \cdot V \dots\dots\dots \end{aligned} \right\} 9a$$

Die im Folgenden angegebenen Werthe der Differentialquotienten

$$\frac{dR}{d\lambda}, \frac{dG}{d\lambda}, \frac{dV}{d\lambda}$$

sowie auch einige der Werthe von *R*, *G*, *V* wurden, wie oben bemerkt, durch graphische Interpolation theils gefunden, theils ausgeglichen.

Die $\delta\lambda$ sind die von KÖNIG gefundenen mittleren Fehler, welche in je fünfzig Versuchen, das Spectrometer auf gleiche Farben einzustellen, begangen wurden.

Tafel I.
Data für die Rechnung

Wellenlänge	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>V</i>	$\frac{dR}{d\lambda}$	$\frac{dG}{d\lambda}$	$\frac{dV}{d\lambda}$	$\delta\lambda$
640 $\mu\mu$	2,66	0,22	0	-0,116	-0,023	0	2,37 $\mu\mu$
630 "	3,95	0,54	0	-0,129	-0,044	0	1,35 "
620 "	5,35	1,12	0	-0,160	-0,078	0	0,67 "
610 "	6,60	2,17	0	-0,107	-0,123	0	0,55 "
600 "	7,51	3,60	0	-0,081	-0,165	0	0,45 "
590 "	8,27	5,48	0	-0,067	-0,208	0	0,42 "
580 "	8,90	7,65	0	-0,055	-0,200	0	0,38 "
570 "	9,37	9,98	0	-0,039	-0,199	0	0,51 "
560 "	9,56	11,45	0,22	0	-0,100	0	0,58 "
550 "	9,21	12,00	0,3	+0,068	0	-0,0138	0,77 "
540 "	8,30	11,55	0,49	+0,121	+0,083	-0,0233	0,80 "
530 "	6,54	10,36	0,75	+0,202	+0,139	-0,0326	0,77 "
520 "	4,62	8,45	1,10	+0,171	+0,228	-0,0400	0,71 "
510 "	3,0	5,75	1,55	+0,162	+0,271	-0,0536	0,64 "
500 "	1,50	3,32	2,2	+0,114	+0,168	-0,0887	0,35 "
490 "	0,78	2,24	3,6	+0,051	+0,059	-0,208	0,31 "
480 "	0,4	1,88	7,9	+0,043	+0,028	-0,52	0,38 "

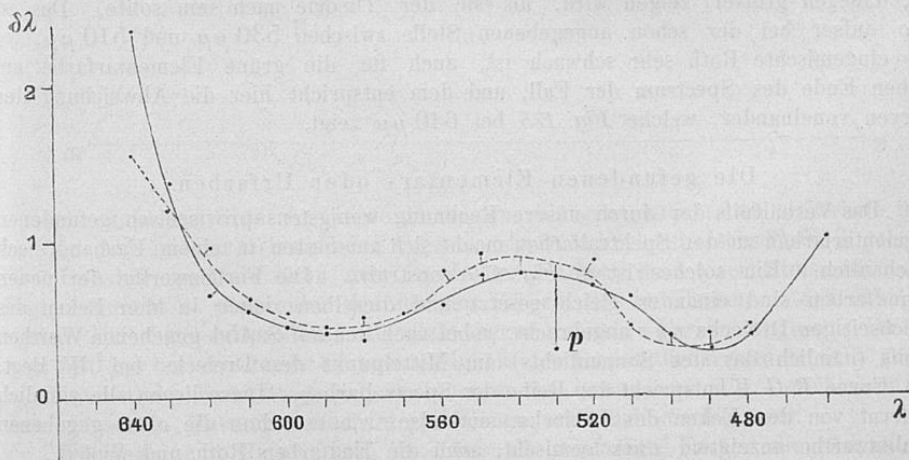
Dies sind die durch die Beobachtungen gegebenen Grundlagen der Rechnung. Die folgende Tafel II. giebt die Ergebnisse der Rechnung.

Tafel II.

Wellenlänge	x	y	z	$\frac{1}{x} \cdot \frac{dx}{d\lambda}$	$\frac{1}{y} \cdot \frac{dy}{d\lambda}$	$\frac{1}{z} \cdot \frac{dz}{d\lambda}$	dE
640 $\mu\mu$	2,05	0,73	0,69	-0,0413	-0,0496	-0,0455	(0,0263)
630 "	2,98	1,18	1,10	-0,0294	-0,0402	-0,0346	0,0196
620 "	3,88	1,70	1,47	-0,0261	-0,0391	-0,0359	0,0120
610 "	4,52	2,38	1,92	-0,0094	-0,0298	-0,0221	0,0151
600 "	4,75	3,10	2,32	-0,0014	-0,0250	-0,0175	0,0146
590 "	4,68	3,95	2,76	+0,0043	-0,0226	-0,0156	0,0158
580 "	4,43	4,86	3,18	+0,0060	-0,0171	-0,0122	0,0125
570 "	3,99	5,79	3,59	+0,0098	-0,0136	-0,0097	0,0173
560 "	3,77	6,43	3,96	+0,0093	-0,0054	-0,0032	0,0125
550 "	3,31	6,47	3,99	+0,0142	+0,0017	+0,0021	0,0146
540 "	2,86	6,26	3,82	+0,0210	+0,0078	+0,0064	0,0173
530 "	2,00	5,51	3,40	+0,0469	+0,0155	+0,0140	(0,0389)
520 "	1,37	4,51	2,90	+0,0196	+0,0300	+0,0159	0,0138
510 "	1,24	3,31	2,44	+0,0043	+0,0338	+0,0167	(0,0253)
500 "	1,33	2,38	2,16	-0,0129	+0,0219	-0,0027	0,0169
490 "	1,83	2,38	2,72	-0,0287	-0,0202	-0,0404	0,0133
480 "	4,04	3,86	5,27	-0,1028	-0,0725	-0,0877	0,0141

Mittel: 0,0176

Fig. 175.



Um eine anschauliche Übersicht über die bisher erreichte Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Theorie zu geben, habe ich in Fig. 175 die Werthe

des $\delta\lambda$ dargestellt, wie sie KÖNIGS letzte Beobachtungen ergeben haben. Diese sind durch die ausgezogene Curve verbunden. Die punctirte Curve dagegen giebt die Werthe von $\delta\lambda$, wie sie nach der Theorie sein müßten, um ein constantes dE bei den gemachten Annahmen über die Grundfarben zu erreichen. Man sieht, daß eine ziemlich ähnlich verlaufende Curve, wie die der beobachteten Werthe, durch die gegebene Theorie erreicht werden kann. Auch würden weitere Verbesserungen der Constanten a, b, c wohl noch merklich bessere Übereinstimmung haben erreichen lassen, als es bisher gelungen ist. Die auffallendste Abweichung ist bei $\lambda = 530 \mu\mu$, wo ein einzelner ganz kleiner Werth von $\delta\lambda$, in *Fig. 175* mit p bezeichnet (bezüglich großer Werth von dE), mitten zwischen solchen erscheint, die dem dort bestehenden Maximum von $\delta\lambda$ entsprechen. Es liegt diese Stelle im Grün nahe bei der Linie E , und dort mußte ein besonders weites Intervall (von $\lambda = 536 \mu\mu$ bis $516,5 \mu\mu$) durch Interpolation ausgefüllt werden, wodurch die Werthe der Differentialquotienten an jener Stelle erheblich unsicher werden. Der hier vorliegende jähe Sprung zwischen den drei benachbarten Werthen läßt sich durch keine Combination der Constanten a, b, c beseitigen. Es ist hauptsächlich das Glied $\left(\frac{1}{x} \cdot \frac{dx}{d\lambda}\right)$, was hier die Abweichung verursacht, und diese wird um so größer, da x hier einem Minimum ganz nahe ist und das x im Nenner deshalb sehr klein ausfällt.

Übrigens könnte es wohl sein, daß eine der Curven der Farbenwerthe der Spectralfarben eine Ecke hätte mit plötzlicher Änderung des Differentialquotienten. Unsere Interpolationsrechnungen, die von der Annahme einer continuirlichen Krümmung der Curven ausgehen, müssen an einer solchen Stelle irre führen.

Sonst ist noch zu bemerken, daß überall, wo die Lichtstärke einer der drei Farben gegen die anderen sehr zurücktritt, die verminderte Empfindlichkeit für die Unterschiedsschwellen schwachen Lichtes sich geltend macht. Dort wird, wenn nicht gleichzeitig der Differentialquotient nach λ sehr klein wird, zu erwarten sein, daß die Empfindlichkeit für die Farbenunterschiede in der Beobachtung sich geringer ($\delta\lambda$ dagegen größer) zeigen wird, als sie der Theorie nach sein sollte. Das ist also außer bei der schon angegebenen Stelle zwischen $530 \mu\mu$ und $510 \mu\mu$, wo das eingemischte Roth sehr schwach ist, auch für die grüne Elementarfarbe am rothen Ende des Spectrum der Fall, und dem entspricht hier die Abweichung der Curven voneinander, welche *Fig. 175* bei $640 \mu\mu$ zeigt.

Die gefundenen Elementar- oder Urfarben.

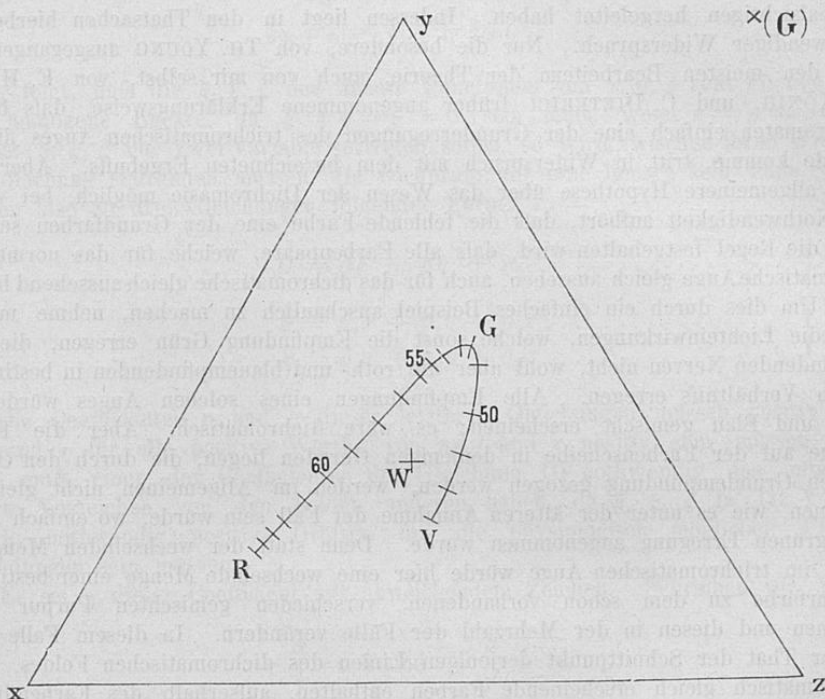
Das Verhältniß der durch unsere Rechnung wenigstens provisorisch gefundenen Elementarfarben zu den Spectralfarben macht sich am besten in einem Farbendreieck anschaulich. Ein solches ist in *Fig. 176* construirt. Die Farbenwerthe der neuen Grundfarben sind einander gleich gesetzt und dieselben daher in den Ecken des gleichseitigen Dreiecks xyz angebracht, wobei nach den auf S. 454 gegebenen Werthen Weiß (nämlich das des Sonnenlichts) im Mittelpunkt des Dreiecks bei W liegt. Die Curve $R G V$ entspricht der Reihe der Spectralfarben. Diese liegen alle ziemlich entfernt von den Ecken des Dreiecks, sind also, wie es schon die oben gegebenen Zahlenwerthe anzeigen, stark gemischt, auch die Endfarben Roth und Violett.

Das spectrale Roth würde nach den auf S. 454 angegebenen Werthen eine weißliche und ein wenig gelbliche Modification der Grundfarbe x sein; letztere also würde etwa ein höchst gesättigtes Carminroth darstellen. Das spectrale Violett

wäre eine weifsröthliche Abänderung der Urfarbe z , und diese letztere wäre also etwa mit dem Ultramarinblau im Farbenton zu vergleichen. Beide Farbenbestimmungen stimmten demnach mit Hrn. E. HERINGS Vermuthungen. Endlich würde die Urfarbe y im Farbenton der Stelle zwischen $\lambda = 540 \mu\mu$ und $560 \mu\mu$ entsprechen, wo $x = z$ ist; das wäre im gelblichen Grün, und zwar grüner, als die Complementärfarbe des Violett, etwa dem Grün der Vegetation entsprechend.

Die starke Wölbung der Curve bei G entspricht dem spectralen Grün bei FRAUNHOFERS Linie E . Das (G) auferhalb des Dreiecks bezeichnet das von A. KÖNIG und C. DIETERICI ursprünglich als Grundfarbe für ihre Mischungs-

Fig. 176.



versuche gewählte Grün G . Diese Farbe war übrigens auch schon auferhalb ihres nach der Analogie der farbenblinden Augen construirten Farbendreiecks \mathfrak{R} , \mathfrak{G} , \mathfrak{B} gelegen.

Da das spectrale Grün dem Rande des Farbendreiecks verhältnismäßig nahe liegt, bekommt es eine unter den übrigen Farben, die im Farbenton der Mischung zweier Urfarben entsprechen, ziemlich hervortretende Farbensättigung. Die bei $\lambda = 530 \mu\mu$ hervortretende Unregelmäßigkeit der Empfindlichkeitscurve fällt gerade in diese starke Krümmung der Farbencurve im Grün, was die Unsicherheit der dort gemachten Messungen und Interpolationen erklärlich machen mag.

Übrigens zeigt diese Curve an, daß alle einfachen Farben die sämtlichen lichtempfindlichen Nerven-elemente des trichromatischen Auges gleichzeitig und mit nur mäßigen Intensitätsunterschieden erregen. Wenn wir also diese Erregungen auf die Anwesenheit dreier photochemisch zu verändernder Substanzen in der

Netzhaut hypothetisch zurückführen, so müssen wir schliessen, daß diese alle drei nahehin gleiche Grenzen der Lichtempfindlichkeit haben und nur untergeordnete Abweichungen von mäfsigem Betrage im Gange der photochemischen Wirkung für die verschiedenen Wellenlängen zeigen. Ähnliche Abänderungen durch Zumischung anderer Substanzen, Substitutionen analoger Atomgruppen u. s. w. kommen ja auch bei anderen photochemisch veränderlichen Substanzen vor, wie sie in der Photographie gebraucht werden, z. B. bei den verschiedenen Haloidsalzen des Silbers.

Vergleich mit dichromatischen Augen.

Die hier gefundenen Grundfarben stimmen nicht mit denen überein, welche die Hrn. A. KÖNIG und C. DIETERICI aus der Vergleichung farbenblinder Augen mit normalsichtigen hergeleitet haben. Indessen liegt in den Thatsachen hierbei kein nothwendiger Widerspruch. Nur die besondere, von TH. YOUNG ausgegangene und von den meisten Bearbeitern der Theorie, auch von mir selbst, von E. HERING, A. KÖNIG, und C. DIETERICI früher angenommene Erklärungsweise, daß bei den Dichromaten einfach eine der Grunderregungen des trichromatischen Auges nicht zu Stande komme, tritt in Widerspruch mit dem bezeichneten Ergebnifs. Aber es ist eine allgemeinere Hypothese über das Wesen der Dichromasie möglich, bei welcher die Nothwendigkeit aufhört, daß die fehlende Farbe eine der Grundfarben sei, und doch die Regel festgehalten wird, daß alle Farbenpaare, welche für das normale trichromatische Auge gleich aussehen, auch für das dichromatische gleich aussehend bleiben.

Um dies durch ein einfaches Beispiel anschaulich zu machen, nehme man an, daß die Lichteinwirkungen, welche sonst die Empfindung Grün erregen, die grünempfindenden Nerven nicht, wohl aber die roth- und blauempfindenden in bestimmtem festen Verhältnifs erregen. Alle Empfindungen eines solchen Auges würden aus Roth und Blau gemischt erscheinen; es wäre dichromatisch. Aber die Farben, welche auf der Farbenscheibe in denjenigen Geraden liegen, die durch den Ort der grünen Grundempfindung gezogen werden, werden im Allgemeinen nicht gleich erscheinen, wie es unter der älteren Annahme der Fall sein würde, wo einfach Ausfall der grünen Erregung angenommen wurde. Denn statt der wechselnden Menge des Grün im trichromatischen Auge würde hier eine wechselnde Menge einer bestimmten Purpurfarbe zu dem schon vorhandenen, verschieden gemischten Purpur hinzukommen und diesen in der Mehrzahl der Fälle verändern. In diesem Falle würde in der That der Schnittpunkt derjenigen Linien des dichromatischen Feldes, welche dichromatisch gleich erscheinende Farben enthalten, außerhalb des Farbendreiecks jenseits der grünen Ecke desselben liegen müssen.

Dies Verhältnifs bliebe ungeändert, wenn wir hierzu noch weiter annehmen wollten, daß jede Erregung des Roth, auch die eben neu angenommene, in bestimmtem Verhältnifs auch die grünempfindenden Nerventheile erregte, und also eine bestimmte Art Gelb zur Empfindung brächte, und jede Erregung des Blau ebenso eine bestimmte Art Grünblau. Dann wären sämtliche Empfindungen eines solchen Auges aus Gelb und Grünblau zu mischen, während der Schnittpunkt der dichromatischen Linien gleichen Aussehens dadurch nicht geändert würde.

Allgemeinere Form der Dichromasie.

Bezeichnen wir, wie bisher, mit x, y, z die Farbenwerthe der verschiedenen Lichter für das trichromatische Auge und damit zugleich das Maafs für die ihnen entsprechenden physiologischen Prozesse im Sehnervenapparat, welche neben einander

bestehen und sich addiren bei der Erzeugung der Farbenempfindung. Dagegen wollen wir mit ξ , η , ζ die entsprechenden physiologischen Prozesse im dichromatischen Auge bezeichnen.

Die erste Regel, die sich aus den Beobachtungen ergeben hat, ist die, daß farbige Lichter, die den normalen Trichromaten gleich erscheinen, es auch für die Dichromaten thun. Also wenn x , y und z gleichen Werth für zwei aus verschiedenen Spectralfarben gemischte Lichter haben, haben für beide auch ξ , η und ζ gleiche Werthe, d. h. die letzteren Größen sind Functionen von x , y , z , und nur von diesen.

Die zweite Regel ist die, daß NEWTONS Mischungsgesetz auch für die Farben des dichromatischen Systems anwendbar ist, was zu einer Gleichung von der Form führt

$$\xi_{(x+y)} = \xi_{(x)} + \xi_{(y)},$$

woraus folgt, daß die ξ , η , ζ nur lineare Functionen von x , y , z sein können, und zwar homogene lineare, da $\xi = \eta = \zeta = 0$ sein muß, wenn $x = y = z = 0$. Da aber ξ , η , ζ nur zwei Variable vertreten sollen, so wird zwischen ihren Werthen eine Gleichung stattfinden müssen, die wiederum nur eine lineare sein kann. Wir kommen also zu drei Gleichungen folgender Form:

$$0 = \alpha\xi + \beta\eta + \gamma\zeta \dots\dots\dots \} 10$$

$$\xi = p_1x + p_2y + p_3z \dots\dots\dots \} 10a$$

$$\eta = q_1x + q_2y + q_3z \dots\dots\dots \}$$

Die Coefficienten p und q dieser letzteren Gleichungen müssen positiv sein, da ξ und η für alle positive Werthe von x , y und z positiv sein müssen. Dagegen muß einer der Coefficienten der Gleichung 10 nothwendig das entgegengesetzte Vorzeichen von den beiden anderen haben, da ξ , η , ζ in TH. YOUNGS Theorie nothwendig positive Größen für alle physiologisch möglichen Farbenempfindungen sein müssen.

Es sei γ dieser Coefficient mit abweichendem Zeichen. Schreiben wir

$$-\frac{\alpha}{\gamma} = a \text{ und } -\frac{\beta}{\gamma} = b,$$

wo also a und b positiv sind, so ergibt Gleichung 10

$$\zeta = a\xi + b\eta \dots\dots\dots \} 10b$$

Setzen wir weiter

$$\begin{aligned} \zeta_1 &= a\xi \text{ und } \zeta_2 = b\eta \\ \zeta &= \zeta_1 + \zeta_2, \end{aligned}$$

so können wir die Empfindung ξ mit der ihr proportionalen $\zeta_1 = a\xi$ zusammenfassen in die Empfindung einer Mischfarbe von bestimmter Zusammensetzung ζ_1 und ξ , und ebenso $\zeta_2 = b\eta$ mit η . Der ganze vorhandene Farbenwerth des dichromatischen Auges erscheint dann als Mischung in veränderlichem Verhältniß von

diesen beiden bestimmt zusammengesetzten Farben. Dadurch wäre dann auch das Aussehen der dichromatischen Farben bestimmt.

Um die besprochenen Verhältnisse in einer analytisch geometrischen Darstellung des Farbensystems anschaulich zu machen, verfahren wir am einfachsten,¹ wenn wir die Werthe der Grundfarben des trichromatischen Systems x, y, z als rechtwinklige Coordinaten eines die betreffende Farbe enthaltenden Punctes gebrauchen. Nach YOUNGS Hypothese, welche nur positive Werthe der physiologisch möglichen Farbewerthe zulässt, ist dann das System aller Farben in der rechtwinkligen positiven Ecke dieses Coordinatensystems angeordnet. Als Farbentafel kann jede Ebene gelten, die die drei positiven Coordinataxen schneidet, z. B. die Ebene

$$x + y + z = \text{Const.} \dots\dots\dots \} 10c,$$

in der das Farbendreieck ein gleichseitiges wird.

Unter diesen Annahmen würde die Gleichung

$$\xi = p_1 \cdot x + p_2 \cdot y + p_3 \cdot z = 0 \dots\dots\dots \} 11$$

eine Ebene darstellen, die durch den Anfangspunct der Coordinaten (die Spitze der Farbenecke) geht, aber ganz auferhalb der positiven Ecke liegt, da bei den vorausgesetzten positiven Werthen der Coefficienten p nothwendig eine oder zwei der Coordinaten negative Werthe haben müssen, um das Trinom zu Null zu machen.

Dasselbe würde gelten für die andere Gleichung

$$\eta = q_1 \cdot x + q_2 \cdot y + q_3 \cdot z = 0 \dots\dots\dots \} 11a.$$

Sollen die beiden Gleichungen gleichzeitig gelten, so würde dadurch die Schnittlinie der beiden Ebenen, beziehlich wenn wir die Gleichung der Farbentafel (10c) hinzunehmen, der Punct, wo die Schnittlinie die Farbentafel schneidet, gegeben sein.

Setzen wir dagegen die Gleichung

$$B \cdot \xi = A \cdot \eta \dots\dots\dots \} 11b$$

oder

$$(Bp_1 - Aq_1) \cdot x + (Bp_2 - Aq_2) \cdot y + (Bp_3 - Aq_3) \cdot z = 0 \dots \} 11c,$$

so ist dies wieder Gleichung einer Ebene, und zwar einer solchen, welche die beiden früher genannten $\xi = 0$ und $\eta = 0$ in derselben Schnittlinie schneidet, da diese beiden letzteren Gleichungen zusammen auch 11b erfüllen.

Die Gleichung 11b können wir aber auch schreiben

$$\xi : \eta = A : B$$

und mit Hülfe von Gleichung 5 ergibt sich dann für die Puncte der Ebene 10b weiter

$$\begin{aligned} \zeta \\ \xi \end{aligned} &= a + \frac{b \cdot B}{A} \\ \frac{\xi}{\eta} &= b + \frac{A}{B}, \end{aligned}$$

¹ S. oben, S. 336—338.

d. h., die drei Farbenempfindungen haben in jeder Ebene von der Form 10b constanten Verhältniß zu einander. Die ganze Ebene ist gleichfarbig, und alle in einem dichromatischen Farbensystem gleichfarbigen Ebenen gehen durch eine gemeinsame Schnittlinie, die aber nothwendig auferhalb oder an der Grenze der positiven Farbenecke liegt. In der nach NEWTON construirten Farbentafel schneiden sich alle gleichfarbigen Linien eines dichromatischen Systems in einem Punkte auferhalb oder an der Grenze des trichromatischen Farbendreiecks.

Zu bemerken ist, daß in diesem Punkte auch $\zeta = 0$ werden, also jede Lichtempfindung fehlen würde, was aber thatsächlich nur dann in Betracht kommt, wenn der Punct an der Grenze oder in einer Ecke des Farbengebietes liegt. Letzteres würde der älteren Annahme über die Natur der Dichromasie entsprechen.

In unseren Betrachtungen ist keinerlei Beschränkung für die Lage des Schnittpunctes gegeben. Daher fällt bei dieser Verallgemeinerung der Theorie der Dichromasie auch die Trennung in zwei scharf getrennte Klassen Grünblinde und Rothblinde weg, welche ja auch den Beobachtungen gegenüber nicht ganz gesichert erscheint.

Damit ist auch nachgewiesen, daß der Mangel an Ubereinstimmung zwischen der fehlenden Farbe der dichromatischen Systeme und je einer der von uns gefundenen Grundfarben keinen unlöslichen Widerspruch einschließt.

Die Messungen der Hrn. KÖNIG und DIETERICI haben für zwei Klassen von Dichromaten die fehlenden Farben auf die von ihnen gewählten Elementarfarben R , G , V zurückgeführt.

Diejenige Grundfarbe, welche normale Trichromaten mehr haben, als Rothblinde, ist von den beiden Autoren bezeichnet als:

$$\mathfrak{R} = \frac{20 R - 3 G + 2 V}{19}.$$

dagegen die andere, welche normale Trichromaten mehr haben, als Grünblinde, als

$$\mathfrak{G} = \frac{1}{5} R + \frac{4}{5} G,$$

Wenn wir die oben gefundenen Gleichungen (9a), in denen die Werthe von x , y , z durch R , G , V ausgedrückt waren, benutzen, um die letzteren Größen durch x , y , z auszudrücken, erhalten wir:

$$\begin{aligned} R &= 1,328 \cdot x + 2,278 \cdot y - 2,611 \cdot z \\ G &= -0,5122 \cdot x + 2,8294 \cdot y - 1,3249 \cdot z \\ V &= -0,4288 \cdot x - 1,4771 \cdot y + 2,9094 \cdot z. \end{aligned}$$

Ferner die beiden fehlenden Farben

$$\begin{aligned} \mathfrak{R} &= 1,434 \cdot x + 1,797 \cdot y - 2,132 \cdot z \\ \mathfrak{G} &= -0,1442 \cdot x + 2,715 \cdot y - 1,483 \cdot z. \end{aligned}$$

Da negative Coefficienten anzeigen, daß die definirten Farben auferhalb des Farbendreiecks liegen, so ergiebt sich dies hiermit thatsächlich für die fehlenden

Farben beider Klassen von Dichromaten. Die fehlende Farbe der Grünblinden würde zwischen den verlängerten Seiten des Farbendreiecks liegen, die sich im Grün schneiden, näher dem vom Roth kommenden Schenkel, die der Rothblinden außerhalb der Roth-Grün-Linie, deren Mitte etwa gegenüber, aber ziemlich entfernt.

Vergleichung der Empfindlichkeit für Helligkeitsunterschiede mit der für Farbenunterschiede.

Der kleinste erkennbare Bruchtheil für Helligkeitsunterschiede bei weißer Beleuchtung in den Beobachtungen von Hrn. A. KÖNIG unter ähnlichen äußeren Einrichtungen, ähnlicher Größe des Gesichtsfeldes u. s. w., wie bei den Farbenvergleichen betrug 0,0173. Die Gleichung (8) ergibt alsdann

$$dE_h = k \cdot 0,0173 \cdot \sqrt{3}$$

Der Werth von k muß, wie oben bemerkt, bei den Farbenvergleichungsversuchen, in denen die Rechnung vom mittleren Fehler ausgeht, 1,8238 mal so groß genommen werden, als bei den Helligkeitsvergleichen, bei denen noch eben sichtbare Unterschiede gesucht sind. Wir erhalten daher aus den letzteren, wenn wir den Werth von dE hier auf dasselbe Maass zurückführen wollen, wie es in der obigen Tafel II (S. 455) gebraucht ist.

$$dE = \frac{0,0173}{1,8238} \cdot \sqrt{3} = 0,01643,$$

während der aus den Werthen der Tafel II gefundene Mittelwerth ist

$$dE = 0,0176.$$

Diese Übereinstimmung kann unter den gegebenen Umständen wohl als über Erwarten gut bezeichnet werden. Sie entspricht der Voraussetzung, von der wir hier ausgegangen sind, daß die Wahrnehmung der Farbenunterschiede ursprünglich auf der Wahrnehmung von Helligkeitsunterschieden beruht.

Eine weitere Prüfung des hier aufgestellten Gesetzes wird wohl besser durch directe Mischung je zweier Spectralfarben in verschiedenem Verhältnisse auszuführen sein, bei denen das Mischungsverhältniß unmittelbar am Apparat abgelesen werden kann, und bei denen auch mannigfachere Vergleichen herzustellen sind, als sie zwischen unmittelbar benachbarten Spectralfarben eintreten.

Die Rechnung für das dichromatische Auge hatte ich schon vor der für das trichromatische durchgeführt, aber unter der älteren einfacheren Annahme, daß eine Grundempfindung ganz fehlt. Die Rechnung stimmte mit den Beobachtungen etwa ebensogut oder schlecht, wie für das trichromatische Auge. Führt man die eben gegebene allgemeinere Auffassung der Dichromasie ein, so läßt die Umformung der Formel schon übersehen, daß dabei noch eine neue Constante eintritt, über die frei zu verfügen ist, und man wird mit deren Hülfe also jedenfalls eine bessere Übereinstimmung mit der Formel herstellen können, als mit der kleineren Zahl von Constanten. Die mühsame Rechnung in diesem noch ziemlich provisorischen Zustande unserer Kenntnisse des Gegenstandes durchzuführen, schien mir überflüssig.

Kürzeste Farbenlinien. Die oben für den allgemeineren Werth von dE gegebene Formel Gl (4) macht es möglich, diejenigen Reihen von Farben zwischen zwei gegebenen Endfarben zu bestimmen, längs deren man die kleinste Summe wahrnehmbarer Unterschiede durchläuft, welche Reihen also den kürzesten Linien im Farbensystem entsprechen würden. Ich werde mir erlauben, für sie den Namen der kürzesten Farbenreihen zu brauchen.

Da eine vollständig genaue Formel für die kleinsten wahrnehmbaren Helligkeitsunterschiede, wie sie annähernd FECHNERS Gesetz giebt, noch nicht gefunden ist, will ich mich auf den Gebrauch der von FECHNER selbst noch gegebenen späteren Formel beschränken, wonach die Deutlichkeit des Unterschiedes von dem Bruche $\frac{dJ}{A + J}$ abhängt, wenn J und $(J + dJ)$ die beiden zu vergleichenden objectiven Lichtmengen sind, A eine von der Qualität des Lichts abhängige Constante. Diese Formel entspricht, wie wir gesehen, den Beobachtungen in einem außerordentlich ausgedehnten Theil der Scala der Helligkeiten. Für sehr kleine und sehr grose Helligkeiten ist die Deutlichkeit aber etwas kleiner, als nach der Formel zu erwarten wäre.

Die von mir als wahrscheinliche Hypothese aufgestellte Formel für die Deutlichkeit des Unterschiedes zweier Farben, von denen die eine aus den Quantis der Urfarben x, y, z zusammengesetzt ist, die andere dagegen aus $(x + dx), (y + dy), (z + dz)$ lautet

$$dE^2 = \left(\frac{dx}{a + x} \right)^2 + \left(\frac{dy}{b + y} \right)^2 + \left(\frac{dz}{c + z} \right)^2 \dots \dots \dots \} 12.$$

Hierbei ist aber zu bemerken, dafs die x, y, z den physiologischen Urfarben entsprechen müssen, und nicht, wie im Mischungsgesetz, durch lineare Functionen derselben ersetzt werden können.

Wenn man in Gleichung (1) andere Variabeln einführt, und setzt:

$$\left. \begin{aligned} \log(a + x) &= \xi \dots \dots \dots \\ \log(b + y) &= \eta \dots \dots \dots \\ \log(c + z) &= \zeta \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} 12a,$$

so kann man die Gleichung (1) auch schreiben:

$$dE^2 = d\xi^2 + d\eta^2 + d\zeta^2.$$

Construirt man also eine Farbenecke, in der man nicht mehr x, y, z , sondern ξ, η, ζ als Coordinaten braucht, so wäre das dE direct proportional dem Linienelement zwischen den beiden durch ξ, η, ζ und $(\xi + d\xi), (\eta + d\eta), (\zeta + d\zeta)$ gegebenen Punkten. In diesem letzteren Coordinatensystem würden sämmtliche kürzeste Farbenreihen durch gerade Linien dargestellt werden müssen, die aber beim Übergang in das ursprüngliche Coordinatensystem der x, y, z im Allgemeinen gekrümmt werden würden.

Wenn wir den einen Endpunct der Farbenreihe mit dem Index (1) bezeichnen, den anderen mit (2), so würde man die Gleichung einer geraden Linie im Coordinatensystem der ξ, η, ζ auf die Form bringen können:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\xi - \xi_1}{\xi_2 - \xi_1} = \frac{\eta - \eta_1}{\eta_2 - \eta_1} = \frac{\zeta - \zeta_1}{\zeta_2 - \zeta_1} \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} 12b.$$

Um die Gleichung dieser Linie in den x, y, z ausdrücken zu können, setzen wir zunächst zur kürzeren Bezeichnung:

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \log \cdot \left[\frac{a + x_2}{a + x_1} \right] = \xi_2 - \xi_1 \dots \dots \dots \\ \mu &= \log \cdot \left[\frac{b + y_2}{b + y_1} \right] = \eta_2 - \eta_1 \dots \dots \dots \\ \nu &= \log \cdot \left[\frac{c + z_2}{c + z_1} \right] = \zeta_2 - \zeta_1 \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} 12c.$$

Dann werden die Gleichungen (12b):

$$\left. \left(\frac{a + x}{a + x_1} \right)^\lambda = \left(\frac{b + y}{b + y_1} \right)^\mu = \left(\frac{c + z}{c + z_1} \right)^\nu \dots \dots \dots \right\} 12d.$$

Wenn von den sechs Größen, die in den Gleichungen 12c unter dem Logarithmenzeichen vorkommen, nicht je zwei im Nenner, oder je zwei im Zähler gleich Null werden, haben die Größen λ, μ, ν endliche reelle, positive oder negative Werthe, und die Punkte der Linie sind eindeutig bestimmt, da ihre Coordinaten nur positiv reell sein können. Da nun a, b, c (Farbencomponenten des Eigenlichts im Sinne von FECHNERS Auffassung) nur positive Werthe haben können, und x, y, z für reelle Farben ebenfalls, so kommt also für reelle Farben die oben bemerkte Ausnahme niemals vor, und zwischen jedem Paare von Punkten des reellen Farbengebiets giebt es also nur eine kürzeste Farbenlinie.

Da indessen die Punkte, in denen zwei von den Größen $(a + x), (b + y)$ und $(c + z)$ gleich Null werden, eine besondere Rolle bei den Constructionen spielen, mache ich hier darauf aufmerksam, daß alle drei Größen, gleich Null gesetzt, den Nullpunct allen Lichtes, Eigenlicht und objectives Licht zusammengenommen, bezeichnen; wir wollen diesen Punct deshalb im Folgenden mit (0) bezeichnen. Wenn nur zwei der genannten Größen gleich Null sind, sind dadurch die Parallelen zu den Coordinataxen gegeben, welche durch den Punct (0) gehen. Wenn von einem Punkte dieser Linien aus kürzeste Farbenreihen nach einem anderen festen Punkte zu construiren sind, so sind diese durch ihre Endpunkte nicht vollständig gegeben, sondern können in unendlicher Anzahl construirt werden.

Ebene Curven. Eben werden Curven, für welche einer der Exponenten λ, μ oder ν gleich Null ist, oder zwei derselben einander gleich.

Im ersteren Falle erhalten die drei Größen, welche in (12d) einander gleichgesetzt sind, alle den Werth 1, was, wenn $\lambda = 0$, folgern läßt

$$\begin{aligned} b + y &= b + y_1 \\ c + z &= c + z_1, \end{aligned}$$

d. h. die betreffenden kürzesten Farbenreihen liegen auf geraden Linien der x -Axe parallel.

Die Annahme $\mu = 0$ giebt eben solche Gerade der y -Axe parallel, und $\nu = 0$ der z -Axe parallel. Dieselben können übrigens durch jeden Punkt der Farbenpyramide gezogen werden.

Im zweiten Falle, wo zwei Exponenten einander gleich, erhalten wir entweder

$$\left. \begin{array}{l} \text{oder} \\ \\ \text{oder} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{a + x_1}{a + x_2} = \frac{b + y_1}{b + y_2} \dots\dots\dots \\ \\ \frac{b + y_1}{b + y_2} = \frac{c + z_1}{c + z_2} \dots\dots\dots \\ \\ \frac{c + z_1}{c + z_2} = \frac{a + x_1}{a + x_2} \dots\dots\dots \end{array} \quad \left. \vphantom{\frac{a + x_1}{a + x_2}} \right\} 12e.$$

Bezeichnen wir wieder den Punkt, dessen Coordinaten $(-a)$, $(-b)$, $(-c)$ sind, d. h. in welchen alle Lichtempfindung fehlt, auch die des Eigenlichts, mit dem Index 0, den Punkt $x = y = z = 0$, wo nur die Empfindung des Eigenlichts da ist, mit ε , so sagt die erste unserer Gleichungen aus, daß die Punkte 0, 1, 2, projectirt auf die xy -Ebene in gerader Linie liegen. Die Curve liegt also in einer Ebene, die der z -Axe parallel ist, und durch den Punkt 0, sowie die beiden Endpunkte der Curve geht.

Die zweite der Gleichungen 12e würde sich auf eine Ebene beziehen, die der x -Axe parallel durch den Punkt 0 geht, die dritte auf eine Ebene, die der y -Axe parallel durch denselben Punkt geht.

Je zwei dieser Ebenen schneiden sich in geraden Linien, die dann nothwendig hinreichend verlängert durch den Punkt 0 gehen, und kürzesten Farbenreihen entsprechen.

Dagegen werden Linien, welche gleicher Qualität des objectiven Lichts entsprechen, verlängert durch den Punkt ε gehen, wo $x = y = z = 0$. Nur eine von diesen, die gleichzeitig durch ε und 0 geht, wird einer kürzesten Farbenreihe entsprechen.

Nun liegt es im Wesen einer kürzesten Farbenreihe, daß unter solchen Farben, die von der einen Endfarbe gleich großen Unterschied zeigen, die in der kürzesten Farbenreihe liegenden auch der anderen Endfarbe ähnlicher als alle anderen benachbarten Farben erscheinen werden.

Fällt die Reihe der Farben gleicher Mischung mit der kürzesten Reihe zusammen, so werden ihre Glieder auch beim Übergang von schwacher zu hoher Lichtstärke keine Abweichung des Farbentons zeigen. Wohl aber wird dies der Fall sein, wenn die erstere Reihe keine kürzeste ist. Denn dann würde es Farben geben von anderer Mischung, durch welche man einen kürzeren Übergang von den dunkelsten zu den hellsten Tönen gleicher objectiver Qualität bahnen könnte.

Nun kommen in der That solche Unterschiede vor. Ich habe schon in meinen älteren Arbeiten¹ über Spectralfarben erwähnt, daß sie bei steigender

¹ S. oben S. 284, 285 und H. HELMHOLTZ, Über Herrn D. BREWSTER'S neue Analyse des Sonnenlichts. *Poggd. Ann.* Bd. 86. S. 520. 1852.

Helligkeit alle dem Weifs, beziehlich Gelbweifs ähnlicher werden. Am schnellsten geht bei steigender Lichtstärke Grün in Gelb, Violett in Weifsblau über. Höhere Helligkeiten sind nöthig, um spectrales Roth in Gelb und Blau in Weifs überzuführen. Es giebt nur eine Farbe, nämlich Gelbweifs, welche bei allen Intensitäten merklich unverändert bleibt. Wir würden daraus zu schliessen haben, dafs Gelbweifs dem Farbenton der geraden Linie entspricht, die durch die Punkte (0) und (ε) unseres Coordinatensystems geht. Wir wollen diese für unser hier vorliegendes Thema als die Principalinie des Farbensystems bezeichnen. Im Sinne von FECHNERS Hypothese wäre sie die Farbe des Eigenlichts der Netzhaut.

Nehmen wir dagegen eine andere Farbe, z. B. Grün, welches bei Steigerung der Intensität und unveränderter Mischung gelb wird. Offenbar müßten wir ein gesättigteres Grün höherer Helligkeit herzustellen versuchen, um unsere Farbenreihe mit dem dem unteren Ende ähnlichsten Farbentone abzuschliessen, d. h. wir müßten zu einer anderen Farbenmischung übergehen, um in einer Reihe möglichst wenig unterschiedener Farbtöne zu bleiben.

Gekrümmte Projectionslinien. Wenn wir von den drei in Gleichung (2c) einander gleichgesetzten Gröfsen zwei, die nicht gleiche Exponenten haben, einander gleichsetzen, so sind die Curven verschieden, je nach dem die beiden Exponenten gleiches oder ungleiches Vorzeichen haben.

A. Curven durch den Punct 0.

Im ersteren Falle, wenn z. B. die beiden Exponenten λ und μ gleiches Zeichen haben, würde $\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)$ positiv sein, und die Curve

$$\frac{a+x}{a+x_1} = \left(\frac{b+y}{b+y_1}\right)^{\frac{\mu}{\lambda}}$$

würde durch den Punct 0 gehen, da dort $a+x=b+y=0$ ist. Ist dabei $\frac{\mu}{\lambda} > 1$, so würde $(a+x)$ schneller steigen, als $(b+y)$ die Curve ihre convexe Seite der Linie $b+y=0$ zukehren.

Umgekehrt ist $\frac{\mu}{\lambda} < 1$, so würde die Curve ihre convexe Seite der Linie $a+x=0$ zukehren.

Wenn wir die Punkte (1) und (2) sehr nahe an einander liegend wählen, und ihre Abstände als kleine Gröfsen behandeln

$$\begin{aligned} x_2 - x_1 &= dx \\ y_2 - y_1 &= dy \\ z_2 - z_1 &= dz, \end{aligned}$$

so wird

$$\lambda = - \frac{dx}{a + x_1}$$

$$\mu = - \frac{dy}{b + y_1}$$

$$v = - \frac{dz}{c + z_1};$$

schreiben wir dann

$$\frac{dx}{dy} = \operatorname{tg} \varphi$$

$$\frac{a + x_1}{b + y_1} = \operatorname{tg} f,$$

so wird

$$\frac{\lambda}{\mu} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} f}.$$

Daraus ergibt sich, daß $\frac{\lambda}{\mu} > 1$, wenn $\operatorname{tg} \varphi > \operatorname{tg} f$ oder $\varphi > f$, d. h. wenn im Punkte 1 die Tangente der Curve einen größeren Winkel mit der positiven y -Axe macht, als die Gerade (0,1). Umgekehrt, wenn $\frac{\mu}{\lambda} > 1$. Der entferntere Theil aller dieser Curven $(1, \infty)$ ist convex, das Stück $(0,1)$ derselben dagegen concav gegen die Gerade (0,1).

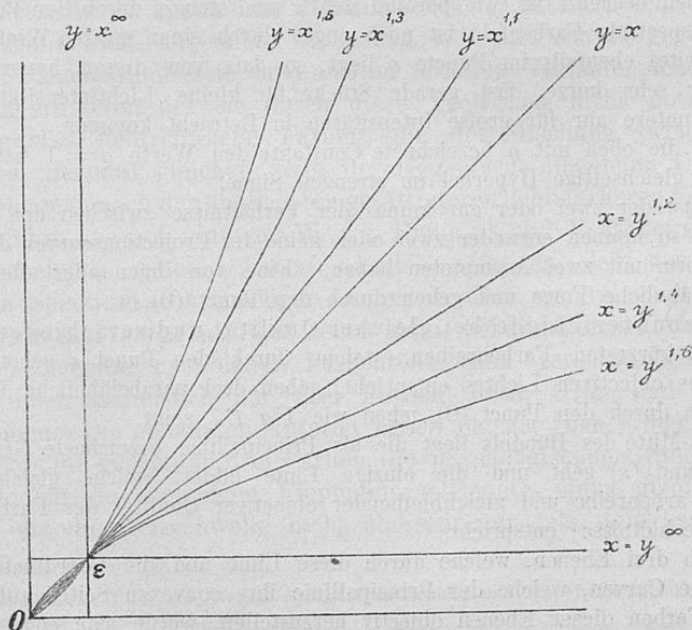


Fig. 177.

Die Grenzen dieses Büschels von Curven sind die, wo $\frac{\mu}{\lambda} = 0$ oder $= \infty$. Es sind dies die schon oben erwähnten geraden Linien, gezogen durch den Punct 1, parallel den Axen der x und der y .

Die *Fig. 177* stellt ein Bündel solcher Curven dar, welche alle durch denselben Punct ε gehen und verschiedene Exponenten haben, deren Werthe (1 bis 1,6) am Rande angegeben sind.

B. Projections-Curven mit zwei Asymptoten.

Wenn die beiden Exponenten der Gleichung entgegengesetztes Zeichen haben, so können wir setzen

$$\frac{\mu}{\lambda} = -\rho.$$

Dann ist ρ eine positive GröÙe, und es wird

$$\frac{a+x}{a+x_1} = \left(\frac{b+y}{b+y_1} \right)^{-\rho}.$$

Also wird für $a+x=0$ das $b+y=\infty$, und für $a+x=\infty$ das $b+y=0$, d. h. die durch den Punct 0 den Coordinataxen parallel gezogenen Linien sind Asymptoten für die Curve, welche hyperbelähnlich mit zwei Enden in das Unendliche läuft. Aber diese in ∞ auslaufenden Enden der Curven liegen außerhalb des Farbenfeldes, selbst außerhalb des physiologisch möglichen, da dieses durch zwei gerade Linien begrenzt ist, die parallel den x und den y durch den Punct ε gelegt sind. Das spectrale Farbenfeld ist noch enger durch einen spitzen Winkel begrenzt, dessen Scheitel ebenfalls im Puncte ε liegt, so dafs von diesen hyperbelähnlichen Curven nur sehr kurze, fast gerade Stücke für kleine Lichtintensitäten, längere und gekrümmtere nur für groÙe Intensitäten in Betracht kommen.

Wenn die oben mit ρ bezeichnete Constante den Werth $\rho=1$ hat, so ist die Curve eine gleichseitige Hyperbel im strengen Sinne.

Da entweder zwei oder gar keines der Verhältnisse zwischen den Exponenten negativ ist, so können entweder zwei oder keine der Projectionscurven die hyperbelähnliche Form mit zwei Asymptoten haben. Eine von ihnen oder alle drei haben die parabelähnliche Form und gehen durch den Punct (0).

Farbenunterschiede bei gleicher Qualität und verschiedener Helligkeit. Die kürzesten Farbenreihen, welche durch den Punct ε gehen, der dem Mangel alles objectiven Lichtes entspricht, geben drei parabelähnliche Projectionen, welche auch durch den Punct (0) gehen wie *Fig. 177* zeigt.

In der Mitte des Bündels liegt die als Principallinie bezeichnete Gerade, welche durch (0) und (ε) geht und die einzige Linie bildet, welche gleichzeitig einer kürzesten Farbenreihe und gleichbleibender objectiver Qualität der Farbe (gleichem Mischungsverhältnisse) entspricht.

In den drei Ebenen, welche durch diese Linie und die Coordinataxen gehen, liegen ebene Curven, welche der Principallinie ihre convexen Seiten zukehren.

Um Farben dieser Ebenen objectiv herzustellen, würde man entweder einzelne Urfarben mit der Principalfarbe zu mischen haben, oder solche Farben, die, mit

der entsprechenden Urfarbe gemischt, die Principalfarbe geben. Ich will die letzteren principale Gegenfarben nennen. Sind Carminroth, Ultramarinblau und Blattgrün im Farbenton den Urfarben entsprechend, und Gelbweiß die Principalfarbe, so wären etwa Spangrün, Gelb und Purpur die principalen Gegenfarben. Von sämtlichen Mischungen aller sechs Farben mit dem principalen Gelbweiß würde zu erwarten sein, daß sie alle innerhalb der Reihe der Farbentöne bleiben, welche die entsprechenden Mischungen hervorbringen können, und nur das Verhältniß würde geändert erscheinen, indem die lichtschwachen Farben dieser Art gesättigter erscheinen würden, als die gleich zusammengesetzten lichtstarken, da die lichtstarken, die in derselben Farbencurve liegen, in der That sich dem Umfange der Farbenspyramide nähern, wo die gesättigteren Farben liegen.

So werden also lichtschwaches Ultramarin und Gelb bei gleicher Qualität und hoher Intensität als ein weißlicheres Blau und Gelb erscheinen müssen. Die Zumischung von Weiß zum Blau wird relativ stärker sein, als die zum Gelb, weil der gelbe Bestandtheil der Principalfarbe etwas Blau wegnimmt und dafür noch etwas Weiß bildet, dem Gelb aber sich einfach hinzufügt.

Dagegen werden schwaches Urroth bis Purpur einerseits und Blattgrün bis Spangrün andererseits ihre entsprechenden lichtstarken Farben in etwas weißlicheren und gelblicheren Mischungen finden.

Dieses Gelblichwerden der rothen und grünen Farbentöne bei hoher Lichtstärke, das Weißwerden des Blau sind schon oben erwähnt.

Verschwinden der Zwischenfarben bei geringer Helligkeit. Die Spectralfarben sind im Allgemeinen einer Urfarbe oder Mischungen aus je zweien solchen sehr nahe in ihrem Farbentone. Wenn man die letzteren auf die Ebene der beiden Urfarben projecirt denkt, so werden kürzeste Farbenreihen, die in bestimmter Richtung vom Punkte (ϵ), dem Punkte der objectiven Dunkelheit, auslaufen, wie in *Fig. 177*, alle convex gegen die Projection der Principallinie sein, und also im ferneren Verlaufe sich derjenigen Urfarbe nähern, von der sie durch diese Projection nicht getrennt sind. Es werden also lichtschwache Farben, die der Mischung zweier Urfarben entsprechen, der auf gleicher Seite der Gegenfarbe liegenden Urfarbe sich nähern, wenn man nach den ähnlichsten gesättigteren lichtstärkeren Farben sucht.

Dies führt uns auf eine von W. VON BEZOLD¹ und E. BRÜCKE² beschriebene Erscheinung. Beide haben nämlich gefunden, daß aus einem gut gereinigten Spectrum von mäfsiger Länge, in dem man aber die stärkeren FRAUNHOFERSchen Linien noch gut sehen kann, bei allmählicher Abschwächung die gelben und die cyanblauen Farbentöne ganz verschwinden, und daß zwischen ihnen schließlicly nur drei Farben, Roth, Grün und Violettblau, stehen bleiben. Die genannten Autoren haben damals auch schon den Schluß gezogen, daß die genannten drei Farben die physiologischen Grundfarben sein müssen, indem sie diejenigen Empfindungselemente einer gemischten Empfindung, die die Reizschwelle nicht überschreiten, als unwirksam auch in

¹ W. V. BEZOLD, Über das Gesetz der Farbenmischung und die physiologischen Grundfarben. *Poggd. Ann.* Bd. 150. S. 237—239. 1873.

² E. BRÜCKE, Über einige Empfindungen im Gebiete des Sehnerven. *Wiener Sitzungsbericht.* Abth. III. Bd. LXXVII. 1878. Febr. 28.

der gemischten Empfindung betrachten. Es ist dies eine Betrachtungsweise, die der hier eingeschlagenen wesentlich verwandt ist.

Mischungen mit Weifs. Ähnliche Abweichungen, wie die bisher besprochenen, zwischen dem Farbentone einer lichtschwachen und lichtstarken Farbe von gleicher objectiver Qualität kommen auch zwischen denen einer isolirten gesättigten Farbe und deren Mischung mit sehr vielem Weifs vor.¹

Wenn Weifs und eine Mischung dieses Weifs mit einer kleinen Menge einer Spectralfarbe als gegeben nach ihrem Orte in der Farbenpyramide angesehen werden, so läßt sich die kürzeste Farbenreihe, die durch die beiden Punkte führt, construiren. Diese wird gegen einen Theil der Oberfläche der Farbenpyramide hin gerichtet sein, an der die gesättigten Farben derselben Reihe liegen, als deren stark mit Weifs verdünnte Modification die gegebene Mischung erscheint.

Dabei ist zu bemerken, dafs, wenn man zu dem Weifs reine Urfarben hinzumischen könnte, die Verbindungslinie beider eine der entsprechenden Coordinataxe parallele Gerade werden würde, welche selbst eine kürzeste Farbenreihe ist und ihre Richtung nicht ändert. Die kürzeste Farbenreihe würde also mit der Mischungsreihe zusammenfallen und keinerlei Farbenänderung entstehen.

Da aber die Spectralfarben als zusammengesetzte Farben anzusehen sind, in denen nur eine oder zwei der Urfarben erhebliches Übergewicht haben, so werden dadurch Krümmungen der kürzesten Farbenreihen möglich.

Um die Form der betreffenden Farbenreihe vollständig übersehen zu können, wird man sich im Allgemeinen je zwei Projectionen auf Grenzflächen der Farbenpyramide entwerfen müssen.

Das Curvenbündel der *Fig. 177* würde auch bei etwas abgeänderten Verhältnissen seinen Charakter behalten. Deuten wir es jetzt so, dafs wir den Punct ε als die Projection des Weifs auf eine der Coordinatebenen betrachten; εx sei die Coordinatrichtung für die eine Grundfarbe, die zum Weifs hinzugethan werden kann, εy für die andere. Beide Linien entsprechen kürzesten Farbenreihen. Dann wird noch die mit $y = x$ bezeichnete Gerade sehr nahehin wenigstens eine kürzeste Farbenlinie sein. Die Gleichung der letzteren, die in diese Richtung fällt, würde allerdings, streng genommen, nicht $x = y$, sondern $a + x = b + y$ sein. Wenn aber die Coordinaten des Weifs so grofs sind, dafs die des Eigenlichts a, b dagegen verschwinden, wird der Unterschied unerheblich.

Nun sieht man, dafs alle Curven, welche zwischen εx und $y = x$ liegen concav gegen x , die anderen concav gegen y sind. Verfolgt man sie von ε aus, so nähern sie sich im Fortlauf der näheren Grundfarbe und weisen auf gesättigtere Abstufungen von dieser hin. Wenn wir also die Art der eingemischten Farbe nach den ähnlichsten, vom Weifs weniger überdeckten Farbentönen beurtheilen, werden wir die Einnischung der reinen Urfarbe x ähnlicher halten.

¹ Auch schon von W. v. BEZOLD erwähnt. *Pogg, Ann.* Bd. 150. S. 245. 1873.

Spectrales Roth kann nach meinen neueren Bestimmungen als Urroth mit überwiegend grünlicher Einnischung betrachtet werden. In der Mischung mit Weiss würde das Grünliche mehr zurücktreten, die Farbe dem Urroth näher, also mehr rosenroth erscheinen, was in der That der Fall ist und schon früher von Hrn. E. HERING bemerkt worden ist.

Violett, was aus gleichen Quantis Urroth und Urblau zusammengesetzt wäre, würde in der Projection auf die Blauroth-Ebene mit der Projection des Weiss fast dieselbe Richtung haben, und seine kürzeste Farbenreihe fast geradlinig sein. Es käme bei spectrumalem Violett nur in Betracht, daß es noch eine Einnischung von Grün hat, die in der Grünroth-Ebene, wie in der Grünblau-Ebene gegen das überwiegende Roth, bezüglich Blau mit steigender Entfernung vom Weiss schwinden würde. Dadurch würde die Farbe dem Complement des Grün, dem Rosenroth ähnlicher gemacht.

Geht man zu bläulichen violetten Einnisungen über, so würde neben dem stärkeren Blau der rothe Bestandtheil des Violett zu schwinden anfangen, was anfangs noch durch das stärkere Schwinden des Grüns compensirt würde. Ich fand, daß zwischen $\lambda = 450 \mu\mu$ bis $\lambda = 430 \mu\mu$ der Zusatz des spectrumalen Blau dem Weiss eine ziemlich deutlich rosenrothe Färbung gab; erst bei $\lambda = 470 \mu\mu$ schwand dieser röthliche Ton.

Farbenunterschiede schwächsten Lichtes. So wie bei hohen Lichtstärken die Farbenunterschiede schwächer werden und zum Theil verschwinden, findet dasselbe auch bei schwächstem Licht statt. Ich habe schon erwähnt, daß bei allmäliger Abnahme der Lichtstärke zuerst die Zwischenfarben im Spectrum schwinden, Gelb und Grünblau, und der von ihnen eingenommene Raum zwischen Roth, Grün und Violettblau sich theilt. Bei weiterer Abnahme tritt an Stelle der letzteren Rothbraun, Olivenbraun und Blaugrau; endlich schwinden alle Farbenunterschiede, am spätesten das Roth,¹ und alles schwächste Licht wird, so lange es überhaupt noch wahrgenommen werden kann, gleichmäßige grau gesehen.

In absolut dunkler Umgebung sieht man deshalb auch ein sehr lichtschwaches Spectrum als einen schwachen Lichtstreifen ohne Farbenunterschiede, und zwar liegt nach den in dieser Beziehung übereinstimmenden Versuchen von F. HILLEBRAND² und A. KÖNIG³ das Maximum der Helligkeit bei $\lambda = 535 \mu\mu$ im Grün. Auch schliessen sich einige von den Curven der monochromatischen Augen derselben Helligkeitscurve ziemlich gut an.

Auch das erste schwache Licht, was ein erglühender Körper in ganz dunklem Raume zuerst ausgiebt, erscheint nach Versuchen von FR. WEBER⁴ grau, „düsternebelgrau“, nach des Autors Benennung, bei steigender Tempe-

¹ DOVES Angabe, daß Blau zuletzt schwinde, bezieht sich auf gleichmäßige Abnahme des objectiven Lichts, und ist durch PURKINJES Phänomen bedingt.

² F. HILLEBRAND (in E. HERINGS Laboratorium angestellte Versuche) in *Sitzungsber. der Wiener Akademie*. Bd. 98. Sitzung vom 21. Febr. 1889.

³ A. KÖNIG, Über den Helligkeitswerth der Spectralfarben. *Festschrift für H. v. Helmholtz*. Hamburg 1891. S. 357. Tafel VI.

⁴ FR. WEBER, Die Entwicklung der Lichtemission glühender fester Körper, *Sitzungsber. d. Akad. d. Wissensch. zu Berlin* 1887. 9. Juni.

ratur „aschgrau“, endlich gelblichgrau, und zwar ist es das Gelbgrün des Spectrum, was so zuerst sichtbar wird. Platin sendet diese Strahlen aus schon bei etwa 391° C., Gold bei 413° , oxydirtes Eisen bei 377° , während deutliche Rothgluth erst bei 525° nach DRAPERS Messung erreicht wird. Dann reicht aber das Spectrum schon vom Roth der FRAUNHOFERSchen Linie *B*, bis zum Grün von *b*. Dafs das Gelbgrün zuerst sichtbar wird, ist wohl der gröfseren Empfindlichkeit des Auges für diese Strahlengattung zuzuschreiben, während das Blau des Spectrum bei diesen niederen Temperaturen noch zu geringe Intensität hat, um sich merklich zu machen.

Ähnliche Beobachtungen kann man an den sogenannten phosphorescirenden Wolken machen, die zuweilen bei sehr klarem Himmel in Hochsommer um Mitternacht im Norden sichtbar werden¹ und auferordentlich hoch liegende Wölkchen zu sein scheinen, die noch Dämmerungslicht von der unter dem Horizont stehenden Sonne haben. Sie erscheinen graugrün, ihr Licht wird durch ein rothes Glas ausgelöscht, während andere von fernem Gaslicht ebenso hell beleuchtete Objecte durch das rothe Glas sichtbar bleiben. Gaslicht enthält also mehr rothe Strahlen, als das der phosphorescirenden Wolken, obgleich auch das letztere wahrscheinlich Dämmerungslicht der auch für sie noch unter dem Horizont stehenden Sonne ist.

Die Erklärung dieser Erscheinungen ergibt sich aus den zuletzt gegebenen Beziehungen der Spectralfarben zu den Urfarben. Jede Spectralfarbe erregt sämtliche drei Urfarben in mäfsigen Stärken. Licht unterscheiden wir, wenn wir die gesammte vorhandene Lichtmasse von dunkel unterscheiden können, d. h. wenn die einzelnen Reize die Reizschwelle übertreten. Um Farben zu unterscheiden, müssen wir kleinere Mengen der Urfarben im einen Gemisch von gröfseren im anderen unterscheiden. So ist z. B. nach den Rechnungen von S. 461 enthalten:

	Im spectralen Roth	Im spectralen Violett	Im Weifs
Urroth	0,6093	0,3528	0,3333
Urgrün	0,1998	0,2498	0,3333
Urblau	0,1913	0,3973	0,3333

Aus den S. 405—408 und S. 415 gegebenen Werthen aus A. KÖNIGS Beobachtungen folgt, dafs die Helligkeiten, bei denen die gröfsere Helligkeit von 0,6 derselben unterschieden werden kann, 8 bis 20 mal so grofs sind als die Reizschwellen. Das erstgenannte Verhältnifs aber müfste von 1 unterschieden werden können, wenn spectrales Roth der betreffenden Lichtstärke von Weifs unterschieden werden sollte. Bei den anderen Farben sind die Verhältnisse noch näher an 1 und schwerer von 1 zu unterscheiden.

¹ In den letzten Jahren vermuthlich durch Reste des Krakatoastaubs begünstigt.

Ich habe in diesem Abschnitte die Voraussetzung festgehalten, daß NEWTONS Farbengesetz streng richtig ist. Daß E. BRODHUN¹ Thatsachen entdeckt hat, die Änderungen in den Verhältnissen der Farbenwerthe der Spectralfarben bei wechselnder Lichtstärke anzeigen, habe ich auf S. 375 und 376 schon angeführt. Es schien noch zweifelhaft, ob man dies nicht als Besonderheit seines dichromatischen Auges ansehen müsse. Neuerdings hat aber auch Herr A. KÖNIG² an seinem normalen trichromatischen Auge solche Versuche bis zu sehr viel größeren Unterschieden der Lichtstärken ausgedehnt, und ähnliche ziemlich weit gehende Änderungen gefunden. Ich habe mich selbst von der Richtigkeit überzeugt. Daraus folgt wohl nun, daß auch NEWTONS Gesetz nur für mittlere Lichtstärken annähernd richtig ist, nicht für zu kleine.

Ältere Methoden der Photometrie. BOUGUER³ liefs zwei weiße Flächen 328 durch die zu vergleichenden Lichter beleuchten; stellte sich so, daß er sie beide perspectivisch neben einander sah und veränderte dann die Entfernung der einen weißen Fläche vom Licht so lange, bis die Erleuchtung gleich wurde. LAMBERT⁴, der in seinem berühmten Werke *Photometria* das erste vollständige System dieser Wissenschaft mit großem Scharfsinn entwickelte, wendete neben anderen für specielle Fälle bestimmten Methoden namentlich das Princip der zwei Schatten an, was oben schon erwähnt ist. Dasselbe Verfahren wendet auch RUMFORD⁵ in dem nach ihm benannten Photometer an.

Um die Stellung des Beobachters bequemer zu machen, wendete POTTER⁶ statt der zwei weißen undurchsichtigen Flächen von BOUGUERS Photometer zwei transparente an, und RITCHIE⁷ fügte noch zwei unter 45° geneigte Spiegel hinzu, welche das Licht auf die weißen Flächen warfen und erlaubten die Lichtquellen nach entgegengesetzten Richtungen hin aufzustellen. J. HERSCHEL⁸ hob hervor, daß die Bedingung inniger Be- 329 rührung der zu vergleichenden Flächen in RITCHIES Photometer erfüllt sei, und dadurch die Genauigkeit zunehme. PERNOT⁹ modificirte das Verfahren von POTTER dadurch, daß er die beiden transparent beleuchteten Flächen noch von der entgegengesetzten Seite durch ein drittes Licht beleuchtet, welches er allmählich näher bringt. Sind jene beiden gleich, so müssen sie gleichzeitig verschwinden. In BUNSENS oben erwähntem Photometer wird eine Papierfläche, die zum Theil mit Stearin getränkt ist, von vorn und von hinten beleuchtet. Ist das hintere Licht schwach, so erscheint der transparente Fleck dunkel, ist es zu stark, hell.

Die Absorption der Lichtstrahlen benutzte DE MAISTRE¹⁰ zur Schwächung, indem er ein Prisma von blauem Glase mit einem gleichen von weißem Glase so zusammenlegte, daß die äußeren Begrenzungsflächen parallel wurden und das Licht ungebrochen durchging, aber an verschiedenen Stellen des Doppelprisma verschieden stark absorbirt wurde. Ähnlich benutzte QUETELET¹¹ zwei Prismen aus blauem Glase, die, verschieden gegen einander verschoben, eine planparallele Platte von veränderlicher Dicke bildeten. Durch die hierbei angewendeten blauen Glasplatten wird aber die Farbe des hindurchgehenden Lichtes verändert, und daß bei der Vergleichung verschiedenfarbigen Lichts keine genaue Messung möglich sei, ist schon erwähnt worden. Noch mißlicher sind zwei andere Instrumente, bei welchen nicht zwei verschiedene Lichter verglichen, sondern absolute

¹ A. KÖNIG, Über NEWTONS Gesetz der Farbenmischung und darauf bezügliche Versuche des Hrn. EUGEN BRODHUN. *Sitzungsber. der Akad. zu Berlin*. 31. März 1887. S. 311.

² Nach mündlicher Mittheilung.

³ BOUGUER, *Essai d'optique* 1729. 12^o. *Traité d'optique sur la gradation de la lumière*. Paris 1760. Latein. Übersetzung. Wien 1762.

⁴ LAMBERT, *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*. Augustae Vindelic. 1760.

⁵ RUMFORD, *Philos. Transactions* LXXXIV. p. 67.

⁶ POTTER, *Edinburgh Journal of Science*. New. Ser. III. 284.

⁷ RITCHIE, *Annals of Philosophy*. Ser. III, Vol. I. 174.

⁸ J. HERSCHEL, *On light*. p. 29.

⁹ PERNOT, *Dinglers polyt. Journ.* CXIX. 155. *Moniteur industr.* 1850. Nr. 1509.

¹⁰ DE MAISTRE, *Bibl. univ. de Genève*. LI. 323. *Pogg. Ann.* XXIX. 187.

¹¹ QUETELET, *Bibl. univ. de Genève*. LII. 212. **Pogg. Ann.* XXIX. 187—189.

Lichtstärken dadurch bestimmt werden sollen, daß sie bei bestimmter GröÙe der Absorption ganz verschwinden. Das eine ist von LAMPADIUS¹ vorgeschlagen. Er sieht durch eine Anzahl dünner Hornblätter nach dem hellen Gegenstande und vermehrt sie so lange, bis das Objekt eben verschwindet. DE LIMENCEY und SEGRETAN² brauchten statt der Hornblätter Papierscheiben. Das andere ist das von einem Ungenannten³ vorgeschlagene Lamprotometer, um die Helligkeit des Tages zu messen. Es wird dabei bestimmt, wie starke Lackmustinctur man nehmen müsse, damit ein vom Tageslicht beleuchteter Platindrath, durch ein mit der Tinctur gefülltes Glas gesehen, verschwinde. Die Grenze der Empfindlichkeit des Auges für Licht ist doch zu unbestimmt, als daß bei solchen Messungen nicht Irrungen um das Dreifache oder mehr der gemessenen GröÙe eintreten sollten. Auf demselben Princip beruht ein Photometer von ALBERT⁴ und eines von PITTER.⁵

330 Dagegen waren es zwei andere Wege, auf denen allmählich die vollendeteren Methoden, welche jetzt üblich sind, sich entwickelten. Der eine dieser Wege hat Bestimmung der Helligkeit der Sterne zum Ziel. J. HERSCHEL schwächte das Licht des helleren Sterns, indem er die Apertur des Fernrohrs, welches auf ihn gerichtet war, durch ein vorge-setztes Diaphragma verkleinerte. Dasselbe Princip liegt auch A. v. HUMBOLDTS Astrometer zu Grunde. Dies ist ein Spiegelsextant von gewöhnlicher Einrichtung. Das Fernrohr des Instruments ist bekanntlich auf einen halb belegten, halb unbelegten Spiegel gerichtet und sieht den einen Stern durch den unbelegten Theil, den anderen durch den belegten und einen zweiten Spiegel. Indem man das Fernrohr senkrecht gegen die Trennungslinie des belegten und unbelegten Theils verschiebt, kann man mehr Strahlen von dem einen oder anderen bekommen und so die Bilder zweier Sterne, oder die beiden Bilder eines Sterns, nach Belieben gleich oder ungleich machen und ihre Lichtstärke vergleichen. Das Verfahren von HUMBOLDT hat den Vortheil, daß die beiden Sterne, welche verglichen werden sollen, dicht neben einander im Gesichtsfelde desselben Fernrohrs erscheinen. Die Vergleichung so intensiver kleiner Lichtpunkte ist aber schwerer, als die Vergleichung heller Flächen. Diesem Mangel wird durch das Objectiv-Photometer von STEINHEIL⁶ abgeholfen. Es ist dies ein Teleskop, dessen Objectivglas halbirte ist. Vor jeder Hälfte des Objectivs befindet sich ein rechtwinkliges Glasprisma als Spiegel. Das Ganze wird so gestellt, daß die eine Hälfte des Objectivs dem Beobachter den einen, die andere den anderen der zu vergleichenden Sterne zeigt. Dann werden die beiden Hälften des Objectivs einzeln hinausgeschoben, so daß nicht mehr deutliche Bilder, sondern Zerstreuungsbilder der beiden Sterne entstehen, welche desto lichtschwächer werden, je größer man sie macht, d. h. je weiter man die entsprechende Hälfte des Objectivs hinaus-schiebt. Jede solche Hälfte ist mit einem rechteckigen Diaphragma versehen, welches mit anderen von anderer GröÙe vertauscht werden kann. Die beiden Bilder der Sterne erscheinen nach richtiger Einstellung als zwei dicht an einander grenzende nahe gleich große Rechtecke von gleicher Helligkeit, also unter den günstigsten Bedingungen, um kleine Unterschiede der Helligkeit zu erkennen. Durch dieses Instrument sind zuerst genaue Lichtmessungen an Fixsternen und Planeten möglich geworden. SCHWERD⁷ dagegen benutzte die Diffraction, welche durch enge kreisförmige Diaphragmen entsteht, um helle Flächen hervorzubringen.

Für die physikalischen Untersuchungen dagegen, wobei es sich darum handelt, zu bestimmen, wie viel Licht bei Refractionen, Reflexionen und anderen Vorgängen verloren gegangen ist, hat man mit Vortheil das stärkere Licht durch Brechung und Zurückwerfung

¹ LAMPADIUS, *Gehlers Wörterbuch*. 2. Auflage. VII. 482.

² DE LIMENCEY, und SEGRETAN, *Cosmos*. VIII. 174; *Polyt. Centralblatt* 1856. 570; *Dinglers polyt. Journ.* CXLI. 78.

³ *Pogg. Ann.* XXIX. 490.

⁴ ALBERT, *Dinglers polyt. Journ.* C. 20 und Cl. 342.

⁵ PITTER, *Mechanics Magazine*. XLVI. 291.

⁶ STEINHEIL, *Pogg. Ann.* XXXIV. 646. — *Denkschriften der Münchner Akad. Math.-phys. Klasse*. Bd. II. 1836. — Ähnlich die Methode von JOHNSON. *Cosmos*. III. 301–305.

⁷ SCHWERD, *Bericht über die Naturforscherversammlung 1855*.

an unbelegten Glastafeln geschwächt. BREWSTER¹ und QUETELET² brauchten mehrfache nahe senkrechte Reflexionen, um starkes Licht mit schwachem vergleichbar zu machen; 28 bis 29 solche Reflexionen verlöschen z. B. das Sonnenlicht. DUWE³ benutzte ebenso die Reflexionen an schwarzen Glastafeln, wie sie zu Polarisationsapparaten gebraucht werden. Die verschieden starke Reflexion bei wechselndem Einfallswinkel benutzte POTTER.⁴ Lichtquelle ist ihm ein halbylindrisch geformter weißer Schirm, dessen gleichmäßige Beleuchtung man voraussetzen muß, die aber schwer zu erreichen sein wird. Die geschickteste Ausführung hat dies Princip in dem Photometer von ARAGO erhalten und ist dadurch zur Ausführung sehr genauer Messungen der Lichtstärke brauchbar geworden.⁵ Die Lichtquelle dieses Photometers ist ein transparenter, ebener, senkrecht stehender Papierschirm, der am Fenster steht und in allen seinen Theilen gleichmäßig erleuchtet sein muß, was sich übrigens durch das Instrument selbst kontrolliren läßt. Senkrecht gegen den Schirm und gegen den Horizont ist ferner aufgestellt eine planparallele Glasplatte, unter deren Mitte sich ein Zapfen befindet, um welchen als Axe ein Rohr in einer horizontalen Ebene drehbar ist. Das Rohr ist horizontal gegen die Mitte der Platte gerichtet, und der Beobachter, welcher durch das Rohr sieht, erblickt theils durch die Platte einen Theil des Papierschirms, theils in ihr gespiegelt einen anderen Theil dieses Schirms. Rechts und links von der Glasplatte, zwischen ihr und dem Schirm, sind horizontal und in etwas verschiedener Höhe schwarze Stäbe angebracht, die dicht neben einander theils durch die Platte, theils von ihr gespiegelt gesehen werden. Wo der gespiegelte schwarze Stab erscheint, sieht der Beobachter das durchgelassene Licht des weißen Schirms allein; wo der schwarze Stab im durchgelassenen Licht erscheint, sieht der Beobachter das gespiegelte Licht des weißen Schirms. Die Röhre wird nun so 331 gestellt, daß die beiden schwarzen Streifen gleich hell erscheinen, und der Winkel, unter dem die Röhre gegen die Glasplatte gerichtet ist, wird durch eine passend angebrachte Theilung gemessen. Man kann nun das einfallende oder das gespiegelte Licht allerlei anderen Einwirkungen unterwerfen und wird dann im Allgemeinen einen anderen Winkel erhalten, unter dem gesehen die beiden Bilder gleich hell erscheinen. Um aus diesem Winkel die stattfindende Schwächung des Lichts berechnen zu können, muß vorher empirisch bestimmt sein, wie sich bei den verschiedenen Einfallswinkeln die durchgelassenen zu den gespiegelten Lichtmengen verhalten, wofür ARAGO ein besonderes Verfahren vorgeschlagen hat, welches darauf beruht, daß die beiden Strahlenbündel, welche ein doppelt brechender Krystall giebt, gleich stark und jeder einzelne halb so stark sind, als der ungetrennte Strahl. Indem er so eines der beiden Strahlenbündel durch Doppelbrechung halbirt oder viertheilt, kann er die Stellungen ermitteln, wo das durchgelassene Licht das Viertel, die Hälfte, das Doppelte, das Vierfache des zurückgeworfenen ist und schließlich durch Interpolation die betreffenden Verhältnisse auch für alle zwischenliegenden Winkel bestimmen.

ARAGO hatte noch ein anderes Princip zur Schwächung des Lichts vorgeschlagen, nämlich die Polarisation in doppeltbrechenden Krystallen zu benutzen. Läßt man vollständig polarisirtes Licht vor der Intensität I in einen solchen Krystall eintreten, und bildet die Polarisationsebene des Lichts mit dem entsprechenden Hauptschnitte des Krystalls einen Winkel φ , so erhält man durch die doppelte Brechung zwei Bündel, deren Intensität beziehlich $I \cos^2 \varphi$ und $I \sin^2 \varphi$ ist. Kann man den Winkel φ messen, so ist dadurch also auch unmittelbar das Verhältniß der Lichtstärke der gebrochenen Bündel gegeben. Die NICOLSchen Prismen eliminiren das eine Bündel ganz und lassen nur das andere bestehen. Hierauf beruht das Photometer von F. BERNARD.⁷ Die beiden zu vergleichenden Strahlen

¹ BREWSTER, *Edinburgh Transactions*. 1815.

² QUETELET, *Bibl. univ. de Genève*. LII. 212. *Pogg. Ann.* XXIX. 187—189.

³ DUWE, *Pogg. Ann.* XXIX. 190 Ann.

⁴ POTTER, *Edinburgh Journal of Science*. New. Ser. IV. 50 und 320. — *Pogg. Ann.* XXIX. 487.

⁵ *Oeuvres de FR. ARAGO* X. p. 184—224.

⁷ F. BERNARD, *Annales de Chimie*. (3) XXXV. 385—438. *Cosmos*. II. 496—497 und 636—639. C. R. XXXVI. 728—731.

werden parallel zu einander, jeder durch zwei drehbare Nicol'sche Prismen, geleitet und dann durch totale Reflexion in einem rechtwinkligen Glasprisma parallel und dicht neben einander in das Auge des Beobachters gelenkt, der ihre Intensität gleich zu machen sucht dadurch, daß er die Hauptschnitte der beiden Nicol'schen Prismen, durch welche der stärkere Strahl geht, unter einem passenden Winkel gegen einander stellt. Stammt das zu vergleichende Licht aus derselben Lichtquelle her, so kann man die beiden ersten Nicol'schen Prismen weglassen, und an ihrer Stelle ein doppeltbrechendes Prisma gebrauchen, welches das Licht der Quelle in zwei gleiche, verschieden polarisirte Hälften spaltet. Sehr ähnlich im Princip ist das Photometer von BEER.¹ Die beiden Strahlenbündel kommen horizontal von rechts und links zum Instrumente, gehen jeder durch ein Nicol'sches Prisma, werden durch einen stählernen Doppelspiegel, der zwei unter 45° gegen den Horizont geneigte spiegelnde Flächen hat, vertical gemacht und fallen durch einen dritten NICOL in das Auge des Beobachters. Dieser sieht vor sich ein kreisförmiges Feld, dessen rechte und linke Hälfte den beiden reflectirenden Flächen des Doppelspiegels entsprechen, und kann durch Drehung der Nicols die beiden Felder gleich hell machen. Ähnlich ist auch das Photometer von ZÖLLNER.²

BABINET³ hat zur Vergleichung der Lichtstärke zweier Strahlenbündel polarisirten Lichts ein Mittel benutzt, welches die Vergleichung ihrer Stärke ungemein erleichtert. Sein Photometer ist zunächst bestimmt, die Helligkeit von Gasflammen zu vergleichen. Eine Röhre läuft in zwei Schenkel aus, von denen der eine die Verlängerung der Röhre bildet, während der andere mit dieser einen Winkel von 70° einschließt. Beide sind durch mattgeschliffene Glastafeln geschlossen. Am Scheitel des Winkels wird die Röhre von einem Satz Glasplatten durchsetzt, welcher den Winkel halbt. Werden nun vor die beiden Röhrenden Lichtquellen gesetzt, so tritt das Licht der einen Quelle in das gemeinsame Röhrenstück, nachdem es von dem Glassatz durchgelassen und senkrecht gegen die Einfallsebene polarisirt ist, und das Licht der anderen Quelle, nachdem es reflectirt, und in der Einfallsebene polarisirt ist. Das gemeinsame Röhrenstück ist durch ein SOLEIL'Sches Polariskop geschlossen. So lange die beiden senkrecht gegen einander polarisirten Lichtmengen ungleiche Intensität haben, sieht man vier complementär gefärbte Halbkreise. Die Farben verschwinden, wenn man beide Lichtmengen dadurch gleich macht, daß man die Entfernung der Flammen verändert. In diesem Instrumente ist also die Vergleichung der Lichtstärke für das Auge zurückgeführt auf die Vergleichung der Farben benachbarter Flächen.

Im Princip ähnlich ist das auf einer Idee von NEUMANN beruhende Photometer von WILD,⁴ aber durch die Abänderung des physiologischen Theils des Apparates ist in diesem Instrumente ein hoher Grad von Empfindlichkeit erreicht. Die beiden zu vergleichenden Strahlen fallen parallel mit einander auf das Instrument und werden schließlic zur Deckung gebracht, indem der eine unter dem Polarisationswinkel erst von einer Glasplatte *A* und dann von einem ihr parallelen Satze von Glasplatten *B* reflectirt und vollständig polarisirt wird, während der andere Strahl durch den Glassatz *B* hindurchgeht. Ehe dieser zweite Strahl jedoch unter dem Polarisationswinkel auf den Glassatz *B* trifft, ist er schon durch einen eben solchen Glassatz *C* hindurchgegangen. Der Glassatz *C* ist um eine Axe drehbar, so daß der Strahl ihn unter verschiedenen genau meßbaren Winkeln passiren kann, wodurch die Menge des durchgelassenen Lichts und das Verhältniß seiner Polarisation geändert wird. Übrigens ist der Glassatz *C* so gestellt, daß die Polarisation, die der Strahl in ihm erhält, entgegengesetzt ist derjenigen, welche ihm der Glassatz *B* mittheilen würde. Lassen wir den zweiten Strahl senkrecht durch *C* gehen, so fällt er unpolarisirt auf *B* und wird hier entgegengesetzt dem ersten reflectirten Strahle polarisirt, mit dem er übrigens von da ab auf demselben Wege vereinigt weiter geht. Wird *C*

¹ BEER, *Pogg. Ann.* LXXXVI. 78–88.

² ZÖLLNER, *Photometrische Untersuchungen*. Dissertat. Basel 1859.

³ BABINET, *C. R.* XXXVII. 774.

⁴ WILD, *Pogg. Ann.* XCIX. 235.

mehr und mehr geneigt, so nimmt die Menge polarisirten Lichts im zweiten Strahle mehr und mehr ab, und zwar in einem Verhältnisse, welches man nach Messung des Einfallswinkels berechnen kann. Mit dem vollständig polarisirten ersten Strahle wird also eine variable Menge theils entgegengesetzt polarisirten, theils natürlichen Lichts des zweiten Strahls gemischt. Dieses gemischte Licht geht nun schliesslich durch eine senkrecht zur Axe geschnittene Kalkspathplatte und einen Turmalin. Ist die Menge polarisirten Lichts in beiden Strahlen gleich groß, so sieht der Beobachter nichts von dem Kreuz mit Ringen in der Kalkspathplatte, wohl aber wird dieses Kreuz sichtbar, sobald die Mengen polarisirten Lichts in beiden Strahlen nicht gleich groß sind. Die Empfindlichkeit des Auges im Erkennen der Polarisationsfigur des Krystals zeigte sich außerordentlich groß, so daß bei wiederholten Einstellungen das Verhältniß der Intensitäten sich nur um ein $\frac{1}{200}$ verschieden fand. Eine noch größere Genauigkeit hat WILD¹ in seinem neueren Photometer erreicht, wo er statt der polarisirten Glasplatten doppelbrechende Krystalle und als Polariskop zwei gekreuzte Bergkrystallplatten benutzte, welche unter 45° gegen die Axe geschnitten sind. Durch Linsen sind die Strahlen, die hindurchgehen, parallel gemacht. Dergleichen Platten zeigen ein geradliniges Fransensystem, von dem bei passender Einstellung des Apparates nur ein Querstreifen ausgelöscht wird, während zu beiden Seiten die Farben complementär sind. Der Beobachter kann sehr genau auf die Mitte der ausgelöschten Fransen das Fadenkreuz einstellen. Nach WILDS Angaben beträgt der Fehler bei einmaliger Einstellung nur zwischen 0,001 und 0,002 der Lichtstärke.

Schon TALBOT² hat zur Schwächung des Lichts eine rotirende Scheibe mit schwarzen und durchsichtigen Sektoren angewendet, und dieses Mittel ist auch von BABINET und SECHI³ zu Messungen der Sternhelligkeiten, später von AUBERT (s. § 22) angewendet worden.

Von POUILLET⁴ ist zur Erleichterung des physiologischen Theils der photometrischen Methoden vorgeschlagen worden, Lichtbilder zu gebrauchen, die nach DAGUERRES Verfahren auf polirten Silberplatten ausgeführt sind. Um ein solches Bild positiv zu sehen, muß es von der Seite beleuchtet sein, der Beobachter aber muß so stehen, daß er irgend einen dunklen Körper, aber nicht das einfallende Licht von der Platte gespiegelt erblickt. Erblickt er im Gegentheil einen sehr hellen Körper von der Platte gespiegelt, so erscheint das Bild negativ, was hell sein sollte, dunkel, und umgekehrt. Dazwischen aber giebt es eine gewisse Helligkeit der gespiegelten Fläche, bei welcher das Bild ganz verschwindet, während es bei der geringsten Vermehrung oder Verminderung der Helligkeit positiv oder negativ auftaucht.

Ein von den bisherigen ganz abweichendes physiologisches Princip der Photometrie hat SCHAFFHÄUTL⁵ benutzt, für dessen Richtigkeit er aber bisher den Beweis noch schuldig geblieben ist. Er behauptet, das Zeitintervall, welches zwischen zwei gleichartigen Lichtindrücken verfließen kann, ohne daß das Auge die Unterbrechung bemerkt, sei proportional der Wurzel aus der Intensität des Lichts. Sein Apparat besteht aus einer Stahlfeder, die an ihrem unteren Ende so eingeklemmt ist, daß sie in ihrer Gleichgewichtslage vertical steht. An ihrem oberen Ende trägt sie einen rechtwinkligen Schirm von dünnem geschwärzten Kupferblech, der in der Mitte von einer rechteckigen Öffnung durchbrochen ist. Durch eine horizontale, von zwei Dioptern geschlossene Röhre sieht der Beobachter auf den Schirm, welchen die Feder trägt; dahinter ist die Lichtquelle so aufgestellt, daß ihr Licht nur dann in das Auge des Beobachters dringen kann, wenn der Schlitz des Schirms in der Axe der Diopterröhre sich befindet. Die Feder wird so lange verkürzt, bis das Bild der Lichtquelle nicht mehr zitternd, sondern ruhig erscheint.

¹ WILD, *Mith. der bernischen naturf. Ges.* 1859. No. 427—429.

² TALBOT, *Pogg. Ann.* XXXV. 457. 464. *Phil. Magaz.* Nov. 1834. p. 327. Darüber PLATEAU in *Bullet. de l'Acad. de Bruxelles.* 1835. p. 52.

³ BABINET und SECHI, *Arch. d. sc. phys. de Genève.* XX. 121—122. *Memorie dell' osservatorio di Roma.* Cosmos. I. 43.

⁴ POUILLET, C. R. XXXV. 373—379. *Pogg. Ann.* LXXXVII. 490—498. *Inst.* 1852. p. 301. *Cosmos.* I. 546—549.

⁵ SCHAFFHÄUTL, *Abbildung und Beschreibung des Universals-Vibrations-Photometer.* *Münchener Abhandl.* VII. 465—497.

Die Lichtintensitäten sollen den Quadraten der Schwingungszeiten (umgekehrt?) proportional sein, oder den vierten Potenzen der Federlängen. Selbst wenn wir die erstere Proportionalität zugeben wollten, würde die letztere bei einer schwingenden belasteten Feder nicht zutreffen.

Endlich ist hier noch die Methode zu erwähnen, welche FRAUNHOFER¹ gebraucht hat, um die Lichtstärke der verschiedenen Farben des Spectrum von Glasprismen unter einander zu vergleichen. Das Spectrum, wurde wie gewöhnlich, durch ein Fernrohr beobachtet, vor dessen Objectiv *A* (Fig. 178) ein Prisma *P* gesetzt ist. *B* ist die Ocularlinse. Innerhalb der Ocularröhre ist,

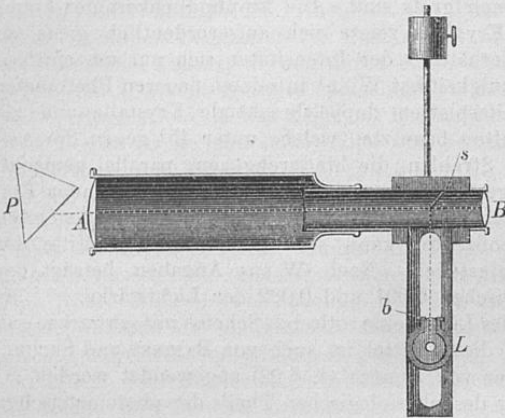


Fig. 178.

45° gegen die Axe des Fernrohrs geneigt, ein kleiner Stahlspiegel *s* befestigt, dessen eine scharfe Kante in der Brennebene des Oculars liegt und die Fernrohraxe schneidet. In der vom Spiegel nicht bedeckten Hälfte der Ocularblending erscheint ein Theil des prismatischen Spectrum. Der Spiegel dagegen reflectirt das Licht einer kleinen Öllampe *L*, welche in einem seitlich der Ocularröhre angeetzten, oben und unten aufgeschlitzten Rohre verschiebbar ist. Vor dieser Flamme ist eine kleine Blending *b* angebracht, durch die die sichtbare leuchtende Fläche begrenzt ist. Dem Beobachter erscheint dieses Licht nur in einem breiten Zerstreungskreise, dessen

Helligkeit dem Quadrate der Entfernung *s b* umgekehrt proportional ist. Man verschiebt nun die Lampe so lange, bis die Helligkeit der beiden in der Ocularblending erscheinenden Halbkreise gleich ist, d. h. bis die Grenze beider am undeutlichsten erscheint. Die Versuche von FRAUNHOFER haben sehr wenig übereinstimmende Zahlen für die Helligkeit der verschiedenen Theile des Spectrum gegeben, wahrscheinlich hauptsächlich deshalb, weil ihm der Einfluss der absoluten Intensität auf die relative Helligkeit der Farben unbekannt war.

334

Die ersten Messungen über die Empfindlichkeit des Auges für Lichtunterschiede hat BOUGUER ausgeführt und dabei gefunden, daß die wahrnehmbare Differenz ein nahezu constanter Bruchtheil der ganzen Intensität sei. Dasselbe Gesetz wurde später von STEINHEIL, MASSON, ARAGO, VOLKMANN bei photometrischen Messungen wiedergefunden und von FECHNER ausführlich behandelt.

Die Beobachtungen über die verschiedene relative Helligkeit der Farben sind zum Theil von PURKINJE, später vollständig von DOVE, an Spectralfarben von HELMHOLTZ ausgeführt.

Unter den Gegenständen dieses Paragraphen sind über die Irradiation die meisten Untersuchungen und Streitigkeiten geführt worden. Die Thatsache, daß helle Gegenstände unter Umständen vergrößert erscheinen, drängte sich natürlich schon früh der Beobachtung auf. PLATEAU citirt EPICURS Brief an PYTHOCLES, in dem erwähnt wird, daß eine Flamme bei Tage in der Ferne kleiner aussehe, als bei Nacht, und daß deshalb auch wohl die Sterne zu groß erscheinen könnten; dann den Anfang der dritten Satire des PERSIUS. — *Jam clarum mane fenestras Intrat et angustas extendit lumine rimas.*

Später waren es besonders die Astronomen, welche die Erscheinungen der Irradiation untersuchten, weil sie sich bei ihren Beobachtungen über die Größe der Himmelskörper störend bemerklich machte. KEPPLER² schob sie hauptsächlich auf mangelnde Accommo-

¹ FRAUNHOFER, *Gilberts Ann.* 1817. Bd. 56. S. 297.

² KEPPLER, *Paralipomena.* p. 217, 220, 285.

dation und hat damit allerdings das Wesentliche der meisten dazu gehörigen Erscheinungen getroffen. Ebenso studirte sie GALILEI¹ genauer; er spricht es aus, daß sie desto lebhafter ist, je größer der Unterschied des hellen Objects und des dunklen Grundes, daß helle Objecte stets vergrößert, dagegen dunkle Objecte auf hellem Grunde (Mercur und Venus vor der Sonne) verkleinert erscheinen, daß die Vergrößerung sehr kleiner Objecte am bedeutendsten ist. Anfangs glaubte er, wie GASSENDI,² annehmen zu dürfen, daß leuchtende Gegenstände die umgebende Luft entzündeten, später aber suchte er den Grund richtiger in unregelmäßigen Brechungen im Auge. Auch GASSENDI glaubte später, daß die Sterne bei Nacht größer erschienen, weil die Pupille weiter sei. Für sein Auge schwankte der Durchmesser des Mondes, je nach der Helligkeit des Grundes zwischen 33' und 38'. Die Verkleinerung kleiner Gegenstände auf hellem Grunde erörtert namentlich SCHICKARD,³ der zugleich die Behauptung aufstellte, daß das Licht am Rande dunkler Objecte sich zum Theil in den Schattenraum hinein ausbreite, wie denn auch später LE GENTIL⁴ die Irradiation durch Diffraction zu erklären suchte. Dagegen suchte HORROCKES⁵ in GALILEI'S Sinne zu vertheidigen, daß die Irradiation ihren Sitz im Auge habe. DESCARTES meinte, daß beim Anblick heller Gegenstände die Pupille sich verengere, das Auge einem nahe sehenden ähnlich werde, und dadurch die Beurtheilung der Entfernung und Größe solcher Objecte verändert werde, außerdem aber könne die Bewegung der Netzhautelemente, wenn sie sehr heftig werde, auf die benachbarten übertragen werden, so daß das empfundene Bild größer erscheine. Hierdurch ist DESCARTES der Urheber der auf Übertragung der Nervenregung gegründeten Theorie der Irradiation geworden. Als nun später die Astronomen stark vergrößernde und gutgearbeitete Fernröhre zu gebrauchen anfangen, machte sich die Irradiation bei den größeren Gestirnen kaum noch merklich, und man fing an, sie zu bezweifeln und zu leugnen,⁶ während andere Astronomen ihre Existenz anerkannten.⁷ Bei den astronomischen Beobachtungen vermischen sich in der Regel die Wirkungen der chromatischen und sphärischen Aberration des Fernrohrs mit denen der Unvollkommenheiten des Auges, und es mußte hier nothwendig das Urtheil der Astronomen, welche Fernröhre gebrauchten, verschieden ausfallen, je nach der Beschaffenheit des Fernrohrs. Daß bei den besten Fernröhren die Irradiation sich in den Messungen nicht mehr merklich macht, hat namentlich BESSEL 1832 beim Durchgang des Mercur vor der Sonne gezeigt.

Während die Astronomen meistens nur die Frage verhandelten, ob Irradiation beste oder nicht, die Frage über ihre Ursachen dagegen übergingen, fingen andere Naturforscher auch an, letztere Frage zu behandeln. J. MÜLLER⁸ betrachtete anfangs die Irradiation, wie wir es oben gethan haben, als eine Ausbreitung objectiven Lichts, später wurde er selbst, sowie die meisten anderen Physiologen jener Zeit, in welcher sich auch die Lehre von den Mitempfindungen entwickelte, durch die sehr ausführliche Arbeit von PLATEAU⁹ über die Irradiation bewegt, sie von einer Übertragung der Reizung von einem Netzhautelement auf das andere abzuleiten. Die Erscheinungen, welche PLATEAU als Irradiation beschreibt, sind von der Art, wie sie ein schwach kurzsichtiges Auge an entfernteren Gegenständen sehen muß, es sind also meist Erscheinungen unvollkommener

¹ GALILEI, *Opere di Galilei*. T. II. p. 18; 255—257, 396; 467—469. *Systema cosmicum*. Lyon 1641 Dial. III. p. 248.

² GASSENDI, *Opera omnia*. Florenz 1727. T. III. p. 385, 567, 583—585. T. I. pag. 499—508.

³ SCHICKARD, *Pars responsi ad epistolam P. Gassendi de Mercurio sub sole viso*. Tubingae 1632.

⁴ LE GENTIL, *Mém. de l'Acad. d. Sc. de Paris*. 1784. p. 469. (Gelesen 1743.)

⁵ HORROCKES, *Venus in sole visa*. Cap. XVI. Abgedruckt hinter HEVELIUS' *Mercurius in sole visus*.

⁶ BIOT, *Traité élémentaire d'astronomie physique*, édit. 2me. pag. 534, 536. — DELAMBRE, *Astronomie théorique et pratique*. T. II. chap. 26. § 197. T. III. chap. 29. § 12. — BESSEL, *Astronom. Nachrichten* 1832. No. 228.

⁷ HASSENFRATZ, *Cours de physique céleste*. 1810. p. 23. — J. HERSCHEL, *On light*. T. I. §. 697. — QUETELET, *Positions de Physique*. 1829. T. III. p. 81. — BRANDES in *Gehler's physikal. Wörterbuch*. Neu bearbeitet. V. 796. ROBISON, *Mem. of the Roy. Astron. Soc. of London*. V. p. 1.

⁸ J. MÜLLER, *Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtsinnes*. 1826. S. 400.

⁹ PLATEAU, *Mém. de l'Acad. de Bruxelles*. T. XI. *Pogg. Ann.* Ergänzungsband. I. S. 79, 193, 405.

Accommodation. Diese Deutung weist er aber zurück, weil er auch die geringe Irradiation, welche sehr helle Gegenstände in der Entfernung des deutlichen Sehens zeigen, beobachtet hatte, und die übrigen Ursachen der Lichtzerstreuung im Auge, welche in diesem Falle wirksam werden, noch nicht kannte. Er stützt sich ferner darauf, daß nach seinen Versuchen die Irradiation bei verschiedenen entfernten Objecten immer dieselbe Winkelgröße behalte; doch beziehen sich seine Messungen nur auf Entfernungen von mehr als 0,6 Meter, also auf Distanzen, innerhalb deren sich der Accommodationsfehler nicht mehr merklich änderte. Auffallend ist, daß ihn seine Versuche mit Linsen, die die richtige Sehweite herstellten und damit die Irradiation aufhoben, nicht auf die richtige Erklärung geleitet haben. Ebenso möchte es schwer sein, seinen Satz, daß zwei benachbarte Irradiationen sich gegenseitig schwächen, mit irgend einer Voraussetzung, wie Mitempfindungen erregt werden mögen, zu vereinigen. Denn wenn die Netzhauttheile, welche im Bilde des schwarzen Streifens liegen, von beiden Seiten her in Erregung versetzt werden, muß ihre Erregung nothwendig stärker werden, als wenn nur an einer Seite ein helles Feld anstößt. PLATEAU muß die genannte Behauptung aufstellen, um zu erklären, daß ein feiner schwarzer Strich auf einem hellen Felde überhaupt noch gesehen wird, wenn der Strich schmaler ist, als die Breite der Irradiationssäume; während sich Alles einfach erklärt, wenn man annimmt, die Irradiation rühre von Zerstreuungsbildern her.

Eine Kritik der Arbeit von PLATEAU hat FECHNER und später ausführlicher H. WELCKER¹ gegeben und die Erklärung von KEPLER wiederhergestellt, welche in der That bei Weitem die meisten Fälle der Irradiation umfaßt. Hinzuzusetzen wäre der WELCKERSCHEN Arbeit eben nur noch, daß sehr kleine und sehr helle Gegenstände auch in der Entfernung des deutlichsten Sehens Irradiation zeigen wegen der übrigen Arten der Abweichung der Strahlen im Auge. An WELCKER schlossen sich Andere an, welche die verschiedenen Arten der Lichtzerstreuung im Auge für die Erklärung der Irradiation gebrauchten, namentlich lenkten FLIEDNER² und H. MEYER³ (Leipzig), CRAMER die Aufmerksamkeit auf die monochromatischen Abweichungen des Auges, FICK auf die chromatische. Es fehlte aber den bisher gegebenen objectiven Erklärungen der Irradiation immer noch der Grund, warum nur die Erhöhung der Helligkeit auf dem dunklen Grunde, und nicht zugleich die Schwächung am Rande der hellen Fläche wahrgenommen wird. Diesen, meint der Verfasser, in der obigen Darstellung nachgewiesen zu haben.

§. 22. Die Dauer der Lichtempfindung.

337 Wenn ein Muskelnerv durch einen kurzdauernden elektrischen Schlag erregt wird, so vergeht eine kurze Zeit (etwa $\frac{1}{60}$ Sec.), ehe die Wirkung der Reizung durch Contraction des Muskels sichtbar wird, und es vergeht eine viel längere Zeit (etwa $\frac{1}{6}$ Sec.), ehe die Wirkung der Reizung auf den Muskel wieder verschwindet. Die Veränderung, welche durch die Reizung in den organischen Theilen eintritt, verläuft also viel langsamer, als die elektrische Entladung, welche die Reizung bewirkte. Dasselbe findet im Auge statt. Wir können allerdings bis jetzt noch nicht nachweisen, daß die Empfindung später entsteht, als das Licht einzuwirken anfängt, aber wohl, daß sie noch andauert, wenn das Licht schon aufgehört hat, einzuwirken.

Die Dauer der Nachwirkung ist desto größer, je stärker das einwirkende Licht gewesen ist, und je weniger ermüdet das Auge. Wenn man einen Augenblick nach der Sonne oder in eine helle Lichtflamme geblickt hat und

¹ H. WELCKER, *Über Irradiation und einige andere Erscheinungen des Sehens*. Giessen 1852.

² FLIEDNER, *Pogg. Ann.* LXXXV. 348.

³ H. MEYER, *Pogg. Ann.* LXXXIX. 540.

dann plötzlich die Augen schließt und mit der Hand bedeckt, oder in einen absolut dunklen Hintergrund blickt, so sieht man noch kurze Zeit auf dem dunklen Grunde eine helle Erscheinung von der Gestalt des vorher gesehenen hellen Körpers, welche allmählich erblasst und dabei auch ihre Farbe verändert. Die Nachbilder sehr heller Objecte sind am leichtesten zu sehen, weil sie am längsten dauern. Übrigens kann man auch von weniger hellen Objecten solche Nachbilder, wie sie hier beschrieben sind, erhalten, wenn nur das Auge vorher im Dunkeln gehörig ausgeruht ist, und man dann für einen Augenblick das Object betrachtet. Ein solches Nachbild eines hellen Körpers auf dunklem Grunde hat im ersten Augenblicke die Farbe des Objects und zeigt oft sehr genau noch die einzelnen Theile des Objects in richtiger Gestalt und Schattirung. Dreht man z. B. in einem übrigens unbeleuchteten Zimmer eine Lampe aus, indem man im letzten Augenblicke nach der Flamme hinblickt, so sieht man nachher noch im Dunkeln das helle Bild der Flamme, umgeben von dem etwas schwächeren der Glocke u. s. w. Ändert man die Richtung des Auges, so bewegt sich das Nachbild in gleichem Sinne, so daß es immer diejenige Stelle des Gesichtsfeldes einnimmt, welche der ursprünglich vom Lichte getroffenen Stelle der Netzhaut entspricht. Damit das Nachbild recht scharf gezeichnet sei, ist es nöthig am Object einen einzigen Punct scharf zu fixiren. Wenn das Auge gewankt hat, ist das Nachbild verwaschen, oder man sieht auch wohl zwei oder drei Bilder des Objects sich theilweise deckend. Ist das Bild recht scharf gezeichnet, so kann man unter günstigen Umständen an diesem Nachbilde Einzelheiten bemerken, auf die man während der Betrachtung des Objects selbst die Aufmerksamkeit nicht gewendet, und die man deshalb übersehen hatte.

Dergleichen Nachbilder heller Objecte, in denen die hellen Theile des Objects hell, die dunkeln dunkel erscheinen, und die deshalb positive Nachbilder genannt werden, vermischen sich übrigens gewöhnlich, während sie allmählich verschwinden, mit anderen Bildern, in denen das Helle des Objects dunkel, das Dunkle hell erscheint, mit negativen Nachbildern, welche hauptsächlich dadurch hervorgerufen zu sein scheinen, daß die Empfänglichkeit der Netzhaut für Licht ebenfalls durch die vorausgegangene Lichtwirkung verändert worden ist. Es lassen sich diese beiden Arten von Erscheinungen in der Beschreibung nicht streng von einander trennen. Ich werde deshalb die genauere Schilderung der positiven Nachbilder erst im nächsten Paragraphen mit der der negativen zusammen geben, und in diesem Paragraphen mich darauf beschränken die Wirkungen schnell wiederholter Lichteindrücke zu beschreiben, bei denen die Nachdauer des Lichteindrucks rein zur Erscheinung kommt, ohne wesentlich durch die veränderte Reizempfindlichkeit des Auges gestört zu werden. 338

Die Hauptthatsache dieses Gebietes ist die, daß hinreichend schnell wiederholte Lichteindrücke ähnlicher Art dieselbe Wirkung auf das Auge ausüben, wie eine continuirliche Beleuchtung.

Die Wiederholung des Eindrucks muß zu dem Ende nur so schnell geschehen, daß die Nachwirkung eines jeden Eindrucks noch nicht merklich nachgelassen hat, wenn der nächste eintritt.

Am leichtesten zeigen dies die rotirenden Scheiben. Wenn sich auf einer schwarzen Scheibe ein heller weißer Punct befindet, und die Scheibe rotirt schnell genug, so erscheint an Stelle des rotirenden Punctes ein grauer Kreis, der in allen seinen Puncten ganz gleichmäÙig aussieht, und an welchem nichts mehr von Bewegung zu entdecken ist. Indem das Auge nämlich irgend eine Stelle des scheinbar ruhenden Kreises fixirt, werden die Stellen der Netzhaut, auf welchen der Kreis sich abbildet, in schneller Wiederholung von dem Bilde des weißen Punctes getroffen, der sich in dem Kreise bewegt. Sie empfangen also einen Lichteindruck, der wegen der Schnelligkeit der Wiederholung continuirlich erscheint und natürlich nicht so stark ist, als wenn fortdauernd weißes Licht auf die Netzhaut fiel; daher nicht weiß, sondern grau erscheint. Bewegt sich dagegen das Auge selbst, so daß sein Fixationspunct sich in derselben Richtung fortbewegt, wie der helle Punct, so kann letzterer sichtbar und die scheinbare Continuität des grauen Kreises dadurch unterbrochen werden. Es ist leicht ersichtlich, daß, wenn der Fixationspunct des Auges sich eine Zeit lang genau ebenso schnell und in derselben Richtung fortbewegte, wie der helle Punct, und immer auf diesen geheftet bliebe, sich das Bild des hellen Punctes dauernd auf dem gelben Flecke der Netzhaut befinden würde, und auf die übrigen Stellen des Augengrundes nur das Bild der dunklen Scheibe fallen würde. Unter diesen Umständen erkennt das Auge die Anwesenheit eines weißen Fleckes an Stelle des grauen Kreises; ebenso wenn die Bewegungen des Fixationspunctes und des hellen Fleckes zwar nicht ganz congruent sind, aber die relative Bewegung beider gegen einander verhältnißmäÙig gering ist.¹

Befindet sich auf der Scheibe noch ein zweiter heller Punct in derselben Entfernung vom Mittelpuncte wie der erste, so wird auch der zweite scheinbar zu einem hellen Kreise ausgebreitet, welcher mit dem hellen Kreise des ersten Punctes zusammenfällt. Die Eindrücke beider Puncte auf der Retina addiren sich. Ebenso wenn eine gröÙere Zahl heller Puncte auf demselben Kreise stehen. Wenn man sich daher auf einer solchen rotirenden Scheibe Kreislinien gezogen denkt, deren Mittelpunct in der Rotationsaxe der Scheibe liegt: so geben bei der Rotation alle Puncte einer solchen Kreislinie, einzeln genommen, das Bild einer gleichmäÙig beleuchteten Kreislinie, und alle diese kreisförmigen Bilder der einzelnen Puncte fallen auf dieselben Theile der
339 Netzhaut und vereinigen sich hier zu einem Gesamtbilde. Für diese Erscheinung kann man nun folgendes Gesetz aufstellen: Jede Kreislinie der Scheibe, deren Mittelpunct in der Rotationsaxe liegt, erscheint so, als ob alles Licht, welches sämmtliche Puncte der Kreislinie

¹ Siehe DOVE in *Pogg Ann.* LXXI. 112. 1846. STEVELLY in SILLIM J. (2.) X. 401. 1850. — MONTIGNI. *Bull. de Bruxelles.* XVIII. 2. p. 4. Institut 1847. No. 928. p. 332.

von sich geben, gleichmäfsig über die ganze Länge der Kreislinie verbreitet wäre, und zwar scheint dieses Gesetz ebenso gut für einfarbiges wie für vielfarbiges Licht zu gelten. Beziehen wir dieses Gesetz auf die Thätigkeit der Netzhaut selbst, so können wir es so aussprechen: Wenn eine Stelle der Netzhaut von periodisch veränderlichem und regelmäfsig in derselben Weise wiederkehrendem Lichte getroffen wird, und die Dauer der Periode hinreichend kurz ist, so entsteht ein continuirlicher Eindruck, der dem gleich ist, welcher entstehen würde, wenn das während einer jeden Periode eintreffende Licht gleichmäfsig über die ganze Dauer der Periode vertheilt würde.

Um die Richtigkeit dieses Gesetzes zu prüfen, construire man sich solche Scheiben, wie *Fig. 179*. Der innerste Ring zeigt die halbe Peripherie Weifs, die andere Hälfte Schwarz; im mittleren Ringe sind zwei Viertel, d. h. wieder die halbe Peripherie, weifs, im äufseren ebenso vier Achtel, der Rest schwarz. Läfst man eine solche Scheibe rotiren, so erscheint sie in ihrer ganzen Ausdehnung ganz gleichmäfsig grau gefärbt. Nur mufs man darauf achten, dafs die Scheibe schnell genug rotirt, um auch im innersten Ringe einen vollkommen continuirlichen Eindruck zu geben. Ebenso kann man auch das Weifs über andere beliebig lange Bogenstücke der Peripherie vertheilen: vorausgesetzt nur, dafs in allen Ringen der Scheibe die Summe der Winkel, welche das Weifs einnimmt, gleich grofs ist, dann geben alle immer dasselbe Grau. Statt des Schwarz und Weifs kann man auch verschiedene Farben nehmen, und erhält in allen Ringen dieselbe Mischfarbe, wenn die Summe der Winkel, welche jede der beiden Farben in den verschiedenen Ringen einnimmt, gleich grofs ist.

Auf diese Weise kann man leicht eine grofse Menge von Prüfungen des Gesetzes ausführen, aber freilich immer nur intermittirendes Licht mit intermittirendem vergleichen, und zwar nur unter Umständen, wo die Qualität der beiden Eindrücke, welche abwechseln, in den verschiedenen verglichenen Fällen dieselbe ist.

Um nun die Richtigkeit des Gesetzes auch für solche Fälle zu verificiren, wo intermittirendes Licht mit continuirlichem verglichen werden soll, habe ich die in *Fig. 179* abgebildete Scheibe angewendet, auf welcher Weifs und Schwarz gleich grofse Winkel einnehmen. Bei der Rotation erscheint ein Grau von der halben Lichtstärke des Weifs. Nun kann man andererseits ein solches Grau hervorbringen, wenn man auf eine schwarze Tafel einen weifsen Streifen legt und diesen durch ein doppeltbrechendes Prisma ansieht. Dann erscheinen zwei Bilder des Streifens, jedes aber von der

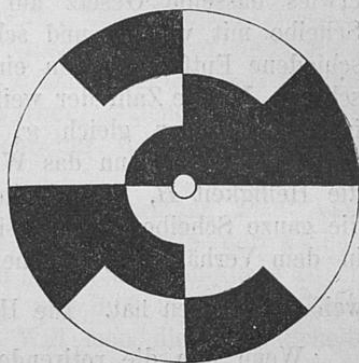


Fig. 179.

halben Helligkeit. Eine gröfsere graue Fläche dieser Art erhält man, wenn man abwechselnd gleich breite weisse und schwarze Streifen auf der Tafel anbringt und sich mit dem doppeltbrechenden Prisma in eine solche Entfernung stellt, dafs die Doppelbilder der weissen Streifen sich genau mit denen der schwarzen decken; dann erscheint die ganze Fläche grau mit der halben Helligkeit des weissen Streifens. Dieses Grau ist nun genau dasselbe, welches durch Umdrehung der Scheibe *Fig 179* entsteht. Natürlich mufs man bei der Vergleichung zu letzterer dasselbe Schwarz und Weiss nehmen, aus dem man die parallelen Streifen gemacht hat, mufs beide Flächen genau gleich beleuchten und auch die rotirende Scheibe durch das doppeltbrechende Prisma betrachten, aber so, dafs sich ihre beiden Bilder nicht trennen, damit auch das Licht der Scheibe der Reflexion und Absorption im Prisma ebenso unterworfen wird, wie das der weissen Streifen. PLATEAU erwies dasselbe Gesetz auf folgendem Wege. Er brachte eine rotirende Scheibe mit weissen und schwarzen Sektoren und eine ganz weisse in verschiedener Entfernung von einem Lichte, bis ihre Helligkeit gleich grofs erschien. Ist die Zahl der weissen Sektoren n , und die Breite jedes einzelnen in Winkelgraden gleich w , so ist die Breite aller zusammengenommen gleich nw . Hat nun das Weiss in der Entfernung 1 von der Lichtquelle die Helligkeit H , und denken wir das Licht, welches es aussendet, über die ganze Scheibe gleichmäfsig verbreitet, so wird die Helligkeit geschwächt in dem Verhältnisse, welches die Fläche der ganzen Scheibe zu der der weissen Sektoren hat. Die Helligkeit wird also $\frac{nw}{360} H$.

Wenn nun die rotirende Scheibe in der Entfernung r von der Lichtquelle gleich hell ist mit einer ganz weissen Scheibe in der Entfernung R , so mufs sein

$$\frac{nw}{360} \frac{H}{r^2} = \frac{H}{R^2} \text{ oder } \frac{r^2}{R^2} = \frac{nw}{360}.$$

Die Messungen PLATEAUS stimmen mit diesem Gesetz auch genügend überein.

Ich selbst habe ausserdem auch noch folgenden Weg eingeschlagen. Wenn man eine mit schmalen schwarzen und weissen Sektoren bedeckte Scheibe hat, so kann man eine scheinbar gleichmäfsige Vertheilung des Lichtes der weissen Sektoren über die ganze Scheibe hervorbringen, indem man zwischen Auge und Scheibe eine convexe Glaslinse bringt, welche die Accommodation verhindert. Steht die Pupille im hinteren Brennpuncte der Linse, so dafs das Bild, welches die letztere von der Scheibe entwirft, in die Fläche der Pupille fällt, und gröfser ist als die Pupille, so erscheint das Licht der hellen Sektoren gleichmäfsig über das ganze durch die Linse gesehene Gesichtsfeld ausgegossen. Nähert man dagegen die Linse der Scheibe, so sieht das Auge mehr oder minder scharf die einzelnen weissen und schwarzen Sektoren, so lange die Scheibe stillsteht. Ist die Scheibe in

Bewegung, so bleibt die Helligkeit gleich groß, man mag die Linse dem Auge oder der Scheibe näher bringen, woraus unmittelbar folgt, daß das ³⁴¹ Auge von dem intermittirenden Licht gleich stark, wie von einer gleichen Quantität continüirlich ankommenden Lichts afficirt wird.

Für farbiges Licht geht die Richtigkeit des oben hingestellten Satzes aus den Versuchen von DOVE hervor über die Erscheinungen, welche rotirende Polarisationsapparate darbieten. Wenn zwischen zwei NICOLSche Prismen doppelbrechende Krystallplatten eingeschaltet sind, so entstehen bekanntlich in vielen Fällen bei gewissen Stellungen der genannten Prismen Farben, die theils gleichmäfsig über das ganze Feld verbreitet sind, theils farbigere Figuren bilden. Bei allen diesen Erscheinungen bekommt aber jeder Punkt der Figur, wie theoretisch in der Lehre von der Polarisation des Lichts nachgewiesen werden kann, genau die Complementärfarbe, wenn man das eine NICOLSche Prisma um einen rechten Winkel dreht. Der Versuch bestätigt es nun, daß bei schneller Rotation des einen NICOL das Auge weiß sieht. Schaltet man noch ein farbiges Glas ein, so erhält man bei zwei um 90° verschiedenen Stellungen des einen NICOL Farben, welche vereinigt die Farbe des Glases geben müssen und bei schneller Rotation auch wirklich geben.

Übrigens wird unser Gesetz für intermittirendes farbiges Licht auch bestätigt durch die Übereinstimmung, welche die Resultate der Farbmischung auf der drehenden Scheibe mit denen haben, die man durch directe Zusammensetzung des farbigen Lichts gewinnt, was in § 20 bei der Lehre von der Farbmischung schon erwähnt ist. Will man die ganze Scheibe gleichmäfsig mit der Farbe überzogen sehen, so pflegt man die Scheibe in Sektoren abzuthelen und den einzelnen Sektoren verschiedene Färbung zu geben, die aber in der Ausdehnung jedes einzelnen Sectors ganz constant sein muß. Dann erscheint bei der Rotation die ganze Scheibe in der Mischfarbe. Die Lichtstärke der Mischfarbe ist aber dabei nach dem obigen Gesetz immer das Mittel aus der Lichtstärke der einzelnen gemischten Farben, und da alle Farbstoffe bei gleicher Beleuchtung dunkler als weiß erscheinen, indem sie nur gewisse Farben, die einen Theil des gesammten weißen Lichts bilden, reflectiren, so ist auch die Mischfarbe immer lichtschwächer, als Weiß, erscheint also, wenn sie wenig gesättigt ist, grau.

Führt man auf einer Farbenscheibe einen farbigen Stern auf andersfarbigem Grunde aus, wie *Fig. 180*, so sieht man bei der Rotation der Scheibe in der Mitte die Farbe des Sterns, am Rande die des Grundes, dazwischen alle continüirlichen Übergangsstufen der einen Farbe durch die Reihe der Mischfarben in die andere. Überhaupt kann man auf den rotirenden Scheiben die Helligkeit oder die Farbmischung von

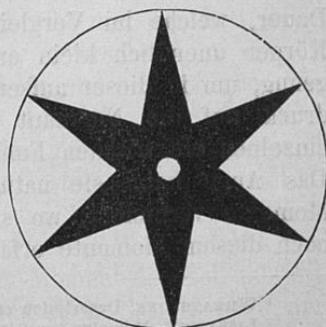


Fig. 180.

der Mitte nach dem Rande hin nach jedem beliebig gewählten Gesetze sich ändern lassen, indem man die Curven, welche die Sectoren begrenzen, passend wählt, wie wir z. B. schon in *Fig. 159* S. 399 dies Mittel benutzt haben, um eine bestimmte Vertheilung des Halbschattens darzustellen.

342 Auf den rotirenden Scheiben beschreiben die einzelnen Punkte Kreislinien. Dieselbe Continuität des Eindrucks findet natürlich auch statt, wenn ein heller Punkt sich in irgend einer anderen geschlossenen Curve bewegt. Überzieht man z. B. eine gespannte Metallsaite mit schwarzer Farbe, macht einen Punkt der Saite wieder frei von dem dunklen Überzuge und beleuchtet ihn passend, so erscheint die Bahn dieses Punktes, wenn die Saite in Schwingungen gesetzt wird, als eine continuirliche, oft sehr verschlungene Lichtlinie. Beschreibt der Punkt dabei einen Weg, der nicht genau in sich zurückkehrt, aber bei jedem folgenden Umlaufe doch der Bahn des früheren Umlaufs sehr nahe kommt, so erscheint dem Auge eine lichte Linie, die allmählich ihre Gestalt und Lage verändert. In derselben Weise hat WHEATSTONE¹ die Schwingungsformen rechteckig prismatischer Stahlstäbe, LISSAJOUS² die Schwebungen von Stimmgabeln beobachtet. Dasselbe Princip hat in der Physik noch eine große Zahl von anderen nützlichen Anwendungen erhalten.

Ist die Helligkeit des bewegten Punktes in seiner Bahn constant, aber die Geschwindigkeit verschieden, so erscheint die Lichtlinie an den Punkten am hellsten, wo die Geschwindigkeit am geringsten ist. An solchen Stellen nämlich verweilt der helle Punkt verhältnißmäßig längere Zeit, und sein Licht wirkt deshalb auch längere Zeit auf die entsprechenden Stellen der Netzhaut als an Stellen größerer Geschwindigkeit. Beobachtet man z. B. eine beleuchtete schwingende Saite, so erscheint diese am hellsten da, wo sie am weitesten von der Gleichgewichtslage entfernt ist, und wo ihre Geschwindigkeit für einen Augenblick gleich Null wird.

Hierher gehören auch die eigenthümlichen Wirkungen intermittirender Beleuchtung, welche am schärfsten bei den regelmäsig wiederholten Funken der magnetelektrischen Inductionsapparate auftreten, sowohl bei denen mit rotirendem Anker, wie bei den NEEFSchen Apparaten mit schwingender Feder. Jeder einzelne Funken dieser Apparate hat eine unbestimmbar kurze Dauer, welche im Vergleich mit der Dauer aller Bewegungen materieller Körper unendlich klein erscheint, doch ist das Licht dieser Funken stark genug, um in dieser außerordentlich kurzen Zeit einen wahrnehmbaren Eindruck auf die Netzhaut zu machen. Bei der Erleuchtung durch einen einzelnen elektrischen Funken erscheinen alle bewegten Körper stillstehend. Das Auge kann sie natürlich nur so wahrnehmen, wie sie sich in dem Momente verhielten, wo sie beleuchtet waren, von ihrer Stellung vor und nach diesem Momente erfährt es nichts. Ist nun die Dauer der Beleuchtung

¹ WHEATSTONE, Description of the Kaleidophone. *New. Quarterly Journal.* I. 1827.

² LISSAJOUS, Mémoire sur l'étude optique ces mouvemens vibratoires. *Ann. chim. phys.* Sér. III. T. LI. 1857.

so kurz, daß während derselben keine Verschiebung des bewegten Körpers von wahrnehmbarer Größe eintreten konnte, so erscheinen seine Umrisse ganz so scharf begrenzt, wie es bei vollkommener Ruhe der Fall sein würde.

Wenn sich nun eine Reihe von elektrischen Funken in sehr kleinen Zwischenzeiten folgt, so erscheinen ruhende Körper bei dieser Beleuchtung ganz so, wie bei continuirlichem Lichte; bewegte Körper aber erscheinen mehrfach. Jeder einzelne Funke zeigt nämlich den bewegten Körper in der Lage, die er in dem betreffenden Augenblicke einnimmt, und da alle diese Eindrücke einen Augenblick dauern, so sind sie alle gleichzeitig vorhanden und lassen den bewegten Körper als mehrfach vorhanden erscheinen. Je schneller die Bewegung des gesehenen Körpers ist, desto weiter rücken seine Bilder aus einander, weil der Weg, den er während jeder Intermission des Lichts zurücklegt, größer wird. 343

Ebenso erscheinen nun mehrfache Bilder, wenn nicht die Objecte, sondern das Auge bewegt wird. Wenn sich im Gesichtsfelde ein continuirlich leuchtender Punct befindet, und wir das Auge bewegen, so rückt dabei das Bild des lichten Punctes auf eine andere Stelle der Netzhaut hinüber. Während der Bewegung trifft es nach einander alle continuirlich an einander stoßenden Punkte einer Linie, die den Ort seiner ersten und seiner letzten Lage verbindet; alle diese Punkte werden erregt, und es muß dadurch für einen Augenblick die Empfindung in der Netzhaut entstehen, welche bei ruhendem Auge eine lichte Linie hervorbringen würde. Gewöhnlich achten wir nicht auf diese Empfindung, weil sie eben jede Bewegung des Auges bei der Gegenwart lichter Objecte im Gesichtsfelde begleiten muß, wir bemerken es aber, wenn ungewöhnlicher Weise bei intermittirendem Lichte die Continuität dieser Linie unterbrochen ist. Benutzen wir als lichtiges Object die Stelle des Inductionsapparates, wo die Funken überschlagen, so erscheint bei Bewegungen des Auges der helle Punct vervielfältigt. Denken wir uns nämlich auf der Netzhaut die Linie gezeichnet, welche das Bild der Funkenstelle beschreibt, so werden von den intermittirenden Funken nur einzelne Stellen dieser Linie erregt, denen entsprechend wir Bilder in das Gesichtsfeld projiciren.

Wenn ein bewegter Körper, den wir bei intermittirendem Lichte betrachten, eine in sich zurücklaufende Bahn beschreibt und zur Zeit jedes Aufblitzens genau an derselben Stelle sich befindet, so erscheint er einfach und stillstehend. Zum Beispiel erscheint die schwingende Feder oder der rotirende Anker der bekannten magnetelektrischen Inductionsapparate beim Lichte ihrer eigenen Funken still zu stehen. Dasselbe geschieht, wenn irgend ein anderer Körper von periodisch veränderlicher Gestalt durch intermittirendes Licht beleuchtet wird, und die Beleuchtung immer mit denselben Phasen seiner Veränderung zusammentrifft; z. B. wenn ein Wasserstrahl, der sich in Tropfen auflöst, so beleuchtet wird, daß im Moment der Beleuchtung ein neuer Tropfen immer wieder genau an derselben Stelle ist, so sieht der Beobachter den Strahl in stillstehende Tropfen aufgelöst. Dies geschieht,

wenn die Periode der Beleuchtung genau gleich ist der Periode der Tropfenbildung oder einem Multiplum derselben. Fällt die Periode der Beleuchtung nicht genau zusammen mit der Periode der Tropfenbildung, oder einem Multiplum derselben, sondern ist jene ein Weniges länger, so tritt eine scheinbare langsame Bewegung der Tropfen ein, welche die wirkliche Bewegung nachahmt, aber mit sehr verringerter Geschwindigkeit. Es werden dann von den folgenden Funken nicht genau dieselben Phasen der Tropfenbildung beleuchtet, wie von dem ersten, sondern immer weiter fortgeschrittene Zustände der folgenden Perioden dieser veränderlichen Erscheinung. Ist die Periode der Beleuchtung dagegen etwas kürzer, als die Periode der Tropfenbildung oder ein Multiplum derselben, so sieht der Beobachter die Erscheinung rückwärts vor sich gehen. Die Tropfen steigen zum Strahle hinauf und gehen in diesen über. Durch diese Verhältnisse wird es möglich, diese und andere periodische Erscheinungen, welche so schnell vor sich gehen, ³⁴⁴ daß der Beobachter sie mit dem Auge nicht unmittelbar erkennen kann, in ihren einzelnen Stadien sichtbar zu machen und zu analysiren. Einige künstlich hervorgebrachte Erscheinungen derselben Art werden unten bei Beschreibung der Apparate auseinandergesetzt werden.

Die Dauer des Lichteindrucks auf das Auge bestimmt man am leichtesten mit Hülfe von Farbenscheiben, die eine veränderliche und meßbare Umlaufgeschwindigkeit haben. Mit Sicherheit läßt sich dabei nur die Umlaufgeschwindigkeit bestimmen, welche nöthig ist, um der Scheibe ein ganz gleichmäßiges Ansehen zu geben. Es zeigt sich dabei, daß sie desto größer gemacht werden muß, je größer die Lichtstärke ist. Auch scheinen die verschiedenen Farben dabei Unterschiede zu zeigen. PLATEAU liefs bei gewöhnlichem Tageslichte eine mit 12 weissen oder farbigen und 12 gleich breiten schwarzen Sektoren versehene Scheibe rotiren. Die Dauer des Vorübergangs eines schwarzen Sectors war also der 24. Theil der Umlaufzeit der Scheibe. Diese Zeit war, wenn die Scheibe einen gleichmäßigen Eindruck machte

	PLATEAU.	EMSMANN. ¹
Für Weiß	0,191 Secunden	0,25 Secunden
„ Gelb	0,199 „	0,27 „
„ Roth	0,232 „	0,24 „
„ Blau	0,295 „	0,22 bis 0,29.

Auf die Vergleichung der verschiedenen Farben wird hierbei kaum viel Werth gelegt werden können, da ein Mittel, ihre scheinbare Helligkeit genau gleich zu machen, fehlte, und die Helligkeit einen sehr großen Einfluß auf die Dauer der Nachwirkung hat. Man erkennt dies leicht, wenn man, einige Fuß entfernt von einer Lampe, einen Farbenkreisel in Bewegung setzt, dessen Geschwindigkeit eben hinreicht, einen gleichmäßigen Eindruck zu erzeugen, und dann die Lampe nähert, sogleich fängt die rotirende Fläche

¹ EMSMANN, *Pogg. Ann.* XCI. 611. 1854.

wieder an zu flimmern. Bei directer Sonnenbeleuchtung muß man noch größere Drehungsgeschwindigkeiten anwenden. Übrigens sind PLATEAUS Zahlen auffallend groß. Ich selbst finde, daß bei stärkstem Lampenlicht, welches eine Scheibe mit gleich breiten weißen und schwarzen Sektoren beleuchtet, der Vorübergang des Schwarz nur etwa $\frac{1}{48}$ Secunde und auch bei sehr schwacher Beleuchtung im Lichte des Vollmonds nur $\frac{1}{20}$ Secunde zu dauern braucht, wenn alles Flimmern authören soll. Übrigens hat PLATEAU schon bemerkt, daß, wenn man das Verhältniß zwischen der Breite der weißen und der schwarzen Sektoren verändert, aber die Zahl der Sektoren constant läßt, die Umlaufzeit dieselbe ist, bei der der Eindruck gleichmäßig wird. Man kann dies sehr leicht nachweisen durch eine Scheibe, wie *Fig. 181*, an welcher die schwarzen Sektoren nach der Mitte, die weißen am Rande breiter sind. Das Flimmern hört bei steigender Umlaufgeschwindigkeit in allen Abtheilungen der Scheibe nahe gleichzeitig auf. Bei breiteren weißen Sektoren ist die Empfindung stärker und sinkt deshalb schneller, sobald der Reiz fortfällt; daher die Pause, d. h. die Breite des schwarzen Sector, kleiner sein muß, als bei schmalen weißen Sektoren. Es ist also wohl besser, bei den Messungen nach der Größe einer ganzen

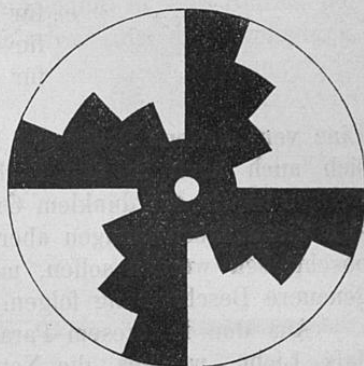


Fig. 181.

345

Periode der Beleuchtungsänderung zu fragen, d. h. nach der Summe der Dauer des Vorübergangs eines weißen und schwarzen Sectors. Diese ist in meinen Versuchen bei stärkstem Lampenlicht also $\frac{1}{24}$, bei schwachem Licht $\frac{1}{10}$ Secunde gewesen. LISSAJOUS, welcher den Weg eines sehr hellen Lichtpunctes beobachtete, der die Bewegungen schwingender Stimmgabeln mitmachte, fand der helleren Beleuchtung entsprechend eine noch kürzere Zeit, nämlich $\frac{1}{30}$ Secunde für die Zeit, während welcher die ganze Curve continuirlich erschien. Nur darf man das Auge nicht bewegen; bei leisen Bewegungen desselben tauchen sehr leicht wieder Flecken auf.

Soll also eine rotirende Scheibe einen ganz gleichmäßigen Eindruck machen, so muß man sie 24 bis 30 Mal in der Secunde umlaufen lassen. Aber man kann dasselbe auch durch geringere Umlaufgeschwindigkeiten erreichen, wenn man die Zeichnung in gleichen Winkelabständen regelmäßig wiederholt. So wird z. B. auf der Scheibe *Fig. 179* das Schwarz und Weiß der 8 Sektoren des äußersten Ringes sich schon bei 6 Umläufen der Scheibe zu gleichmäßigem Grau verbinden, das des mittleren Ringes erst bei 12, das des innersten erst bei 24 Umläufen. Schwerer ist es, die Zeit zu bestimmen, während welcher der Eindruck in abnehmender Stärke nachdauert, ehe er ganz verlischt. Auch diese Zeit ist von der Lichtstärke abhängig, wie schon das früher Gesagte erkennen läßt. Die Nachdauer des hellen Sonnenbildes kann selbst bis zu einigen Minuten dauern. Während also die Wirkung

hellen Lichts im Anfang am schnellsten abnimmt, hat sie doch im Ganzen die längste Dauer, ähnlich wie ein heißer Körper in kühler Umgebung um desto mehr Temperaturgrade in gleicher Zeit sich abkühlt, je heißer er ist, aber auch desto längere Zeit braucht, ehe er seine höhere Temperatur ganz verloren hat. PLATEAU hat an seinen Farbenscheiben auch in dieser Beziehung Messungen angestellt, welche die Zeit des Vorübergangs eines schwarzen Sectors ergeben, wenn die Farbe der hellen Sectors sich über die schwarzen so ausgebreitet hatte, daß das Schwarz nirgends mehr rein erschien. Es ergab sich

für Weiß	0,35	Secunden
für Gelb	0,35	„
für Roth	0,34	„
für Blau	0,32	„

Eine verschiedene Dauer der Nachwirkung für die verschiedenen Farben zeigt sich auch noch in den Farbenveränderungen, welche das Nachbild eines weißen Lichts auf dunklem Grunde erleidet, ehe es ganz verschwindet. Da sich diese Erscheinungen aber mit denen, welche im folgenden Paragraphen beschrieben werden sollen, mannigfaltig vermischen, so möge erst dort ihre genauere Beschreibung folgen.

346 Aus den in diesem Paragraphen geschilderten Thatsachen geht hervor, daß Licht, welches die Netzhaut getroffen hatte, im Sehnervenapparate eine primäre Wirkung hinterläßt, die erst in den nächstfolgenden Augenblicken sich in Empfindung umsetzt. Die Größe der primären Veränderung, die ein momentaner Lichteindruck zurückerläßt, hängt nur von der Quantität Licht ab, die auf den betreffenden Theil der Netzhaut gefallen ist, wobei es einerlei ist, ob sehr intensives Licht eine kurze Zeit, oder schwächeres eine längere Zeit gewirkt hat, vorausgesetzt nur, daß die Zeit der Einwirkung überhaupt kleiner als $\frac{1}{30}$ Secunde gewesen ist. Die primäre Gesamtwirkung sehr intensiven Lichts fällt also nicht verhältnißmäßig schwächer aus, als die mäßigen Lichts von entsprechend längerer Dauer, wie dies doch bei dauernder Empfindung des Lichts von verschiedener Stärke der Fall ist.

Es liegt hierin kein Widerspruch, wie es wohl scheinen könnte, denn den Mangel der Proportionalität fanden wir zwischen der objectiven Lichtintensität und der fertig ausgebildeten Empfindung, hier haben wir es dagegen nur zu thun mit der augenblicklichen primären Wirkung, die erst später in Empfindung übergehen wird, und es ist kein Hinderniß anzunehmen, daß die vermuthlich photochemische Wirkung in der Nervenmasse einem anderen Gesetze der Größe folge, als die secundäre Wirkung, die Empfindung. Das ganze Verhältniß wird vielleicht am klarsten durch den Vergleich mit einem Magneten, der in einem galvanischen Multiplicator aufgehängt ist, und durch einen intermittirenden Strom von hinreichend schnellen Intermissionen abgelenkt wird. Auch in diesem Falle hängt die Ablenkung nur ab von der

gesamten Menge von Elektrizität, welche in der Zeiteinheit durch den Draht fließt, ohne doch dieser Menge nothwendig proportional zu sein. Auch hier existirt aber eine der Elektrizitätsmenge jedes einzelnen momentanen Stromes proportionale Wirkung, nämlich die kleine Geschwindigkeit, welche er dem Magneten im Sinne der Ablenkung mittheilt, und welche bis zum Eintritt des nächsten Stromes durch die Wirkung des Erdmagnetismus wieder aufgehoben sein muß, wenn die Ablenkung des Magneten constant bleiben soll. Der Magnet erscheint continuirlich ruhend abgelenkt, wenn die Schwankungen in seiner Lage, welche die einzelnen Stromstöße hervorbringen, zu klein sind, um wahrgenommen zu werden; so giebt auch ein intermittirendes Licht eine continuirliche Empfindung, wenn die Schwankungen in der Stärke der Empfindung kleiner sind, als die kleinsten wahrnehmbaren Stufen der Empfindung.

Was die Einrichtung der rotirenden Scheiben betrifft, welche MUSCHENBROEK¹ zuerst erwähnt, so sind die einfachsten die Kreisel. Ich pflege für die meisten Versuche einen einfachen aus Messing gedrehten Kreisel zu benutzen, dessen Querschnitt in *Fig. 182* in $\frac{1}{3}$ Größe dargestellt ist. Er wird nur mit der Hand in Gang gebracht. Man kann ihn deshalb in jedem Augenblicke leicht und ohne Vorbereitung in Bewegung setzen, seine Geschwindigkeit nach Belieben verstärken oder mäßigen, aber allerdings entspricht das Maximum der Geschwindigkeit,

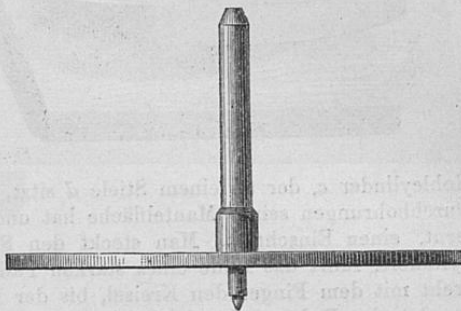


Fig. 182.

in der Secunde, was man ihm mit den Fingern mittheilen kann, nur ungefähr 6 Umdrehungen³⁴⁷ in der Secunde, wonach er 3 bis 4 Minuten in Bewegung bleibt. Wegen der geringen Rotationsgeschwindigkeit bekommt man einen ganz gleichmäßigen Lichteindruck nur, wenn die Scheiben in 4 oder 6 Sektoren getheilt und in jedem die gleiche Vertheilung von Farben, Licht und Schatten angebracht ist. Ist die Zahl der gleichen Wiederholungen der Zeichnung eine geringere, so giebt es wenigstens bei starker Beleuchtung ein mehr oder weniger schillerndes Ansehen der Scheibe. Die Zeichnungen kann man selbst während des Ganges der Scheibe leicht darauf werfen und kann auch leicht Veränderungen hervorbringen, wenn man auf eine volle Scheibe eine mit ausgeschnittenen Sektoren wirft, deren Lage auf der unteren man durch Hinstreifen mit den Fingern oder durch Blasen mit dem Munde verändern kann; so lassen sich während des Ganges der Scheibe sehr mannigfaltige Variationen hervorbringen.

Giebt man der Scheibe z. B. gleich breite blaue und rothe Sektoren, und legt darauf eine Scheibe mit gleich breiten Sektoren, von denen man den ersten, dritten, fünften u. s. w. schwarz gemacht hat, während der zweite, vierte, sechste u. s. w. fortgeschnitten ist, so wird bei der Rotation die ganze Scheibe blau sein, wenn die schwarzen Sektoren der oberen Scheibe auf die rothen der unteren fallen und diese verdecken, dagegen wird die Scheibe roth erscheinen, wenn die schwarzen Sektoren der oberen Scheibe auf die blauen der unteren fallen; in den Zwischenlagen erhält man verschiedene Mischungen von Roth und Blau und kann daher während des Ganges der Scheibe die eine Farbe allmählich in die andere übergehen lassen, wenn man durch Überstreifen mit dem Finger oder durch Blasen die Lage der oberen Scheibe verändert. Begrenzt man die verschiedenen Sektoren nicht durch gerade, sondern durch krumme oder gebrochene Linien, so kann man leicht sehr mannigfache und bunte Wechsel von Ringsystemen erzeugen.

¹ MUSCHENBROEK, Introductio. § 1820. 1760.

Um den Kreiseln gröfsere Geschwindigkeit zu geben, müssen sie durch ein um ihren Stiel geschlungenes Band, welches man abzieht, in Bewegung gesetzt werden. Die einfachste Einrichtung dazu ist die in *Fig. 183* abgebildete. Es dient dazu ein hölzerner

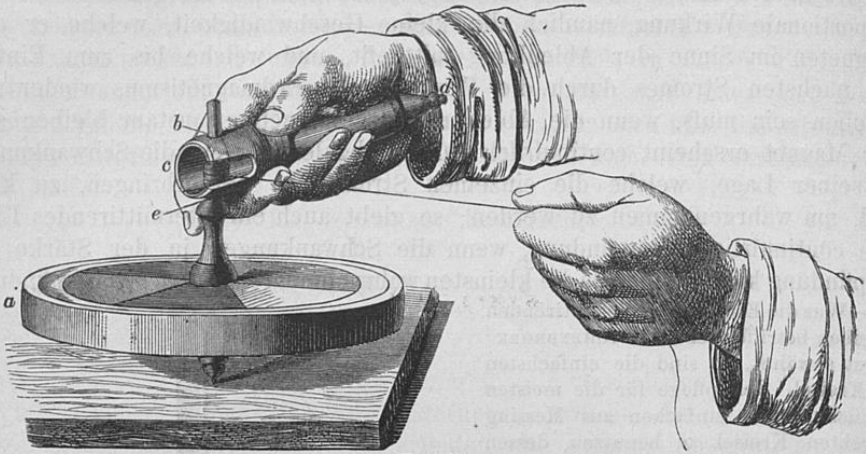


Fig. 183.

Hohlcylinder *c*, der an einem Stiele *d* sitzt, bei *b* und *e* zwei einander gegenüberstehende Durchbohrungen seiner Mantelfläche hat und von beiden, um einen rechten Winkel entfernt, einen Einschnitt. Man steckt den Stiel *b* des Kreisels durch die Öffnungen des Cylinders, führt das Ende eines starken Fadens durch eine Durchbohrung des Stiels und dreht mit dem Finger den Kreisel, bis der Faden aufgewickelt ist. Der Theil des Stiels, um den der Faden aufgewickelt ist, wird dadurch so dick, daß er nicht mehr aus der Hülse *c* hinausgleiten kann. Hält man nun den Kreisel mittelst der Hülse nahe über einem Tische, zieht den Faden kräftig ab, so kommt der Kreisel in schnelle Rotation und fällt, sobald der Faden abgewickelt ist, auf den Tisch herab, wo er lange weiter

läuft. Der in *Fig. 184* nach seiner Zusammensetzung abgebildete Kreisel ist so ein-

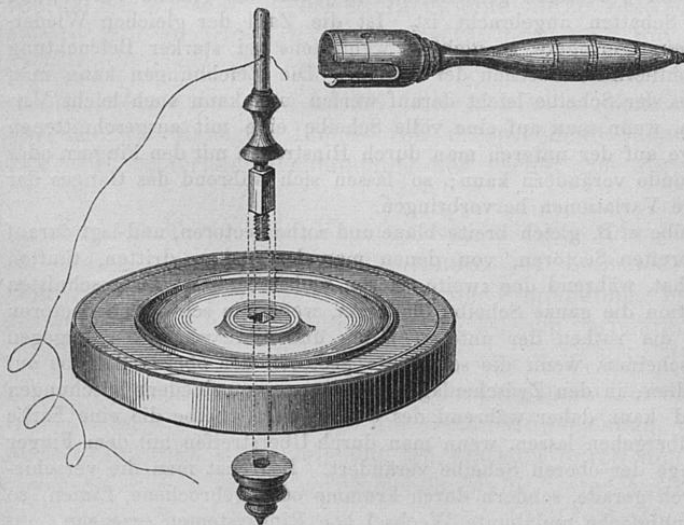


Fig. 184.

gerichtet, daß man die Scheiben mittelst des Stiels fest klemmen kann, wie dies bei den Versuchen von MAXWELL zur Bestätigung des NEWTONSchen Gesetzes der Farbenmischung nöthig ist. Man braucht dazu eine Reihe kleinerer und größerer runder Scheiben aus steifem Papier mit einer centralen Öffnung und einem radialen Schlitz, wie *Fig. 185* zeigt. Jede Scheibe wird nur mit einer Farbe gleichmäßig überzogen; legt man zwei oder mehrere auf einander und schiebt sie gegenseitig durch

ihre Schlitzte hindurch, so werden auf jeder Seite Sectoren der einzelnen Scheiben von beliebig veränderlicher Breite sichtbar, so daß das Mischungsverhältniß der Farben continuirlich geändert werden kann.

Die vollkommenste Construction für einen Kreisel, der nur bei sehr schneller Bewegung gebraucht werden soll, bietet der BUSOLDSche Farbenkreisel dar (*Fig. 186*). Er besteht aus einer fünf Pfund schweren Scheibe, die aus einer Legirung von Zink und Blei gegossen ist, ein Decimeter im Durchmesser. Die Axe von Messing läuft unten auf einer fein abgerundeten Spitze von nicht gehärtetem Stahl. Der cylindrische Theil der Axe ist rauh gemacht, damit die Schnur fest darauf liegen kann. Will man den Kreisel in Bewegung

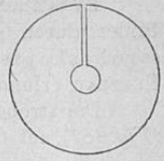


Fig. 185.

setzen, so wird seine Axe nach Umwicklung mit der Schnur in die Einschnitte der eisernen Arme *dd* eingelegt, ein Teller untergestellt und mit der rechten Hand die Schnur kräftig abgezogen, während die linke sich gegen den Hebel *e* stützt. Der Kreisel muß vor dem Abziehen möglichst nah am Rande des Tellers stehen, die Schnur einen halben Fuß kürzer sein, als die ausgespannten Arme messen, und an ihrem Ende mit einer Handhabe

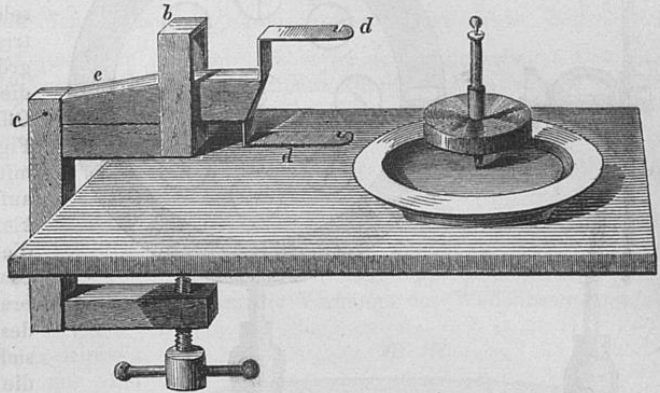


Fig. 186.

versehen sein. Wenn der Kreisel läuft, zieht man den Teller mit dem Kreisel unter den Armen des Hebels *e* hervor. Dieser, welcher um eine Axe bei *c* drehbar ist, hebt sich dabei nach oben. Bei kräftigem Abziehen der Schnur kann man bis 60 Umdrehungen in der Secunde hervorbringen, und die Bewegung hält 45 Minuten an.

Außer den Kreiseln hat man nun auch vielfältig Scheiben benutzt, deren Axe in zwei Zapfenlagern läuft, und die entweder durch ein Uhrwerk, oder eine unendliche 349 Schnur, oder durch Abziehen einer Schnur wie die Kreisel in Bewegung gesetzt werden.

Eine für messende Versuche bestimmte wesentliche Verbesserung ist ein von LUMMER und BRODHUN neuerdings construirter Rotationsapparat, auf welchem zwei ausgeschnittene Scheiben laufen, deren Stellung zu einander während der Rotation allmählig geändert werden kann. Die Beschreibung wird in den photometrischen Berichten der Deutschen phys. techn. Reichsanstalt gegeben werden.

Im Allgemeinen tritt bei diesen Apparaten die Unbequemlichkeit ein, daß man die Scheiben nicht wechseln kann, ohne den Apparat anzuhalten und die Scheibe aus ihren Axenlagern zu entfernen. Andererseits hat man den Vortheil, die Scheibe in verticaler Stellung umlaufen lassen zu können, wobei ein großes Auditorium sie gleichzeitig sehen kann, was bei den Kreiseln nicht so leicht zu erreichen ist. Mischung der Farben hat MONTIGNY auch durch ein rotirendes Prisma erreicht, dessen objectives Spectrum er über einen weißen Schirm laufen liefs.

Das Thaumatrope ist ein rechteckiges Täfelchen, welches man um eine Axe, die durch die Mitte der längeren Seiten geht, rotiren läßt. Auf die eine Seite ist etwa ein Vogel gemalt, auf die andere der Käfig. Wenn man schnell rotiren läßt, scheint der Vogel im Käfig zu sitzen. Es ist jetzt als Kinderspielzeug bekannt, erfunden von Dr. PARIS.¹

¹ PARIS, *Edinb. Journal of Science*. VII. 87. *Pogg. Ann.* X. 480. 1827.

Es schliessen sich hier die zusammengesetzteren Apparate an, welche rotirende Bilder durch gleichzeitig rotirende Spalten sehen lassen. Dazu gehören zunächst die stroboskopischen Scheiben von STAMPFER, welche gleichzeitig und unabhängig von PLATEAU erfunden und mit dem Namen des Phänakistokops belegt wurden.¹

Die stroboskopischen Scheiben sind Papierscheiben von 6 bis 10 Zoll Durchmesser (Fig. 187), auf denen sich, im Kreise gestellt und in gleichen Entfernungen von einander,

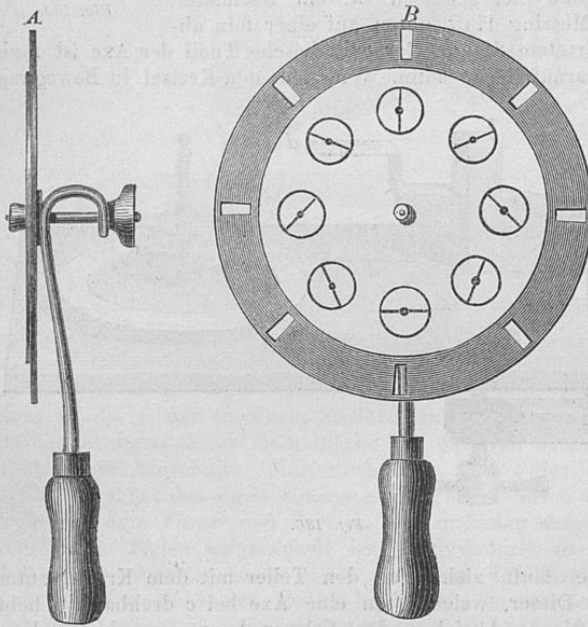


Fig. 187.

eine Anzahl (8 bis 12) von Figuren befindet, welche eine Reihe von Momenten irgend einer periodisch wiederkehrenden Bewegung darstellen. Eine solche Scheibe wird concentrisch auf eine zweite etwas gröfsere dunkle Scheibe gelegt, die am Rande ebenso viel Öffnungen hat, als die erstere Figuren, und beide zusammen mittelst einer Schraubenmutter auf das vordere Ende einer kleinen eisernen Axe befestigt, die im oberen Ende eines passenden Handgriffs angebracht ist. Beim Gebrauche des Instruments stellt man sich vor einen Spiegel, wendet die Scheibe mit den Figuren gegen diesen, stellt das Auge so, dafs man durch eines der Löcher am Rande der gröfsere Scheibe das Spiegelbild der Figuren sieht, und setzt nun die Scheiben in Rotation. Dann

scheinen die Figuren, die man im Spiegel sieht, die Bewegung auszuführen, deren Acte dargestellt sind, ohne sich dabei von der Stelle zu bewegen.

350 Bezeichnen wir diese Öffnungen mit Ziffern, und nehmen wir an, dafs das Auge zuerst durch die Öffnung 1 sehe, dann, wenn die Scheibe weiter rotirt, durch die Öffnung 2 u. s. w., und bezeichnen wir ferner die Figuren, die auf den zu Öffnung 1, 2, 3 u. s. w. gehenden Radien stehen, mit denselben Ziffern, so wird zunächst der Beobachter, indem er durch die Öffnung 1 nach dem Spiegel sieht, auf dem Radius, der im Spiegelbilde der Scheibe nach dem Spiegelbilde seines Auges hinweist, die Figur 1 erblicken. Wenn er nun die Scheibe dreht, so geht die Öffnung 1 vor seinem Auge vorbei, das Spiegelbild wird ihm zunächst durch die dunkle Pappscheibe ganz verdeckt, und erst wenn die Öffnung 2 vor seinem Auge ankommt, erblickt er es wieder. Nun steht aber die Figur 2 an demselben Orte, wo sich vorher Figur 1 befand, nämlich auf dem Radius, der vom Mittelpunct der Scheibe nach dem Auge des Beobachters geht. Es folgt wieder Dunkelheit, bis Öffnung 3 vor das Auge tritt und nun Figur 3 an demselben Platze erscheint, wo vorher 1 und 2 sich befanden. Wären nun diese Figuren alle einander gleich, so würde der Beobachter eine Reihe von einander getrennter, unter sich aber gleicher Gesichtseindrücke erhalten, welche bei hinreichend schneller Wiederholung in eine andauernde Empfindung ver-

¹ PLATEAU schickte schon im November 1832 durch QUETELET ein Exemplar an FARADAY; STAMPFER verfertigte die erste im December 1832. PLATEAU beschrieb seine Erfindung in einem vom 20. Januar 1833 datirten Schreiben in der *Correspondance math. et physique de l'observat. de Bruxelles* VII. 365; STAMPFER in einer besonderen Schrift: „Die stroboskopischen Scheiben oder optischen Zauberscheiben, deren Theorie und wissenschaftliche Anwendung“, deren Vorrede von Juli 1833 datirt ist.

schmelzen, die einem ruhenden Objecte entspricht. Wenn die Figuren dagegen von einander ein wenig verschieden sind, so verschmelzen die getrennten Lichteindrücke auch zu dem Bilde eines Gegenstandes, aber dieser verändert sich scheinbar fortdauernd, so wie es die Reihenfolge der Bilder mit sich bringt.

Wenn die Zahl der Figuren nicht gleich der der Löcher ist, so erscheinen die Figuren in vor- oder rückschreitender Bewegung. Denken wir uns n Löcher und m Figuren, die Zahlen m und n aber nur wenig verschieden, und zu Anfang eine der Figuren auf dem Radius stehend, der nach dem Auge des Beobachters, welches durch eine Öffnung schaut, hinweist. Wird die Scheibe um den Bogen $\frac{2\pi}{n}$ gedreht, so tritt wieder eine Öffnung vor das Auge des Beobachters. Die zweite Figur ist dann aber um einen Bogen $\left(\frac{2\pi}{n} - \frac{2\pi}{m}\right)$ von dem genannten Radius entfernt. Ist dieser Bogen nun klein genug, so daß die zweite Figur sich jetzt näher an dem erstgesehenen Orte der ersten Figur befindet, als jede andere jetzt sichtbare Figur, so identificiren wir die jetzt gesehene zweite mit der früher gesehene ersten Figur und glauben, die letztere um das entsprechende Bogenstück fortbewegt zu sehen. Gewöhnlich macht man m gleich $n - 1$ oder gleich $n + 1$. Im ersteren Falle schreiten die Figuren in dem Sinne fort, wie die Scheibe sich dreht, im zweiten Falle entgegengesetzt.

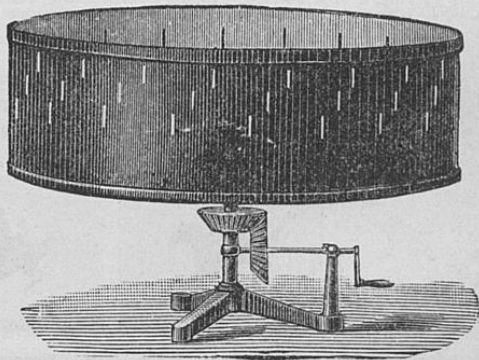
Je schmaler man die Öffnungen der größeren Scheibe macht, desto schärfer begrenzt werden die Bilder gesehen, aber desto lichtschwächer werden sie auch. Um die Bilder objectiv an die Wand zu werfen, hat UCHATIUS¹ einen Apparat construirt. Sehr nützlich verwendet sind sie von J. MÜLLER², um die Vorgänge der Wellenbewegung zu versinnlichen.

Das Dädaleum von W. G. HORNER ist ein ähnliches Instrument, nur sind die Löcher auf dem Mantel eines hohlen Cylinders angebracht, und die Bilder theils auf der Innenfläche des Mantels (am besten transparent), theils auf der Grundfläche.

Eine jetzt viel gebrauchte Form dieses Instruments ist die in Fig. 188 dargestellte. Die Bilder werden auf langen Papierstreifen angeordnet, die man in den Hohlcyliner hineinlegt, so daß sie sich dem unteren Theile seiner inneren Wand anlegen und bei der Rotation durch die Centrifugalkraft fest angedrückt werden. Man setzt die Trommel in Bewegung und betrachtet die Bilder durch eine der Seitenöffnungen.

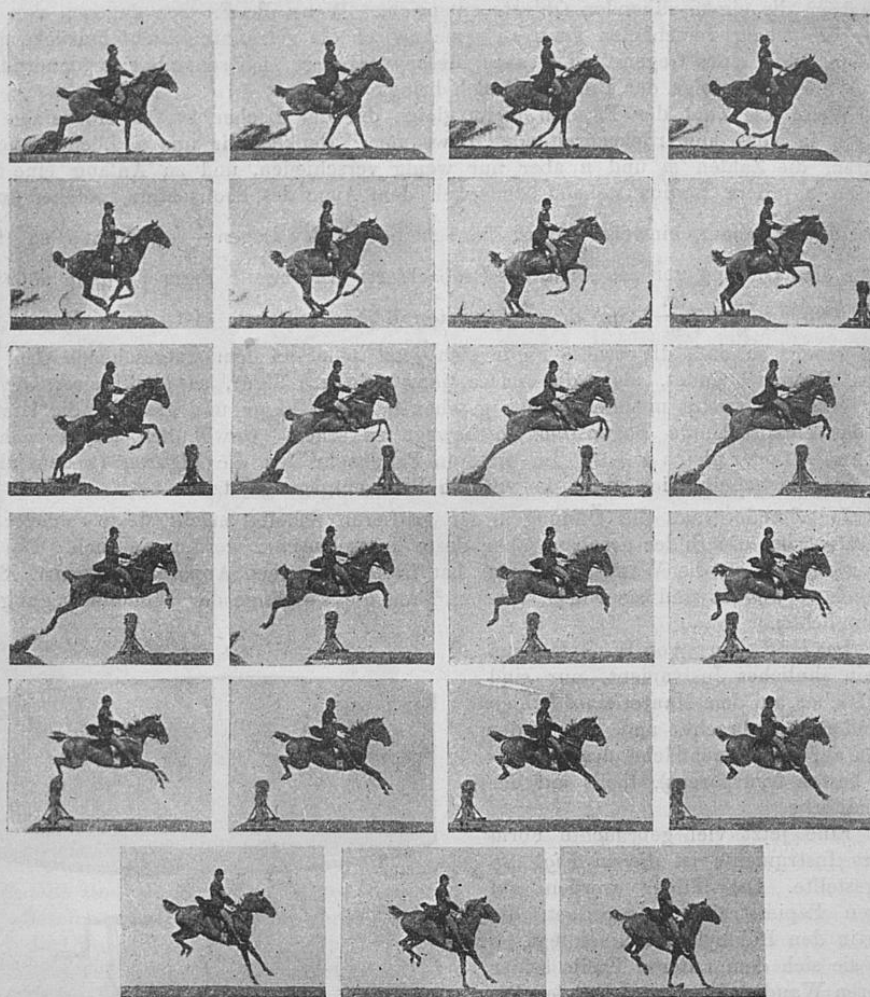
Durch eine Öffnung der mittleren Reihe angesehen scheinen sie gewöhnlich auf ihrer Stelle zu bleiben, durch eine Öffnung der oberen oder unteren Reihe gesehen aber vorwärts oder rückwärts fortzuschreiten. Ausgezeichnet vollendete Bilder sind durch Momentphotographien von dem Amerikaner Herrn MUYBRIDGE und von Herrn O. ANSCHÜTZ in Deutschland erzeugt worden, die natürliche Bewegungen von Menschen und Thieren in außerordentlicher Treue wiedergeben. Die Figuren 189 zeigen eine solche Reihe von dem letzteren entworfen. Diese Bilder sind auch für das Studium der thierischen Bewegungen wichtig.

Fig. 188.

Durchmesser des Cylinders $57\frac{1}{2}$ cm.

¹ UCHATIUS, *Sitzungsberichte der k. k. Akad. zu Wien*. X. 482. 1853.

² J. MÜLLER, *Pegg. Ann.* LXVII. 271. 1846.



Figuren 189.

350 Bei den bisher beschriebenen Apparaten rotiren die Figuren und die Öffnungen mit derselben Winkelgeschwindigkeit; eine andere Reihe von Erscheinungen zeigt sich, wenn sie mit verschiedener Winkelgeschwindigkeit rotiren.

Einer der einfachsten Apparate dieser Art ist der in *Fig. 190* dargestellte Kreisels von J. B. DANCER in Manchester, wenn man auf dem Vorsprung der Axe noch eine zweite Scheibe ruhen läßt, in welcher Öffnungen verschiedener Gestalt angebracht sind, und an deren Rand ein Stück Faden angeknüpft ist, wie es *Fig. 190* darstellt. Diese obere Scheibe rotirt langsamer als der Kreisels wegen des Luftwiderstandes an dem mit ihr herumfliegenden Faden, während sie durch die Reibung an der Axe des Kreisels mitgenommen wird. Enthält die untere Scheibe mehrere verschiedengefärbte Sektoren, so sieht man die in die obere Scheibe eingeschnittenen Figuren vervielfältigt und in den verschiedenen Farben der unteren Scheibe ausgeführt, ein sehr buntes Bild, was bald continuirlich, bald springend sich zu bewegen scheint.

Betrachten wir eine einzelne Öffnung der oberen Scheibe und rechnen die Drehungswinkel von der Stelle ab, wo sie sich zu Anfang der betrachteten Zeit befindet. Ein in der verlängerten Axe des Kreisels befindliches Auge wird durch die Öffnung eine der Farben der unteren Scheibe erblicken, und diese Stelle gelte auf der unteren Scheibe als Nullpunct für die Messung der Winkel. Die obere Scheibe laufe m Male, die untere n Male in der Secunde um, beide in gleicher Richtung: so ist der Bogen, um den sich jeder Punct der oberen Scheibe in der Zeit t fortbewegt gleich $2\pi m t$, und für die Puncte der unteren Scheibe, ist derselbe gleich $2\pi n t$. Von zwei Punkten der oberen und unteren Scheiben die anfangs über einander standen, ist also nach der Zeit t der untere um den Bogen $2\pi(n-m)t$ voraus, und daraus folgt, daß durch die Öffnung der oberen Scheibe zur Zeit t ein Theil der unteren Scheibe gesehen wird, der um den Bogen $2\pi(m-n)t$ auf dieser von dem anfangs gesehenen Puncte entfernt ist, wobei positive Bogen im Sinne der Drehung, negative rückwärts zu rechnen sind. Wenn also

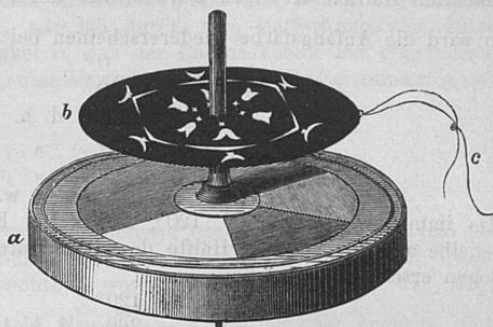


Fig. 190.

$t = \frac{1}{n-m}$ geworden ist, werden sämtliche Farben der unteren Scheibe einmal in der Öffnung der oberen erschienen sein, und ihre Reihe wird wieder vom Anfang beginnen, und sich wiederholen. Während dieser Zeit ist aber die Öffnung selbst um den Bogen $2\pi m t = 2\pi \frac{m}{n-m}$ fortgerückt, und die Reihe der Farben, wie sie sich in der Öffnung folgten, muß über diesen Bogen ausgebreitet erscheinen, und zwar in umgekehrter Ordnung, als sie auf der Scheibe stehen, wenn, wie in dem beschriebenen Apparate der Fall ist, $n > m$. Dieselbe Reihe von Farben folgt nun wieder, während die Öffnung sich über einen zweiten, dritten u. s. w. Bogen von der Länge $2\pi \frac{m}{n-m}$ fortbewegt. Ist nun

$$\frac{m}{n-m} = \frac{1}{p}, \text{ also } n = (p+1)m$$

und p eine ganze Zahl, so wird sich nach einem ganzen Umlauf der oberen Scheibe die Farbenreihe in der Öffnung gerade p Male wiederholt haben und bei jedem folgenden Umlauf, wie beim ersten, genau an derselben Stelle wieder erscheinen. Es erscheint dann auf der oberen Scheibe ein ruhender farbiger Ring mit p maliger Wiederholung der Farben der unteren Scheibe. Ist p nicht genau gleich einer ganzen Zahl, so werden die Orte der Farben beim zweiten Umlaufe nicht mehr ganz genau mit denen des ersten Umlaufes zusammenfallen, der Farbenring wird sich fortzubewegen scheinen.

$$\text{Wenn } \frac{m}{n-m} = \frac{2}{2p+1}, \text{ also } n = \left(p + \frac{3}{2}\right)m$$

und p eine ganze Zahl ist, so werden beim zweiten Umlaufe die Farben neue Orte einnehmen, beim dritten aber dieselben wie beim ersten, beim vierten wie beim zweiten, so daß doch eine ruhende Farbenscheinung entstehen kann, wenn nur der Kiesel schnell genug läuft, daß der Eindruck auf das Auge die Zeit zweier Umläufe der Öffnung überdauert. Man erhält dann eine $(2p+1)$ malige Wiederholung der gleichen Farbenfolge, diese selbst ist aber nicht mehr gleich der Folge der Farben der unteren Scheibe, sondern

stellt die Mischungen je zweier Farben dieser Scheibe dar, welche auf den entgegengesetzten Hälften derselben Durchmesser liegen. Wenn z. B. $p = 1$, also $\frac{m}{n-m} = \frac{2}{3}$, so wird die Anfangsfarbe wiedererscheinen bei

352

0°		
240		
480	d. h.	120°
720	"	0
960	"	240

u. s. w.,

also immer wieder bei 0°, 120°, 240°. Die Farbe dagegen, welche auf der unteren Scheibe auf der anderen Hälfte desselben Durchmessers steht, wird in der Mitte dieser Bogen erscheinen, also bei

120°		
360	d. h. bei	0°
600	"	240

u. s. w.,

d. h. an denselben drei Stellen, wird sich also mit der ersten Farbe mischen.

Im Allgemeinen ergibt sich leicht, daß, wenn der Bruch $\frac{m}{n-m}$ in kleinsten ganzen Zahlen ausgedrückt, gleich $\frac{q}{p}$ ist, und der Eindruck im Auge q Umdrehungen der oberen Scheibe überdauert, man p Wiederholungen einer Folge von Farben sieht, die entstehen, indem je q äquidistante Farben der unteren Scheibe gemischt werden. Dauert der Eindruck im Auge aber nicht so lange, so erscheinen die Farben hin- und herspringend.

Wenn man die Form, Zahl und Größe der Öffnungen in der oberen Scheibe variirt, entstehen auf diese Weise natürlich sehr bunte kaleidoskopische Bilder. Diese Bilder werden bei dem Kreiseln der *Fig. 190* noch bunter und erhalten sehr feine Zeichnungen dadurch, daß eigenthümliche Oscillationen der oberen Scheibe eintreten. Man hört nämlich ein lautes Schnarren des Kreisels, sobald man die obere Scheibe aufgelegt hat, und wenn man als untere Scheibe eine rein weiße gewählt hat: so sieht man die Figur der oberen Scheibe nicht sich in ein System concentrischer Kreislinien verwandeln, wie es sein müßte, wenn die obere Scheibe mit gleichmäßiger Geschwindigkeit rotirte, sondern man sieht eine große Zahl von Wiederholungen der eingeschnittenen Figur. Dies läßt schliessen, daß die Rotationsbewegung der oberen Scheibe in regelmäßiger Abwechslung verzögert und beschleunigt ist. Diese Oscillationen müssen durch die Reibung der oberen Scheibe an der Axe hervorgebracht sein. Außerdem findet ein zweites System von Oscillationen statt, wobei der Mittelpunkt der oberen Scheibe horizontal hin- und hergeht, was man aus gewissen Eigenthümlichkeiten der Figur, wie sie über weißer Unterlage erscheint, erkennen kann.

Regelmäßiger zeigt das von PLATEAU construirte Anorthoskop diese Erscheinungen. Zwei kleine Rollen von verschiedenem Durchmesser, deren Axen in derselben geraden Linie unmittelbar hinter einander liegen, werden durch zwei unendliche Schnüre herumgetrieben, welche beide um die Peripherie derselben größeren Scheibe laufen; letztere wird mittels einer Kurbel bewegt. An der einen Rolle ist eine transparente Scheibe befestigt, auf der sich eine verzerrte Zeichnung befindet, an der anderen eine schwarze Scheibe mit einem oder mehreren Spalten. Wenn man die Scheiben rotiren läßt, kommt die richtige Zeichnung zum Vorschein.

Wir haben gesehen, daß, wenn m die Zahl der Umläufe des Schirmes in der Secunde bezeichnet, und n die der Zeichnung, daß auf einem Bogen $2\pi \frac{m}{n-m}$, den ein Punkt der spaltförmigen Öffnung des Schirmes durchläuft, alle die Punkte der Zeichnung der Reihe

nach erscheinen, die ebenso weit wie jener Punct vom Mittelpuncte entfernt sind. In dem Zerrbilde des Objects auf der transparenten Scheibe nehmen aber diese Puncte die ganze Peripherie ein. Denkt man sich also in dem Original und seinem Zerrbilde die Puncte durch Polarcordinaten gegeben, nämlich durch ihre Entfernung vom Mittelpuncte der Scheibe ρ und durch den Winkel ω , den der Radius Vector mit einem festen Radius bildet, und nennen wir ρ_0 und ω_0 die Werthe für die richtige Zeichnung, ρ_1 und ω_1 für die verzerrte, so ist.

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \rho_1 \\ \omega_0 : \omega_1 &= m : (m-n). \end{aligned}$$

353

Mit Hülfe dieser Gleichungen kann die verzerrte Zeichnung construiert werden, indem man die Winkel ω in dem angegebenen Verhältnisse verändert. Damit bei jedem Umlauf der Scheiben dieselben Figuren wieder sichtbar werden, muß wie früher der Bogen $2\pi \frac{m}{m-n}$ ein aliquoter Theil der Peripherie sein, also $\frac{m}{m-n}$ eine positive oder negative ganze Zahl.

Sind die Scheiben beide gleichläufig, also m und n positiv, $n > m$, so haben ω_0 und ω_1 entgegengesetztes Zeichen, müssen also nach entgegengesetzter Richtung gelegt werden.

Es wird $\frac{m-n}{m} = 1 - \frac{n}{m}$ eine negative ganze Zahl, wenn $\frac{n}{m}$ eine ganze Zahl p ist, d. h. die transparente Scheibe p ganze Umläufe macht, während die dunkle Scheibe einen macht. Das Bild wiederholt sich $(p-1)$ Male auf dem Umfang der Scheibe. Man kann in diesem Falle p äquidistante radiale Spalten in der schwarzen Scheibe anbringen.

Wenn die beiden Scheiben in entgegengesetzter Richtung umlaufen, also $m = -\mu$ ist, so wird

$$\omega_0 : \omega_1 = \mu : (n + \mu).$$

Die beiden Winkel sind also nach der gleichen Seite hin zu nehmen. Wenn $\frac{n}{\mu} = p$ und p eine ganze Zahl, so wird die Zahl der Bilder gleich $p + 1$, und man kann wieder p Spalten in der dunklen Scheibe anbringen.

Wenn endlich die Rotationen gleichläufig sind, m und n also positiv, aber $m > n$, so bekommen ω_0 und ω_1 wieder dasselbe Zeichen, aber während in den bisherigen Fällen ω_1 gleich oder größer als ω_0 war, wird es nun kleiner. In den bisher beschriebenen Fällen konnte das Zerrbild die ganze Peripherie des Kreises einnehmen, jedes einzelne richtige Bild nahm dann nur einen aliquoten Theil der Peripherie ein. In dem jetzigen Falle aber ist der höchste Werth von ω_0 offenbar 2π , und demgemäß

der höchste von $\omega_1 = \left(1 - \frac{n}{m}\right) 2\pi$. Es kann das Zerrbild deshalb auch auf der transparenten Scheibe mehrmals wiederholt werden, ja es wird vortheilhaft sein, es zu wiederholen, um mehr Licht zu erhalten. Damit dann immer dieselbe Erscheinung wiederkehre, muß der bezeichnete Maximalwerth von ω_1 ein aliquoter Theil der Peripherie sein, d. h. $\frac{m}{m-n}$ muß eine ganze Zahl p sein, also

$$\frac{n}{m} = \frac{p-1}{p}.$$

Dabei ist die Anzahl der möglichen Wiederholungen des Zerrbildes p , das richtige Bild einfach. Die Zahl der Spalten kann gleich $p - 1$ gemacht werden.

Man kann aber auch in diesem Falle die Spalte einfach lassen, und das Zerrbild in seinen Wiederholungen etwas verändern, so daß es verschiedene Momente einer Bewegung darstellt, dann erhält man ein richtiges Bild, was diese Bewegung auszuführen scheint.

Sollen die geforderten Verhältnisse der Umdrehungszahlen m und n genau eingehalten werden, so kann man dies nur erreichen, wenn man die Axen durch Zahnräder in Bewegung setzt. Bei den Rollen stimmen die Verhältnisse der Durchmesser und die Beschaffenheit der Fäden nie so genau überein, daß nicht allmählig kleine Abweichungen von dem geforderten Verhältnisse eintreten, und dann drehen sich die restaurirten Bilder auf der Scheibe allmählig um deren Mittelpunkt. Diese unvermeidliche Ungenauigkeit der Schnurläufe hat PLATEAU übrigens benutzt, um einen sehr allmählichen Farbenwandel hervorzubringen, indem er zwei Rollen aufsetzt, welche, so gut es geht, einander gleich gemacht sind. an der einen eine transparente Scheibe mit gleich breiten farbigen Sektoren befestigt, an der anderen eine schwarze Scheibe, in der ein oder zwei gleiche Sektoren ausgeschnitten sind. Wenn die Oeffnung anfangs gerade vor einem der farbigen Sektoren der hinteren Scheibe steht, wird bei der Rotation das ganze Feld in dieser
354 Farbe erscheinen, allmählig aber werden sich die Scheiben gegen einander verschieben, es wird von einem anderen Sector der farbigen Scheibe anfangs wenig, allmählig immer mehr frei werden, und dessen Farbe daher sich stärker und stärker einmischen, während die des ersten in demselben Verhältnisse verschwindet. So erhält man einen sehr leise und allmählig eintretenden Farbenwandel.

Es gehören hierher auch noch gewisse Curven, welche erscheinen, wenn zwei Reihen von geraden oder gekrümmten Stäben sich hinter einander bewegen. Das erste Beispiel davon, welches Aufsehen erregte, waren gewisse Figuren, welche an den Rädern eines Wagens erscheinen, wenn ein solcher hinter einem Gitter vorbeifährt.¹ Am einfachsten von den hierher gehörigen Fällen ist die von FARADAY beobachtete Erscheinung. Er liefs zwei gleiche Zahnräder hinter einander in entgegengesetzter Richtung schnell rotiren, so daß ihre Axen in einer geraden Linie lagen. Während nun von jedem, einzeln gesehen, die Zähne wegen der Schnelligkeit der Bewegung verschwinden, sah er ein Rad mit doppelt so viel Zähnen stillstehen, wenn er sie so betrachtete, daß die eine Zahnreihe durch die andere hin erschien. Denken wir uns die Zähne hell auf dunklem Grunde, so wird durch die schnell umlaufenden hellen Zähne jedes einzelnen Rades eine gewisse Menge Licht über den Grund scheinbar gleichmäßig ausgebreitet, und durch beide Zahnreihen zusammen die doppelte Menge Licht an solchen Stellen des Grundes, wo hinter einander bald von der einen, bald von der anderen Reihe ein Zahn hinüberläuft. Wo aber ein Zahn der vorderen Reihe einen solchen der hinteren deckt, wird für den Augenblick das Licht des hinteren hinweggenommen, weil es nicht zum Auge des Beobachters kommen kann, und eine solche Stelle scheint dem Beobachter deswegen nur halb so stark beleuchtet, als die benachbarten, wo die beiden Zähne ungestört nach einander ihr Licht in das Auge senden. Somit erscheinen in dem hellen Scheine, den die Zahnreihen geben, diejenigen Stellen dunkler, wo bei der Bewegung der Räder je zwei Zähne zur Deckung kommen. Ist nun ω der Winkelabstand der Zähne, und gehen wir von einer Stellung der Räder aus, wo die Zähne sich decken, so wird eine zweite Deckung zu Stande kommen, wenn das eine Rad sich um $\frac{1}{2} \omega$ nach rechts, das andere um ebenso viel nach links gedreht hat. Die dunklen Streifen werden also nur den Winkelabstand $\frac{1}{2} \omega$ haben, und ihre Anzahl wird daher doppelt so groß sein, als die der Zähne. Das eine Rad kann man auch weglassen, wie BILLET SÉLIS bemerkt, wenn man hinter das erste einen Hohlspiegel stellt, der ein mit dem Objecte zusammenfallendes, aber verkehrtes Bild dieses Rades entwirft. Sehr hübsch läßt sich auch diese Methode anwenden, um die Art, wie sich ein Wasserstrahl in Tropfen auflöst, sichtbar zu machen.

Eine ähnliche Erscheinung beobachtete EMSMANN an dem bekannten Abplattungsmodell, welches aus zwei elastischen Messingringen besteht, die zwei gegen einander

¹ ROGET in *Phil. Transact.* 1825. I. 131. *Pogg. Ann.* V. 93. PLATEAU ebenda XX. 316. 1829. FARADAY ebenda XXII. 601. 1831. EMSMANN ebenda LXIX. 326.

senkrechten Meridiankreisen der Erde entsprechen und um die der Erdaxe entsprechende Linie schnell gedreht werden, wobei sie durch die Centrifugalkraft eine elliptische Gestalt annehmen. Da sie das Licht stark reflectiren, verbreiten sie bei schneller Rotation einen Lichtschein über die Kugelfläche, die sie beschreiben, und darin erscheinen dunkle Linien an den Stellen, wo bei der Rotation ein vorderes Bogenstück ein hinteres bedeckt. Das allgemeine Princip dieser Erscheinungen hat PLATEAU ausgesprochen. Wenn zwei erleuchtete Curven sich durch das Gesichtsfeld so schnell bewegen, daß sie eine scheinbar continuirliche Beleuchtung der Fläche zurücklassen, so erscheint eine dunkle Linie in diesem lichten Felde, welche die Punkte verbindet, in denen sich nach einander die Curven geschnitten haben, vorausgesetzt, daß das Licht der einen Curve die andere nicht durchdringen kann.

Zur Geschichte: Die Dauer des Lichteindrucks wurde von NEWTON¹ gleich einer Secunde geschätzt, später genauer gemessen von SEGNER,² der 30 Tertian, d'ARCY,³ der 8 Tertian, CAVALLO,⁴ der 6 Tertian als längste Dauer des Eindrucks einer im Kreise geschwungenen glühenden Kohle fand. PARROT⁵ fand, daß der Eindruck in einem hellen Zimmer kürzere Zeit währe, als in einem dunkeln. Daran schloffen sich dann die späteren Messungen von PLATEAU⁶ über die verschiedene Dauer der Eindrücke verschiedener Farben, und EMSMANN.⁷

Farbenkreisel erwähnt MUSSCHENBROEK,⁸ ohne einen älteren Beobachter zu nennen. Besondere Formen sind beschrieben durch E. G. FISCHER,⁹ LÜDICKE,¹⁰ BUSOLT.¹¹

Die fast gleichzeitige Erfindung der stroboskopischen Scheiben durch PLATEAU und STAMPPER zu Ende des Jahres 1832 ist schon oben erwähnt. Die Construction des Anorthoskops durch PLATEAU¹² fällt in den Januar 1836. Letzterer hat auch die Theorie der hierher gehörigen Erscheinungen vielfältig und ausführlich bearbeitet.

§ 23. Die Veränderungen der Reizbarkeit.

Wir haben gesehen, daß nach der Einwirkung von Licht auf die Netzhaut der Zustand von Reizung im Sehnervenapparate noch eine Zeit lang anhält. Diese Nachdauer des Eindrucks nimmt man nach der Betrachtung heller Gegenstände am ungestörtesten wahr, wenn man das Auge auf ein ganz dunkles Gesichtsfeld richtet. Außerdem zeigt sich aber, daß nach Einwirkung hellen Lichts auf irgend eine Stelle der Netzhaut diese nun auch neu von außen einfallendes Licht in einer anderen Weise empfindet, als es die vorher nicht afficirten Theile der Netzhaut thun. Wir haben es also hier auch mit einer durch Einwirkung des Lichtes veränderten Empfänglichkeit des Sehnervenapparates gegen neue äußere Reize zu thun.

Wir wollen im vorliegenden Paragraphen hauptsächlich aufsuchen, welche Empfindungen entstehen, wenn die von vorausgegangenem hellen Lichte aff-

¹ NEWTON, *Optice*. Quaestio XVI.

² SEGNER, *De raritate luminis*. Gott. 1740.

³ d'ARCY, *Mem. de Paris*. 1765. p. 450.

⁴ CAVALLO, *Naturlehre*, übers. von TROMMSDORF III. 132.

⁵ PARROT, *Entretiens sur la Physique*. Dorpat 1819—24. III. 235.

⁶ PLATEAU, *Pogg. Ann.* XX. 304—324. 1829.

⁷ EMSMANN, *Pogg. Ann.* XXI. 611. 1854.

⁸ MUSSCHENBROEK, *Introd. ad philos. natur.* § 1820. 1762.

⁹ E. G. FISCHER, *Lehrbuch der mechanischen Naturl.* Berlin 1827. II. 267.

¹⁰ LÜDICKE, *Gilbert's Ann.* V. 272. 1800. und XXXIV. 42. 1810.

¹¹ BUSOLT, *Pogg. Ann.* XXXII. 656. 1833.

¹² PLATEAU, *Bull. de Brux.* 1836. III. 7. Derselbe in *Pogg. Ann.* XX. 319—543. 1829. XXXII. 646. 1833. XXXVII. 464. 1836. LXXVII. 563. LXXIX. 269. 1849. LXXX. 150. 287. 1849.

eirte Parthie der Netzhaut von anderem äusseren Lichte getroffen wird. Ich bemerke jedoch gleich, dafs auch ein Theil der Erscheinungen hierhergezogen werden mufs, welche im scheinbar dunkeln Gesichtsfelde erscheinen, weil es nämlich in Wirklichkeit kein absolut dunkles Gesichtsfeld giebt, vielmehr auch bei vollständigem Ausschluss alles äusseren Lichtes doch immer noch eine gewisse schwache Reizung der Netzhaut durch innere Einflüsse bestehen bleibt, welche das schon im § 17 erwähnte Lichtchaos oder Eigenlicht des dunkeln Gesichtsfeldes hervorbringt. Die Reizempfänglichkeit der Netzhaut erscheint nun gegen diese inneren Reize in derselben Weise abgeändert, wie gegen objectives Licht, und es gehören deshalb zu unserem gegenwärtigen Gegenstande auch Erscheinungen, die im dunkeln Gesichtsfelde eintreten, nachdem der Zustand der Reizung der Netzhaut ganz aufgehört hat. Ich bemerke hierbei noch, dafs in hellen Räumen der Schluss der Augenlider allein nicht hinreicht, das Gesichtsfeld von allem objectiven Lichte frei zu machen, wie man leicht an der weiteren Verdunkelung merkt, welche eintritt, wenn man die Augen nun zukneift, oder die Hand davor legt. Ja in directer Sonnenbeleuchtung reicht es noch nicht einmal hin, nur die Hand vorzulegen, weil auch durch diese noch eine wahrnehmbare Quantität rothen Lichtes hindurchdringt. Wenn also im Folgenden von einem ganz dunkeln Gesichtsfelde die Rede ist, so ist darunter immer nur zu verstehen das Gesichtsfeld, wie es in einem absolut dunkeln, von allen Spuren objectiven Lichts geschützten Zimmer sich findet, oder wie es in einem hellen Zimmer entsteht, wenn man die Augen schliesst, und jedes Auge dicht, aber ohne Druck mit einer Handfläche oder einem dunkeln undurchsichtigen Tuche bedeckt.

Ich werde ferner im Folgenden dasjenige Licht, welches zuerst auf die Netzhaut eingewirkt und deren Reizempfänglichkeit verändert hat, das primäre Licht nennen, das später auf die veränderte Netzhautstelle einwirkende dagegen das reagirende Licht, weil es für uns gleichsam ein Reagenz ist, durch welches wir die Reizbarkeit der Netzhaut prüfen.

Die Mannigfaltigkeit der Erscheinungen dieses Gebietes ist nun sehr grofs, und obgleich eine ziemliche Anzahl ausgezeichnete Beobachter daran gearbeitet hat, ist es noch in vielen Theilen unsicher und lückenhaft. Die Schwierigkeit liegt darin, dafs zuerst jeder Beobachter, der sich daran macht, eine gewisse Zeit braucht um sich genügend zu üben, die hierher gehörigen Erscheinungen sicher aufzufassen und zu beurtheilen, und dabei meistens diese Versuche schnell die Augen so angreifen, dafs bei einzelnen Beobachtern, die sie zu lange fortgesetzt haben, schwere und gefährliche Augen- und Nervenkrankheiten eingetreten sind. Es haben deshalb die meisten Beobachter bisher nur eine verhältnismäfsig geringe Menge von Thatsachen selbst bestätigt und neu entdecken können, und auch jedem künftigen Beobachter, welcher dergleichen Versuche machen will, ist anzurathen an jedem einzelnen Tage nur sehr wenige Versuche dieser Art zu machen, und die Versuchsreihen für längere Zeit abzubrechen, sobald er bemerkt, dafs nach den Ver-

suchen oder überhaupt beim Ansehen hellen Lichtes oder lebhafter Farben sich leichte Schmerzen in den Augen oder im Kopfe einstellen, oder wenn die Nachbilder anfangen, lebhafter und dauernder zu werden, als sie im gesunden Auge sind.

Wir unterscheiden positive und negative Nachbilder in derselben Weise, wie man bei den Photographien von positiven und negativen Bildern redet. Positive Bilder sind solche, in denen die hellen Parthien des Objects ebenfalls hell, die dunkeln dunkel sind, negative Bilder dagegen solche, in denen die hellen Parthien des Objects dunkler, die dunkeln heller erscheinen.

Ich werde den Gang der Erscheinungen nun zunächst beschreiben, indem ich nur auf die Lichtstärke, nicht auf den Wechsel der Farben Rücksicht nehme, welcher den Wechsel der Helligkeit in den meisten Fällen begleitet, und seine Erklärung wahrscheinlich darin findet, daß für die verschiedenen Farben die Dauer der einzelnen Stadien der Erscheinung verschieden ist. Um den normalen Verlauf der Nachbilder ungestört zu beobachten, ist es nothwendig zunächst die Netzhaut von den Nachbildern der früheren Lichteindrücke zu befreien, wozu es gewöhnlich nöthig ist und genügt, einige Minuten mit dicht bedeckten Augen zu sitzen, bis man im dunkeln Gesichtsfelde nichts mehr vor sich sieht als das Lichtchaos, dessen eigenthümliche Muster (meist gleichsam helle Gerinnsel durch baumartig und netzförmig vertheilte dunkle Streifen getrennt) man bald kennen lernt. Wenn man keine Bruchstücke von Zeichnungen äußerer Gegenstände mehr sieht, und auch beim Eindringen ganz schwachen Lichts durch die geschlossenen Augenlider keine mehr sichtbar werden, ist das Auge vorbereitet, um den Eindruck zu empfangen.

Richtet man nun die Augen eine kurze Zeit auf einen hellen Gegenstand, z. B. die helle Fensterfläche, am besten so, daß man die Richtung der Augen unverändert läßt und sie nur auf- und zudeckt, so bleibt unmittelbar hinterher ein positives Bild des primären hellen Objects stehen, wie dies schon im vorigen Paragraphen besprochen ist. Dieses Bild ist desto schärfer und deutlicher, je weniger die Richtung der Augen verändert worden ist, und seine Helligkeit finde ich am größten, wenn die Bestrahlung der Netzhaut durch das primäre Licht etwa nur $\frac{1}{3}$ Secunde gedauert hat. Die Erscheinungen des vorigen Paragraphen haben gelehrt, daß die Stärke der Reizung durch das Licht während der ersten Zeitmomente seiner Wirkung zunimmt; aber sie erreicht sehr schnell ihr Maximum. Dauert die Bestrahlung länger als $\frac{1}{3}$ Secunde, so nimmt die Stärke des Nachbildes, welche der Intensität der zurückbleibenden Reizung der Sehnervensubstanz entspricht, schnell wieder ab, wovon wir den wahrscheinlichen Grund später nachweisen werden. Je größer übrigens die Intensität des primären Lichtes ist, desto heller ist das positive Nachbild, und desto länger dauert es. Dabei ist zu bemerken, daß im positiven Nachbilde oft auch Grade der Helligkeit unterscheidbar werden, welche beim directen Anblick wegen zu großer

359 Helligkeit nicht unterschieden wurden. Dreht man z. B. eine Lampe mit rundem Docht schnell aus, während man nach der erlöschenden Flamme hinblickt, so erkennt man im Nachbilde die grössere Helligkeit der Ränder im Vergleich zur Mitte der Flamme, welche man (siehe § 21) bei der directen Betrachtung schwer bemerkt. Dieselbe Bemerkung machte auch AUBERT bei den Nachbildern des elektrischen Funkens, welcher, direct gesehen, als ein verwaschener Lichtstreif, im Nachbilde als eine scharf gezeichnete Linie erschien. Man kann übrigens auch von sehr mächtig erleuchteten Gegenständen, z. B. von weissem Papier, welches die zum Schreiben und Lesen bequeme Helligkeit hat, nach der beschriebenen Methode noch positive Nachbilder gewinnen, die eine erkennbare Dauer von etwa zwei Secunden haben, während im Gegentheil das helle Nachbild der Sonne oft mehrere Minuten lang stehen bleibt.

Um die positiven Nachbilder recht schön zu haben, beachte man noch folgende Regeln. Während ihrer Erzeugung und ihrer Dauer muß man sorgfältig jede Bewegung des Auges und jede heftigere Bewegung des Körpers vermeiden, weil sie bei einer solchen stets für einige Zeit verschwinden. Nachdem man also genügende Zeit mit dicht bedeckten Augen gesessen hat, richte man unter den bedeckenden Händen die Augen nach der Richtung des Objects und bemühe sich, sie ganz unverrückt zu halten, während man die Hände schnell wegzieht und ebenso schnell wieder überdeckt. Diese Bewegung der Hände muß aber leise und leicht, ohne starke Anstrengung und Erschütterung des Körpers ausgeführt werden. Wenn man dies Verfahren gut eingeübt hat, so gelingt es zuweilen das positive Nachbild unter den bedeckenden Händen so scharf und hell zu sehen, daß es den Eindruck macht, als wären die Hände durchsichtig, und man sähe die wirklichen Objecte. Man hat Zeit genug, an diesen Nachbildern noch eine Menge einzelner Umstände zu bemerken, auf welche zu achten man während der wirklichen Betrachtung nicht Zeit hatte. Die lichtschwachen Flächen verschwinden am schnellsten, ohne ihre Farbe wesentlich zu verändern, die helleren bleiben längere Zeit stehen, wobei ihre Farbe durch bläuliche Töne in ein violettes Rosa, später Gelbroth übergeht. Zur Zeit, wo die helleren Stellen aus Blau in Violett übergehen, wird die Zeichnung des Nachbildes oft ziemlich undeutlich, weil, wie mir scheint, die hellen Theile dann verhältnißmäßig mehr an Licht verloren haben als die schwächer beleuchteten, und beide in ihrer Beleuchtung sich ziemlich nahe gekommen sind, und weil wir überhaupt, wie im folgenden Paragraphen noch näher zu besprechen ist, nur wechselnde Erregungszustände der Netzhaut gut von einander unterscheiden, für einen constanten Erregungszustand aber schnell das Unterscheidungsvermögen verlieren. Später werden in den positiven Nachbildern die weniger hellen Gegenstände ganz dunkel, und die helleren bleiben noch längere Zeit, jetzt rosa gefärbt, allein sichtbar. Sehr auffallend war es, wenn ich das Nachbild eines hellen Teppichs betrachtete, über welchen vom Fenster her ein Streifen Sonnenlicht fiel. Es trat eine Zeit ein, wo ich das

Muster des Teppichs vollständig sah, aber überall gleich hell, so daß der Streifen Sonnenlicht sich nicht mehr bemerklich machte. Nachher verschwand das Muster des Teppichs, während die Figur des genannten helleren Streifen nun wieder in rosarothem Lichte erschien und bis zuletzt stehen blieb. Es kann daher auch wohl bei bestimmten Beleuchtungsgraden die Zeichnung des Bildes ganz oder theilweis sehr undeutlich werden, und nachher wieder deutlicher, also scheinbar das Bild fast verschwinden und nachher sich wieder aufklären. Wenn man aber genau aufpaßt, wird man bemerken, daß der Grund des Bildes zur Zeit der Verwirrung der Zeichnung merklich heller ist, als wenn nacher die hellsten Stellen auf ganz schwarzem Grunde abgezeichnet wieder erscheinen. Es ist deshalb in solchen Fällen nicht der Lichteindruck verschwunden und wiedergekommen, sondern nur der Unterschied zwischen hellen und helleren Stellen für einige Zeit kleiner geworden und, die Fähigkeit ihn wahrzunehmen, verschwunden, bis neuer Wechsel in Färbung und Helligkeit des Nachbildes dieses wiederherstellen. Übrigens habe ich stets an Bildern, welche viele verschieden helle Objecte enthielten, gesehen, daß die einzelnen Objecte desto später aus dem positiven Bilde gänzlich verschwanden, je heller sie waren. Bei schwachen Nachbildern, wie diejenigen wohl waren, welche AUBERT nach der Beleuchtung der Objecte durch den elektrischen Funken erhielt, hat dieser Beobachter jedoch gefunden, daß nach schwachen Funken die positiven Nachbilder länger dauerten, als nach starken Funken.

Hat man dagegen beim Auf- und Zudecken des Auges dieses kräftig bewegt, oder gedrückt, oder erschüttert, so sieht man im ersten Moment ein verwirrtes Lichtchaos, aus dem sich dann erst allmählig das Nachbild entwickelt. Ebenso wird das schon entwickelte Nachbild durch Bewegung, Erschütterung, Druck, äußeres Licht zeitweise oder ganz aufgehoben.

Wenn das äußere Licht nur sehr kurze Zeit eingewirkt hatte, nicht blendend war, und das Gesichtsfeld ganz frei von allen Spuren äußeren Lichts gehalten wird, verschwindet das positive Bild gewöhnlich, ohne in ein negatives überzugehen. Wenn man aber, während das positive Nachbild noch besteht, oder auch etwas später, das Auge gegen gleichmäßig beleuchtete Flächen kehrt, oder auch nur mit geschlossenen Lidern sich nach einer hellen Umgebung wendet, erscheint ein negatives Nachbild. Je stärker das positive Nachbild ist, desto stärker muß auch das reagirende Licht gemacht werden, um es in ein negatives Bild zu verwandeln. Es giebt immer eine gewisse Stärke des reagirenden Lichts, bei welcher das positive Bild einfach verschwindet, ohne negativ zu werden. Ist das reagirende Licht stärker, so entsteht ein negatives Bild; ist es schwächer, so bleibt das Bild positiv und wird nur undeutlicher. Mit wachsender Stärke des reagirenden Lichts wächst übrigens auch die Deutlichkeit des Nachbildes, bis jene Lichtstärke den Grad überschreitet, der für Erkennung von Differenzen der Lichtstärke um kleine Bruchtheile am günstigsten ist, um dann wieder abzunehmen. Man kann somit auch Nachbilder erhalten von schwächerem primitiven Lichte auf

stärkerem reagirenden, nur muß man auf sie gut aufpassen, weil sie sehr schnell vergehen. Auch nachdem das positive Bild geschwunden ist, bleibt auf hellen Flächen das negative Nachbild noch kurze Zeit sichtbar, indem es ebenfalls allmählig erblaßt und verschwindet, ja es kann sogar im ganz dunkeln Gesichtsfelde sichtbar werden, indem es hier als eine Verminderung der Helligkeit des Eigenlichts der Netzhaut erscheint. In der Regel erscheint
361 dann dieses Eigenlicht selbst in der nächsten Umgebung des dunklen Nachbildes durch Contrast mit diesem etwas heller.

Größere Intensität des primären Lichts giebt dem negativen Nachbilde eine größere Deutlichkeit und Dauer. Auch unterscheiden sich im Nachbilde diejenigen Theile eines als primär beleuchtendes Object gebrauchten, blendend hellen Gegenstandes, welche eine objectiv verschiedene, für die Empfindung aber nicht verschiedene Lichtstärke haben. Ich habe oft gesehen, wenn ich nach der untergehenden Sonne geblickt hatte, daß Gegenstände, die einen Theil der Sonnenscheibe bedeckten, im negativen Nachbilde deutlich zu erkennen waren, von denen beim directen Anblick der Sonne wegen der Irradiation keine Spur zu erkennen war. Selbst kleine Gegenstände, Zweige und Blätter von Bäumen können auf diese Weise nachträglich sichtbar werden. Die Reizempfindlichkeit derjenigen Netzhauttheile, welche das Bild der Sonnenscheibe selbst aufgenommen haben, ist also nachher stärker verändert, als sie es in den Netzhautstellen ist, welche von den Zerstreungskreisen und dem diffus verbreiteten Lichte getroffen waren, obgleich die ursprüngliche Empfindung beider sich nicht unterscheiden ließ. Eben deshalb sind Nachbilder der Sonne anfangs gewöhnlich größer, als die Sonnenscheibe, und werden später kleiner, indem sich anfangs noch ein Nachbild der Zerstreungskreise am äußeren Rande der Sonne hinzugesellt, welches aber schneller negativ wird und endlich früher schwindet, als das der Mitte des Sonnenkörpers, wo die volle Helligkeit desselben eingewirkt hat.

Der Einfluß der Dauer der primären Bestrahlung ist für das negative Nachbild ein anderer, als für das positive. Nämlich die Stärke des negativen Nachbildes nimmt zu mit der Dauer der Bestrahlung, und scheint sich erst bei längerer Dauer asymptotisch einem gewissen Maximum zu nähern. Durch lange Dauer sehr starker Bestrahlung kann sogar eine bleibende Veränderung der betreffenden Netzhautstelle entstehen, wie dies RITTER¹ erfuhr, als er 10 bis 20 Minuten lang direct in die Sonne gesehen hatte. Zur Erzeugung deutlicher negativer Nachbilder ist es deshalb nützlich, die primäre Bestrahlung länger (bei mäßigem Licht etwa 5 bis 10 Secunden) dauern zu lassen. Dann ist das positive Nachbild schwach und schwindet schnell, das negative dagegen stärker und dauert länger. So z. B. schwindet wenn man helle Wolken durch das Fenster etwa $\frac{1}{3}$ Secunde lang betrachtet hat, das positive Nachbild nach etwa 12 Secunden, das negative auf

¹ RITTER, Beiträge zur näheren Kenntniß des Galvanismus. 1805. Bd. II. S. 175—181.

hellerem Grunde nach etwa 24 Secunden. Wenn ich dasselbe Object dagegen 4 oder 8 Secunden betrachtete, schwand das negative Nachbild erst nach 8 Minuten. Ich hielt das Gesichtsfeld dabei ganz dunkel und liefs nur von Zeit zu Zeit schwaches Licht durch die geschlossenen Lider einfallen, um zu prüfen, ob das Nachbild noch da sei. Um das negative Nachbild recht scharf gezeichnet zu erhalten, ist es nothwendig, während der Dauer der Bestrahlung scharf einen bestimmten Punkt des hellen Objects zu fixiren. In dem negativen Nachbilde ist es noch besser als in dem flüchtigeren positiven möglich nachträglich Einzelheiten zu erkennen, die man bei der directen Beschauung nicht bemerkt hatte. Hat man nach einander zwei verschiedene Punkte des Objects fixirt, so erkennt man auch nachher zwei sich theilweis deckende Nachbilder. So kann man auch im Nachbilde, wenn im Gesichtsfelde die Sonne steht, und man den Blick schnell über das Feld hinschweifen liefs, den ganzen Weg abgebildet erhalten, den das Sonnenbildchen auf der Netzhaut zurückgelegt hat. Hat man den Blick auf einzelnen Stellen des Feldes einen Augenblick festgehalten, so entsprechen diesen Punkten intensivere runde Nachbilder der Sonne, welche länger positiv bleiben, und wenn sie negativ geworden sind, dunkler werden und länger dauern. Diese sind verbunden durch schmalere verwaschene Streifen, welche anfangs zwar auch hell sind, sich aber bald negativ dunkler zeigen, und desto schwächer gezeichnet sind, je gröfser die Geschwindigkeit der Augenbewegung für die betreffende Stelle gewesen war. Diese Streifen sind schmäler als die Sonnenscheibe und am Rande verwaschen, weil über die ihrem Rande entsprechenden Netzhauttheile nur eine Sehne des runden Sonnenbildes hingeglitten ist, über die mittleren dagegen ein Durchmesser, auf letztere also das Sonnenlicht länger gewirkt hat.

Positive wie negative Nachbilder bewegen sich, wenn das Auge bewegt wird. Ihre scheinbare Lage im Gesichtsfelde entspricht immer dem Orte, wo ein Object sich befinden müfste, dessen Bild auf die von dem primären Lichte getroffene Netzhautstelle fallen sollte. Ist also der gelbe Fleck von starkem Lichte getroffen worden, so befindet sich das Nachbild, wo man auch hinsehen möge, immer im Fixationspunkte des Auges und hindert, wenn es stark ist, feinere Gegenstände zu erkennen. Liegt ein kräftig gezeichnetes Nachbild dicht neben dem Fixationspunkte, so verleitet es den Beschauer leicht, es fixiren zu wollen, das Auge wendet sich nach dem Nachbilde hin, und dann fliegt dieses scheinbar immer vor dem Fixationspunkte her nach dem Rande des Gesichtsfeldes hin, ähnlich den fliegenden Mücken. Fixirt der Beschauer aber einen äufseren festen Punkt, so stehen auch die Nachbilder still. Ihre Bewegung hängt immer nur von Bewegung des Auges ab.

Wenn wir nun aus den bisher beschriebenen Erscheinungen Schlüsse auf den Zustand der Netzhautstelle und des zugehörigen Theils des Sehnervenapparats ziehen wollen, welche von dem primären Lichte erregt worden waren, so finden wir, dafs in ihnen erstens nach Erlöschen des primären

Lichtes der Reizungszustand noch eine Zeit lang dauert, was durch die positiven Nachbilder angezeigt wird, und dafs zweitens die betreffende Nervensubstanz neu einfallendes, reagirendes Licht schwächer empfindet, als die früher von Licht nicht getroffenen übrigen Netzhautstellen. Nach der Einwirkung von Licht besteht also erstens Reizung fort, zweitens ist die Empfänglichkeit für neue Reize vermindert. Dafs Reizung einen Zustand verminderter Reizempfänglichkeit zurücklässt, findet auch bei den motorischen und bei anderen empfindenden Nerven statt. Wir nennen einen solchen Zustand Ermüdung.

363 Aus dem Umstande, dafs die negativen Nachbilder bei steigender Helligkeit des reagirenden Lichtes so lange deutlicher werden, bis diese Helligkeit etwa den Grad erreicht hat, wo Verminderung der Lichtstärke um kleine Bruchtheile ihrer ganzen Gröfse am besten wahrgenommen wird, können wir schliessen, dafs die Ermüdung der Sehnervensubstanz die Empfindung neu einfallenden Lichtes ungefähr in dem Verhältnifs beeinträchtigt, als wäre die objective Intensität dieses Lichtes um einen bestimmten Bruchtheil ihrer Gröfse vermindert. Es soll, bei dem Mangel genügender Messungen, hierdurch nur der Gang im Allgemeinen bezeichnet werden, welchen die Intensität der Empfindung einer ermüdeten Netzhautstelle als Function der Intensität des reagirenden Lichtes einhält. So lange noch neben dem negativen Bilde das positive besteht, ist die Reizung der Netzhaut zusammengesetzt aus der noch fortbestehenden Reizung, welche das primäre Licht hervorgebracht hat, und der durch die Ermüdung verminderten Reizung durch das reagirende Licht, und in diesem Sinne können wir die Helligkeit des Nachbildes als die Summe der Helligkeit des positiven Bildes und der durch die Ermüdung verminderten Helligkeit des reagirenden Lichtes betrachten. Ist nun die Verminderung der Helligkeit des reagirenden Lichtes gröfser als die Helligkeit des positiven Bildes, so wird die ganze Helligkeit des Nachbildes geringer sein, als die Helligkeit des reagirenden Lichtes, wie sie den nicht ermüdeten Netzhautstellen der Umgebung erscheint, das Nachbild also negativ werden. Dies ist bei gröfserer Helligkeit des reagirenden Lichtes der Fall. Bei geringerer dagegen ist die Helligkeit des positiven Bildes mehr als hinreichend, den Verlust durch die Ermüdung zu decken; das Bild ist positiv.

Es sei H die scheinbare Helligkeit des reagirenden Lichts in den nicht ermüdeten Netzhautstellen, αH in den ermüdeten, wo $\alpha < 1$, und I die scheinbare Helligkeit des positiven Bildes, so mufs nach dem oben Gesagten bei wechselnder Gröfse von H doch α ziemlich constant sein. Nehmen wir dies an, so ist $\alpha H + I$ die Helligkeit des Nachbildes, H die des Grundes, auf welchem es erscheint. Für

$$H = \frac{I}{1 - \alpha}$$

wird

$$I + \alpha H = H$$

das Nachbild so hell, wie der Grund, es wird unsichtbar. Für

$$H > \frac{I}{1-\alpha}$$

wird

$$I + \alpha H < H$$

das Nachbild negativ, umgekehrt für

$$H < \frac{I}{1-\alpha}$$

wird das Nachbild positiv. Ist I sehr klein, so kann schon die scheinbare Helligkeit des Eigenlichtes der Netzhaut grösser sein als $\frac{I}{1-\alpha}$, dann wird das negative Bild auch im dunkelsten Gesichtsfelde erscheinen. Ist endlich das positive Bild ganz geschwunden, so ist H die Helligkeit im Grunde und αH im Nachbilde. Ist $1 - \alpha$ bei schwindender Ermüdung sehr klein geworden, so wird eine gewisse mittlere Stärke des reagirenden Lichtes nöthig sein, um den Unterschied erkennen zu lassen. Im dunkeln Gesichtsfelde wird es dann nicht zu sehen sein. Endlich wird $1 - \alpha = 0$, und das Nachbild schwindet ganz.

Was die negativen Bilder im ganz verdunkelten Gesichtsfelde betrifft, so lehrt der Augenschein, daß sie durch Verringerung des Eigenlichtes der Netzhaut zu Stande kommen. Dieses Eigenlicht also, welches wir aus der 364 Wirkung innerer Reize auf den Sehnervenapparat herleiten müssen, unterliegt den Wirkungen der Ermüdung ebenso wie der Eindruck des äusseren Lichtes. Daß Ermüdung des Auges durch Reizung seine Empfänglichkeit für andere Reize beeinträchtigt, läßt sich übrigens auch für elektrische und mechanische Reize der Netzhaut nachweisen. Wenn man ein negatives Nachbild im Auge entwickelt hat, und läßt einen elektrischen Strom aufsteigend durch Auge und Sehnerven gehen, wobei die helle bläuliche Erleuchtung des Gesichtsfeldes eintritt, so wird das negative Nachbild dadurch verstärkt, und wenn ein Bild gerade im Uebergang von positiv zu negativ ist, kann man es durch einen aufsteigenden Strom negativ, durch einen absteigenden positiv machen. Das für Licht ermüdete Auge empfindet also auch den elektrischen Reiz schwächer. Hat man durch gleichmäßig anhaltenden Druck Farbenscheinungen im Auge entwickelt und läßt mit dem Drucke nach, so kann man die noch bestehenden Bilder im dunkeln Gesichtsfelde negativ machen, indem man Licht durch die geschlossenen Augenlider einfallen läßt, oder nach einer beleuchteten Fläche hinblickt. Die Ermüdung durch Druckreiz macht also das Auge auch gegen Lichtreiz unempfindlicher.

In solchen Fällen, wo man ein schwindendes Nachbild durch reagirendes Licht für einen Augenblick sichtbar gemacht hat, sieht man zuweilen unmittelbar nachher im dunkeln Gesichtsfelde wieder ein schwaches positives Nachbild. Daraus ist zu schliessen, daß in der ermüdeten Netzhautstelle die Reizung durch reagirendes Licht zwar schwächer ist, als in den nicht ermüdeten Theilen, aber länger nachdauert, welcher Umstand übrigens ebenfalls bei den motorischen Nerven seine Analogie findet, da die Zuckung eines ermüdeten Muskels zwar weniger kräftig ist, aber länger dauert, als die eines nicht ermüdeten. Dieser Wechsel zwischen positiven und negativen Bildern, welcher zuweilen bei wenig auffallenden Aenderungen der Beleuchtung durch Zukneifen der Augenlider, Bewegungen des Augapfels unter den geschlossenen Lidern, auch wohl nach subjectiven Lichterscheinungen durch plötzlichen Druck auf den Augapfel eintreten kann, hat einige Beobachter, namentlich PLATEAU, veranlaßt, einen spontanen Wechsel der Zustände des Nervenapparats während der Dauer der Nachwirkung anzunehmen. Ich selbst kann in dieser Beziehung nur FECHNER beistimmen, daß in den meisten Fällen Wechsel der Beleuchtung, Bewegungen des Auges oder des Körpers u. s. w. Veranlassung zu diesem Wechsel geben. Aber natürlich kann zu einer Zeit, wo sich zwei entgegengesetzte Einflüsse gerade im Gleichgewichte halten, der kleinste Nebenumstand nach der einen oder anderen Seite einen Ausschlag geben. Ich erinnere daran, daß selbst die Athembewegungen auf das Eigenlicht der Netzhaut einwirken. Zuweilen schwinden auch die Bilder nur, ohne sich in die entgegengesetzten zu verwandeln, und zwar, wie AUBERT es passend bezeichnet, so als wenn eine nasse Stelle auf einem erwärmten Bleche schwindet. Uebrigens verschwinden auch schwache objective Bilder zuweilen in ähnlicher Weise, wenn man starr einen Punkt fixirt, z. B. eine Landschaft in der Nacht betrachtet. Es macht mir den Eindruck, als ob die Vergleichung der Erregungsstärke verschiedener Netzhauttheile aufhörte möglich zu sein, wenn die Erregung nicht von Zeit zu Zeit wechselt. Bei objectiven Bildern ist dies jederzeit zu bewerkstelligen dadurch, daß man den Fixationspunkt wechselt, bei subjectiven aber nicht. Wir kommen in der Lehre vom Contraste darauf noch wieder zurück. Ich finde übrigens, daß, wenn man bei möglichst unverrückt gehaltenem Auge dergleichen Bilder aufmerksam festzuhalten sucht, das Gefühl der Anstrengung gerade dann am größten ist, wenn die Bilder so hinschwinden. Dann folgt nach einiger Zeit ein Nachlaß dieser Anstrengung, wobei die Bilder wiederkommen. Welche innere Veränderung dem entspricht, weiß ich nicht anzugeben.

Hierher gehören weiter folgende Erscheinungen, die sich aus den angegebenen Principien erklären.

Wenn man auf grauem Grunde einen hellen Gegenstand, z. B. ein weißes Stück Papier, betrachtet, und dieses plötzlich entfernt, während man die Richtung des Auges unverändert läßt, so erscheint ein dunkleres Nachbild des weißen Papiers, wie in den bisher beschriebenen Fällen. Betrachtet

man auf dem grauen Grunde dagegen ein Stückchen schwarzen Papiers, und zieht dies weg, so erscheint ein helles Nachbild. Die von dem Bilde des weißen Papiers getroffene Stelle der Netzhaut ist mehr ermüdet, die von dem schwarzen Bilde getroffene weniger ermüdet, als der Rest der Netzhaut, auf welchem der graue Grund sich abbildete. Indem nachher die ganze Netzhaut gleichmäfsig von dem Lichte des grauen Grundes getroffen wird, wirkt dieses Licht am stärksten auf den Theil der Netzhaut, der primär schwarz sah, schwächer auf den, der vorher grau sah, am schwächsten auf den, der weiß sah. Der Versuch, bei dem wir das schwarze Papier betrachten und dann wegziehen, ist nun deshalb wichtig, weil er zeigt, dafs bei längerer Betrachtung des grauen Grundes Ermüdung der von seinem Lichte getroffenen Netzhaut eintritt, und dieses Licht deshalb immer schwächer und schwächer empfunden wird. Wenn wir nämlich das schwarze Papier wegziehen, trifft das Licht des grauen Grundes eine ausgeruhte Stelle der Netzhaut, und macht auf diese eben denselben Eindruck, den zu Anfang des Versuchs das Grau des Grundes gemacht haben mufs. Dieses hat aber inzwischen die Theile der Netzhaut, die es trifft, ermüdet, und erscheint viel dunkler, wenn wir es mit dem frischen Eindrucke auf den unermüdeten Netzhautstellen vergleichen. Es unterscheidet sich dieser Versuch von den früheren dadurch, dafs das primäre und das reagirende Licht dasselbe ist, nämlich das Licht des grauen Grundes. Wir erkennen daraus, dafs äufseres Licht von constanter Stärke, welches längere Zeit ununterbrochen auf die Netzhaut einwirkt, eine immer schwächer und schwächer werdende Erregung derselben hervorbringt. Ja die Erregungsstärke kann, namentlich bei sehr schwachem Lichte, so abnehmen, dafs sie überhaupt nicht mehr wahrgenommen wird. Wenn man bei hereinsinkender Nacht irgend einen schwach erkennbaren Gegenstand anhaltend fixirt, ohne die Richtung des Auges zu verändern, verschwindet derselbe bald vollständig, und erst indem man die Richtung des Blicks verändert, pflegt das Object wieder im negativen Nachbilde aufzutauchen. Namentlich am Seehorizonte ist diese Erscheinung sehr auffallend, wenn man bei beginnender Dunkelheit sich bestrebt, ihn zu durchmustern, weil hier die Nachbilder jedes Theiles des Horizonts jedem anderen Theile congruent sind, und welchen Punkt des Horizonts man auch fixiren mag, das Nachbild des dunkleren Meeres auf Meer, des helleren Himmels auf Himmel fällt. Richtet man den Blick dann etwas höher, so erscheint am unteren Theile des Himmels ein hellerer Streif, der unten begrenzt ist durch die jetzt wieder sichtbar werdende Grenze des Meeres, oben durch eine dieser parallel fortlaufende Linie, die durch den neuen Fixationspunkt geht. Dieser Streif ist das negative Nachbild des Meeres, auf den Himmel projicirt. Richtet man den Blick umgekehrt tiefer, so erscheint ein schwarzer Streif, das negative Nachbild des Himmels auf dem Meere, nach oben begrenzt durch den Horizont des Meeres, nach unten durch eine damit parallele Linie. So kann der Horizont im indirecten Sehen

sichtbar werden, aber er verschwindet immer wieder, wenn man ihn direct zu fixiren sucht.

Aehnliche Erscheinungen treten auch ein, wenn man ein weißes oder schwarzes Quadrat auf grauem Grunde fixirt und den Fixationspunkt ein wenig verändert. Dann deckt das Nachbild des Papiers nicht vollständig das Papier selbst, und die Ränder verändern ihre Helligkeit. Wo das Nachbild des weißen Papiers auf den grauen Grund zu liegen kommt, erscheint dieser dunkler; wo das Nachbild des grauen Grundes sich über das weiße Papier hinschiebt, erscheint dieses heller. Beim schwarzen Papier ist es umgekehrt. Hat man den Blick eine Zeit lang genau an einem bestimmten Punkte des Papiers festgehalten und richtet ihn plötzlich auf einen anderen benachbarten Punkt, so sind auch die Ränder des Nachbildes scharf gezeichnet, und der wahre Sachverhalt ist leicht zu erkennen. Wenn man dagegen fortdauernd mit dem Fixationspunkte geschwankt hat, so sind die Nachbilder schlecht begrenzt, und es erscheint dann der helle Grund in der Nähe des weißen Papiers nur verwaschen dunkler schattirt, und der Rand des weißen Papiers ebenso hell schattirt. Aehnliches geschieht, wenn man eine Zeit lang ein weißes Quadrat auf dunklem Grunde betrachtet hat und, ohne den Fixationspunkt zu verändern, das Auge plötzlich dem Object näher bringt, so daß die scheinbare Größe des letzteren wächst. Dann erscheint der Rand des Quadrats, soweit er jetzt nicht mehr von dem Nachbilde des früher gesehenen Bildes gedeckt wird, hell aufzublitzen. Entfernt man dagegen das Auge plötzlich, nachdem man das Quadrat längere Zeit fixirt hat, so erscheint es auf dem dunkeln Grunde von einem dunkleren Rahmen umgeben.

Die eben beschriebenen Versuche gehen nun in ganz ähnlicher Weise vor sich, wenn man statt vor dem grauen Grunde dieselbe weiße Scheibe vor ganz dunklem Grunde betrachtet. Es tritt hierbei das Eigenlicht der Netzhaut an Stelle des Grau. Nur gesellt sich dazu noch gewöhnlich eine eigenthümliche Erscheinung, die mir davon herzurühren scheint, daß, ehe man absichtlich die weiße Scheibe fest zu fixiren begann, der Blick nach der Regel im Gesichtsfelde gewandert ist, und dabei die verschiedenen Theile der Netzhaut nach einander verschieden hellen Beleuchtungen ausgesetzt waren und daher im Beginn des Versuchs, mäsig ermüdet sind. Dadurch wird auch die Empfindung ihres Eigenlichts herabgesetzt. Geht man nun zu fester Fixation eines bestimmten Punctes der weißen Scheibe über, so schwächt sich durch steigende Ermüdung das Weiß, während der Lichtnebel des dunklen Gesichtsfeldes zunimmt und allmähig deutlicher, namentlich in der Umgebung des weißen Feldes hervortritt, wo ein objectiver Maassstab, der in Wahrheit freilich irreführt, an der langsam sinkenden Helligkeit der weißen Scheibe gegeben zu sein scheint.

Viele Beobachter, wie früher PLATEAU, neuerdings E. HERING¹ deuten

¹ E. HERING, Ueber successive Lichtinduction und sogenannte negative Nachbilder, *Pflüger's Archiv*. Bd. 43. S. 264. 1888.

dies so, als wenn das weiße Feld durch Contrast in seiner Nachbarschaft eine neue subjective Lichtempfindung hervorriefe, oder, wie sie es nennen, „inducire“. Ich finde eine solche besondere Hypothese nicht nöthig. Wir kommen übrigens noch in der Lehre vom Contrast auf diese Hypothese zurück. In den darüber gemachten Auseinandersetzungen wirkt auch vielfältig die Ansicht mit ein, daß das Eigenlicht der Netzhaut eine Empfindung von verschwindend kleiner Intensität sei, während man dasselbe, wie ich oben auf Seite 414 schon hervorgehoben habe, überhaupt nur durch die kleinen Differenzen seiner Stärke kennt, die den Lichtstaub des dunkeln Gesichtsfeldes bilden, während seine mittlere Stärke nach der modificirten FECHNERSchen Hypothese berechnet, gar nicht so klein sein kann. Was man nach meiner Ansicht der Sache am Rande der Nachbilder von weißen Scheiben sieht, würde als die wahre Stärke des Eigenlichts ausgeruhter Netzhautstellen zu betrachten sein, nur besonders deutlich wahrnehmbar durch den Contrast.

Zeitlicher Verlauf eines durch constante Beleuchtung erzeugten Eindrucks. Die beschriebenen Erscheinungen lassen auf folgenden Verlauf der Empfindungsstärke schließen, wenn von einem bestimmten Augenblick ab in einer ausgeruhten Netzhautstelle eine constante Beleuchtung beginnt. Der Eindruck des ersten Moments hat eine Nachwirkung von gewisser Dauer. Dazu gesellt sich gleich darauf verstärkend der Eindruck des zweiten Zeittheilchens, und so fort jedes folgenden. Aber gleichzeitig läßt jede dadurch erregte Thätigkeit des Nerven, die sich durch die Empfindung wahrnehmbar macht, auch einen gewissen Grad von Erschöpfung zurück, die unter dem Einfluß des arteriellen Blutes nur langsam schwindet. Die später folgenden neuen Lichteinwirkungen bringen, zusammenwirkend mit den schwindenden Nachwirkungen der vorausgegangenen, also nicht mehr dieselbe Höhe der Summe hervor, wie die ersten, welche mit einem Zustand geringerer Ermüdung des Auges zusammentrafen. Daraus folgt, daß eine constante Beleuchtung eine im Anfang schnell steigende Empfindung geben muß, die dann ein Maximum erreicht, später wieder sinkt. Den Beweis für das Sinken der Erregung hat uns der vorher beschriebene Versuch mit einer weißen Scheibe gegeben, die zuerst auf schwarzem Grunde gesehen wurde und die dann, wenn ihr ein gleich heller weißer Grund untergeschoben wurde, in negativem Nachbilde erschien, dunkler als der gleich beleuchtete Grund.

Um die Zeit zu bestimmen, welche verfließt, ehe das Maximum erreicht wird, können Versuche dienen, die nach folgendem Plane angestellt wurden und von Herrn SIGMUND EXNER¹ ausgeführt worden sind. Man zeigt dem beobachtenden Auge erst ein begrenztes weißes Scheibchen (Halbkreis) auf schwarzem Grunde, eine meßbare kleine Zeit später erscheint überall ganz weißer Grund von gleicher Helligkeit, noch etwas später wird das

¹ SIGMUND EXNER, Ueber die zu einer Gesichtswahrnehmung nöthige Zeit. *Sitz.-Ber. d. Wiener Akad.* Abth. II. Bd. 58. S. 601—632. 1868.

Ganze mit Schwarz verhüllt. Der Beobachter aber behält ein Nachbild im Auge, welches den Intensitäten der letzten Momente der Empfindung entspricht. Hat der erst entstandene Eindruck schon sein Maximum erreicht, der zweite noch nicht, so bleibt das ursprüngliche Bild in positivem Nachbilde stehen. Haben beide das Maximum überschritten, so ist der erste schon mehr gesunken, als der zweite; das Nachbild ist negativ. Dazwischen liegt ein Moment, wo die ursprüngliche Figur weder positiv noch negativ sichtbar bleibt, sondern ganz ausgelöscht wird. Dann muß der erste Eindruck das Maximum schon überschritten, der zweite es noch nicht erreicht haben.

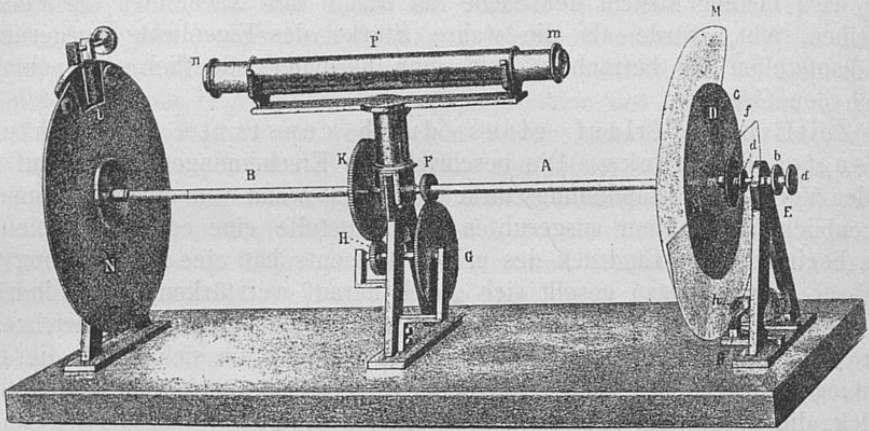


Fig. 191.

Um die Bedingungen des Versuchs herzustellen, diente der in *Fig 191* abgebildete Apparat. Der Beobachter blickte durch einen feststehenden Spalt *1* von der Breite seiner Pupille. Unmittelbar vor diesem Spalt rotirte eine Messingscheibe *N*, deren Rand den Spalt zudeckte. Nur ein Zwölftheil des Randes war ausgeschnitten. So lange dieser Ausschnitt vor dem Auge verweilte, sah der Beobachter hierdurch die Bilder eines nicht vergrößernden astronomischen Fernrohrs *P*, d. h. eines Systems zweier Convexlinsen *m* und *n* von gleicher Brennweite, die um die Summe ihrer Brennweiten von einander entfernt waren. Jenseits dieses Linsensystems rotirte eine zweite Scheibe *D* zwölfmal so schnell wie die erste, so daß sie in 10 Secunden einen ganzen Umlauf machte, während der erwähnte Ausschnitt der ersten Scheibe am Auge des Beobachters vorüberging. Diese Scheibe enthielt, eingeklemmt zwischen zwei kleineren Messingscheiben, Sektoren theils von weißem und schwarzem steifen Papier, theils konnten Spalten zwischen diesen freigelassen werden, durch welche das Fernrohr einen Augenblick Bilder ferner Objecte zeigte. Die zweite Scheibe stand im hinteren Brennpunct des Linsensystems, das Auge des Beobachters im vorderen, so daß das optische Bild der zweiten Scheibe mit der Pupille des Beobachters zusammenfiel und für diesen sich, beim Vorrücken eines verdeckenden Randes der entfernteren Scheibe, das gesehene Bild gleichmäßig im

ganzen Felde verdunkelte, wozu nur so viel Zeit nöthig war, als der genannte Rand brauchte, um die Breite der Pupille zu durchlaufen.

Bei den Versuchen erblickte der Beobachter zuerst durch das Fernrohr das begrenzte weiße Feld, dann trat ein weißer Sector der Scheibe vor, dann ein schwarzer, der den größeren Theil des Umfangs einnahm. Zwischen den einzelnen Beobachtungen blieben immer Pausen von zwei Minuten, bis der Ausschnitt der ersten Scheibe wieder den Blick frei liefs.

S. EXNER fand, daß das Maximum desto früher eintrat, je stärker die Beleuchtung des weißen Feldes war; ich gebe hier die Ergebnisse zweier Versuchreihen:

Intensität	Zeit zur Erreichung des Maximum nöthig in Secunden	
	I. Reihe	II. Reihe
1	0,2873	0,2654
2	0,2460	0,2176
4	0,2000	0,1744
8	0,1508	0,1188

Man sieht daraus, daß das Maximum desto schneller erreicht wird, je stärker das Licht, und zwar sind die Zeitdifferenzen, welche einer Verdoppelung der Beleuchtungsstärke entsprechen, nahehin gleich groß.

Der genannte Beobachter hat auch durch Benutzung verschieden starker Beleuchtungen der beiden weißen Felder noch andere Punkte der Curve abmessen können, welche die Empfindungsstärke als Function der Zeit darstellt, und dadurch die Form einer solchen Curve (*Fig 192*) ziemlich vollständig hergestellt.

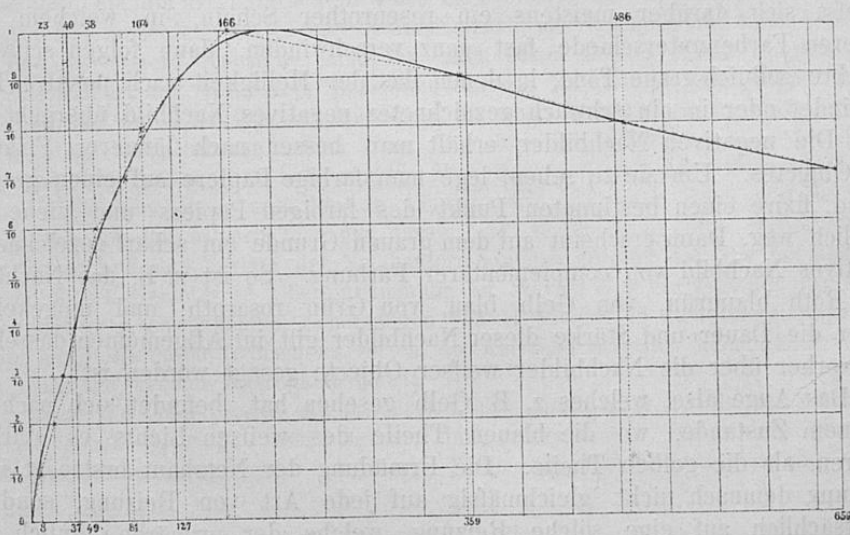


Fig. 192.

Mit demselben Apparat wurden noch Beobachtungen über die Zeit gemacht, in welcher die Wahrnehmung des Gesichtsbildes zu Stande kommt; davon später.

366 Für die Seitentheile der Netzhaut haben PURKINJE und AUBERT bemerkt, daß der Eindruck heller Objecte auf ihnen viel leichter schwindet, als im Centrum. Die Ermüdung scheint dort also viel schneller einzutreten. Für die negativen Nachbilder auf den Seitentheilen hat AUBERT gefunden, daß sie weniger intensiv sind, als die centralen, übrigens sich im Wesentlichen ähnlich verhalten. Außerdem, finde ich, werden sie viel leichter übersehen, als die centralen Nachbilder, selbst auf hellen Flächen, und nur beim Wechsel der Beleuchtungsstärke bemerkt man sie leicht.

Wir gehen jetzt über zu den Farbenerscheinungen der Nachbilder. Wenn man farbige Objecte betrachtet hat und die Nachbilder auf ganz dunklem oder weißem Grunde von verschiedener Helligkeit betrachtet, so 367 entsteht je nach Umständen ein positives oder negatives Bild. Das positive Bild ist im Anfang in den Stadien seiner größten Helligkeit gleich gefärbt mit dem Object, und das negative Bild ist, wenigstens sobald es vollständig und kräftig entwickelt ist, complementär zu dem Objecte gefärbt. Der Uebergang von dem positiven zu dem negativen Bilde geschieht indessen gewöhnlich so, dass sich weißliche oder graue Farbtöne anderer Art dazwischenschieben, und zwar ist die Ordnung dieser Farben in der Regel dieselbe, gleichviel ob der Uebergang durch allmähiges Nachlassen der Reizung oder durch Steigerung der Helligkeit des Grundes geschieht.

Die positiven Bilder entwickelt man am besten durch momentane Wirkung des primären Lichtes. Hat man dabei verschieden gefärbte Objecte vor sich, so zeigt das zurückbleibende positive Nachbild im Anfange die Objecte genau in ihren natürlichen Farben. Ehe das Nachbild verschwindet, ergießt sich darüber meistens ein rosenrother Schein, in welchem die früheren Farbenunterschiede fast ganz verschwinden, dann folgen schwach gefärbte gelblich-graue Töne, in denen das der Helligkeit nach positive Bild schwindet oder in ein schwach gezeichnetes negatives Nachbild übergeht.

Die negativen Nachbilder erhält man besser nach längerer Fixation des Objectes. Um sie zu sehen, lege man farbige Papiere auf einen grauen Grund, fixire einen bestimmten Punkt des farbigen Papiers und ziehe es plötzlich weg. Dann erscheint auf dem grauen Grunde ein scharf gezeichnetes negatives Nachbild von complementärer Färbung. So ist z. B. das Nachbild von Roth blaugrün, von Gelb blau, von Grün rosaroth, und umgekehrt. Ueber die Dauer und Stärke dieser Nachbilder gilt im Allgemeinen dasselbe, was vorher über die Nachbilder weißer Objecte gesagt worden ist.

Das Auge also, welches z. B. Gelb gesehen hat, befindet sich nachher in einem Zustande, wo die blauen Theile des weißen Lichts es stärker afficiren, als die gelben Theile. Die Ermüdung der Netzhaut erstreckt ihre Wirkung demnach nicht gleichmäßig auf jede Art von Reizung, sondern hauptsächlich auf eine solche Reizung, welche der primären ähnlich ist. Sehr einfach wird dieser Umstand aus TH. YOUNG'S Annahme dreier für die

verschiedenen Farben verschieden empfindlichen Nervenarten erklärt. Denn da das farbige Licht diese drei Arten von Nerven nicht gleich stark erregt, so müssen den verschiedenen Graden der Erregung auch verschiedene Grade der Ermüdung nachfolgen. Hat das Auge Roth gesehen, so sind die rothempfindenden Nerven stark gereizt und sehr ermüdet, die grünempfindenden und violetteempfindenden schwach gereizt und wenig ermüdet. Fällt nachher weißes Licht in das Auge, so werden die grün- und violetteempfindenden Nerven davon verhältnißmäfsig stärker afficirt werden, als die rothempfindenden. Der Eindruck des Blaugrün, der Complementärfarbe des Roth, wird deshalb in der Empfindung überwiegen.

Entsprechend verhält es sich, wenn man negative Nachbilder von farbigen Objecten auf farbigem Grunde betrachtet. Aus der Farbe des Grundes schwinden immer hauptsächlich diejenigen Bestandtheile, welche in der primär angeschauten Farbe überwiegen. So läßt ein grünes Object auf gelbem Grunde ein rothgelbes Nachbild, auf blauem Grunde ein violettes. Denken wir uns das Gelb aus Roth und Grün, das Blau aus Grün und Violett zu- 368 sammengesetzt, dann das Grün in beiden durch Einfluß der Ermüdung vermindert, so ergiebt sich der Erfolg, daß das Nachbild im Gelb sich dem Roth, im Blau dem Violett nähern wird. Ueberhaupt liegt die Farbe des Nachbildes immer zwischen der des Grundes und der der Complementärfarbe des Objects, und kann, soweit es nur den Farbenton, nicht die Helligkeit betrifft, als eine Mischung von beiden angesehen werden.

Herr C. HESS hat unter Leitung von Herrn E. HERING Versuche über farbige 10 Nachbilder angestellt,¹ deren Ergebnisse sich durchaus unter die oben aufgestellte Regel einordnen, die er aber glaubt zur Widerlegung der Theorie von TH. YOUNG verwerthen zu können. Seine Einwendungen wären richtig einer Farbentheorie gegenüber, die die Grundfarben in einer oder einigen der Spectralfarben zu finden glaubt, und außerdem das Eigenlicht der Netzhaut als verschwindend klein betrachtet. Gegen die erstere Annahme habe ich mich schon in der ersten Ausgabe dieses Werkes erklärt mit besonderer Beziehung auf die Nachbilder. Nun wissen wir von dem Verlauf der Ermüdungserscheinungen im Auge bisher noch zu wenig, da wir es in allen beobachtbaren Fällen ohne Ausnahme mit Ermüdung aller drei Faserarten zu thun haben, um Schätzungen über den gröfseren oder kleineren Einfluß mit einiger Sicherheit anstellen zu können, wie sie Herr HESS anstellt. Aber schliesslich handelt es sich hier nur darum, zu zeigen, daß eine Hypothese über die Gröfse und den Verlauf der Netzhautermüdungen möglich ist, die mit den That-sachen dieses Gebietes in Übereinstimmung ist, welche hier übrigens nur dazu dienen soll, statt der schwankenden Schätzungen von HESS eine in sich folgerichtige Rechnung mit bestimmten Gröfsen zu setzen, die übrigens natürlich keinen anderweitigen Anspruch auf genaue Richtigkeit macht.

Setze die Componenten des primären Lichts gleich x, y, z , die des reagirenden Lichts gleich ξ, η, ζ . Setze ferner, daß während der Einwirkung von x die Erregungsstärke der gleichen Grundfarbe ξ mit steigender Zeit t abnehme, wie

¹ C. HESS, Über die Tonänderungen der Spectralfarben durch Ermüdung der Netzhaut mit homogenem Lichte. *Grünes Archiv*. Bd. 36. Abth. 1. S. 1–32. 1890.

Ebenso

$$\xi' = \xi \cdot e^{-k x t}.$$

$$\eta' = \eta \cdot e^{-k y t}$$

$$\zeta' = \zeta \cdot e^{-k z t}.$$

Diese Gleichungen drücken aus, daß diese Erregungen mit der Zeit um so schneller abnehmen, je stärker die Intensität der ermüdenden Farbe.

Daraus folgt

$$\frac{\xi'}{\eta'} = \frac{\xi}{\eta} \cdot e^{-k(x-y)t}.$$

Ist also im ermüdenden Licht x stärker vertreten als y , so wird $\frac{\xi'}{\eta'}$ mit steigender Ermüdung kleiner als $\frac{\xi}{\eta}$. Ebenso ist, wenn $y > z$ das $\frac{\eta'}{\zeta'} < \frac{\eta}{\zeta}$, d. h. der Farbenton des Nachbildes ändert sich so, daß das ξ am meisten zurücktritt, η weniger, ζ am wenigsten. Zurücktreten der überwiegenden Farbe x nähert das Nachbild im Farbenton deren Complementärfarbe, wozu sich dann noch die complementäre Färbung des Eigenlichts der Netzhaut gesellt.

Gäbe es Spectralfarben, die nur einer oder zweien Grundfarben entsprächen, in denen also $z = 0$ oder $y = z = 0$ wäre, so würde für diese keine Ermüdung eintreten und deren Nachbild würde sich der Complementärfarbe dieser Farben nicht nähern können, und die letztere nun aus dem Eigenlicht herkommen können. Dann wäre der Einwurf von HESS berechtigt.

368

Von besonderem Interesse sind die Fälle, wo die Farbe des Objects der des Grundes gleich oder complementär ist. Um Beobachtungen über den ersteren Fall zu machen, thut man am besten, ein schwarzes Object auf einen farbigen Grund zu legen, und nachdem man einen Punkt seines Randes eine Weile fixirt hat, es plötzlich hinwegziehen. Unter diesen Umständen ist der neben dem Schwarz sichtbare Theil des Grundes als das primäre farbige Object zu betrachten, der ganze farbige Grund nach Entfernung des schwarzen Objects als das reagirende Licht. Man sieht alsdann ein helles Nachbild des schwarzen Objects, in welchem die Farbe des Grundes nicht bloß lichtstärker, sondern auch gesättigter ist, als im Rest des Grundes, so daß sie auf dem letzteren mit vielem Grau gemischt zu sein scheint. Bei einiger Aufmerksamkeit erkennt man das Dunkel- und Grauerwerden des farbigen Grundes auch wohl, ehe man das schwarze Object wegnimmt. Recht auffallend wird es im letzteren Momente, weil nun an dieser Stelle die Farbe in der Weise sichtbar wird, wie sie im ersten Augenblicke des Beschauens dem unermüdeten Auge erscheint. Dieses Grauerwerden des Grundes findet sich nicht bloß bei gemischten weifslichen Farben, bei welchen es so stark werden kann, daß der Farbenton des Grundes ganz verschwindet, sondern selbst bei den homogenen Farben des Spectrum und gewisser farbiger Gläser, nachdem man auf das Sorgfältigste alles fremde

weißes Licht ausgeschlossen hat. Wenn man z. B. ein mit Kupferoxydul roth gefärbtes Glas, welches nur rothe Strahlen hindurchläßt, vor die Augen nimmt, den Kopf und die Ränder des Glases mit einem dunkeln Tuche umhüllt, so daß nur rothes Licht zu den Augen dringen kann, dann durch das Glas nach einer weißen Fläche sieht und vor diese ein schwarzes Object bringt, welches man plötzlich entfernt, so sieht man den Gegensatz zwischen dem rothgrauen Grunde und dem gesättigten Roth des Nachbildes ganz deutlich. Die Erklärung dieser Erscheinung liegt offenbar darin, daß während des Anschauens der rothen Farbe des Grundes die betreffenden Theile der Netzhaut für Roth ermüden und es deshalb schwächer empfinden, als die unermüdeten Theile, auf welche das Bild des schwarzen Objects gefallen war. Ist das Roth auch noch mit Weiß gemischt, so nimmt die Empfindlichkeit für das Roth in einem stärkeren Verhältnisse ab, als für die übrigen Farben, die in dem beigemischtem Weiß enthalten sind, und die Farbe muß deshalb durch die Ermüdung der Netzhaut verhältnißmäßig weißlicher werden; da sie aber auch gleichzeitig lichtschwächer wird, erscheint sie grau. Dasselbe geschieht nun aber nicht bloß mit weißlichem Roth, sondern auch mit ganz reinem Roth, und hier wird man die Erklärung theils von dem Lichtnebel des dunkeln Gesichtsfeldes, theils von der gemischten Natur der Eindrücke sämtlicher Spectralfarben herleiten müssen.

Wenn die primäre Farbe complementär zu der reagirenden Farbe des Grundes ist, so erscheint die letztere in der Ausdehnung des Nachbildes gesättigter als auf den nicht ermüdeten oder durch die Farbe des Grundes ermüdeten Theilen der Netzhaut. Wenn man auf einen rothen Grund ein blaugrünes Object legt, und nachdem man es eine Weile fixirt hat, es wegzieht, so erscheint ein gesättigt rothes Nachbild, ähnlich als hätte man ein schwarzes Object weggenommen. Man kann sich aber leicht überzeugen, daß die Farbe im Nachbilde eines complementären Objects noch gesättigter ist, als im Nachbilde eines schwarzen Körpers. Am einfachsten ist es, sich ein Object zu verfertigen, von dem ein Theil schwarz, ein anderer farbig, z. B. blaugrün ist, dies auf einen complementären (rothen) Grund zu legen, und einen Punkt des Grundes dicht an der Grenze des Schwarz und Blaugrün zu fixiren. Nimmt man das Object dann weg, so erscheint in dem ganzen Nachbild die Farbe des Grundes klarer als in dem vorher unbedeckten Theile des Grundes. Das Nachbild des Blaugrün ist etwas dunkler als das des Schwarz, aber es ist nicht das Roth, welches dort lichtschwächer wäre, vielmehr erscheint das Roth im Nachbilde des Schwarz wie von einem weißlichen Nebel übergossen, welcher im Nachbilde des Blaugrün das Roth freiläßt. Es erscheint also das Nachbild des Roth auf Roth grauroth, des Schwarz auf Roth weißroth, des Blaugrün auf Roth gesättigt roth. Man sieht diese Unterschiede sehr gut, wenn man bei diesem Versuch alle drei Nuancen neben einander hat.

Setzt man voraus, daß das Roth des Grundes noch Weiß enthält, so

erklärt sich der Erfolg leicht. Schwarz ermüdet das Auge gar nicht, es empfindet im Nachbilde unverändert das weißliche Roth des Grundes. Roth ermüdet das Auge für Roth, es empfindet im Nachbilde das Roth schwächer, die übrigen Bestandtheile des Weiß ziemlich ungeschwächt, die Empfindung ist die von lichtschwachem weißlichen Roth (Grauroth). Das Blaugrün macht dagegen das Auge unempfindlicher für die dem Roth fremdartigen Theile in dem Lichte des Grundes, und läßt also das Roth im Nachbilde freier von fremden Beimengungen heraustreten.

Dieselben Versuche gelingen nun aber ebenso gut mit reinen Spectralfarben. Ich habe im Felde eines Fernrohrs mir einzelne Theile des Spectrum hergestellt mit allen Vorsichtsmafsregeln, welche nöthig sind, um die letzten Reste weißen Lichts zu entfernen. Der Grund war so tiefschwarz, daß man die Blendung des Fernrohrs auf ihm nicht mehr erkennen konnte, vielmehr die wolkigen Figuren des inneren Lichtnebels auf ihm sah. Das Auge wurde von keinem anderen Lichte, als dem eines kleinen Theils des Spectrum getroffen. Auf dieses farbige Feld warf ich nun Nachbilder von complementären Spectralfarben. Zu dem Ende war vor das Ocular unter 45° ein kleines bewegliches Stahlspiegelchen gestellt, in welchem man gespiegelt einen passend abgeblendeten Theil eines anderen, sehr hellen Spectrum sah, durch eine kreisförmige Blendung abgegrenzt. Für dieses zweite Spectrum ist ein so hoher Grad von Reinheit nicht erforderlich. Die Anordnungen waren so getroffen, daß der ganze Kreis in der gleichen Farbe erschien. Sobald man das Spiegelchen vor dem Ocular fortzog, sah der Beobachter statt des bisher durch Reflexion gesehenen Kreises durch das Fernrohr auf das reine Spectrum. Auf diesem erschien das Nachbild des farbigen Kreises. Es traten hier genau dieselben Erfolge ein, wie bei den ähnlichen Versuchen mit Pigmentfarben. Namentlich erschien das Nachbild der Complementärfarben als eine gesättigtere Farbe im Vergleich mit der Farbe des Grundes. Der letztere schien wieder mit einem weißlichen Lichtnebel bedeckt zu sein, welcher an der Stelle des Nachbildes gleichsam fortgenommen war, und die Farbe des Grundes in ihrer größten Reinheit hervortreten liefs. Aus diesen Versuchen geht unabhängig von den Gründen, die uns die Untersuchung der Farbenempfindlichkeit in § 21 geliefert hat, die wichtige Folgerung hervor, daß die gesättigtesten objectiven Farben, welche existiren, die reinen Spectralfarben, im unermüdeten Auge noch nicht die gesättigteste Farbenempfindung hervorrufen, welche überhaupt möglich ist, sondern daß wir diese erst erreichen, wenn wir das Auge gegen die Complementärfarbe unempfindlich machen.

Auch in diesem Falle könnte man glauben, daß der weißliche Schein, welcher den Grund überzieht, der innere Lichtnebel sei, dessen störende Theile im Nachbilde entfernt seien. In der That sieht man, wenn man das Auge auf den dunkeln Grund neben dem Spectrum richtet, ein complementär gefärbtes Nachbild. Auch in diesem Falle halte ich diese Erklärung für ungenügend, weil die Erscheinung auf sehr hellen Spectralfarben zu sehen

ist, gegen welche die scheinbare Helligkeit des Lichtnebels doch wohl zu klein erscheint. Folgen wir dagegen der Annahme von TH. YOUNG, so würden wir hier die reinen Farbenempfindungen der einzelnen Nervenarten vor uns haben, gegen welche die Spectralfarben immer noch weislich er- 371
scheinen müssen, weil nach der nothwendigen Modification jener Annahme jede einzelne Art homogenen Lichts nicht bloß eine einzige Art von Nervenfasern ausschliesslich erregen kann.

Alle diese Versuche über Nachbilder farbiger Objecte auf farbigem Grunde kann man nun auch so anstellen, daß man den Fixationspunkt wechselt, oder das Object dem Auge nähert und wieder davon entfernt, wie dies vorher für weisse Objecte beschrieben ist. Hat man zum Beispiel eine blaue Scheibe auf gelbem Grunde eine Weile so betrachtet, daß man einen Punkt derselben fixirte, und wechselt nun den Fixationspunkt, so fällt das Nachbild der blauen Scheibe zum Theil auf den Grund, zum Theil auf die Scheibe; ebenso das Nachbild des Grundes. Wo das Nachbild der Scheibe auf den Grund fällt, erscheint das Gelb gesättigter, ebenso das Blau, wo das Nachbild des Grundes auf die Scheibe fällt. Dagegen erscheint das Blau und Gelb mit Grau gemischt, wo das Nachbild der Scheibe auf die Scheibe, und das Nachbild des Grundes auf den Grund fällt. Der Erfolg der übrigen Abänderungen dieser Versuche läßt sich leicht übersehen. Zuweilen mischen sich auch Contrasterscheinungen ein. Hat man ein weisses Papierschnitzelchen auf rothem Grunde fixirt, und wirft dann das Nachbild auf Weiss, so ist das Nachbild des rothen Grundes blaugrün, das des kleinen weissen Feldes roth durch Contrast zu jenem Grün, wie sich im nächsten Paragraphen zeigen wird. Am besten legt man zu dem Ende das farbige Papier auf ein weisses Blatt, auf das farbige dann ein weisses Schnitzelchen, welches man mit einer Pincette festhält, während man das farbige Blatt wegzieht. Schwach erscheint eine solche Contrastfärbung auch um das Nachbild eines farbigen Quadrats auf weissem Grunde.

Aber nicht nur farbige, sondern auch weisse Objecte geben farbige Nachbilder, in denen die Farben gewöhnlich mannigfach wechseln. Man bezeichnet diese Erscheinungen gewöhnlich als das farbige Abklingen der Nachbilder. Die Reihenfolge der Farben ist dabei verschieden, je nach der Dauer und der Intensität des primären Eindrucks. Die Farbenfolge nach momentaner Anschauung finde ich übereinstimmend mit FECHNER¹ und SEGUIN.² Das ursprüngliche Weiss geht schnell durch grünliches Blau (SEGUIN Grün) in schönes Indigblau, später in Violett oder Rosenroth über. Diese Farben sind hell und klar. Dann folgt ein schmutziges oder graues Orange, während dessen sich das positive Nachbild meist schon in ein negatives verwandelt, und im negativen Bilde wird dieses Orange oft noch ein schmutziges Gelbgrün. Nach sehr kurzer Einwirkung des primären Lichts ist meist das Orange die letzte Farbe, und das Bild schwindet, ehe es ne-

¹ FECHNER, *Pogg. Ann.* L. 220. 1840.

² SEGUIN, *Annales de Chimie et de Physique.* 3. Ser. XLI. 445—446. 1850.

gativ wird. Dieselbe Farbenfolge fand auch AUBERT nach der Betrachtung des etwas bläulich gefärbten Entladungsfunkens einer Leydener Flasche, nur war das Orange auf dunklem Grunde nicht deutlich erkennbar, auf weißem dagegen sowohl diese Farbe als das folgende Grün sehr deutlich. Umgeben ist das Bild von einem gelben Hofe, wohl dem negativen Nachbilde des durch unregelmäßige Brechung im Auge zerstreuten bläulichen Lichts.

372 Die bisher beschriebenen Erscheinungen beziehen sich auf den Verlauf des Nachbildes im ganz dunkeln Felde. Wenn es dabei überhaupt zur Bildung negativer Nachbilder kommt, so erscheinen diese nur in das Eigenlicht des dunkeln Feldes dunkel eingezeichnet. Wenn man nun während des Bestehens eines solchen Nachbildes allmählig reagirendes Licht zuläßt, indem man die Hände, oder ein dunkles Tuch, mit dem man die Augen bedeckt hat, langsam hinwegzieht, so beobachtet man im Allgemeinen, daß das Nachbild dabei in die späteren Stadien seiner Farbenentwicklung übergeht und wieder zurückschreitet, wenn man das reagirende Licht wieder schwächer macht. Läßt man z. B. Licht hinzutreten, während das Bild im absoluten Dunkel blau ist, so geht es durch Rosaroth in ein negatives gelbes Bild über. Deckt man schnell genug wieder zu, so findet man das Blau wieder. Ist das Bild im absoluten Dunkel rosaroth, so wird es durch schwaches Licht gelbroth u. s. w. Wenn das positive Nachbild im dunkeln Gesichtsfelde schließlichsich ganz geschwunden ist, sieht man auf schwach erleuchtetem Grunde noch längere Zeit ein graues oder grüngraues negatives Nachbild, und der hellere Grund, der es umgibt und der den nicht ermüdeten Stellen des Auges entspricht, erscheint dann rosaroth.

Zur Erklärung dieser Erscheinungen hat PLATEAU die Annahme gemacht, daß die Dauer der einzelnen Stadien der Nachbilder für die verschiedenen Farben verschieden sei, und er suchte dies durch die im vorigen Paragraphen erwähnten Versuche auch direct zu erweisen. Um eine vollständige Erklärung zu geben, müßten wir nicht blos den Verlauf der nachbleibenden Reizung, sondern auch den Verlauf der Ermüdung vollständig kennen. Indessen läßt sich doch einiges aus ihnen schliessen. Im ganz dunkeln Gesichtsfelde sind nämlich die ersten hellsten Stadien der Erscheinung ziemlich unabhängig von dem Grade der Ermüdung, weil diese erst in Betracht kommt, sobald die Helligkeit des positiven Nachbildes sich von der des inneren Lichtnebels nicht mehr sehr unterscheidet. Wir können deshalb als wahrscheinlich annehmen, daß die grünblaue, blaue und rosaroth Phase nur von der nachbleibenden Reizung bedingt sind, während bei der gelben und grünen, in denen sich das negative Nachbild ausbildet, auch die Ermüdung in Betracht kommt. Wir müssen daraus schliessen, daß die nachbleibende Reizung für die drei Farben Roth, Grün, Violett in der Weise abnimmt, wie die nebenstehende *Fig. 193* es darstellt. Darin bedeuten die horizontalen Abscissen die Zeit, die verticalen Ordinaten der Curven die Intensität der Reizung. Die ausgezogene Linie entspricht dem Grün, die punktirte dem Violett, die gestrichelte dem Roth. Die positive Nachwirkung

nimmt für alle Farben continuirlich ab, aber so, daß die Abnahme des Roth im Anfang die schnellste, nachher die langsamste ist, die des Grün anfangs die langsamste, nachher die schnellste. Bei den dargestellten Größen der Farbeempfindung wird in der Zeit von 0 bis 1 Blaugrün überwiegen, bei 1 Blau, bei 2 Violett, bei 3 Purpur, welcher all-

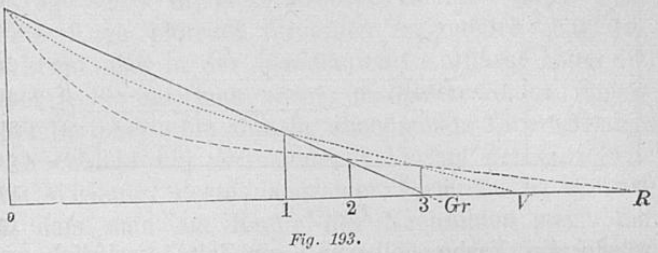


Fig. 193.

373

mäßig sich mehr in das Rothe zieht. Nun mischt sich in Wirklichkeit aber die Ermüdung ein, welche in dem weißlichen inneren Lichtnebel ein grünliches Nachbild entwickelt, so daß also die Ermüdung für Grün, dessen nachbleibende Erregung am schnellsten geschwunden ist, schließlich am geringsten zu sein scheint. Dieses grüne negative Bild, mit positivem Roth gemischt, wird ein Gelb geben, welches je nach der größeren Stärke des einen oder anderen heller oder dunkler, als der Grund erscheinen kann, und zuletzt in Grün übergeht, wenn auch das Roth erlischt. Bei PLATEAU'S Versuchen über die Dauer der Farbeindrücke stellte sich dasselbe Gesetz der Abnahme heraus, daß diejenigen Eindrücke, welche im Anfang am schnellsten abnahmen, schließlich am längsten in schwachen Resten dauerten. Ganz anders gestaltet sich die Reihe der Farbercheinungen, wenn die Ermüdung größer geworden ist, wie es nach längerer Einwirkung weissen Lichts, oder nach Einwirkung sehr intensiven Lichtes stattfindet. Bei längerer Einwirkung weissen Lichtes zeigt sich nach FECHNER'S Beobachtungen der Einfluß der Ermüdung schon während der Betrachtung des Weissen dadurch, daß dieses farbig wird. Nachdem er die Augen eine Zeit lang geschlossen gehalten hatte, um die Nachwirkung früherer Eindrücke zu beseitigen, richtete er dieselben auf ein weißes im Sonnenschein auf schwarzem Papier liegendes Feld. In den ersten Momenten liefs sich wegen einer Art von Blendung kein sicheres Urtheil über das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein einer Farbe fällen; eine solche scheint sich in der That erst nach einiger Zeit zu entwickeln. Bald nämlich färbt sich das Papier verschieden gelb, dann blaugrau oder blau, ohne daß bei oftmaligen Versuchen eine Übergangsstufe durch Grün wahrzunehmen gewesen wäre, dann rothviolett oder roth. Die gelbe Phase ist die kürzeste; die blaue dauert oft ziemlich lange, ehe sie in die folgende übergeht. Nach der rothen oder rothvioletten konnte er keine weitere wahrnehmen, obgleich er den Versuch bis zu großer Anstrengung des Auges fortsetzte. Auch im verbreiteten Tageslichte nahm er die angegebene Folge der Färbungen oft wahr, obschon einmal mit größerer Entschiedenheit als das andere Mal; die beiden letzten Färbungen erkannte er hier in der Regel leichter als die erste gelbe. FECHNER stellt die Erscheinungen durch drei Curven, aber mit

anderen Grundflächen vor, ähnlich denen der *Fig 194*, wo wieder die horizontalen Abscissen der Zeit proportional sind, die verticalen der Erregungsstärke der Netzhaut bei dauernder Betrachtung einer weissen Fläche. Die

ausgezogene Curve entspricht dem Grün, die gestrichelte dem Roth, die punktirte dem Violett.

In der Zeit von 0 bis 1

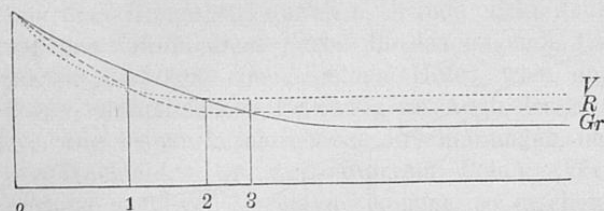


Fig. 194.

würde die Farbe gelbgrün, zur Zeit 1 weiflich grün, bei 2 weiflich blau, bei 3 violett, später rosaroth sein.

Nach längerer und stärkerer Einwirkung primären weissen Lichts zeigt das Nachbild auf ganz dunklem Grunde folgende Farbenreihe: Weifs, Blau, 374 Grün, Roth, Blau und auf weissem Grunde schliesslich noch blaugrün und gelb. Beim Roth wird das Bild negativ. SEGUIN schaltet in seiner Beschreibung einige Zwischenstufen mehr ein. Die Farben der ersten Reihe sind ihm Weifs, Grün, Blau, die der zweiten (negativen) Gelb, Roth, Violett, Blau, Grün. Wenn die Einwirkung des weissen Lichts eine gewisse Zeit überdauert hat, ist diese Farbenreihe constant und wird durch längere Einwirkung nicht weiter geändert. Bei einer kürzeren, aber doch nicht bloß momentanen Dauer der primären Lichtwirkung, wo das primäre Weifs sich deutlich gelb gefärbt hatte, war die Farbenfolge Gelb, Blau, Rothgelb, dann wurde es negativ grün. BRÜCKE giebt an: Grün, Blau, Roth, dann negativ ohne deutliche Farbe. Die blaue Phase scheint also immer die erste Änderung des primären Lichteindrucks zu sein, dann folgt eine rosenrothe, rothgelbe bis grüne positive Phase, je nach der Dauer des primären Eindrucks.

Auch bei diesen farbigen Nachbildern bestätigt sich die Regel, daß Erhellung des Grundes durch weisses Licht die späteren Phasen des Nachbildes herbeiführt, während Verminderung des reagirenden Lichtes das Nachbild wieder auf frühere Phasen zurücktreten läßt. So oft ich Nachbilder beobachtet habe von gleichmäßig erleuchteten Flächen, für deren Umrisse mein Auge gut accommodirt war, habe ich die Farbenveränderungen des Nachbildes entweder auf der ganzen Fläche gleichzeitig, oder auch wohl unregelmäßig von dieser oder jener Seite vorschreitend gesehen. Dagegen ist es nach dem Anblicke der Sonne oder ähnlicher blendender Objecte gewöhnlich, daß die Farbenveränderungen des Bildes vom Rande nach der Mitte hin vorschreiten. Ausser den Unregelmäßigkeiten der Brechung, welche für hellere Objecte immer grössere Mengen Licht in die Nachbarschaft des Bildes verbreiten, kommt hier auch wohl in Betracht, daß bei schmerzhafter Blendung des Auges es fast unmöglich wird, die Accommodation und Richtung des Auges festzuhalten. Die Folge davon ist, daß die der Mitte des Sonnenbildes entsprechende Stelle der Retina anhaltender und intensiver

der Lichtwirkung unterworfen wird, als die dem Rande jenes Bildes näheren. An den Sonnenkörper selbst schließt sich ringsum der Widerschein des in der Atmosphäre und im Auge selbst diffus zerstreuten Lichts. Wenn man das im Dunkel ausgeruhte Auge plötzlich für einen Augenblick nach der Sonne blicken läßt, so erkennt man in der blendenden Lichtfläche kaum die Umrisse des Sonnenkörpers. So hat man denn in diesen Fällen immer eine vom Centrum nach der Peripherie hin allmähig abnehmende Lichtwirkung, und der entspricht im Nachbilde ein verschiedener Verlauf der einzelnen Phasen. Je intensiver die Wirkung, desto langsamer verlaufen im Ganzen die einzelnen Phasen, so daß man am Rande des Nachbildes meist die früheren Stadien sieht, welche allmähig gegen das Centrum vorrücken. Außerdem ist die Reihenfolge der Farben in den peripherischen Theilen wegen der geringeren Ermüdung meist etwas abweichend von der in der Mitte. Das Nachbild hat in seinen ersten Stadien dieser Erklärung entsprechend einen größeren Umfang als die scheinbare Gröfse der Sonne beträgt, und man verfällt leicht in den Fehler, das ganze Nachbild für das Bild der Sonnenscheibe allein zu halten, und zu glauben, daß die verschiedenen farbigen Ringe, die sich darin entwickeln, dieser selbst angehören, während sie in Wirklichkeit ihrer Umgebung entsprechen. Um das Nachbild 375 der Sonne möglichst regelmäfsig zu entwickeln, nehme ich ein sehr dunkel gefärbtes Glas (oder ein berufstes Glas oder mehrere complementär gefärbte Gläser über einander gelegt), sehe damit nach der Sonne hin, welche durch das Glas nur noch als eine schwach sichtbare Lichtscheibe erscheinen muß. Dann nehme ich das Glas für einen Moment weg, und schliesse sogleich die Augen. So werden dieselben verhältnißmäfsig wenig angegriffen, und haben wenig Zeit, ihre Stellung zu verändern, während doch das Nachbild sich sehr glänzend entwickelt. Unter diesen Umständen finde ich auch im Nachbilde meist einen Kern, welcher in seiner ganzen Ausbreitung eine gleichmäfsige Färbung hat, und ziemlich die Gröfse der scheinbaren Sonnenscheibe besitzt, so daß man die Abweichungen, welche am Rande vorkommen, den Fehlern der Brechung im Auge zuschreiben kann.

Man sieht unter diesen Umständen in der Umgebung des Sonnenbildes schnell die Phasen des Nachbildes verlaufen, welche weiße Gegenstände nach momentanem Anblick geben. Positives Blau, Rosaroth, welches durch Gelb in negatives Dunkelgrün übergeht, während das Bild der Sonne selbst in dieser ersten Phase als ein verwaschener, nicht regelmäfsig runder weißer Fleck erscheint, der ungefähr zu der Zeit, wo der Grund rosenroth geworden ist, in die zweite Phase tritt, und sich hellblau färbt. Die zweite geht meist schnell in die dritte Phase über, indem das Blau zuerst am Rande, dann auch in der Mitte grün wird, während am Rande ein rothgelber Saum entsteht, der dunkler als die Umgebung ist, und an dessen äußerem Rande sich dann auch wohl schon in dieser Phase ein noch dunklerer blaugrauer Saum abzeichnet. Richtet man die Augen während dieser Phase auf ein weißes Feld, so verwandelt sich das positive Grün durch Violett in das negative Blutroth der folgenden Phase.

Die vierte Phase entsteht, indem das Roth des Saumes sich über die Mitte des Bildes verbreitet. Der blaugraue Saum wird dafür breiter und dunkler. Das ganze Nachbild ist jetzt dunkler als die Umgebung. Letztere erscheint im Gegensatz dazu weißlich oder grünlich. Es ist dies das letzte negative Grün vom Bilde der Himmelsfläche. Die etwa vorhandenen Nachbilder der Fensterstäbe erscheinen darin hell. Blickt man in dieser Phase auf weißen Grund, so geht das Roth in Grünblau über.

In der fünften Phase endlich nimmt das ganze Nachbild die blaue Farbe des bisherigen Saumes an, und verschwindet im dunkeln Felde meist in diesem Stadium des Blau, während es auf weißem Felde grünblau erscheint.

Diesen von FECHNER aufgestellten Phasen möchte ich noch eine sechste anschließen, wo man im dunkeln Felde vom Nachbilde nichts mehr erkennt, wohl aber auf weißem Felde noch einen gelben oder bräunlichen Schein sieht. Endlich nach ziemlich langer Zeit schwindet auch dieser. Hat man während dieser Zeit, und selbst noch später, wo der gelbe Schein geschwunden ist, auf Weiß gesehen, und schließt plötzlich die Augen, so tritt noch wieder ein schwaches positives bläuliches Nachbild auf, welches schnell wieder schwindet. Öffnet man dann die Augen, indem man sie auf Weiß richtet, so sieht man im ersten Augenblick noch wieder das gelbe Nachbild. Die 376 Erklärung dieser Erscheinung scheint mir in dem schon erwähnten Umstande zu suchen, daß in einem ermüdeten Nerven die neue Reizung langsamer verschwindet, als in den umgebenden unermüdeten Theilen der Netzhaut.

Es scheint übrigens der Verlauf dieser Nachbilder intensiven Lichts bei verschiedenen Personen nicht wesentlich verschieden zu sein, wenn sie unter denselben Umständen entwickelt werden; wenigstens stimmen in dieser Beziehung meine eigenen Beobachtungen, so weit sie reichen, mit FECHNER'S und SEGUIN'S überein.

Bei dieser complicirteren Farbenfolge dürfen wir vermuthen, daß durch die stattfindende Ermüdung die Zeit, in der die Eindrücke der einzelnen Farben in der Netzhaut schwinden, so wie auch die Perception des inneren Lichtnebels geändert sei, und da wir weder diese Verhältnisse genau genug kennen, noch wissen, wie die Ermüdung selbst bei verschiedenen Graden derselben für die einzelnen Farbenempfindungen verschwindet, so ist eine vollständige Erklärung der einzelnen Stadien dieses farbigen Abklingens nicht möglich. Um sie zu geben, würde zuerst der Verlauf der Ermüdung und ihr Einfluß auf den Verlauf der Erregung für die einzelnen reineren Farbeindrücke bestimmt und verglichen werden müssen.

Wenn wir das Abklingen des Nachbildes nach Eindrücken gesättigter Farben genau beobachten, ist die Erscheinung allerdings sehr viel einfacher, aber es fehlen Farbenveränderungen doch nicht ganz. Die Hauptzüge der Erscheinung sind schon vorher angegeben worden. Es erscheint zuerst ein positives dem primären Lichte gleich gefärbtes, später ein negatives complementäres Bild. Der Übergang von positiv zu negativ geschieht

num aber nach lebhafteren Lichteindrücken in der Regel nicht so, daß das eine Bild einfach erbläst, und dann das andere sichtbar würde, sondern in diesem Übergangsstadium verändert sich die Farbe durch weißliche Farbtöne hindurch. Hat man nur eine primäre Farbe im Gesichtsfelde gehabt, so erscheinen die Farben des abklingenden Bildes noch immer ziemlich gesättigt, und sind von mehreren Beobachtern als gesättigte Farben angegeben worden, weil es im dunkeln Gesichtsfelde an einem Vergleichungspunkte fehlt. Wenn man aber an dem nur momentan gesehenen primären Objecte verschiedene Farben von ungefähr gleicher Helligkeit vor sich hatte, so sieht man, daß die Nachbilder im Übergangsstadium von positiv zu negativ viel geringere Farbenunterschiede zeigen, als die ursprünglichen Farben, indem sie alle stark gemischt sind mit dem rosarothem oder gelblichen Weiß, welches auch die Nachbilder momentan gesehener weißer Objecte zeigen. In dieser Beziehung ist namentlich das Nachbild eines momentan angeschauten prismatischen Spectrum interessant. Nachdem noch einige Secunden die primären Farben im Nachbilde sichtbar gewesen sind, und die lichtschwachen äußersten Farben sich ganz verdunkelt haben, verwandelt sich das ganze Nachbild in einen röthlich weißen Fleck von der Gestalt des Spectrum, in welchem Farbenunterschiede kaum noch angedeutet sind, nur zieht das frühere Gelb und Orange etwas in das Bläuliche, woran sich an der Stelle des früheren Roth dessen, schon negativ gewordenes grünblaues Nachbild anschließt. Um mich über den Ort der früheren Farben im Nachbilde orientiren zu können, mußte ich auf dem weißen Schirm, auf den das Spectrum projectirt war, einen schwarzen Strich machen, der parallel den 377
Farbenstreifen das Spectrum schnitt, und im Nachbilde sichtbar blieb. So erkannte ich, daß das röthlich weiße Nachbild der ganzen Ausdehnung des Spectrum vom Orange bis Indigo entspricht. Dasselbe Resultat gewinnt man, wenn man farbige Papiere von nahe gleicher Helligkeit von der Sonne bescheinen läßt, und durch momentanes Anschauen ein Nachbild entwickelt.

Es geht hieraus hervor, daß im positiven Nachbilde gefärbter Objecte nach momentanem Anblicke zuerst die vorherrschende Farbe schwindet, und damit das Nachbild dem eines weißen Objects ähnlich wird, wobei namentlich gewöhnlich die rosenrothe Phase eines solchen hervortritt. Dann entwickelt sich allmählig die Complementärfarbe des negativen Nachbildes, aber sie kann schon sichtbar werden, noch ehe das positive Bild negativ geworden ist, sie kann also heller erscheinen als der dunkle Grund. Ich glaube das Hervortreten der Complementärfarbe darauf zurückführen zu können, daß sich zu dieser Zeit das schwach und weiß gewordene positive Bild deckt mit dem durch die Ermüdung des Auges in dem inneren Lichtnebel entstehenden negativen und complementären Bilde. Es ist klar, daß durch eine solche Deckung z. B. nach Anblick von Roth positives Weiß und negatives Blaugrün zusammen ein grünlich weißes positives Bild geben können. Diese positiv complementären Bilder sind von mehreren Beobachtern¹ er-

¹ PURKINJE. Zur Physiologie der Sinne. II. 110. 1825. — FECHNER, *Pogg. Ann.* L. 213. 1840. — BRÜCKE. Untersuchungen über subjective Farben, *Denkschr. der Akad. zu Wien.* Bd. III. S. 12. 1850.

wähnt. Hat man sie allein oder nur mit der primären Farbe zusammen im Gesichtsfelde, so erscheint die Complementärfarbe ziemlich gesättigt. Kann man sie aber mit Nachbildern anderer Farben vergleichen, so habe ich stets gefunden, daß die Complementärfarbe stark mit Weiß oder Grau gemischt erschien, so lange sie noch heller als der Grund war, erst im negativen Nachbilde entwickelt sie sich dann gesättigter.

Im Sinne von TH. YOUNG'S Fartheorie würden wir diese Erscheinungen so erklären, daß jede, auch die gesättigteste objective Farbe subjectiv mit Weiß gemischt ist, daß die starke Erregung, welche der vorherrschenden Farbe entspricht, verhältnißmäßig schneller abnimmt, als die schwachen Erregungen, welche den anderen im Weiß enthaltenen Farben entsprechen, so daß der gesammte Farbeneindruck, indem er schwächer wird, auch sich dem Weiß nähert. Dann gewinnt in den lichtschwächeren Stadien des positiven Bildes endlich auch das durch Ermüdung bewirkte negative Bild mit seiner Färbung einen merklichen Einfluß.

Bei den einzelnen Farben geschieht das Abklingen nach momentanem Anblicke in etwas verschiedener Weise, je nach ihrer Verwandtschaft mit den Farbentönen des abklingenden Weiß. Beim Grün ist es meist am einfachsten, weil seine Complementärfarbe Rosaroth dem Rosaroth des abklingenden Weiß gleich ist. Dieser Farbenton entwickelt sich deshalb besonders hell und schön. Grünliches Blau geht durch Blau und Violet, Blau durch Violet in Rosaroth über, im letzteren Falle entwickelt sich die folgende Phase des Gelb reiner und kräftiger, weil sie mit der Complementärfarbe des Blau zusammenfällt. Die vor dem Rosaroth liegende grünblaue und blaue Phase des abklingenden Weiß kann sich bei den bisher genannten Farben wegen ihrer Ähnlichkeit mit diesen Farben selbst nicht wohl bemerklich machen, scheint es aber zu thun beim Gelb, welches durch grünliches Weiß in Violet übergeht, und beim Roth. Bei dem letzteren tritt statt des Rosaroth mehr eine violette, später graugrüne Farbe ein. Es schwindet übrigens verhältnißmäßig am schnellsten. Daß die grüne Stufe, wenn man keine anderen Farben zur Vergleichung im Gesichtsfelde hat, häufig gesättigt grün erscheint, ist schon vorher erwähnt. Es stimmen mit diesen Beobachtungen im Wesentlichen auch die Versuche von AUBERT, welche er bei Betrachtung des elektrischen Funken durch farbige Gläser erhielt, nur das sehr gemischte Gelb gab ihm noch die gelbe Stufe des abklingenden Weiß nach dem Violet, ehe es zum negativen Blau kam. Meist auch bildete sich ein Lichthof, der die Stadien schneller durchlief.

Nach längerer oder stärkerer Einwirkung primären farbigen Lichts machen sich ebenfalls während des Überganges von dem positiven gleichfarbigen zum negativen complementärgefärbten Bilde einige von den Phasen merklich, welche weißes Licht zu dieser Zeit zeigt. Namentlich tritt vielfach der rothe Saum, und um diesen der blaugraue Saum auf. FECHNER hat dergleichen Versuche angestellt, indem er durch Combinationen verschiedener farbiger Mittel, welche nur eine oder zwei Farben des Spectrum

durchliefsen, nach der Sonne sah; ich selbst kann einige Beobachtungen hinzufügen, welche ich mit prismatischen Farben angestellt habe, indem ich eine runde Öffnung betrachtete, durch welche Sonnenstrahlen, die ein Prisma passirt hatten, traten. Wenn das farbige Licht so intensiv ist, dafs es weifs oder gelb erscheint, so bleibt dies auch anfangs im Nachbilde, dann entwickelt sich über allmählig die eigentliche Farbe deutlich.

Homogenes rothes Licht brachte FECHNER hervor, indem er theils durch ein rothes Glas, theils durch eine dicke Schicht Lackmustinctur nach der Sonne sah. Bei directer Betrachtung erschien es wegen seiner hohen Intensität gelb. Auch das Nachbild war anfangs gelb, am Rande roth, und wurde später durch Verminderung seiner Intensität ganz roth, gleichzeitig tauchte ein schwarzblaugrüner Saum auf. Im dunkeln Felde entwickelt sich bei diesem Versuche gewöhnlich kein deutliches negatives Bild. Auf weifsem Grund dagegen wird die grünblaue Farbe des Saumes central. Ich habe dasselbe an prismatischem Roth gesehen. Der Übergang vom Roth zum Grünblau geschah bei diesen Versuchen durch Violet. Nach etwas andauernder Betrachtung einer Flamme durch ein rothes Glas geschieht er dagegen meist durch ein positives Gelbgrün, dem das negative Grünblau folgt.

Homogenes Gelb erhielt FECHNER durch Combination zweier blaßgelben, eines grünen und eines blaßrothen Glases, wobei aufser Gelb nur wenig Grün durchging. Das Nachbild erschien gelb mit rothem Rande, um letzteren bildete sich ein dunkel blaugrüner Ring. Bei einem einfachen Glase, welches Roth, Gelb, Grün und eine Spur von Blau durchliefs, folgte sich Gelb, Grün, dann Blaugrau mit rothwarzem Umring. Bei reinem prismatischen Gelb sah ich ebenfalls den Übergang in Grün und den rothschwarzen Umring. Das Grün und Roth kommen im Nachbilde des 379 Weifs unter denselben Umständen vor. Dagegen sah PURKINJE,¹ nachdem er eine Kerzenflamme 12 bis 60 Secunden angeschaut hatte, die Farbenfolge: blendend weifs, gelb, roth, blau, mild weifs, schwarz.

Ziemlich reines Grün, mit Gelb gemischt, erhielt FECHNER durch ein grünes, ein hellblaues und zwei hellgelbe Gläser. Die Sonne erschien dadurch grünlichweifs; ebenso das Nachbild mit schwarzrothem Umring. Grün, mit sehr wenig Blau und Gelb gemischt, erhielt er durch drei grüne und ein gelbes Glas. Die Sonne erschien fast weifs, das Nachbild ebenso etwas grünlich mit bläulichweifsem Saum, später bläulichweifs mit schwarzrothem Umring, um den eine Zeit lang ein schwach lilafarbener Schein sichtbar war. Ich selbst erhielt von prismatischem Grün ein grünes Nachbild, blau gesäumt, und auf weifsem Grunde dunkles Purpur, gelb gesäumt.

Blau, mit Grün gemischt, erhielt FECHNER durch eine Kupferlösung. Die Sonne erschien, dadurch gesehen, weifs. Das Nachbild anfangs ebenso weifs, dann blau. Es entwickelte sich dann ein positiv grüner, um diesen

¹ J. PURKINJE, Beobachtungen und Versuche. I. 100. 1819.

ein negativ rother Rand. Prismatisches Blau erzeugte mir ebenfalls den purpurnen Saum, während die Umgebung complementär Goldgelb gefärbt erschien.

Homogenes Violett erhielt FECHNER mittels einer dicken Schicht schwefelsaurer Kupferlösung, mit Ammoniak versetzt, und eines violetten Glases. Die Sonne erschien bläulichweifs. Ebenso anfangs das Nachbild; es bekam dann einen dunkelvioletten, um diesen einen schwarzrothen Umring, die Umgebung grünlich. Die Erscheinung verschwand, ehe der Umring central wurde.

In allen diesen Fällen zeigt sich, wo der Saum des Nachbildes anfängt negativ zu werden, der rothe Saum, der auch bei den Nachbildern des Weifs eintritt, als wäre die homogene Farbe mit Weifs gemischt, dessen Abklingungsphasen sich merklich machen zu der Zeit, wo die positive Nachwirkung der Hauptfarbe mit der complementären negativen sich im Gleichgewicht hält.

Wenn das primär gesehene weisse oder farbige Licht von geringer Stärke oder bei mäfsiger Stärke von sehr geringer Dauer ist, so bleiben positive Bilder zurück, die durch sehr schwach gefärbte weifsliche Töne abklingen, deren Farbenton schwer zu benennen ist und durch Contraste in der auffälligsten Weise abgeändert werden kann, wodurch denn die sonderbarsten scheinbaren Widersprüche in den Resultaten eintreten. Hat man viele verschieden gefärbte Objecte im Gesichtsfelde, so blassen die Farbunterschiede im Nachbilde aus. Dieser Art scheinen auch die von AUBERT bei Beleuchtung farbiger Objecte mit dem elektrischen Funken erhaltenen Nachbilder gewesen zu sein. So erscheinen ihm rothe Quadrate auf Weifs im Nachbilde roth, ein breiterer rother Streifen, aus demselben Papier geschnitten, mit weissen Quadraten auf weissem Grunde dagegen grün. Das Nachbild blauer und gelber Streifen mit schwarzen Quadraten auf schwarzem Grunde erschien ihm immer gelb, auf weissem Grunde lieferten beide Streifen blaue Nachbilder. Wovon diese Verschiedenheiten abhingen, bleibt noch zu ermitteln.

380 Andere Erscheinungen des farbigen Abklingens beobachtet man an rotirenden Scheiben, welche schwarze und weisse Sektoren haben, und nicht so schnell rotiren, dafs ein ganz continuirlicher Eindruck im Auge entsteht. Wenn man eine solche Scheibe anfangs langsam, dann allmählig schneller rotiren läfst, und sie anhaltend betrachtet, aber so, dafs man vermeidet der bewegten Figur mit dem Blicke zu folgen, bemerkt man, dafs das Weifs sich färbt, und zwar an dem vorangehenden Rande röthlich, an dem hinterher folgenden bläulich. Bei schwächerem Licht zieht der röthliche Farbenton mehr in das Rothgelbe, der bläuliche in Violett, bei stärkerem der erste in Rosaroth, der letztere in Grünblau. Bei langsamer Rotation ist der bläuliche Ton anfangs über einen breiteren Theil des Weifs ausgedehnt als der röthliche. Bei schneller Rotation dagegen breitet sich das Roth als Rosaroth über das ganze Weifs aus, während das Grünblau auf die schwarzen Sektoren hinübereückt; im Ganzen erscheint dann auf der Scheibe das Violett zu über-

wiegen. Bei noch schnellerer Rotation kann man die verschiedenen Sectors nicht mehr von einander scheidern, man sieht dann das Feld fein gesprenkelt, und die Flecke zwischen violetter Rosa und Grüngrau hin und her flimmern. Endlich bei noch weiterer Steigerung der Rotationsgeschwindigkeit wird das Flimmern schwächer, die graue Mischfarbe des Weiss und Schwarz tritt immer mehr hervor, und ist nur noch von veränderlichen größeren Flecken von violetter Rosa überlaufen, welche wie die Flecken und Streifen in gewässertem Seidenzeug geformt sind.

Man sieht diese verschiedenen Stadien der Erscheinung sehr gut neben einander, wenn man eine Scheibe in drei concentrische Ringe abtheilt, wie in *Fig. 195*, und dem innersten 2 schwarze und 2 weisse Sectors, dem mittleren von beiden je 4, dem äusseren je 8 giebt. Wenn die Scheibe mit gewisser Schnelligkeit rotirt, hat man auf dem innersten Felde die überwiegend grünliche Färbung des Weiss, im mittleren die rosaroth, im äusseren das feingesprenkelte Flimmern. Bei grösserer Geschwindigkeit zeigt das innere Feld die rosaroth Färbung, das mittlere das feingesprenkelte Flimmern, das äussere das mit Violett gewässerte Grau. Ich bemerke dabei noch, dass derjenige Streif, auf welchem das Rosaroth am reinsten entwickelt ist, immer dunkler erscheint als die benachbarten Streifen, in denen der Wechsel langsamer oder schneller stattfindet. Die Ordnung der Farben, wie sie zuerst auf den weissen Streifen auftreten, ist an einer in Sectors getheilten Scheibe erst nach einiger Übung zu erkennen, leichter an einer Scheibe (*Fig. 196*), die von einer schwarzen und einer gleich breiten weissen Spirallinie bedeckt ist. Es geht daraus hervor, dass wenn ein Punkt der Retina in schneller Abwechslung von weissem Lichte getroffen und wieder verdunkelt wird, so dass die Netzhaut sich im Zustande abwechselnd steigender und sinkender Erregung findet, die Zeit der Maxima der Erregung nicht für alle Farben auf denselben Augenblick fällt, sondern die Erregung für Roth und Violett früher eintritt als für Grün.

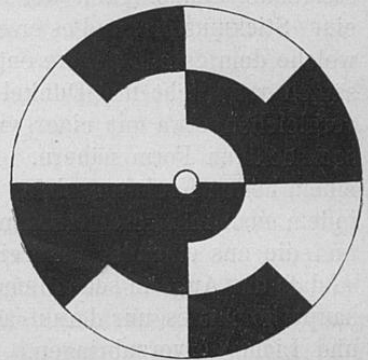


Fig. 195.



Fig. 196.

Es treten diese Farbenercheinungen gewöhnlich nicht im ersten Augenblicke des Hinsehens ein, sondern erst nach einiger Zeit, und werden dann allmählig immer glänzender. Es scheint

also ein gewisser Grad von Ermüdung des Auges durch das flimmernde Licht dafür nothwendig zu sein. Außerdem verbinden sich damit nun noch andere Erscheinungen, welche von einer verschiedenen Empfänglichkeit verschiedener Stellen der Netzhaut für diese Art von Reizung herzurühren scheinen. Es werden nämlich in dem flimmernden Licht gewisse Muster sichtbar, die zum Theil in Beziehung zu bestimmten Stellen der Netzhaut stehen.

PURKINJES¹ Lichtschattenfigur. Wenn nämlich die Geschwindigkeit der Scheibe so groß geworden ist, daß man die einzelnen Sectoren nicht mehr einzeln erkennt, so erscheint die Zahl der Sectoren vermehrt, und diese bilden gleichsam ein Gitter von verwaschen gezeichneten und gekrümmten Stäben, dessen Maschen in Richtung des Radius der Scheibe am längsten sind. Bei steigender Schnelligkeit der Bewegung wird die Zeichnung feiner, ähnlich der eines Stickmusters, und es erscheint an derjenigen Stelle des flimmernden Feldes, welche dem gelben Flecke entspricht, eine eigenthümliche in schärferen Gegensätzen von Licht und Dunkel gezeichnete rundliche oder querovale Figur, zu vergleichen etwa mit einer vierblättrigen Rose, deren Blätter aber sich einer sechseckigen Form nähern. In ihrem Centrum steht ein dunkler Punkt, von einem hellen Kreis umgeben. Dieselben Figuren kann man auch hervorbringen, indem man mit geschlossenen Augenlidern sich gegen ein helles Licht kehrt, und die aus einander gespreizten Finger vor dem Auge hin und her bewegt, so daß das Auge in schnellem Wechsel beleuchtet und beschattet wird. Überhaupt kommt es nur darauf an, einen solchen schnellen Wechsel von Schatten und Licht hervorzubringen. PURKINJE unterscheidet bei diesen Figuren die primären und secundären Gestalten. Die primären Gestalten sind in seinem rechten Auge größere und kleinere Vierecke, schachbrettartig dunkel und hell wechselnd, die den größten Theil des Gesichtsfeldes überziehen. Nur abwärts vom Mittelpunkte sieht er größere Sechsecke in einer Strecke ausgebreitet. Von der in meinen Augen ziemlich regelmäsig ausgebildeten Rosette des gelben Flecks scheint er nur einzelne Züge gesehen zu haben, dagegen sind bei mir die Flecken außerhalb des Centrum weder regelmäsig viereckig noch sechseckig, sondern unregelmäsig, nach der Peripherie an Größe zunehmend.

382 Aehnlich sah sie auch PURKINJE mit seinem schwachsichtigen linken Auge. Als secundäre Gestalten, die namentlich, wenn er die geschlossenen Augenlider gegen die Sonne kehrt, erscheinen, beschreibt PURKINJE achtstrahlige Sterne und eigenthümliche eckig gebrochene Spirallinien, welche sich aus den primären Mustern durch Verschiebung der hellen und dunkeln Vierecke entwickeln, übrigens sehr wandelbar sind. Die secundären Gestalten erschienen ihm im linken, wie im rechten Auge nur symmetrisch umgestellt.

Beobachtet man diese Erscheinungen auf den rotirenden Scheiben, so verwischt sich bei größerer Geschwindigkeit die Erscheinung immer mehr, und es bleiben nur noch die gewässerten Flecke als letzter Rest zurück, die schon vorher beschrieben sind. Zur Zeit, wo das Flimmern am heftigsten

¹ PURKINJE, *Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne*. Bd. I. Prag 1823. S. 10.

ist, verschwindet bei recht starrem Hinblicken zuweilen die ganze Figur, und es wird anscheinend hinter ihr ein dunkelrother Grund sichtbar, in welchem eine große Menge in einander verschlungener Strömungen vorhanden zu sein scheint, eine Erscheinung, in der VIERORDT¹ den Blutlauf der Netzhautgefäße zu erkennen glaubt. In meinen eigenen Augen entspricht das Bild dieser Bewegung mehr uferlosen Strömungen, die fortdauernd ihr Bett wechseln und sich hin und her schieben. Man könnte allerdings daran denken, daß die intermittirende Beleuchtung die Bewegung der Blutkörperchen sichtbar mache, ebenso wie man dadurch die Bewegungen und Formen der Tropfen eines ausfließenden Strahls sichtbar macht. Aber was ich selbst davon gesehen habe, würde ich nicht wagen für Blutbewegung zu erklären, eher glaube ich, daß Lymphkörperchen, welche im Blute sparsamer vorkommen als helle Flecke, die durch das Gesichtsfeld schiefen, dabei sichtbar werden.

Läßt man auf den flimmernden Scheiben farbiges Licht mit Schwarz wechseln, indem man entweder auf den Scheiben farbige Sektoren anbringt, oder die schwarzweißen Scheiben durch farbige Gläser betrachtet, so zeigen auch unter diesen Umständen selbst homogene Farben Spuren von farbigem Abklingen. Sieht man z. B. durch ein rothes Glas, welches keine andere Farbe als Roth hindurchläßt, so erscheint der vorausgehende Rand der hellen Felder orange, der nachfolgende rosaroth, entsprechend dem gelb und blau im weißen Licht. Der schwarze Grund überzieht sich gleichzeitig mit complementärem Grün. Noch deutlicher wird die Complementärfarbe,² wenn man von den Spiralbändern das eine farbig, das andere grau macht, die Scheibe eine Weile laufen läßt und dann plötzlich anhält, oder auch wenn man mit einer Scheibe mit abwechselnd farbigen und weißen oder grauen Sektoren ebenso verfährt. SINSTEDEN³ brauchte zu demselben Zwecke eine orangerothe Scheibe mit ausgeschnittenen Sektoren, die über einer weißen, beschatteten lief. Wenn er die obere anhielt, erschien die untere lebhaft blau.

Aehnliche Erscheinungen erhielt auch E. BRÜCKE, indem er eine kleine schwarze Scheibe vor einer farbigen Glastafel in schwingende Bewegung setzte. Namentlich auffallend war dabei die Erscheinung vor einer grünen Scheibe, indem die Stellen, vor denen Hell und Dunkel wechselte, rosaroth erschienen, die ganz bedeckten und ganz unbedeckten dagegen grün.

Ein eigenthümliches vielleicht hierher gehöriges Phänomen sind die ³⁸³ sogenannten flatternden Herzen. Auf farbigen Blättern aus steifem Papier sind Figuren von einer anderen lebhaften Farbe angebracht; am besten scheinen Roth und Blau zu wirken, die Farben müssen sehr lebhaft und gesättigt sein. Wenn man die Blätter betrachtet und mit einer gewissen Geschwindigkeit hin und her bewegt, scheinen die Figuren selbst gegen das Papier sich zu verschieben und auf diesem hin und her zu schwanken. Der

¹ VIERORDT, *Archiv für physiol. Heilkunde*. 1856. Heft II.

² H. W. DOVE in *Pogg. Ann.* LXXV. 526. 1848.

³ SINSTEDEN, *Ebenda.* LXXXIV. 45. 1850

Grund der Erscheinung scheint darin zu liegen, daß der Lichteindruck im Auge für die verschiedenen Farben nicht gleich schnell zu Stande kommt und vergeht, und deshalb das Blau in der von dem Blatte beschriebenen Bahn scheinbar etwas hinter dem Roth zurückbleibt. Etwas Aehnliches wird auch wahrgenommen, wenn man das Auge statt des Objects bewegt. So sahen WHEATSTONE,¹ BRÜCKE und E. DU BOIS-REYMOND² bei Gasbeleuchtung, wenn sie das Auge über rothe und grüne Tapeten hinstreifen ließen, daß das Muster sich scheinbar bewegte. Nach BREWSTER sieht man es auch, wenn helles Tageslicht durch ein kleines Loch in ein sonst dunkles Zimmer fällt.

Ich habe in der bisher gegebenen Darstellung mich der namentlich von FECHNER durchgeführten Ansicht angeschlossen, wonach alle Erscheinungen der Nachbilder theils in einer noch fortbestehenden Reizung der Netzhaut, theils in einer verminderten Reizempfänglichkeit derselben ihren Grund finden. In der That, wenn man die bisherige Bedeutung des Begriffs Reizung und Reizempfänglichkeit festhält, müssen wir von fortbestehender Reizung sprechen, wenn ein Auge im absolutem Dunkel ein positives Nachbild sieht, und wir müssen die Reizempfänglichkeit als vermindert betrachten, wenn das Auge am Orte eines negativen Nachbilds äußeres Licht schwächer empfindet, als mit der nicht ermüdeten Netzhaut. Daß also Reizung fortbesteht und die Reizempfänglichkeit vermindert sei, ist keine Hypothese, sondern unmittelbarer Ausdruck der Thatsachen. Auch genügen diese beiden Umstände, um die bei weitem größte Zahl der augenfälligeren und constanten Erscheinungen dieses Gebiets zu erklären, namentlich die Erscheinungen der veränderten Lichtintensität, der positiven gleichfarbigen und negativen complementären Nachbilder. Ob wir es dabei nur mit einer Störung der Thätigkeit der Nervensubstanz zu thun haben, und wieviel dabei vielleicht die photochemischen Veränderungen der Pigmente der Retina mitspielen müssen wir vorläufig dahingestellt sein lassen. Die sehr zusammengesetzten Erscheinungen des farbigen Abklingens starker oder anhaltender Lichteindrücke vollständig auf ein einfaches Schema zurückzuführen, möchte freilich vor der Hand noch schwer sein und allerlei willkürliche Annahmen nothwendig machen. Indessen läßt sich einsehen, warum diese Erscheinungen so veränderlich sein müssen. Wir kennen eben weder das Gesetz, wonach eine mehr oder weniger vorgeschrittene Ermüdung des Auges für die einzelnen Farben verschwindet, noch die Abhängigkeit, in welcher die Stärke des nachbleibenden Lichteindrucks von der Ermüdung steht. Die negativen complementären Bilder im dunkeln Gesichtsfelde sind hierbei nach FECHNERS Ansicht als veränderte Empfindungsweisen der inneren Reize der Netzhaut anzusehen. Viele Physiker haben dagegen diese Bilder als Wirkungen einer neuen entgegengesetzten Thätigkeit der Netzhaut angesehen, und namentlich hat PLATEAU³ diese Ansicht zu einer zusammenhängenden Theorie ausgebildet. Er wies nach, daß man dergleichen complementär gefärbte Bilder auch beim gänzlichen Mangel alles äußeren Lichtes sehen könne, und da er auf das Eigenlicht des Auges noch nicht aufmerksam geworden war, wußte er die Erscheinung eben nicht anders als durch

¹ WHEATSTONE, *Inst.* No. 582. p. 75. 1845.

² BRÜCKE und E. DU BOIS-REYMOND, *Die Fortschritte in der Physik im Jahre 1845*, redig. von KARSTEN. I. 23.

³ J. PLATEAU, *Ann. de Chim. et de Phys.* LIII. 386. 1833. *Pogg. Ann.* XXXII. 543. 1833.

eine neue entgegengesetzte Thätigkeit der Netzhaut zu erklären. Da er weiter auch noch spätere Wechsel des positiven und negativen Bildes bemerkte, so stellte er den Satz auf, daß die Netzhaut nach jedem heftigen Lichteindruck erst durch eine Reihe von Oscillationen zur Ruhe käme, wobei sie abwechselnd nach einander entgegengesetzte Zustände durchlaufen sollte. Diese entgegengesetzten Zustände entsprächen der Empfindung complementärer Farben. Er brachte dies in Verbindung mit gewissen Contrasterscheinungen, die im nächsten Paragraphen näher besprochen werden sollen, und nahm auch für die räumliche Ausbreitung des Eindrucks eine Reihe solcher Oscillationen an. Dagegen ist eben zu erinnern, daß die negativen complementären Nachbilder nicht in einer activen Thätigkeit der Netzhaut bestehen, sondern im Gegentheil als Verminderungen der schon vorher bestehenden inneren Lichtempfindung sichtbar werden; und daß ferner jene Wechsel zwischen positiven und negativen Bildern, wie man bei genauer Aufmerksamkeit fast immer erkennt, von äußeren Umständen, namentlich von schwachen Änderungen in der Beleuchtung des Augengrundes abhängen. Ich halte es für sehr mißlich, diese zarten, äußerst schwankenden Erscheinungen, wie es die Nachbilder zur Zeit ihres Kampfes zwischen positiv und negativ im dunkeln Gesichtsfelde sind, bei der hoch gesteigerten Empfindlichkeit des Organs, welches lange im Dunkeln verweilt hat, wo nachweisbar kaum wahrnehmbare äußere Einflüsse die Verwandlung des Bildes herbeiführen, als Basis einer Theorie zu benutzen. Wir dürfen uns aber nicht wundern, wenn wir unter diesen Umständen noch nicht immer den Grund der eintretenden Veränderungen zu bezeichnen wissen. Übrigens hat schon FECHNER auf eine andere Schwierigkeit von PLATEAUS Theorie aufmerksam gemacht. Dieser muß nämlich annehmen, daß bei den Nachbildern die complementären Farben als entgegengesetzte Thätigkeiten der Netzhaut sich einander aufheben und Dunkelheit erzeugen. Wenn z. B. ein complementär gefärbtes Nachbild besteht, ist die Wahrnehmung der primären Farbe beeinträchtigt. Wenn man nach einander das Auge durch grün und roth ermüdet hat, ist das Nachbild schwarz. Wie läßt sich aber diese Behauptung vereinigen mit der Thatsache, daß die gleichzeitig von objectivem complementären Lichte hervorgebrachten Empfindungen sich zu der von Weiß vereinigen, welches heller ist als jede der beiden Farben einzeln genommen?

BRÜCKE betrachtet die positiv complementären Nachbilder als unvereinbar mit FECHNERS Theorie. Ich habe schon vorher darauf aufmerksam gemacht, daß die Färbung dieser Bilder in der That sehr weißlich ist und nur durch den Contrast gegen die vorher gesehene primäre Farbe und den mangelnden Vergleich mit anderen Farben die complementäre Farbe so grell hervortritt. Hat man gleichzeitig zwei primäre Farben neben einander gesehen, so überzeugt man sich leicht davon, daß ihre Nachbilder in den letzten Augenblicken ihrer positiven Erscheinung nur einen geringen Hauch der complementären Farben zeigen, so daß ich glaube, diese Bilder als aus einem positiven weißlichen Nachbilde und einem negativen complementären gemischt ansehen zu dürfen und dadurch diese Erscheinung auch unter FECHNERS Erklärung fügen zu können. Zu erwähnen ist noch eine räthselhafte Erscheinung, die AUBERT beschreibt bei den Nachbildern von Gegenständen, die durch den elektrischen Funken beleuchtet waren. Hier sah er bei schwarzen und rothen Quadraten auf weißem Grunde scheinbar gleichzeitig mit dem überschlagenden Funken leuchtende negative Bilder. Diese fehlten aber bei weißen Quadraten auf schwarzem Grunde, zuweilen erschienen sie gegen das Urbild verschoben. Ihnen folgten erst die gleich-

farbigen positiven Bilder. Von farbigen Streifen auf weißem oder schwarzem Grunde sollen die Nachbilder immer complementär gefärbt und immer heller als der Grund gewesen sein.

385 Ich halte es überhaupt für gerathen, in diesem äußerst verwirrten Gebiete der mannigfaltigsten Erscheinungen eine theoretische Ansicht, die wie die FECHNER'sche bei weitem die größte Zahl der hierher gehörigen Erscheinungen leicht erklärt, und namentlich alle diejenigen gut erklärt, welche sich durch ihre Energie, Deutlichkeit und Constanz auszeichnen, als leitenden Faden festzuhalten, selbst wenn sich auch einzelne flüchtigere Erscheinungen finden, für welche man gegenwärtig noch keine ganz genügende Erklärung geben kann, wie es die Farbenwandlungen sind, die in dem Augenblicke erfolgen, wo das Bild aus positiv in negativ übergeht und wo die entgegengesetzten Einflüsse der nachdauernden Reizung und der Ermüdung sich in einem leicht veränderlichen Gleichgewichte befinden. Für jetzt habe ich noch keine Erscheinung auffinden können, welche entschieden unvereinbar mit FECHNER's Erklärungsprincipien wäre.

Beschrieben werden die positiven und negativen Nachbilder der Fenster 1634 von PEIRESC.¹ Dann tritt der Versuch als eine Art Kunststück auf. BONACURSIUS behauptet gegen den Jesuiten ATHAN. KIRCHER,² er könne bewirken, daß man im Finstern ebenso gut sehe, wie im Hellen, und behielt Recht, indem er KIRCHER im dunkeln Zimmer eine in einer Öffnung des Fensters befestigte Zeichnung starr betrachten liefs. Dann wurde das Zimmer ganz verdunkelt, und KIRCHER sah die Zeichnung deutlich wieder, indem er (was unnöthig war) nach einem in der Hand gehaltenen weissen Papier blickte. KIRCHER giebt die Erklärung dazu, daß das Auge das eingesogene Licht wieder ausstrahle und das vorgehaltene Papier beleuchte. MARIOTTE³ wiederholte ähnliche Versuche. NEWTON kannte die Blendungsbilder, und soll sie für psychischer Natur erklärt haben,⁴ weil er die Nachbilder, welche durch Blicken nach der Sonne erzeugt waren, noch längere Zeit dadurch wieder hervorrufen konnte, daß er die Aufmerksamkeit auf sie richtete. Er wurde zu diesen Versuchen veranlaßt durch eine Anfrage von LOCKE, der sie in ROB. BOYLES Buch über die Farben erwähnt gefunden hatte. Eine vollständigere Theorie der Erscheinungen gab dann JURIN⁵ im Jahre 1738, und zwar gründete er sie theils auf die Fortdauer der Reizung, theils auf die Annahme, daß beim Aufhören einer stark angelegten Empfindung von selbst eine entgegengesetzte hervorgerufen würde. Ausführliche Beschreibungen der Erscheinungen gab BUFFON,⁶ die dann später dem Pater SCHERFFER⁷ das Material zur Begründung seiner Theorie gaben. Dieser stellte im Gegensatz zu JURIN die Ansicht auf, daß die Nachbilder — er kennt fast nur negative — durch die verminderte Empfindlichkeit der ermüdeten Netzhaut entstehen. Dasselbe Princip wendet er auch zur Erklärung der complementären Farbe an, indem er sich dabei auf NEWTONS Farbenmischungsregel stützt. Eine andere etwas willkürlich aufgeputzte Theorie dieser Erscheinungen, die aber schon an PLATEAUS Oscillationen erinnert, gab GODART.⁸ Eine Menge von Beobachtungen kamen weiter hinzu durch DARWIN,⁹ namentlich über die

¹ PEIRESC, Vita. p. 175, 296. 1634.

² ATHAN. KIRCHER, Ars magna. p. 162. 1646.

³ MARIOTTE, Oeuvres. p. 318. 1668.

⁴ D. BREWSTER, Newton's Leben übers. von GOLDBERG. Leipzig 1833. S. 263.

⁵ JURIN, Essay on distinct and ind. vis. p. 170 in Smith's Optics. Cambridge 1738.

⁶ BUFFON, Mém. de Paris. 1743. p. 215.

⁷ SCHERFFER, Abhandlung von den zufälligen Farben. Wien 1765. — Lateinisch vom Jahre 1761. auch im Journal de Physique de ROZIER. XXVI. 175 und 273. (1785).*

⁸ GODART, Journal de Physique. 1776. VIII. 1 und 269.

⁹ DARWIN, Philos. Transact. 1786. LXXVI. 313. — Zoonomie übers. von BRANDIS. Hannover 1795. II. 387.

farbigen Nachbilder, durch AEPINUS¹ und DE LA HIRE² über das farbige Abklingen des Sonnenbildes, durch GERGONNE,³ BROCKEDON,⁴ der sie zugleich zu einer Theorie der ästhetischen Farbenharmonie zu verwenden suchte, LEHOT,⁵ der namentlich auf die Erscheinungen aufmerksam machte, die bei plötzlicher Änderung der Entfernung eines farbigen Feldes entstehen, GOETHE,⁶ BEER⁷ über Verschwinden der Farben durch Hinstarren bei operirten Staarkranken, HIMLY und TROXLER,⁸ PURKINJE,⁹ OSANN,¹⁰ SPLITTGERBER,¹¹ KNOCHENHAUER,¹² DOVE¹³ über subjective Farben an bewegten Objecten, SINSTEDEN,¹⁴ SCORESBY,¹⁵ GROVE¹⁶ über die Wiederbelebung von Nachbildern durch abwechselnde Erhellung und Verdunkelung des Gesichtsfeldes, SÉGUIN¹⁷ (viele und genaue Beobachtungen über Abklingen der Farben), BRÜCKE,¹⁸ AUBERT¹⁹ über Nachbilder durch den elektrischen Funken erzeugt.

Von Versuchen zur theoretischen Zusammenfassung und Erklärung der bisher gehörigen Erscheinungen ist noch weiter zu erwähnen der Versuch von PRIEUR DE LA CÔTE D'OR,²⁰ sie auf das Princip des Contrastes zurückzuführen, ferner die von BREWSTER aufgestellte Ansicht,²¹ daß die complementäre Farbe sich zugleich mit der gesehenen entwickle und diese trübe. Es liefen die entgegenstehenden Ansichten zuletzt aus in die beiden zusammenfassenden Arbeiten von PLATEAU²² und FECHNER.²³ Der erstere brachte die Meinungen, welche entgegengesetzte Thätigkeiten der Netzhaut annehmen, in eine consequente Form, FECHNER dagegen, der mit einer außerordentlichen Selbstaufopferung auch gleichzeitig eine große Reihe genauer, selbst messender Versuche in diesem Gebiete ausgeführt hat, gab zuerst eine genügende Herleitung der negativen Bilder aus dem Princip der Ermüdung. Diese beiden Arbeiten bezeichnen im Wesentlichen noch den gegenwärtigen Stand der Wissenschaft. Der Begriff der Ermüdung des Auges für eine einzelne Farbe bedurfte aber noch einer näheren Definition. Die Farbentheorie von TH. YOUNG gab eine solche. Um sie zu prüfen, habe ich die Versuche über die Nachbilder der Spectralfarben ausgeführt,²⁴ wobei ich auf die große Deutlichkeit der positiven Nachbilder nach momentaner Lichtwirkung aufmerksam wurde.

§ 24. Vom Contraste.

Wir haben im vorigen Paragraphen untersucht, wie nach einander ge-
sehene Farben sich gegenseitig verändern. Es bleibt uns jetzt noch übrig

¹ AEPINUS, *Journ. de Phys.* XXVI. 291. 1776. — *Novi Comment. Petrop.* X. 286.

² DE LA HIRE, bei PORTERFIELD *on the eye.* I. 343.

³ GERGONNE, *Journ. de Mathemat.* XXI. 291. 1830.

⁴ BROCKEDON, *Quart. Journal of Sc.* N. XIV. 399; *Wiener Zeitschr.* VIII. 471.

⁵ LEHOT, *Fechner, Repertorium* 1832. p. 229.

⁶ GOETHE, *Farbenlehre.* I. 13, 20.

⁷ BEER, *Das Auge oder Versuch das edelste Geschenk des Schöpfers zu erhalten.* S. 1—8

⁸ HIMLY, *Ophthalmol. Bibl.* Bd. I. Stück 2. S. 1—20. Bd II. St. 2. S. 40.

⁹ PURKINJE, *Beiträge.* I. 72, 96. 1819.

¹⁰ OSANN, *Pogg. Ann.* XXXVII. 288. 1836.

¹¹ SPLITTGERBER, *Ebenda.* IL. 587. 1840.

¹² KNOCHENHAUER, *Ebenda.* LIII. 346. 1841.

¹³ DOVE, *Ebenda.* LXXI. 112. LXXV. 524, 526. 1848.

¹⁴ SINSTEDEN, *Ebenda.* LXXXIV. 45. 1850.

¹⁵ SCORESBY, *Philosoph. Mag.* (4) VIII. 544. 1854.

¹⁶ GROVE, *Ebenda.* (4) III. 435—436. 1852.

¹⁷ SÉGUIN, *Ann. de Chimie et de Phys.* Sér. 3. XLI. 413—431. 1850. C. R. XXXIII. 642. XXXIV. 767. XXXV. 476. 1850.

¹⁸ BRÜCKE, *Denkschr. d. k. k. Akad. zu Wien* III: *Pogg. Ann.* LXXXIV. 418. 1850.

¹⁹ AUBERT, *Moleschott, Untersuchungen zur Naturl.* Bd. V. 279. 1858.

²⁰ PRIEUR DE LA CÔTE D'OR, *Ann. de Chimie.* LIV. p. 1. 1804.

²¹ BREWSTER, *Phil. Mag.* II. 89. IV. 354. 1833. — *Pogg. Ann.* XXIX. LVI. 138.

²² PLATEAU, *Ann. de Chimie et de Phys.* 1833. LIII. 386; 1835. LVIII. 337; *Pogg. Ann.* XXXII. 543.

Am vollständigsten in *Essai d'une Théorie génér. comprenant l'Ensemble des apparences visuelles, qui succèdent à la contemplation des objets colorés.* Bruxelles 1834.

²³ FECHNER, *Pogg. Ann.* XXXIV. 221, 513. 1838. XXXV. 227; L. 193, 427. 1838.

²⁴ Öffentlich vorgetragen in der Sitzung der niederrheinischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde in Bonn am 3. Juli 1858 und in der Naturforscherversammlung zu Karlsruhe September 1858.

zu untersuchen, welchen Einfluss verschiedene im Gesichtsfelde neben einander gleichzeitig erscheinende Helligkeiten und Farben auf einander ausüben.

Da der Erfolg einer solchen Nebeneinanderstellung meistentheils der ist, daß jeder Theil des Gesichtsfeldes neben einem helleren dunkler, neben einem dunkleren heller aussieht, und seine Farbe neben einer anderen Farbe gesehen sich mehr oder weniger der Complementärfarbe der letzteren annäherte, so hat der hierin sich aussprechende Gegensatz zu dem Namen des Contrastes Veranlassung gegeben. Genauer unterscheidet CHEVREUL die hierher gehörigen Erscheinungen unter dem Namen des simultanen Contrastes von denjenigen, wo zwei Farben nach einander auf derselben Netzhautstelle erscheinen, welche er mit dem Namen des successiven Contrastes belegt.

Es kommen nun aber auch Fälle vor, wo die Farbe eines Theiles des Gesichtsfeldes durch Nebensetzung einer anderen Farbe so verändert wird, daß sie der letzteren selbst, nicht ihrer Complementärfarbe ähnlicher wird. Auf diese würde der Name des Contrastes nicht unmittelbar passen, wenn auch vielleicht in Wirklichkeit hier die eine Farbe durch einen Contrast gegen die Complementärfarbe der anderen verändert wird. Um nun solche Fälle durch die Bezeichnung nicht auszuschliessen, bezeichnet BRÜCKE diejenige Farbe, welche durch die Wirkung einer im Gesichtsfelde daneben stehenden hervorgebracht wird, als die *inducirte* Farbe, und diejenige andere, welche die Veranlassung zur Erscheinung jener ersten giebt, als die *inducirende* Farbe. Dabei wollen wir, wenn das Feld, dessen Farbe verändert ist, selbst farbig ist, dessen Farbe wie früher die *reagirende* nennen. Indem die reagirende Farbe durch die *inducirte* verändert wird, entsteht die *resultirende* Farbe. Im Allgemeinen passen also unmittelbar unter den Begriff des Contrastes nur die gewöhnlichen Fälle, wo die *inducirte* Farbe der *inducirenden* complementär ist. Es kommen aber Fälle vor, wo die *inducirte* Farbe der *inducirenden* gleich ist.

Was zunächst die Erscheinungen des successiven Contrastes betrifft, so ergeben sich diese leicht aus dem, was im vorigen Paragraphen gesagt ist. Hat man ein Feld von der Farbe *A* und mittlerer Helligkeit angeschaut, und wendet das Auge auf ein anderes von der Farbe *B*, so ist die nachbleibende Reizung des Eindrucks *A* in der Regel nicht so groß, um auf einem zweiten Felde von mittlerer Helligkeit ein positives Nachbild zu Stande kommen zu lassen, man sieht also ein negatives Nachbild von *A* auf dem Felde *B*. Dadurch werden diejenigen Theile der Farbe *B* geschwächt, welche mit *A* gleichartig sind. Ist *B* von demselben Farbenton wie *A*, so wird es durch den Contrast weisslicher oder grauer, ist es complementär, so wird es gesättigter. Liegt es auf einer oder der anderen Seite des Farbenkreises zwischen *A* und seiner Complementärfarbe, so geht es in einen benachbarten Farbenton über, der, weiter von *A* entfernt, näher an seiner Complementärfarbe liegt. Übrigens erscheint *B* desto mehr verdunkelt, je heller *A* gewesen ist. Dies wäre also das allgemeine Gesetz des successiven Contrastes. voraus-

gesetzt solche Helligkeiten beider Felder, daß eben nur negative Nachbilder 389 zu Stande kommen.

Man kann sich nun leicht davon überzeugen, daß der successive Contrast, d. h. der durch Nachbilder verursachte, auch dann eine große Rolle spielt, wenn man farbige Felder, die neben einander im Gesichtsfelde stehen, mit einander vergleicht. Man hat in diesen Fällen meist nur simultanen Contrast zu sehen geglaubt, weil man bisher eine gewisse Eigenthümlichkeit des menschlichen Blicks in der Lehre vom Contraste wenig beachtet hat. Bei dem gewöhnlichen bequemen Gebrauche unserer Augen pflegen wir nämlich den Fixationspunkt fortdauernd langsam im Gesichtsfelde wandern zu lassen, so daß er nach einander über die verschiedenen Theile der betrachteten Objecte hingeleitet. Dieses Wandern des Blicks geschieht unwillkürlich, und wir sind so daran gewöhnt, daß es eine außerordentliche Anstrengung und Aufmerksamkeit erfordert, auch nur 10 bis 20 Secunden lang den Blick ganz scharf auf einen bestimmten Punkt des Gesichtsfeldes zu fixiren. So wie wir das thun, treten auch sogleich ungewöhnliche Erscheinungen ein. Es entwickeln sich nämlich scharf gezeichnete negative Nachbilder der Objecte, die, so lange der Blick festgehalten wird, mit den Objecten zusammenfallen, und diese deshalb schnell undeutlich werden lassen. Deshalb tritt denn auch bald das Gefühl von Blendung und Anstrengung des Auges ein, so lange wir bei der Fixation des Gesichtspunktes beharren, der Trieb das Auge zu bewegen wird immer unwiderstehlicher und die kleinen Schwankungen seiner Stellung, welche ungeachtet unserer Anstrengung eintreten, verrathen sich dadurch, daß an den Rändern der Objecte bald rechts, bald links Theile der entstandenen negativen Nachbilder aufblitzen. Auch ist diese Wanderung des Blickes, wodurch auf sämtlichen Theilen der Netzhaut ein fortdauernder Wechsel zwischen stärkerer und schwächerer Erregung und zwischen den verschiedenen Farben unterhalten wird, offenbar von großer Bedeutung für die ungestörte Gesundheit und Leistungsfähigkeit des Sehnervenapparats. Denn nichts greift das Auge so an, als wenn man häufig negative Nachbilder durch langes Hinstarren nach selbst nur mäßig beleuchteten Flächen entwickelt. Starke negative Nachbilder sind ja immer Zeichen hoch gesteigerter Ermüdung der Netzhaut.

Überlegen wir nun, was geschieht, wenn bei diesem Wandern des Blicks verschieden farbige oder verschieden helle Felder im Gesichtsfelde liegen. Wenn wir ein begrenztes farbiges Feld mit genauer Fixation des Blicks auf einen Punkt desselben betrachten, entwickelt sich ein scharf begrenztes Nachbild, welches deshalb eben leicht zu erkennen ist. Wenn wir hinter einander zwei verschiedene Punkte des Objects eine Zeit lang fixirt haben, bilden sich zwei gut begrenzte Nachbilder aus, die sich zum Theil decken, aber schon nicht mehr so leicht, ohne besondere Aufmerksamkeit als Abbilder des Objects erkannt werden. Ist aber der Blick langsam über den Gegenstand hingegangen, ohne irgendwo anzuhalten, so ist das Nachbild natürlich nur ein verwaschener Fleck, und wird, obgleich es für den aufmerksamen

390 Beobachter wirklich da ist, schon nicht mehr so leicht erkannt. Geht nun der Blick auf ein anderes benachbartes Feld von anderer Farbe über, so wird diese Farbe natürlich durch den Einfluß des Nachbildes verändert, gerade so als hätten wir nach einander in demselben Theile des Gesichtsfeldes diese verschiedenen Farben gehabt. Wir haben also in einem solchen Falle nicht simultanen Contrast, oder wenigstens diesen nicht allein, sondern wir haben auch hier successiven Contrast, und die Erscheinungen sind ganz oder großentheils identisch mit den im vorigen Paragraphen beschriebenen. Um allein simultanen Contrast zu haben, müssen wir nothwendig besonders dafür sorgen, daß während des Versuchs der Blick ganz streng fixirt sei.

Wir werden die Erscheinungen des reinen simultanen Contrastes, welche bei strenger Fixation des Blicks bestehen bleiben, später genauer untersuchen. Zunächst will ich noch die Erscheinungen beschreiben, die zum Theil dem simultanen Contraste, größtentheils aber dem successiven angehören, wie sie bei dem gewöhnlichen unbefangenen Gebrauche des Auges sich zeigen. Die Farbenänderungen, welche dabei eintreten, sind genau dieselben, welche ich schon für den reinen successiven Contrast beschrieben habe. Sie sind im Allgemeinen viel deutlicher und auffallender als die des reinen simultanen Contrastes, und wo beide verschiedene Resultate herbeiführen könnten, überwiegen bei dem unbefangenen Gebrauche des Auges stets die des successiven Contrastes; wo beide die gleichen Wirkungen hervorbringen, werden die Farbenveränderungen stets viel bedeutender, wenn man von der Fixation des Blickes zur Wanderung desselben übergeht.

Im Allgemeinen ist es vortheilhaft für die Contrastwirkungen, wenn die inducirende Farbe lichtstärker ist, als die reagirende, weil dann die Nachbilder jener lebhafter und anhaltender sind. Legt man also z. B. auf einen farbigen Papierbogen einen kleinen Kreis von weißem Papier, so wird dies Weiß complementär gefärbt. Die Färbung ist aber auffallender, wenn man statt Weiß Grau nimmt, oder selbst Schwarz, da alles Schwarz bei diesen subjectiven Versuchen als ein dunkles Grau zu betrachten ist. Doch ist ein mittleres Grau in der Regel vortheilhafter für den Versuch als Schwarz. Die Contrastwirkung kann in solchen Fällen so weit gehen, daß eine ziemlich lebhafte Farbe in die complementäre umgekehrt wird. Legt man z. B. auf eine rothe Glasscheibe ein kleines Stück orangerotes Papier (mit Mennige gefärbt) und hält dies gegen den hellen Himmel, so erscheint das röthliche Papier lebhaft grünblau, in der Complementärfarbe des rothen Glases, die nahehin auch seine eigene ist.

Ferner ist es vortheilhaft, wenn die inducirende Farbe einen großen Theil des Gesichtsfeldes bedeckt, weil dann die verschiedenen Netzhautstellen häufig und anhaltend von dieser Farbe getroffen und durch sie ermüdet werden. Die Contrastfarben sind deshalb besonders lebhaft, wenn die reagirende Farbe ein kleines Feld einnimmt, welches rings umgeben ist von einem ausgedehnten Grunde, der mit der inducirenden Farbe gefüllt ist. In diesem Falle wird hauptsächlich nur die Farbe des kleinen Feldes verändert, nicht

die des grossen. Aber die Contrastwirkungen fehlen auch nicht, wenn die beiden Felder gleich gross sind, dann ist der Einfluss ein gegenseitiger, und die Farbe eines jeden von beiden wird durch die Farbe des anderen geändert.

Endlich ist die Contrastwirkung desto grösser, je näher das inducirende ³⁹¹ Feld dem reagirenden im Gesichtsfelde liegt, weil, wenn der Blick von dem einen zum anderen Felde hinübergleitet, das Nachbild desto stärker entwickelt ist, je schneller er das andere Feld trifft. Dies zeigt sich sehr deutlich bei der Anordnung, welche CHEVREUL für seine Versuche gewählt hat. Er schneidet von jeder der beiden Farben z. B. Gelb und Roth zwei Streifen zurecht, legt dann einen gelben und einen rothen Streifen dicht neben einander. Diese wollen wir bezeichnen mit G_1 und R_1 . Dann legt er neben den gelben Streifen G_1 in kurzem Abstände einen zweiten gelben G_2 und ebenso neben den rothen R_1 einen zweiten R_2 . Die Contrastwirkung macht sich dann nur an den beiden mittleren Streifen G_1 und R_1 merklich. Das Gelb von G_1 wird grünlich, indem es sich dem zu R_1 complementären Blaugrün nähert, und R_1 erscheint purpurn, indem sich etwas Indigblau, die Complementärfarbe von G_1 , zumischt. Dagegen erscheinen die beiden seitlichen Streifen G_2 und R_2 in unveränderter Färbung, und man hat dadurch gute Gelegenheit, die Contrastwirkung zu erkennen. Eben davon hängt es nun auch ab, dass, wenn etwas breitere Felder an einander stossen, die Contrastfärbung namentlich an den Rändern hervortritt. Jedes Mal, wo der Blick von dem einen Felde A auf das andere B hinübergleitet, sind diejenigen Theile der Netzhaut, welche eben das Feld A verlassen, am meisten durch die Farbe A ermüdet, auf diese fällt nun das Bild der Randtheile von B . Weniger ermüdet sind diejenigen Netzhauttheile, welche etwas früher A verlassen haben, und schon weiter in das Feld B hineingerückt sind. Diesen erscheint deshalb die inducirte Farbe schwächer. So folgt, dass jedes Mal, wo der Blick zum Felde B übergeht, die Randtheile von B am meisten durch den Contrast verändert sind, die weiter vom Rande entfernten Theile im Verhältniss ihrer Entfernung weniger. Stößt also z. B. ein grünes und ein blaues Feld aneinander, so erscheint der Rand des Grün etwas gelblicher als die Mitte, der Rand des Blau etwas violetter als seine Mitte, weil dort das dem Blau complementäre Gelb sich zumischt, hier das dem Grün complementäre Purpurroth. Man kann das Spiel der Nachbilder am Rande solcher Flächen sehr gut beobachten, wenn man sich eine Reihe von Fixationspunkten bezeichnet, und den Blick nur springend bewegt, indem man ihn eine kurze Zeit auf jedem Fixationspunkte festhält. Dann sieht man deutlich die wohlbegrenzten Nachbilder sich auf das andere Feld hinüberschieben. Die älteren, weiter vorgeschobenen sind blasser, die neuesten, welche dem Rande am nächsten bleiben, sind stärker.

Handelt es sich nicht um Unterschiede der Farbe, sondern der Helligkeit, so findet man, dass die Helligkeit des reagirenden Feldes neben einem helleren inducirenden vermindert erscheint, neben einem dunkleren dagegen vergrößert.

Übrigens wird bei diesen Versuchen das Hervortreten der Complementärfarbe noch durch andere Umstände begünstigt, gegenüber den Methoden, negative Nachbilder zu sehen, welche im vorigen Paragraphen beschrieben sind. Während nämlich im Allgemeinen nöthig ist, ein farbiges Object absichtlich mehrere Secunden zu fixiren, um ein deutliches Nachbild von einiger Dauer nachher auf einem gleichmälsig gefärbten Grunde zu erhalten, so zeigt es sich bei den Versuchen über Contrast, dafs nur eine ziemlich flüchtige Betrachtung der einen Farbe genügt, um die complementäre Farbe auf dem anderen Felde zu induciren, und dafs diese complementäre Farbe nachher viel dauernder ist, als es ein unter gleichen Umständen gewonnenes Nachbild sein würde. Um auf einem gleichmälsig gefärbten Grunde ein Nachbild zu erkennen, mufs dieses gut entwickelt und gut begrenzt sein. Es bewegt sich mit dem Blicke hin und her, giebt sich dadurch gleich als eine subjective Erscheinung zu erkennen, und wir sind für gewöhnlich daran gewöhnt, unsere Aufmerksamkeit nur den objectiven Gesichtsercheinungen zuzuwenden. Wenn dagegen ein verwaschenes Nachbild ein kleineres gefärbtes Feld bedeckt, welches seine objective Begrenzung hat, und immer unter dem Einflufs des Nachbildes erscheint, so kann dieser Einflufs nicht unmittelbar in der Anschauung von den übrigen objectiven Erscheinungen des Gesichtsfeldes getrennt werden, und wird deshalb viel leichter ein Gegenstand unserer Aufmerksamkeit. Im dritten Abschnitte werden wir die hier erwähnte Eigenthümlichkeit unserer Aufmerksamkeit näher zu besprechen haben.

Dazu kommt, dafs die Ermüdung der Netzhaut bei den hier betrachteten Contrasterscheinungen immer wieder erneuert wird, und die Wirkung deshalb anhaltend ist, während sie bei den meisten Methoden Nachbilder zu erzeugen ziemlich schnell vergeht.

Wir wenden uns nun zu den Erscheinungen des reinen simultanen Contrastes. Um diese als solche sicher erkennen zu können, mufs bei der Anordnung der Versuche dafür gesorgt werden, dafs keine Nachbilder entstehen können, dafs der Theil der Netzhaut, welcher die inducirte Farbe empfinden soll, vorher auch nicht vorübergehend von dem Bilde des inducirenden Feldes getroffen wird. Vollständig kann dies in der Regel nur erreicht werden, wenn man die inducirende Farbe erst sichtbar macht, nachdem sich das Auge auf einen bestimmten Punkt des inducirten Feldes festgeheftet hat. Diesen Punkt mufs es dann auch während der ganzen Dauer des Versuchs festhalten. Ist die inducirende Farbe nicht zu lichtstark oder zu gesättigt, so genügt es auch, die Augen, welche auf dunkeln wenig gefärbten Gegenständen herumgewandert sind, oder geschlossen waren, schnell auf das inducirte Feld zu richten, und dann einen Punkt von diesem festzuhalten, ohne vorher den Blick auf dem inducirenden verweilen zu lassen. Diese letztere Methode genügt namentlich deshalb in den meisten Fällen, weil die hierher gehörigen Contrasterscheinungen sich gerade bei schwachen Farbenunterschieden des inducirenden und inducirten Feldes am deutlichsten

zeigen, während umgekehrt die Erscheinungen des successiven Contrastes durch starke Gegensätze der Farbe und Beleuchtung begünstigt werden.

Übrigens ist zu bemerken, daß bei sehr dauernder starrer Fixirung ⁿ auch auf sehr schwach gefärbten Feldern sich Nachbilder entwickeln, wie ich schon auf S. 511 beschrieben habe, welche den Gegensatz der Farben gänzlich auslöschen und damit auch den Contrast, übrigens bei gelegentlicher Wendung des Blicks deutlich sichtbar werden, so daß man bei den Versuchen über simultanen Contrast überhaupt nur kurze Beobachtungszeit anwenden darf.¹

Die hierher gehörigen Erscheinungen scheinen mir von ganz anderer ³⁹² Art zu sein, als die bisher betrachteten. Sie lassen sich im Allgemeinen charakterisiren als Fälle, in denen eine genaue Beurtheilung der reagirenden Farbe durch Vergleichung mit anderen als der inducirenden nicht möglich ist. In solchen Fällen sind wir geneigt, diejenigen Unterschiede, welche in der Anschauung deutlich und sicher wahrzunehmen sind, für größer zu halten als solche, welche entweder in der Anschauung nur unsicher heraustreten, oder mit Hilfe der Erinnerung beurtheilt werden müssen. Es ist dies wohl ein allgemeines Gesetz bei allen unseren Wahrnehmungen. Ein Mensch mittlerer Größe ³⁹³ neben einem sehr großen sieht klein aus, weil wir im Augenblick deutlich sehen, daß es größere Menschen giebt, aber nicht, daß es auch kleinere Menschen giebt. Derselbe Mensch mittlerer Größe, neben einen kleinen gestellt, wird groß aussehen.

In der Lehre von den Wahrnehmungen werden wir noch vielen Fällen ⁿ ähnlicher Art begegnen.

Die Bedingungen, welche erfüllt werden müssen, um eine sehr genaue Wahrnehmung der Farbenunterschiede und Helligkeitsunterschiede zwischen zwei verschiedenen an einander stoßenden Flächenstücken des Gesichtsfeldes zu erreichen, sind § 16 bei den Methoden der Photometrie erörtert worden. Es geschieht dies, wie wir gesehen haben, am sichersten, wenn beide im Gesichtsfelde ganz dicht an einander stoßen, und ihre Grenze durch nichts weiter als ihren Farbenunterschied bezeichnet ist. Selbst der feinste, eben noch sichtbare Schattenstrich zwischen ihnen macht die Vergleichung unsicherer. Um so größer wächst die Unsicherheit, wenn breitere Felder mit großen Unterschieden der Beleuchtung sich zwischen die zu vergleichenden einschieben, und am aller unsichersten wird die Vergleichung, wenn ein gegenwärtiger Eindruck mit dem Gedächtnißbilde eines früheren verglichen werden muß. Und eben die leicht beobachtbare und zweifellos constatirte Thatsache, daß die besprochenen Bedingungen für die möglichst genaue Ausführung einer photometrischen Messung eingehalten werden müssen, zeigt doch deutlich an, daß, wenn diese Bedingungen nicht erfüllt sind, die Vergleichung

¹ Ich gebe zu, daß einige meiner früheren Versuche durch diesen Umstand beeinflusst sein können, und lasse deshalb einige Versuche der früheren Auflage fort, die nicht in hinreichend kurzer Zeit ausgeführt werden können.

einer Farbe oder Helligkeit mit einer anderen, beziehlich mit dem, was wir als das Muster derselben betrachten, an das sich ihr Namen nach gewöhnlichem Sprachgebrauch heftet, nothwendig mit einem größeren oder geringeren Grade von Unsicherheit behaftet ist, und daß wir uns nicht wundern dürfen, wenn wir in solchen Fällen Irrthümer in der Abschätzung des betreffenden Farbeindrucks begehen, die sich als solche erkennen lassen, wenn man die Vergleichung unter besseren Bedingungen ausführt. Diese Unsicherheit aber empfinden wir nicht als solche, sondern jeder gegenwärtige Gesichtseindruck erscheint uns, so lange wir ihn vor uns haben, als ganz bestimmt. Daß wir also bei unsrer Abschätzung der Gleichheit oder Ungleichheit dieses Farbeindrucks mit irgend einem bestimmten Muster, was wir im Sinn haben, Irrthümer begehen, ist durchaus nicht verwunderlich. Was einer Erklärung bedarf, ist eigentlich nur der Umstand, daß diese Irrthümer in der Mehrzahl der Fälle in einem bestimmten Sinne ausfallen und nicht regellos hin- und herschwanken. Die Überschätzung der deutlichen Unterschiede scheint mir hier das meist entscheidende Motiv zu sein. Daneben scheinen aber auch gelegentlich andere Momente, welche aus den Erfahrungen über die Erscheinungsweisen von Körperfarben genommen sind, unsere Schätzung der gesehenen Farben zu beeinflussen.

411 Einer der Fälle, der von solchen anderen Einflüssen leicht frei gehalten werden kann, läßt sich auf Farbenkreiseln herstellen, wenn man in einer Scheibe wie *Fig. 197* schmale farbige Sektoren auf weißen Grund setzt, sie

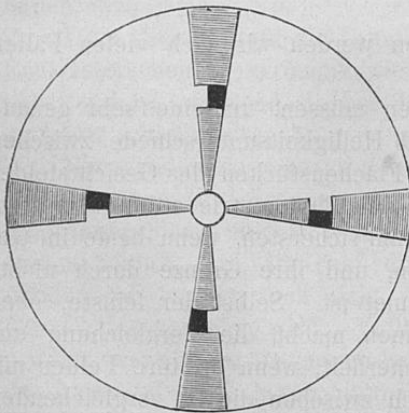


Fig. 197.

aber in mittlerer Entfernung vom Mittelpunkte durch einen aus Schwarz und Weiß zusammengesetzten Streifen unterbricht, so daß beim Umdrehen eigentlich ein grauer ringförmiger Streifen auf schwach gefärbtem weißlichen Grunde entstehen sollte. In der That sieht dieser Ring aber nicht grau, sondern complementär gefärbt aus, und zwar am intensivsten, wenn er gleiche oder etwas geringere Helligkeit als der Grund hat. Ist die Breite der farbigen Sektoren groß, und dadurch die Farbe des Grundes zu intensiv, so ist die

Complementärfarbe des Ringes schwächer, oder wenigstens zweifelhafter als bei schwacher Färbung des Grundes; ebenso wenn man den grauen Ring mit zwei schmalen schwarzen Kreislinien einfasst, die ihn scharf vom Grunde abgrenzen. Es fehlt in den letzteren Fällen die Contrastfärbung vielleicht nicht ganz, aber sie ist mit einer erheblichen Unsicherheit des Urtheils über die Farbe des inducirten Feldes verbunden, und durch Vergleichung mit einem neben dem Farbenkreisel befindlichen weißen Felde kann man leicht zu dem Resultate gelangen, daß das inducirte Feld wirklich weiß sei, während ohne

die Kreislinien die complementäre Contrastfarbe sich mit zweifelloser Bestimmtheit der Wahrnehmung aufdrängt.

Deutlich zeigt sich der Contrast auch, wo die inducirte Fläche an entgegen- 412
gesetzten Seiten mit zwei verschiedenen Farben in Berührung tritt. Dann wird jene an den entsprechenden Rändern complementär gefärbt, oder wenn die inducirte Fläche mit einem Rande an eine dunklere, mit dem anderen an eine hellere Fläche stößt, erscheint der erstere Rand heller, der letztere dunkler. Diese Contrasterscheinungen sind aber ebenfalls nur dann deutlich, wenn das inducirende vom inducirten Felde eben nur durch den Unterschied der Farbe oder der Helligkeit geschieden ist, und keine andere Begrenzung existirt.

Man kann solche Versuche leicht unter einer transparenten Papierdecke ausführen. Man klebe ein Blatt grünen und rosenrothen Papiers zusammen, so daß man ein Blatt erhält, welches zur Hälfte grün, zur Hälfte rosenroth ist. Am Orte der Grenzlinie zwischen beiden Farben befestige man ein Streifen grauen Papiers, und lege über das ganze ein ebenso großes Blatt dünnen Briefpapiers. Es wird nun der graue Streifen, wo er an das Grün stößt, rosenroth, und wo er an Roth stößt, grün erscheinen, in seiner Mitte gehen die beiden Farben in einander über durch einen unbestimmten Farbenton, der wohl eigentlich Grau ist, aber doch nicht bestimmt von uns als solches anerkannt werden könnte. Die Erscheinung ist viel lebhafter, wenn die 413
Längsrichtung des grauen Streifen quer zur Trennungslinie der Farben steht. Dann kann der Theil des Grau, welcher in das Grün hineinragt, ebenso lebhaft rosenroth erscheinen, wie der rosenrothe Grund der anderen Seite. Schwächer, aber doch deutlich erkennbar ist die Contrastfarbe, wenn die mittlere Längslinie des grauen Streifen gerade auf der Trennungslinie der Farben liegt. Dann erscheinen die Seitenränder des Grau mit einem schmalen nach der Mitte hin verwaschenen Saume der Complementärfarbe gefärbt.

Ähnliche Wirkungen erhält man, wenn man dünne Papierblätter treppenförmig über einander legt, so daß an dem einen Rande der Papierschicht nur ein Blatt hervorsieht, daran ein Streifen stößt, wo sich zwei decken, dann drei u. s. w. Läßt man Licht durch eine solche Lage von Blättern scheinen, so ist natürlich innerhalb jeder Stufe die objective Helligkeit constant, doch erscheint jede Stufe dunkler an dem Rande, wo sie an die nächst hellere anstößt, und heller, wo sie an die nächst dunklere stößt.

Viel schöner und feiner abgestuft lassen sich aber alle diese Erscheinungen auf dem Farbenkreisel hervorbringen. Man gebe den Sektoren des Farbenkreisels die nebenstehende Form der *Fig. 198*, und mache sie

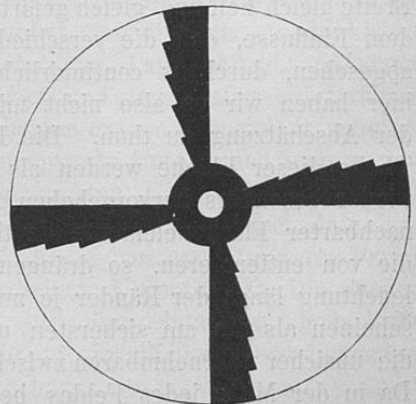


Fig. 198.

weiss und schwarz, so erscheinen beim Umdrehen mehrere concentrische Ringe, von denen die äusseren immer heller sind, als die nächstliegenden inneren. Innerhalb eines jeden solchen Ringes ist die Winkelbreite der schwarzen Flächenstücke constant, also auch die Helligkeit bei schnellem Umdrehen; nur von einem zum anderen Ringe wechselt die Helligkeit. Und doch erscheint jeder Ring nach innen zu, wo sich der nächst dunklere anschliesst, heller, nach aussen zu, wo sich der nächst hellere anschliesst, dunkler. Sind die Helligkeitsunterschiede der Ringe sehr klein, so sieht man zuweilen kaum, dass die inneren Ringe dunkler als die äusseren sind, es fällt vielmehr nur der periodische Wechsel von Hell zu Dunkel an den Rändern der Ringe in die Augen.

Nimmt man statt Weiss und Schwarz verschiedene Farben, so erscheint jeder Ring am äusseren und inneren Rande verschieden gefärbt, während doch objectiv die Farbe jedes einzelnen Ringes in seiner ganzen Breite dieselbe ist. Jede einzelne von den gemischten Farben tritt an demjenigen Rande jedes Ringes stärker hervor, wo ein anderer Ring anstösst, der weniger von dieser Farbe enthält. Hat man also z. B. Blau und Gelb gemischt, und überwiegt das Blau in den äusseren Ringen, Gelb in den inneren, so erscheint jeder Ring am äusseren Rande gelb, am inneren blau, und wenn die Farbenunterschiede der einzelnen Ringe überhaupt sehr gering sind, kann auch hier wieder die Täuschung eintreten, dass die wirklich vorhandenen Unterschiede der Farbe der verschiedenen Ringe verschwinden, und die abwechselnd blaue und gelbe Contrastfärbung der Ränder auf einen gleichmässig gefärbten Grund aufgetragen zu sein scheint. 414 Sehr bezeichnend ist es auch, dass in diesen Fällen gewöhnlich die Mischfarbe nicht zur Anschauung kommt, man vielmehr die beiden gemischten Farben getrennt und neben oder durch einander zu sehen glaubt.

Diese so auffallenden Contrastwirkungen verschwinden aber, wenn man die Grenze zwischen je zwei Ringen durch feine schwarze Kreislinien bezeichnet. Dann erscheint jeder Ring, wie er wirklich ist, in seiner ganzen Breite gleich hell und gleich gefärbt. Auch hier ist es wieder von entscheidendem Einflusse, dass die verschiedenen Felder Theile einer, von der Färbung abgesehen, durchaus continuirlichen und gleichartigen Fläche seien. Auch hier haben wir es also nicht mit Veränderungen der Empfindung, sondern der Abschätzung zu thun. Die Beleuchtungsunterschiede der verschiedenen Theile dieser Fläche werden als die einzigen wahrnehmbaren Unterschiede wieder besonders hervorgehoben, und da diejenigen zweier unmittelbar benachbarter Flächenelemente deutlicher und sicherer wahrnehmbar sind, als die von entfernteren, so drängen sich namentlich die Unterschiede der Beleuchtung längs der Ränder je zweier Felder der Wahrnehmung auf, und erscheinen als die am sichersten und deutlichsten wahrnehmbaren grösser als die unsicher wahrnehmbaren zwischen je zwei mittleren Theilen zweier Felder. Da in der Mitte jedes Feldes bei den beschriebenen Versuchen kein plötzlicher Sprung der Beleuchtung existirt, welcher wahrgenommen werden

könnte, so muß der Schein entstehen, daß die Farbe des einen Randes durch die Mitte des Feldes allmählich in die des anderen übergeht. Macht man aber in der Mitte des inducirten Feldes einen schwarzen Strich, oder legt man ein graues Feld, dessen Hälften ungleich hell und durch eine scharfe Grenzlinie getrennt sind, zwischen zwei farbige, so gehen die complementären Färbungen von jeder Seite her bis an diese Grenzlinie vor, und scheiden sich an dieser. Sind die Farbenunterschiede des inducirten und der inducirenden Felder so groß, daß zwischen allen Punkten derselben der Farbenunterschied zweifellos wahrnehmbar ist, so verschwindet die Contrastwirkung, oder wird wenigstens viel zweifelhafter. Findet noch irgend eine andere Abgrenzung des inducirten Feldes statt, so wird der Unterschied seiner Färbung von der des inducirenden viel unsicherer wahrgenommen, und der Contrast schwindet ebenfalls, oder wird schwächer.

Außerordentlich schlagend zeigt sich die Wirkung schwacher Unterschiede bei einem zuerst von H. MEYER¹ angegebenen Verfahren. Man schneide ein Blatt aus feinem weißen Briefpapier und eines aus farbigem Papier, z. B. grünem, beide genau gleich groß, lege beide auf einander, so daß sie sich genau decken, und schiebe ein Schnitzelchen grauen Papiers dazwischen, welches ebenso dunkel oder dunkler als das grüne ist. Weniger gut ist schwarzes oder weißes Papier. Durch das weiße Papier schimmert das Grün und Grau der Unterlage nur ganz schwach durch, und wo das letztere liegt, erscheint jetzt ein sehr deutliches und starkes Rosaroth. Giebt man der Unterlage eine andere Färbung, so erscheint das graue Schnitzelchen immer in der Complementärfarbe durch das aufgelegte weiße scheinend. Es gelingt häufig die Verhältnisse so zu treffen, daß die complementäre Contrastfarbe deutlicher hervortritt als die schwache Farbe des Grundes.

Der Einfluß schwächster Grenzlinien ist bei diesen Versuchen sehr auffällig. Man nehme ein durchscheinendes weißes Papierblatt, und lege es auf ein undurchsichtiges weißes. Oben auf lege man ein Schnitzelchen von hellgrauem Papier, was man durch einen leichten Anflug chinesischer Tusche so weit gefärbt hat, daß es, wenn es auf dem obersten dünnen weißen Papierblatt liegt, oder auch dort angeklebt ist, ebenso dunkel erscheint, als ein dunkleres Schnitzelchen, was unter dem durchscheinenden Papier liegt. Alsdann nehme man das undurchsichtige Weiß fort und lege dafür ein farbiges Blatt ein. Dann sieht man von oben die beiden grauen Schnitzel in nahehin gleicher Helligkeit des objectiven Grau. Der optische Unterschied besteht nur darin, daß das oben liegende durch seine zarten Grenzlinien, die man eben noch erkennt, vom Grunde getrennt ist, während die Grenzlinie des anderen Schnitzel mehr als ein verwaschener Fleck von etwas anderer Farbe als der Grund des deckenden Papiers erscheint. Unter diesen Umständen kommt die complementäre Contrastfarbe auf dem letzteren, bedeckten Schnitzel sehr deutlich zum Vorschein, während sie auf dem oben liegenden

¹ H. MEYER, *Pogg. Ann.* XCV. 170. 1855.

kaum oder gar nicht zu erkennen ist. Diese Form des Versuchs ist besonders bequem, weil man schwache Färbungen durch Nachbilder nicht sehr ängstlich zu vermeiden braucht, da beide gleichfarbige Flecke durch solche, wenn sie sich entwickeln sollten, nahehin gleichmäÙig verändert werden, während der Unterschied, der von der Deutlichkeit der Grenzen abhängt, bestehen bleibt.

Bringt man die beiden grauen Flecke einander sehr nahe, so wird die Contrastwirkung viel schwächer, dann stört offenbar die Gleichheit der beiden Grau, welche man um so sicherer erkennt, je näher sich die beiden Flächen liegen.

Auch kann man den Contrast sehr schwächen, wenn man zwei gleichgefärbte graue Schnitzel zwischen das farbige Papier und das dünne weiÙe Blatt legt und auf dem deckenden dünnen Papier einen feinen Strich mit Tinte macht, der der Umrifslinie des einen grauen Feldes folgt. Auch dann zeigt das nicht abgegrenzte graue Feld die Contrastfarbe viel deutlicher, als das abgegrenzte.

Besonders deutlich tritt die Contrastfarbe auch hervor, wenn man das Nachbild eines weiÙen oder grauen kleinen Feldes, was von farbigem Grunde umgeben ist, auf einen gleichmäÙig weiÙen oder grauen Grund wirft. Das Nachbild des weiÙen Feldes würde bei Vermeidung allzu starken Lichts kaum gefärbt sein, wenn der umgebende Grund vorher schwarz oder dunkelgrau gewesen wäre. War aber, wie bei dem beschriebenen Versuche, der Grund gefärbt, so erscheint das Nachbild des kleinen weiÙen Feldes jetzt gleichfarbig dem früher gesehenen Grunde, während die Umgebung die Farbe seines complementären Nachbildes zeigt. Diese ruft offenbar durch Contrast wieder ihre Complementärfarbe, d. h. die ursprüngliche Farbe des Grundes in dem weiÙen kleinen Felde hervor.

Die Bedingungen sind hier besonders günstig für eine ruhige Beobachtung des Contrastes; denn die Grenzen des kleinen grauen Nachbildes sind immer ein wenig verwaschen, ohne scharfe Umrifslinie, und außerdem stört das Schwanken der Gesichtslinie die Erscheinung gar nicht, weil das Nachbild durchaus fest auf der Netzhaut liegen bleibt.

Der Farbenunterschied zwischen den ursprünglich gesehenen beiden Feldern kann sehr schwach sein; die Erscheinung wird dadurch kaum weniger deutlich. Man erreicht dies z. B., indem man den stark gefärbten Grund mit durchscheinendem weiÙen Papier überdeckt und vor diesem das weiÙe Feld anbringt, welches das weiÙe Nachbild geben soll.

Contrast bei starken Farbenunterschieden. Ein kleines weiÙes Feld etwa ein mit einer Pincette gehaltenes Papierschnitzelchen, hinter welchem ein gleich hell beleuchteter Bogen weiÙen Papiers weggezogen wird, so daÙ an Stelle des letzteren ein ausgedehnter lebhaft gefärbter Grund erscheint, zeigt mir im ersten Moment die Complementärfarbe, aber nur undeutlich und sehr flüchtig. Gleich darauf tritt aber auch die dem Grunde gleichnamige Farbe in schwachen Andeutungen auf dem kleinen Felde auf, oft fleckweise

vertheilt zwischen Stellen, die die Complementärfarbe zeigen. So ist es wenigstens jetzt in meinem 70. Lebensjahre. Die von mir in der ersten Auflage gegebene Beschreibung dieser Erscheinung macht mich glauben, daß ich damals die Complementärfarbe deutlicher und sicherer gesehen habe. Ich muß dahingestellt sein lassen, ob meine Augenmedien vielleicht trüber geworden sind, so daß sie mir mehr objectives Licht von der Farbe des Grundes über das kleine weiße Feld ausbreiten, und dadurch der Contrast gestört wird.

Das reagirende Weiß darf im Allgemeinen nicht zu hell genommen werden. Wenn man den Versuch in einem Zimmer anstellt, wo von einer Lampe oder von einer nicht zu großen Fensteröffnung her das Licht einfällt, kann man die Helligkeit des weißen Papiers leicht dadurch verändern, daß man das Licht mehr oder weniger senkrecht auffallen läßt, und so die passende Helligkeit auffindet. Eine mittlere Helligkeit des Weißs, welche ungefähr eben so groß ist, wie die des farbigen Grundes, ist am vortheilhaftesten. Ist das Weiß zu hell, oder andererseits zu stark beschattet, so daß es sich dem Schwarz nähert, so sind die Contrastfarben minder deutlich oder fehlen ganz. Je mehr die farbige Fläche vom Gesichtsfelde einnimmt, desto heller kann das Weiß gemacht werden. Wenn man sich mit dem Auge von den Objecten entfernt, und deren scheinbare Größe also kleiner wird, so wird die inducirte Farbe schwächer oder schwindet ganz. Ebenso schwindet sie bei anhaltendem Fixiren, und verwandelt sich in die der inducirenden Farbe gleiche, auch desto leichter, je kleiner die scheinbare Größe des inducirten Feldes ist, je stärker dieses beleuchtet ist, und je dunkler das inducirte Feld ist. Läßt man das letztere aus einem schwarzen Scheibchen bestehen, und bringt dieses vor eine farbige Glasplatte, welche in einer Oeffnung des Fensterlades befestigt ist, so daß man die lichte Himmelfläche hindurchsieht, so ist häufig von Anfang an die schwarze Scheibe mit der Farbe des Glases überzogen, vorausgesetzt, daß man Nachbilder vermeidet. Ich finde hierbei keinen Unterschied der verschiedenen Farben als den, daß die käuflichen rothen Gläser dunkler zu sein pflegen als die gelben, grünen und blauen, und daher für das Roth eine größere Lichtstärke, z. B. die von sonnenhellen Wolken nöthig ist, um die gleiche Farbe von Anfang an zu erzeugen. Bei den blauen Gläsern, welche auch bei ziemlich dunkler Färbung die Erscheinung zeigen, könnte wohl auch die Fluorescenz der Linse und Hornhaut dazu beitragen, blaues Licht über die dunkle Scheibe zu verbreiten. Nach kurzem Fixiren tritt immer die gleiche Farbe ein, und nur am Rande des schwarzen Feldes zeigt sich der von Schwankungen der Gesichtslinie herführende complementäre Saum.

Wenn wir zunächst von den Fällen absehen, wo die inducirte Farbe der inducirenden gleich ist, so können wir das Hauptresultat der beschriebenen Versuche auch so ausdrücken: „Wenn im Gesichtsfelde eine besondere Farbe überwiegend verbreitet ist, so erscheint uns eine weißlichere Abstufung desselben Farbentons als Weiß, und wirkliches Weiß als complementär ge-

397 färbt.“ Es wird also die Norm dessen, was wir Weifs nennen, dabei verändert. Nun ist die Empfindung des Weifs keine einfache Empfindung, sondern in einem bestimmten Verhältnisse zusammengesetzt aus den Empfindungen der drei Grundfarben. Um nun in einem bestimmten Falle eine gegebene Farbe als Weifs anzuerkennen, wenn uns die Möglichkeit fehlt, sie mit anderem Weifs zu vergleichen, welches als solches anerkannt ist, müssen wir das Intensitätsverhältniß der drei darin enthaltenen Grundfarben als verändert oder unverändert wieder erkennen. Die Vergleichung der Intensität verschiedener Farbenempfindungen ist aber, wie wir in § 21 gesehen haben, eine höchst unsichere und ungenaue. Es kann also auch die darauf beruhende Bestimmung des Weifs keine sehr genaue sein, sondern es werden ziemlich bedeutende Schwankungen in dem, was wir zu verschiedenen Zeiten für Weifs halten, möglich sein, wie wir es denn auch wirklich finden.

In dieser Erklärung liegt auch zugleich der Grund, warum die Schwankungen der Vorstellung des Weifs nicht so weit gehen, daß wir eine gesättigte Farbe, z. B. das Roth der mit Kupferoxydul gefärbten Gläser, welche nur Licht vom rothen Ende des Spectrum hindurchlassen, jemals für Weifs halten sollten, selbst wenn wir uns längere Zeit in einem Raume befinden, welcher sein Licht nur durch ein solches Glas empfängt. In der That sind wir nicht im Zweifel, wenn wir sehr lichtstarkes Roth mit lichtschwachem Blau vergleichen, welche Farbe die hellere sei. Über große Unterschiede entscheiden wir sicher auch aus der Erinnerung, nicht aber über kleine. Wenn also dem Auge homogenes Licht dargeboten wird, und die Empfindung der rothen Grundfarbe daher sehr intensiv ist, im Vergleich zu den Empfindungen der beiden anderen Grundfarben, so erkennen wir ohne Bedenken die Farbe als Roth an. Wir thun dies auch noch, wenn die Empfindung des Roth durch Ermüdung des Auges schon sehr bedeutend abgeschwächt ist. Wohl aber können wir unter solchen Umständen ein etwas weifsliches, aber noch immer ziemlich gesättigtes Roth für Weifs halten, wie in dem oben beschriebenen Versuche, wo ein mennigrothes Papier vor einem stark erleuchteten rothen Glase grünlich erscheint.

Noch auf einen anderen Umstand muß ich aufmerksam machen, der in einem solchen Falle vor allzu großen Irrthümern schützt. Es ist dies das Eigenlicht der Netzhaut, welches nach einiger Zeit bei wanderndem Blicke complementär zur herrschenden Farbe erscheint, und sich auf allen ganz dunkeln Stellen des Gesichtsfeldes merklich macht. Wenn wir anhaltend durch ein rothes Glas sehen, erscheinen bald alle ganz dunkeln Objecte lebhaft grün. Neben dem Roth wird also seine Complementärfarbe sichtbar, und wir werden dadurch gezwungen, das Roth als Roth anzuerkennen, wir können es nicht mit Weifs verwechseln. Bei herrschender weißer Beleuchtung erscheint der Nebel auf den dunkeln Stellen weifs, und wird eben deshalb nur bei genauer Aufmerksamkeit bemerkt. Selbst bei schwächer gefärbtem Licht, z. B. bei einer Lampe oder Kerze, macht sich das Eigenlicht der Netzhaut in dieser Weise bemerklich. Man braucht nur vor eine weisse

von der Kerze beleuchtete Papierfläche einen schmalen schwarzen, ganz un-
beleuchteten Gegenstand zu halten, und den Blick über ihn und die Papier-
fläche wandern zu lassen, so erkennt man bald den indigblauen Schein auf
dem Schwarz, welcher dem Rothgelb des Kerzenlichts complementär ist.
Weißes Papier bei Kerzenbeleuchtung erscheint ebenso gut weiß, wie bei
Tageslicht. Blickt man aber durch eine innen geschwärzte Röhre, welche
nur eine kleine Öffnung hat, nach dem Papier, und vergleicht das Aussehen
des kleinen Theils der Papierfläche, den man noch sieht, mit dem dunkeln
Felde, so erkennt man bald, daß jenes rothgelb ist, letzteres bläulich er-
scheint, während bei Tageslicht sich kaum ein solcher Unterschied zeigt.
Dies ist ein Mittel, um die Farbe der herrschenden Beleuchtung zu erkennen,
selbst wenn man kein Tageslicht zur Vergleichung herbeischaffen kann.

Eine genaue Bestimmung des Weiß, bei verbreiteter farbiger Beleuch-
tung kann aus der Vergleichung mit dem Eigenlichte des Auges natürlich
nicht hervorgehen, weil das letztere zu schwach und nicht rein weiß ist.

Wenn wir also eine beschränkte Anzahl farbiger Objecte im Gesichts-
felde haben, so sind wir viel besser im Stande, die relativen Unterschiede
der vorhandenen Farben unter einander und von ihrem Mittel zu bestimmen,
als den Unterschied dieses Mittel vom Weiß. Nun ist bei der normalen
Beleuchtung durch Tageslicht, und wenn wir eine große Mannigfaltigkeit von
Objecten frei vergleichen können, das Weiß des Sonnenlichts die Mittel-
farbe, von der aus wir die Abweichungen der übrigen Farben nach den ver-
schiedenen Richtungen der Farbentafel hin beurtheilen. Ist aber eine andere
Farbe A herrschend, so daß das Mittel aller gleichzeitig angeschauten
Farben sich der Farbe A nähert, so sind wir geneigt, dieses Mittel als den
Ausgangspunkt unserer zeitweiligen Farbenbestimmungen zu benutzen, und
es mit Weiß zu identificiren.

Ein weiterer sehr günstiger Fall für die Erscheinungen des simultanen
Contrastes sind die farbigen Schatten. Diese haben unter allen Contrast-
erscheinungen zuerst und am meisten die Aufmerksamkeit auf sich gezogen.
Die leichteste Art, sie zu beobachten, ist die, daß man ein Blatt Papier
von entgegengesetzten Seiten her gleichzeitig mit abgeschwächtem Tageslicht
und mit Kerzenlicht beleuchtet. Das Tageslicht, d. h. weißes Licht, welches
vom bewölkten Himmel, oder von einer von der Sonne beschienenen weißen
Fläche, oder auch vom Monde kommt, lasse man durch eine nicht zu breite
Öffnung einfallen, damit es deutliche Schatten werfen könne. Dann stelle
man auf das Papier irgend einen Körper (Finger, Bleistift), welcher Schatten
wirft. Man wird zwei Schatten erkennen. Ich nenne Schatten des Tages-
lichts denjenigen, welcher auch, wenn die Kerze fehlte, da sein würde, und
Schatten des Kerzenlichts denjenigen, dessen Dasein von der Anwesen-
heit der Kerze abhängt. Der Schatten des Tageslichts ist beleuchtet von
rothgelbem Kerzenlicht, aber nicht von Tageslicht. Er erscheint in seiner
objectiven Färbung, nämlich rothgelb. Der Schatten des Kerzenlichts wird
von dem weißen Tageslichte, nicht aber von dem rothgelben Kerzenlichte

beleuchtet. Er ist also objectiv weiß, erscheint aber blau, complementär zur Farbe des Grundes, welche ein weißliches Rothgelb ist, da die nicht beschatteten Theile des Papiers gleichzeitig von dem weißen Tageslichte und dem rothgelben Kerzenlichte beschienen sind. Die Färbungen sind am deutlichsten, wenn man die Stärke beider Lichtquellen so abgleicht, daß die Schatten beider gleich dunkel sind.

Das Blau im Schatten des Kerzenlichts wird lebhafter, wenn man den Blick häufig über den rothgelben Grund wandern läßt, aber es entsteht auch ganz ohne Vermittelung von Nachbildern. Man merke und bezeichne sich irgend einen Punkt *a*, der in dem blauen Schatten liegt, setze vor die Kerze einen undurchsichtigen Schirm, lasse eine Weile nur Tageslicht auf das Papier fallen, bis die Nachwirkung des rothgelben Lichts vollständig erloschen ist, und das Tageslicht wieder vollkommen weiß erscheint. Nun fixire man den Punkt *a* und ziehe den Schirm vor der Kerze weg. Sogleich färbt sich nun der Schatten des Kerzenlichts blau, und bleibt blau, wenn auch nicht die kleinste Schwankung des Blicks erfolgt ist. Ferner tritt auch die Contrastfarbe im Schatten sogleich auf, wenn man die Augen eine Weile schließt und bedeckt, und sie dann plötzlich öffnend nach den Schatten hinwendet.

Man nehme eine innen geschwärzte Röhre, und gebe ihr eine solche Stellung, daß, wenn man hindurchsieht, das Auge nur Stellen des Papiers erblickt, welche im Schatten des Kerzenlichts liegen. Läßt man nun zuerst nur Tageslicht einfallen, blickt dann durch die Röhre, und läßt alsdann auch das Kerzenlicht einfallen, so sieht der Beobachter nichts von den mit Kerzenlicht beleuchteten Stellen, er bemerkt dessen Anwesenheit gar nicht, und das Aussehen der Stelle des Papiers, welche er durch die Röhre sieht, bleibt unverändert. Es folgt daraus, was hier bemerkt werden mag, da es von OSANN bezweifelt wurde, daß objectiv die Farbe des Papiers im Schatten des Kerzenlichts nicht verändert wird.

395 Statt der rothgelben natürlichen Farbe des Kerzenlichts kann man nun auch andere Farben anwenden. Das Kerzenlicht kann man färben, indem man farbige Gläser vor die Kerze setzt, und so gefärbtes Kerzenlicht entweder mit Tageslicht oder mit ungefärbtem Kerzenlicht combinirt. Am glänzendsten werden die Erscheinungen aber, wenn man die Versuche in einem dunkeln Zimmer anstellt, und durch eine Öffnung des Ladens, die mit einem farbigen Glase gedeckt ist, gefärbtes Sonnenlicht eintreten läßt, durch eine andere kleine Öffnung weißes Tageslicht. In allen diesen Fällen erscheint das weiße Licht sowohl bei fixirtem, als auch, und zwar viel stärker, bei wanderndem Blick complementär zu dem farbigen gefärbt.

Die complementäre Farbe erscheint bei wanderndem Blicke sogar auch auf ganz schwarzen Flächen und auf Flächen, die schwach mit der herrschenden Farbe beleuchtet sind. Bei fixirtem Blicke erscheint eine dunkle Fläche bald complementär, bald gleichfarbig. Bei schwächerem Lichte gewöhnlich ersteres, bei stärkerem Lichte letzteres, jedenfalls wird sie aber nach einiger Dauer der Fixation gleichfarbig dem herrschenden Lichte, während nur an

den Rändern bei den unvermeidlichen Schwankungen der Gesichtaxe hin und wieder die Complementärfarbe aufblitzt. So wie man den Blick wandern läßt, kommt die Complementärfarbe immer zu Stande, oder wird glänzender, wenn sie schwach schon vorher da war.

Die Complementärfarbe kommt sogar dann zum Vorschein, wenn man das Licht durch zwei Gläser von derselben Farbe gehen läßt, wovon aber das eine schwächer gefärbt ist als das andere, oder wenn man zwei gleiche Gläser anwendet, aber neben dem einen noch weißes Licht einfallen läßt. In solchen Fällen wird also der Farbenton des weislicheren Schattens scheinbar in den entgegengesetzten verwandelt.

Ehe wir die Fälle von Contrast verlassen, bei denen die inducirte Farbe ⁴⁰⁰ den größten Theil des Gesichtsfeldes einnimmt, müssen wir noch den Grund der zuweilen erscheinenden Färbung des reagirenden Feldes, welche der inducirenden gleichnamig ist, erörtern. Es kommt dies unter zwei Bedingungen vor, erstens nämlich wenn das inducirende Feld eine sehr große Lichtstärke hat, zweitens bei langem Fixiren desselben Punktes.

Wenn das inducirende Feld eine sehr große Lichtstärke hat, halte ich das Auftreten der gleichnamigen Färbung im reagirenden Felde nicht für eine subjective Erscheinung, sondern für eine Ausbreitung objectiven Lichts. Jede feste und flüssige durchsichtige Substanz, welche wir kennen, zerstreut kleine Mengen des Lichts, welches durch sie hindurchgeht, nach allen Seiten hin, und erscheint deshalb, wenn starkes Licht durch sie hingeht, selbst schwach erleuchtet. Dafs dies auch mit der Hornhaut und der Krystalllinse des Auges der Fall ist, haben wir schon oben (§ 14, S. 142) erwähnt. Man denke ferner an die entoptischen Objecte des Glaskörpers, welche nothwendig das durchgehende Licht theilweis von seinem Wege ablenken müssen, man denke daran, dafs Licht von den erleuchteten Stellen der Netzhaut nach den übrigen Theilen des Augengrundes hin reflectirt wird, so ergiebt sich, dafs wenn eine größere Menge Licht in das Auge eindringt, immer merkliche Mengen davon über einen größeren oder kleineren Theil des Augengrundes ausgebreitet sein werden. Am deutlichsten zeigt sich diese Beleuchtung durch diffuses Licht bei der zweiten in § 15 beschriebenen Methode, die Gefäße der Retina sichtbar zu machen, indem man eine Kerzenflamme unterhalb des Auges hin und her bewegt. In dem Lichtnebel, welcher hierbei den Grund des Auges ausfüllt, erscheinen die Schatten der Netzhautgefäße; die Beleuchtung ist also jedenfalls eine objective, und nicht bloß eine Ausbreitung der Lichtempfindung in der Netzhaut.

Nun kann man sich bei objectiven Versuchen mit Glaslinsen leicht überzeugen, dafs das diffus zerstreute Licht immer am stärksten in der Nähe des regelmäfsig gebrochenen Lichtbündels ist, und schwächer wird, je weiter man sich von diesem entfernt. Läßt man Sonnenlicht durch die Öffnung eines schwarzen Schirms auf eine entfernte Linse fallen, und fängt das Bild der hellen Öffnung auf einem weissen Schirme auf, so sieht man das helle Bildchen von einem weissen Nebelschein umgeben, der auch sichtbar wird, wenn man

das Bild der hellen Öffnung selbst dicht am Rande des Schirms vorbeigehen läßt. Jener weiße Nebelschein ist also keine im Auge entstehende Irradiation, sondern eine objective Erscheinung. Noch besser sieht man es, wenn man in den Schirm eine kleine Öffnung macht, die man dem Bilde der hellen
 401 Öffnung nahe bringt, ohne sie aber damit zusammenfallen zu lassen. Blickt man durch die Öffnung des Schirmes nach der Linse, so erscheint diese desto heller erleuchtet, je näher man dem optischen Bilde der Lichtquelle kommt. Ein ganz entsprechendes Phänomen entsteht im Auge. Wenn man eine Lichtflamme vor einem sehr dunkeln Felde sieht, z. B. vor der geöffneten Thür eines ganz dunkeln Raumes, so erscheint die Flamme von einem weißlichen Nebel umgeben, der in ihrer unmittelbaren Nähe am hellsten ist. Man bemerkt diesen Lichtschein am besten, wenn man einen kleinen undurchsichtigen Körper zwischen das Auge und die Flamme bringt, so daß diese nicht mehr gesehen wird. Augenblicklich verschwindet auch der Lichtnebel vor dem Grunde, und man sieht diesen in seiner eigenthümlichen Schwärze. Ist das Licht farbig, so ist natürlich auch der zerstreute Lichtnebel von derselben Farbe. Ich glaube auch in diesem Falle nicht zweifeln zu dürfen, daß dieser Lichtnebel von der Zerstreuung objectiven Lichts herührt, da die Vertheilung des Lichts ganz dieselbe ist, welche ein System Glaslinsen unter denselben Umständen geben würde. Aber allerdings fehlt hier der Nachweis mittels der Schatten der Netzhautgefäße, der in dem erst erwähnten Falle gegeben werden konnte. Beim blauen Lichte kommt endlich auch noch das durch Fluorescenz der Linse zerstreute weißbläuliche Licht hinzu, welches sich ebenfalls über den ganzen Grund des Auges ausbreitet. Wenn also eine große Menge farbigen Lichts in das Auge fällt, werden immer auch solche Theile der Netzhaut, welche Bilder dunkler Objecte empfangen, von dem herrschenden Lichte schwach beleuchtet werden, und zwar desto stärker, je näher sie den Bildern der hellen Flächen liegen. Außerdem besteht im Bereich des dunkeln Bildes die innere Reizung der Nervenmasse, das weißliche Eigenlicht der Netzhaut. Dieses allein genommen würde im Contrast zur herrschenden Farbe dieser complementär erscheinen. Kommt aber viel der inducirenden Farbe gleichnamiges zerstreutes Licht hinzu, so wird dies von Anfang an den überwiegenden Eindruck machen; daher denn, wie oben bemerkt, schwarze Scheibchen vor farbigen Gläsern bei geringerer Helligkeit complementär, bei größerer gleichfarbig erscheinen.

Der zweite Fall, wo die inducirte Farbe der inducirenden gleichartig ist, bei langer Fixation nämlich, erklärt sich aus dem, was im vorigen Paragraphen über das allmähliche Erlöschen der Bilder durch lange Fixation beigebracht worden ist. Es ist schon dort bemerkt worden, daß wenn eine Stelle der Netzhaut lange Zeit hindurch von demselben Lichteindrucke getroffen wird, die Empfindung der Helligkeit immer schwächer und die Farbe immer weniger gesättigt wird. Indessen bemerken wir diese Veränderung des Eindrucks nur, wenn wir Vergleichen mit dem Eindruck, den dasselbe Licht auf un-

ermüdete Netzhautstellen macht, anstellen. Wir halten also dabei das Urtheil über die Farbe und Helligkeit fest, welches wir uns beim ersten Anblick gebildet haben. In der That würden wir, selbst wenn wir den Wechsel des Eindrucks bei einiger Aufmerksamkeit bemerken, ihn bald als subjective Erscheinung erkennen lernen, da er ja in jedem einzelnen Falle immer und immer wiederkehrt, und würden ihn, wie andere ähnliche subjective Erscheinungen, bald übersehen lernen.

Wenn die fixirte Fläche hellere und dunklere Theile hat, so verlöschen ⁴⁰² diese Unterschiede bei der Abschwächung des Eindrucks allmählich. Man bezeichne sich auf einer solchen Fläche einen Punkt, der als Fixationspunkt dient; übrigens ist es vorthellhaft, wenn die Grenzen zwischen hellen und dunkeln Theilen verwaschen sind, um bei kleinen Schwankungen des Auges nicht zu stark gezeichnete Nachbilder zu geben. Fixirt man scharf und fest, so verlöschen in 10 bis 20 Secunden oft recht auffallende Lichtunterschiede, und zwar in der Weise, dafs anfangs die helleren Theile dunkler werden, und gleichzeitig die dunkleren heller. Auffallend ist dabei auch, dafs eine gröfsere dunkle Masse sich häufig in einen verwaschenen dunkeln Fleck verwandelt, oder eine helle Masse in einen verwaschenen hellen Fleck, als wären die Objecte mit dünnflüssigen Farben gemalt, und diese verliefen in einander. Übrigens ist in dieser Weise der Versuch schwer auszuführen, wegen der langen starren Fixation, und sehr anstrengend. Jeder Lidschlag, jede kleine Verrückung des Auges stellt das Bild wieder her. Viel bequemer und vollständiger gelingt er, wenn wir Objecte benutzen, die zur Netzhaut selbst eine feste Lage haben, nämlich die Netzhautgefäfsse. Ich habe im § 15 die Methoden auseinandergesetzt die Netzhautgefäfsse sichtbar zu machen. Das Gemeinsame dieser Methoden besteht darin, dafs man den Schatten der Gefäfsse in eine ungewöhnliche Richtung fallen läfst, oder den Kernschatten zu verlängern sucht. Dabei ist aber auch nöthig die Richtung des Schatten werfenden Lichts fortdauernd zu verändern, und man sieht nur diejenigen Gefäfsse, deren Schatten den Ort wechselt. So wie man die Lichtquelle unverrückt läfst, schwinden die Gefäfsstämme im Gesichtsfelde in wenigen Secunden, indem sie so hell werden wie das übrige Gesichtsfeld. Sie schwinden schneller und vollständiger, als es Bilder äufserer Gegenstände thun, bei denen die Schwierigkeit der Fixation besteht; sie schwinden um so schneller, je schwächer die Beleuchtung ist. Am längsten halten sie sich, wenn man durch eine Linse Sonnenlicht auf die äufsere Seite der Sclerotika concentrirt, weil hier das Feld am hellsten ist.

Einfache Überlegungen zeigen übrigens leicht, dafs das Verschwinden der Netzhautgefäfsse ganz dieselben Ursachen hat, wie das Verschwinden aller fest fixirten Bilder, und dafs hierbei keineswegs irgend eine besondere Eigenthümlichkeit der hinter den Gefäfsen liegenden Netzhauttheile im Spiel ist. Es ist nicht zulässig anzunehmen, dafs diese Stellen etwa mit einer gröfseren Erregbarkeit begabt seien, als der Rest der Netzhaut, und deshalb trotz der Beschattung ebenso starke Empfindung hätten, wie die anderen. Denn wenn

wir den Schatten in ungewöhnlicher Richtung entwerfen, indem wir einen Theil der Sclera durch die Pupille oder von aussen beleuchten, und zur Lichtquelle für den Augengrund machen, so verhalten sich die neu beschatteten Theile der Netzhaut genau ebenso, wie die gewöhnlich beschatteten. Auch auf jenen schwindet das Bild schnell, wenn es seinen Platz nicht wechselt, und die gewöhnlich beschatteten Theile geben sich keineswegs durch eine dauernd gröfsere Helligkeit zu erkennen. Vorübergehend blitzen allerdings helle Streifen neben dem Schatten auf, sobald der Schatten eine Zeit lang still gestanden hat, und dann wieder sich zu bewegen beginnt. Aber das
 403 geschieht bei seitlicher Beleuchtung ebenso gut, wie bei der Beleuchtung von vorn. Es zeigt sich dabei also wohl, dafs die beschatteten Theile der Netzhaut ausruhen, und wenn wieder Licht auf sie fällt, dieses lebhafter empfinden. Aber die Nachwirkung der Ruhe, das negative helle Nachbild des Schattens dauert eben nicht länger als das Nachbild dunkler äufserer Objecte. Ich glaube deshalb nicht zweifeln zu dürfen, dafs wir in dem schnellen Verschwinden des Gefäfsschattens eben nichts anderes sehen, als in dem Verschwinden jedes starr angeschauten objectiven Bildes mit mäfsigen Helligkeitsunterschieden, nur dafs in jenem Falle die Schwierigkeiten der Fixation wegfallen.

Wenn nun dauernd eine Stelle der Netzhaut *A* stärker beleuchtet wird als eine andere *B*, so wird allerdings, weil *A* mehr ermüdet wird als *B*, der anfängliche Unterschied der Erregung bis zu einem gewissen Grade vermindert werden, und wir sehen ihn dabei allmählich auch für unsere Empfindung ganz und gar verschwinden, sei es nun, dafs er wirklich zu klein wird, um wahrgenommen zu werden, oder, was mir wahrscheinlicher dünkt, weil unser Unterscheidungsvermögen für anhaltende Nervenerregungen viel unvollkommener ist, als für wechselnde Erregung. Da wir nun aber in diesen Fällen unsere Beurtheilung der Farbe nach dem ersten Eindruck festhalten, und über die allmähliche Veränderung desselben wegsehen, so scheinen uns bei diesem Versuch die Flächen *A* und *B* einander ähnlicher zu werden, während ihre mittlere Helligkeit ungefähr constant erscheint. Im Allgemeinen wird die hellere *A* dabei dunkler, die dunklere *B* aber heller. Eine silbergraue Tapete zum Beispiel mit dunkler grauen Blättern, an der Kupferstiche hängen, erscheint mir bei längerem Fixiren wie mit Milch übergossen.

Sind im Gesichtsfelde verschiedene Farben, so hat deren Eindruck ebenfalls nur im ersten Augenblicke volle Lebhaftigkeit. Bei anhaltendem Fixiren werden alle Farben immer dunkler und grauer, und daher einander ähnlicher. Dafs sie ähnlicher werden, bemerken wir; die Veränderung der herrschenden Farbe aber bemerken wir nicht, oder nur ungenau, so lange uns die Vergleichung mit frischen Eindrücken fehlt, und so halten wir diese meist für unverändert.

Haben wir also ein weifses Feld auf rothem Grunde fixirt, und werden die beiden Farben einander immer ähnlicher, so urtheilen wir, dafs das Weifs roth werde. Dazu kommt, dafs bei jedem Schwanken des Blicks an der

Grenze beider Felder auf dem Weiss ein grünes Nachbild, auf dem Roth das von gesättigtem Roth aufblitzt, und durch den Contrast die Wirkung verstärkt.

Dafs beide Farben sich einander nähern, zeigt sich sehr deutlich, wenn man ein kleines rothes Feld auf breitem weifsen Grunde fixirt. Auch dann wird, wie FECHNER bemerkt hat, das Weiss nach einiger Zeit röthlich, und zwar gleichmäfsig in seiner ganzen Ausdehnung. Ein zweites kleines farbiges Feld, welches weit seitlich liegt, hat keinen Einflufs auf den Gang der Erscheinung. Wählt man aber den Fixationspunkt auf der Grenze zweier kleinen verschiedenfarbigen Felder, die auf weifsem Grunde liegen, so überzieht sich nach FECHNER der Grund mit der Mischfarbe beider. Es zeigt sich hierbei also eine besondere Bevorzugung der Farbe, welche der gelbe Fleck empfindet, was wohl seinen Grund darin hat, dafs diese am schärfsten und sichersten beurtheilt wird, während die Farbenempfindung auf den Seitentheilen der Netzhaut viel unvollkommener ist.

In den bisher betrachteten Fällen, wo wir voraussetzten, dafs die inducirende Farbe den grössten Theil des Gesichtsfeldes einnimmt, oder wenigstens durch ihre Stärke und Lebhaftigkeit die anderen beherrscht, sind die Contrasterscheinungen ziemlich constant und deutlich, und scheinen weiter von keinen Nebenbedingungen abzuhängen. Anders ist es, wenn das Feld der inducirenden Farbe kleiner ist, so dafs daneben an der Grenze des Gesichtsfeldes noch eine hinreichende Anzahl weifser und verschiedener Objecte erscheinen können. Dann sind die Contrasterscheinungen durchaus nicht mehr so constant, und hängen von manchen merkwürdigen Nebenbedingungen ab, die mir für die Theorie dieser Erscheinungen sehr wichtig zu sein scheinen. Ist aufserhalb des inducirenden und inducirten Feldes das Gesichtsfeld dunkel, so stört dies nicht so sehr. Erst wenn das Dunkel einen sehr grossen Theil des Gesichtsfeldes einnimmt, wenn man z. B. durch eine schwarze Röhre sieht, scheint das Eigenlicht der Netzhaut eine weifse Beleuchtung zu vertreten, und die Contrasterscheinungen werden unsicher.

Einflufs der Vorstellung von der körperlichen Lage der gesehenen Objecte. Sehr wirksam zeigt folgendes Verfahren von RAGONA SCINA die Contrastfarben auch bei mäfsiger Ausdehnung des farbigen Feldes. Es seien *ab* und *ac* Fig. 199 zwei weisse Papierflächen, die eine horizontal liegend, die andere senkrecht, und *ad* eine farbige Glasplatte, welche gegen die beiden Papierflächen um 45° geneigt ist; *e* und *f* seien zwei schwarze Flecke. Ein Beobachter, welcher von oben bei *B* her auf den Apparat herniedersieht, erblickt die Fläche *ab* durch das gefärbte Glas hindurch, und sieht *ac* gespiegelt. Das Spiegelbild der Fläche *ac* fällt scheinbar mit der Fläche *ab* zusammen, und das Spiegelbild des schwarzen Flecks *f* liege neben dem Flecke *e*, etwa in *g*. Nun ist das Licht, welches farbige Gläser hindurchlassen,

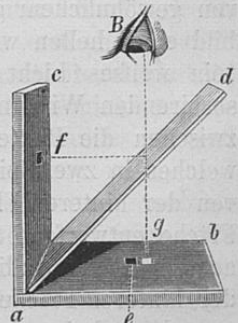


Fig. 199.

gefärbt, das, was sie reflectiren, besteht theils aus rein weißem Licht, welches an der vorderen Fläche reflectirt ist, theils aus verhältnißmäßig kleinen Antheilen farbigen Lichts, welches an der hinteren Fläche, oder mehrmals innerhalb der Platte reflectirt ist. Das reflectirte Licht ist also bei dunkel gefärbten Platten fast weiß, wenigstens viel schwächer gefärbt, als das durchgelassene Licht. Demnach erhält das Auge des Beobachters von dem Spiegelbild g des Fleckes f her nur durchgelassenes, also gefärbtes Licht, was von ab kommt, von dem hellen Grunde theils durchgelassenes farbiges, theils reflectirtes weißliches Licht, und von dem Flecke e her nur reflectirtes weißliches Licht. Obgleich nun dieses letztere Licht nicht ganz weiß ist, sondern immer noch Theile gefärbten Lichtes von der Farbe des Glases enthält, erscheint es doch im Contrast gegen die Farbe des Grundes complementär gefärbt, der Fleck g dagegen natürlich in der gesättigten Farbe des Glases. Ist also z. B. das Glas grün, so erscheint e rosaroth, g grün.

Auch hier muß man darauf sehen, daß der Unterschied zwischen der Helligkeit, in der e und der Grund erscheint, nicht zu groß wird, und deshalb bei farbigen Gläsern, die viel Licht durchlassen, die Fläche ab durch ein weißes Papier beschatten. Übrigens ist die Contrastfarbe von e deutlicher, wenn der dem Grunde gleichnamig erscheinende Fleck f da ist, als wenn er fehlt. Beide werden hier unter scheinbar gleichen Bedingungen gesehen, und die Vergleichung ihres Aussehens steigert den Gegensatz. Sucht sich nun der Beobachter ein graues Papier aus, welches genau dieselbe Farbe hat, wie ihm der Fleck e ohne Contrast erscheinen würde, und bringt er davon ein Schnitzelchen über die farbige Glasplatte, so daß es ihm den Fleck e halb verdeckt, so erscheint ein solches Schnitzelchen gar nicht oder nur zweifelhaft complementär gefärbt, und sobald man die Farbe des Flecks e mit ihm vergleicht, und sie als gleich anerkennt, schwindet auch die Complementärfarbe von e und verwandelt sich in einfaches Grau. Es ist dies ganz dieselbe Erscheinung wie bei der ersten Methode.

406 Ähnliche Erscheinungen, die freilich nur sehr kleine durch Contrast gefärbte Felder, aber doch eine lebhaftere und deutliche Wirkung zeigen, sind folgende. Man nehme eine schwach gefärbte etwas dicke Glasplatte etwa von gewöhnlichem grünlichen Fensterglas, und betrachte in ihr das Spiegelbild einer hellen weißen Fläche. Dabei wirft die vordere Fläche der Platte rein weißes Licht zurück, die hintere grünliches, weil letzteres der absorbirenden Wirkung des Glases ausgesetzt gewesen ist. Nun bringe man zwischen die Platte und die helle Fläche ein schmales schwarzes Stäbchen, welches in zwei Spiegelbildern erscheint, deren eines von der vorderen, eines von der hinteren Fläche der Platte reflectirt wird. Wo das von der vorderen Fläche entworfene Spiegelbild gesehen wird, empfängt das Auge des Beobachters noch grünliches Licht von der hinteren Fläche, wo das Spiegelbild der hinteren Fläche liegt, noch weißes Licht von der vorderen Fläche. Der Grund erscheint daher weiß, kaum etwas grünlich, das erstere Spiegelbild

grün, das zweite durch Contrast sehr deutlich rosaroth. Noch deutlicher wird die Erscheinung, wenn man die hintere Fläche eines solchen gefärbten Glases mit Spiegelfolie belegt, und die Nachbilder unter so schiefer Incidenz betrachtet, daß beide gleich stark erscheinen.

Ähnlich ist folgender Versuch. Man lege ein farbiges, z. B. grünes, auf ein weißes Papier (besser ein graues von gleicher Helligkeit). Nahe dem Rande, wo das grüne und weiße Feld zusammenstoßen, mache man auf jedes von beiden einen kleinen schwarzen Fleck, und setze ein Rhomboeder von Doppelspath auf diese Stelle. Durch den Krystall sieht man alle Punkte der Unterlage doppelt. In der Mitte erscheint ein grünweißer Streifen, wo sich das ordentliche Bild des Weißen mit dem außerordentlichen des Grün deckt. Man muß die Anordnung so treffen, daß in diesem Streifen je eines der Bilder der beiden schwarzen Flecke erscheint. In dem ordentlichen Bilde des auf dem Weißen befindlichen schwarzen Flecks fehlt Weiß, ist aber Grün vorhanden, der Fleck ist grün. In dem außerordentlichen Bilde des auf dem Grün befindlichen schwarzen Flecks fehlt Grün, ist aber Weiß vorhanden; durch Contrast erscheint er lebhaft rosenroth.

In den zuletzt beschriebenen Versuchen hängt die Contrastwirkung nicht mehr allein ab von einer bestimmten Vertheilung der Farben im Gesichtsfelde. Wir haben gesehen, daß diese bei zwei verschiedenen leichten Abänderungen desselben Versuchs genau gleich sein kann, und doch in dem einen Falle die Contrastwirkung deutlich eintritt, im anderen nicht oder wenigstens unsicher. Sobald das contrastirende Feld als ein selbständiger Körper anerkannt wurde, der über dem farbigen Grunde lag, oder auch nur durch eine hinreichende Bezeichnung seiner Grenzen als ein gesondertes Feld genügend abgetheilt war, fiel der Contrast fort. Da also das Urtheil über die räumliche Lage, über die körperliche Selbständigkeit des betreffenden Objects entscheidend für die Bestimmung der Farbe ist, so folgt, daß die Contrastfarbe hier nicht durch einen Act der Empfindung, sondern durch einen Act des Urtheils oder der Abschätzung entsteht. Die Art dieser Urtheilsacte, durch welche wir zur Wahrnehmung von Objecten mit bestimmten Eigenschaften gelangen, wird in der dritten Abtheilung genauer besprochen werden. Da die bezeichneten Urtheilsacte überwiegend oft unbewußt und unwillkürlich vollzogen werden, so ist es natürlich oft schwer, ⁴⁰⁷ auszumitteln, auf welcher Verkettung von Eindrücken das endliche Resultat beruht, und es liegt in der Natur der Sache, daß sehr verschiedenartige Umstände von Einfluß sein können. Ich will versuchen hier dergleichen Umstände zu bezeichnen, so weit ich bei der Neuheit des Gegenstandes sie aufzufinden weiß.

Die bisher beschriebenen Versuche haben etwas Gemeinsames, welches den Eintritt der Contrastwirkung sehr zu unterstützen scheint, obgleich auch ohne diesen Umstand Contrast zu Stande kommen kann. In allen diesen Fällen scheint nämlich eine farbige Beleuchtung oder eine farbige durchsichtige Decke über das Feld ausgebreitet zu sein, und die An-

schauung ergiebt nicht unmittelbar, daß sie auf der weissen Stelle fehlt, so daß hier nicht bloß einfach an Stelle des Weifs die Complementärfarbe des Grundes gesetzt wird, daß man vielmehr an die Stelle des Weifs zwei neue Farben setzt, die gemeinsame Farbe der Decke oder Beleuchtung und deren Complement. Am klarsten ist das Verhältniß bei der in *Fig. 199* dargestellten Anordnung, wo man durch das unter 45° geneigte grüne Glas sieht. Man urtheilt, daß der schwarze Fleck des unteren horizontalen Blattes rosenroth sei, aber man urtheilt auch, daß man diesen Fleck wie das ganze Blatt mit seiner rosenrothen Farbe durch das grüne Glas sehe, und daß die grüne Farbe, welche das Glas giebt, sich ununterbrochen über die ganze unterliegende Fläche erstreckt, auch über den dunkeln Fleck. Man glaubt also an dieser Stelle gleichzeitig zwei Farben zu sehen, nämlich das Grün, welches man der Glasplatte zuschreibt, und das Rosenroth, welches man dem dahinter liegenden Papier zuschreibt, und beide zusammen geben in der That die wahre Farbe dieser Stelle, nämlich Weifs. In der That müßte ein Object, welches, durch ein grünes Glas gesehen, weisses Licht in das Auge sendet, wie dieser Fleck, rosenroth sein. Bringen wir aber ein genau ebenso aussehendes weisses Object oberhalb der Glasplatte an, so fällt jeder Grund weg, die Farbe des Objects in zwei zu zerlegen, es erscheint uns weifs.

Ebenso wenn farbige Flächen mit durchscheinendem Papier bedeckt sind. Ist die Unterlage grün, so erscheint das Papier selbst grünlich gefärbt. Geht nun die Substanz des Papiers ohne sichtbare Unterbrechung über das untergelegte Grau hin, so glaubt man ein Object durch das grünliche Papier hindurchschimmern zu sehen, und ein solches Object muß wiederum rosenroth sein, um weisses Licht zu geben. Ist aber die weisse Stelle als selbständiges Object abgegrenzt, fehlt die Continuität mit dem grünlichen Theil der Fläche, so betrachtet man sie als ein weisses Object, welches auf dieser Fläche liegt. Ich habe schon oben im § 20 erwähnt, daß eine solche Trennung zweier Farben, die in demselben Theile des Gesichtsfeldes vorhanden sind, durch das Urtheil vorkomme. Wir lernten diesen Umstand dort als ein Hinderniß für das ungestörte Zustandekommen der Empfindung einer Mischfarbe kennen. Eine solche Trennung tritt sehr häufig ein, sobald die beiden Farben ungleichmäfsig verbreitet sind. Man glaubt dann, wie VOLKMANN¹, der diese Erscheinungen zuerst erwähnt hat, es beschreibt, die eine Farbe durch die andere hin zu sehen. Die Fähigkeit, eine solche Trennung auszuführen, scheint mir auf folgendem Umstande zu beruhen. Ihre wichtigste Bedeutung haben die Farben für uns, insofern sie Eigenschaften der Körper sind, und als Erkennungszeichen der Körper benutzt werden können, Wir gehen deshalb bei unseren Beobachtungen mit dem Gesichtssinne stets darauf aus, uns ein Urtheil über die Körperfarben zu bilden, und dabei die Verschiedenheiten der Beleuchtung, unter der sich ein Körper uns darbietet,

¹ VOLKMANN, *Müllers Archiv für Anat. und Physiol.* 1838. S. 373.

zu eliminiren. Ich habe in § 20 schon erwähnt, dafs wir in diesem Sinne deutlich unterscheiden zwischen einem weifsen Blatte in schwacher Beleuchtung und einem grauen Blatte in starker Beleuchtung, daher wir eine gewisse Schwierigkeit finden, uns davon zu überzeugen, dafs hell beleuchtetes Grau gleich sei schwach beleuchtetem Weifs. Wir müssen künstlich das starke Licht genau auf das graue Feld beschränken, so dafs wir aus dem Sinneneindruck nicht entnehmen können, das Grau sei stärker beleuchtet als der Rest des Gesichtsfeldes. Erst dann erkennen wir seine Identität mit Weifs. So wie wir nun gewöhnt und geübt sind, uns ein Urtheil über Körperfarben zu bilden mit Elimination der verschiedenen Helligkeit der Beleuchtung, unter der wir sie sehen, so eliminiren wir auch die Farbe der Beleuchtung. Wir haben hinreichende Gelegenheit dieselben Körperfarben zu untersuchen bei vollem Sonnenschein, bei dem blauen Licht des klaren Himmels, bei dem schwachen weifsen Licht des bedeckten Himmels, bei dem rothgelben Licht der sinkenden Sonne, und bei dem rothgelben Licht der Kerzen. Dazu kommen noch die farbigen Reflexe der umgebenden Körper. In einem Laubwalde ist die Beleuchtung überwiegend grün, in Zimmern mit farbigen Wänden den Wänden gleichfarbig. Dieser letzteren Änderungen der Beleuchtung werden wir uns nicht einmal deutlich bewußt, und doch kann man sie mittels der farbigen Schatten oft genug nachweisen. Indem wir die gleichen farbigen Gegenstände unter diesen verschiedenen Beleuchtungen sehen, lernen wir uns trotz der Verschiedenheit der Beleuchtung eine richtige Vorstellung von den Körperfarben zu bilden, d. h. zu beurtheilen, wie ein solcher Körper in weifser Beleuchtung aussehen würde, und weil uns nur die constant bleibende Körperfarbe interessirt, werden wir uns der einzelnen Empfindungen, auf denen unser Urtheil beruht, gar nicht bewußt.

So sind wir denn auch nicht in Verlegenheit, wenn wir einen Körper durch eine farbige Decke hindurch sehen, zu scheiden, was der Farbe der Decke und was dem Körper angehört. Dafs wir in den beschriebenen Versuchen dasselbe thun, auch da, wo die Decke über dem Körper gar nicht farbig ist, verursacht, oder befördert wenigstens die Täuschung, in die wir verfallen, und vermöge deren wir dem Körper eine falsche Farbe, die Complementärfarbe des farbigen Theils der Decke zuschreiben.

Während wir aber geübt sind in einer einfarbigen Beleuchtung die Körperfarben richtig zu erkennen, reicht unsere Übung doch nicht zu, dasselbe zu thun, wenn zwei verschiedenfarbige Beleuchtungen von zwei verschiedenen Seiten und von eng begrenzten und scharfe Schatten werfenden Lichtquellen kommen. Denn in den meisten der oben aufgezählten Fälle farbiger Beleuchtung sind die farbigen Flächen sehr breit, und das farbige Licht ist deshalb ziemlich gleichmäfsig über alle Seiten der betrachteten Objecte verbreitet. Wir gewöhnen uns deshalb, von allen farbigen Flächen 409 ohne Unterschied, so weit sie im Bereich der farbigen Beleuchtung sind, die Farbe der Beleuchtung abzuziehen, um die Körperfarbe zu finden. Das-

selbe thun wir nun bei den farbigen Schatten, wo zwei farbige Beleuchtungen sich verbinden. Kommen Kerzenlicht und Tageslicht zusammen, so ist die Beleuchtung des Grundes weislich rothgelb. Dieses Rothgelb der Beleuchtung subtrahiren wir nun auch von der Farbe des Schattens, zu dem gar kein Kerzenlicht gelangt, und halten diesen für blau, während er weifs ist. Wie in der That sich die Anschauung bildet, dafs die farbige Beleuchtung sich bei solchen farbigen Schatten und in der durchscheinenden Papierdecke auch über den objectiv weissen Fleck hinziehe, zeigt sich namentlich, wenn kleine Unregelmäfsigkeiten des Papiers die Beleuchtung fleckig machen; dann glaubt der Beobachter diese Fleckchen in der farbigen Beleuchtung zu sehen, die hier gar nicht existirt.

Weitere Beispiele, die sehr geeignet sind, unsere Fähigkeit zu zeigen, zwei Farben hinter einander gelegener Objecte von einander zu trennen, lasse ich hier noch folgen. Das erste schliesst sich an VOLKMANN'S schon erwähnte Versuche an, der zwei farbige schmale Papierstreifen vor das Auge hielt, einen ganz nahe, den anderen in der Entfernung des deutlichen Sehens, und dabei bemerkte, dafs er, statt die Mischfarbe zu sehen, die eine Farbe durch die andere hin sah. Man bringe einen grünen Schleier dicht vor die Augen, und lasse ihn hinreichend stark beleuchten, dafs sich das ganze Gesichtsfeld mit einem grünen Scheine füllt, während das Muster und die Falten des Schleiers nur in einem sehr verwaschenen Zerstreuungsbilde erscheinen. Man wird ohne Schwierigkeit die Farben der dadurch gesehenen Gegenstände richtig erkennen, obgleich auf der Netzhaut sich zu allen Farben noch das grüne Licht des Schleiers mischt. Ja noch auffallender wird es, wenn nach einiger Zeit Ermüdung des Auges für das grüne Licht eintritt, dann färben sich nämlich die durch den Schleier gesehenen Gegenstände sogar rosenroth, trotz der Zumischung des grünen Lichts zu ihrem Netzhautbilde. Am besten zeigt sich dies, wenn wir nur mit dem rechten Auge durch den grünen Schleier sehen und das linke schliesen. Nach kurzer Zeit sieht ein weisses Papier, durch den Schleier gesehen, nicht nur weifs, sondern sogar röthlich weifs aus. Wenn wir nun das rechte Auge schliesen, das linke unbedeckte öffnen, so erscheint das Papier im Gegensatz dazu jetzt diesem Auge grün. Abwechselnd das rechte und linke Auge öffnend, sehen wir dann mit jenem, wo das Netzhautbild des Papiers grünlich-weifs ist, das Papier röthlich, mit diesem, wo das Netzhautbild weifs ist, umgekehrt das Papier grünlich.

Derselbe Erfolg tritt bei dem von SMITH¹ in Fochabers angegebenen und von BRÜCKE² veränderten und theoretisch erklärten Versuche ein. Wenn man nahe neben dem rechten Auge eine hell brennende Flamme anbringt, oder die Sonne von rechts her das Auge bescheinen läfst, aber so, dafs kein Licht direct in die Pupille eindringt, während das linke Auge beschattet 410 wird, so erscheinen dem rechten Auge weisse Gegenstände grünlich, dem

¹ SMITH, *Edinb. Journ. of Science*. V. 52. — *Pogg. Ann.* XXVII. 494. 1832.

² BRÜCKE, *Denkschrift der k. k. Akad. zu Wien*. III. Bd. *Pogg. Ann.* LXXXIV. 418. 1851.

linken röthlich gefärbt. Man sieht dies deutlich, wenn man hinter einander bald das rechte, bald das linke Auge öffnet, oder wenn man vor beide Augen ein weißes Blatt Papier bringt und ein in der Mitte zwischen Augen und Papier gehaltenes schwarzes verticales Stäbchen fixirt, welches man dann in zwei Bildern, eines dem rechten, das andere dem linken Auge angehörig, auf das Papier projectirt sieht. Auch dann ist das links erscheinende Bild, wo das linke Auge die Papierfläche sieht, aber nicht das rechte, roth, das andere grün. Fixirt man dagegen eine schwarze Tafel und hält in einiger Entfernung davor ein weißes Object, welches im Doppelbilde erscheint, so ist das rechte Bild roth, welches jetzt das vom linken Auge gesehene ist, das linke grün. Dem seitlich beleuchteten Auge also erscheint Weiß grünlicher als dem nicht beleuchteten Auge. Nun dringt unter diesen Umständen Licht durch die Sclera und die Augenlider in das beleuchtete Auge, und dieses Licht ist roth, wie wir aus früheren Versuchen¹ schon wissen. Läßt man Sonnenlicht seitlich auf das Auge scheinen, so erkennt man auch die rothe Farbe auf dunklen Objecten. Betrachtet man z. B. eine Druckschrift, so erscheinen die schwarzen Buchstaben schön roth, das weiße Papier grün. Dies rothe seitlich eingedrungene Licht zerstreut sich über den größten Theil des Augengrundes, und die Netzhautstellen des beleuchteten Auges, welche das Bild eines weißen Objects aufnehmen, werden also gleichzeitig von weißem und rothem Lichte beleuchtet, empfinden aber grünlich weiß. Die grünliche Färbung wird bei längerer Fortsetzung des Versuchs immer deutlicher, weil sie von der Ermüdung des Auges für Roth abhängt. Aber sie kann bei der überwiegend rothen Beleuchtung der Netzhaut nur dadurch zu Stande kommen, daß die schon vorher bestehende und ausgebreitete Erleuchtung des Grundes getrennt wird von dem hinzukommenden Lichte der Objecte, und das letztere grünlich erscheint, weil das Auge für roth ermüdet ist. Im Gegensatz hierzu erscheint nun im unveränderten Auge das reine Weiß röthlich.

Man betrachte ferner die Spiegelbilder der Tapeten und der Decke eines Zimmers in der gut polirten Oberfläche einer Mahagony-Tischplatte. Accommodirt man das Auge für die gespiegelten Gegenstände, so erscheinen diese entweder in natürlicher Farbe, oder auch oft etwas bläulich, complementär zur Farbe der Platte. Accommodirt man das Auge dagegen für die Platte, so sieht man, daß die Summe des Lichtes, was von ihr herkommt, ganz überwiegend rothgelb ist. Die complementäre Färbung der Spiegelbilder tritt hier, wie ich finde, namentlich dann ein, wenn das gespiegelte Licht der Objecte verhältnißmäßig schwach gegen die Beleuchtung der Platte ist. Wenn dagegen bei sehr schrägem Einfall die Stärke des gespiegelten Lichts sehr zunimmt, die Holzmaserung dagegen verschwindet, so erscheinen die Spiegelbilder oft im Gegentheil röthlich, indem man dann die Trennung zu vollziehen keine Veranlassung mehr hat. Bei diesen zuletzt n

¹ S. oben S. 192.

beschriebenen Erscheinungen ist das hinzukommende Licht besonders gleichmäÙig der Zeit und der Fläche nach über das ganze Bild, über seine hellen und dunklen Stellen ausgegossen, von den Bewegungen des Auges unabhängig, während die körperlichen Objecte mit ihren gewöhnlichen Farbenunterschieden erscheinen. Dies scheint die Deutung desselben als eines unabhängigen Theils der Farbeneindrücke zu begünstigen. Dasselbe ist auch bei den Papierdecken der Fall.

414 Von den früheren Beobachtern ist in den theoretischen Erklärungen der Contrasterscheinungen immer vorausgesetzt worden, daß die Reactionsweise der Nerven, die Empfindung, in den inducirten Theilen der Netzhaut verändert sei, daß die Contrasterscheinungen also in gewissem Sinne in das Gebiet der Mitempfindungen gehörten, zu welchen viele Forscher auch die Irradiation rechneten. In gewissem Sinne hatte man allerdings Recht von veränderter Empfindung zu sprechen, insofern man bei den Beobachtungen den successiven Contrast nicht genau von dem simultanen getrennt hatte, und also allerdings eine Änderung der Empfindung durch Nachbilder eintreten konnte. Ich habe hier, so viel ich weiß, die Trennung des successiven und simultanen Contrastes zuerst methodisch für alle Fälle durchzuführen gesucht und gefunden, daß in den Fällen, wo die inducirende Farbe nicht durch ihre Ausdehnung und Lichtstärke alle anderen überwiegt, das Auftreten der Contrastfarbe von Umständen abhängt, die nur durch die psychischen Thätigkeiten, 415 durch welche es zu Gesichtswahrnehmungen kommt, festgestellt werden. Wenn dem inducirten Felde körperliche Selbständigkeit zugeschrieben wird, kommt es unter der genannten Bedingung meist nicht zur Wahrnehmung der Contrastfarbe. Die Art der hierbei vorkommenden Täuschung des Urtheils habe ich schon oben bezeichnet. Es handelt sich immer um Fälle, wo eine gewisse Breite des Zweifels über die Art der inducirten Farbe besteht, weil ein genauer Vergleich derselben mit Weiß nicht ausführbar ist, und wo deshalb unser Wahrnehmungsvermögen durch Nebenumstände veranlaßt wird, die betreffende Farbe bald an die eine, bald an die andere Grenze des Intervalls zu verlegen, innerhalb dessen die Unsicherheit besteht. Denjenigen meiner Leser, welche den Einfluß der psychischen Thätigkeiten auf unsere Sinneswahrnehmungen noch wenig kennen, wird es vielleicht ungläublich vorkommen, daß durch psychische Thätigkeit eine Farbe im Gesichtsfelde erscheinen soll, wo keine ist; ich muß diese bitten, ihr Urtheil zu suspendiren, bis sie die Thatsachen des dritten Abschnittes dieses Werkes, der die Sinneswahrnehmungen behandeln wird, kennen gelernt haben, wo sie viele Beispiele ähnlicher Art finden werden. Es leitet uns der vorliegende Paragraph zur Lehre von den Gesichtswahrnehmungen schon hinüber. Ich habe ihn in der Lehre von den Empfindungen noch stehen lassen, weil der Contrast bisher immer dort seine Stelle fand, und die gewöhnlichsten Erscheinungen, die zu ihm gehören, gemischter Natur sind.

Da die meisten Contrasterscheinungen von der Breite der Unsicherheit in der Beurtheilung der Intensität und Qualität unserer Gesichtsempfindungen abhängig sind, so muß nothwendig Übung in der Beurtheilung der Farben einen beträchtlichen Einfluß auf das Eintreten des Contrastes haben. So wie ein in der Beurtheilung räumlicher GröÙen geübtes Auge sich vor manchen Täuschungen hüten wird, in die ein ungeübtes verfällt, wird es auch bei den Farbenbestimmungen geschehen, und ich glaube deshalb, daß geübte Augen den Contrast im Allgemeinen

weniger lebhaft sehen werden, als ungeübte. Meine Versuche wurden mir von Personen, die in optischen Beobachtungen erfahren waren, leicht bestätigt. Dagegen sind in manchen Büchern die Contrasterscheinungen so beschrieben, daß ich annehmen muß, sie seien manchen Beobachtern viel leichter sichtbar und viel häufiger als mir.

Während nun die Contrasterscheinungen bei begrenztem inducirendem Felde durch die Abhängigkeit der Färbung von anderen nur durch Beurtheilung festgestellten Umständen keinen Zweifel über ihre Deutung lassen, sind die Contraste bei unbegrenztem inducirendem Felde viel constanter, und würden deshalb eher die Deutung zulassen, daß sie durch Veränderungen der Empfindung selbst hervorgerufen seien. Indessen sind offenbar bei diesen letzteren die Bedingungen noch viel ungünstiger als bei den ersten, um die empfundene Farbe des inducirten Feldes sicher bestimmen zu können, weil eben die Vergleichung der Farbe dieses Feldes mit anderem Weiß ganz fehlt, oder wenigstens viel beschränkter ist. Außerdem zeigen die Contraste auf unbegrenztem inducirendem Felde, wenn sie auch constanter auftreten, doch in ihren Intensitätsverhältnissen eine vollständige Analogie mit denen des begrenzten Feldes. Es wird in allen diesen Fällen die Contrastfarbe in voller Intensität schon durch eine sehr kleine Intensität der inducirenden Farbe hervorgerufen, und durch Steigerung der letzteren nicht oder wenig verstärkt. Dagegen kann sie eine deutliche Verstärkung erleiden, sobald wirklich die Empfindung durch Nachbilder verändert wird. Sie wird endlich durch das Urtheil in voller Intensität festgehalten, sobald man alle anderen Farben aus dem Gesichtsfelde entfernt. Ich zweifle deshalb nicht, daß auch bei großem inducirendem Felde die Deutung der Erscheinungen die nämliche sein müsse, wie bei kleinem, daß auch hier die Contrastfarbe nur durch eine falsche Schätzung gesetzt sei, wenn ich auch in diesen 416 Fällen noch keinen so genügenden Beweis für diese Deutung liefern kann.

Die Contrasterscheinungen sind dem LEONARDO DA VINCI großentheils schon bekannt gewesen. Er sagt, daß unter allen Farben von gleicher Vollkommenheit jene die schönsten sind, welche neben den entgegengesetzten stehen, also Weiß neben Schwarz, Blau neben Gelb, Roth neben Grün.¹ Später waren es namentlich die farbigen Schatten, welche von allen anderen Contrasterscheinungen die Aufmerksamkeit in Anspruch nahmen. OTTO V. GUERICKE² kannte sie, und suchte sie zu benutzen, um den Aristotelischen Satz, daß Weiß und Schwarz gemischt Blau geben könnten, zu beweisen. Aber erst BUFFON³ lenkte die allgemeinere Aufmerksamkeit auf sie; er beobachtete sie indessen nur immer zufällig bei Sonnenaufgang oder Untergang, wo sie bald blau, bald grün waren. Abbé MAZEAS⁴ erzeugte sie durch das Licht des Mondes und einer Kerze. Auch er glaubte die Farben aus einer Verminderung des Lichtes erklären zu können. Dagegen suchten MELVILLE⁵ und BOUGUER⁶ die Erscheinungen aus NEWTON'S Farben Theorie zu erklären. Man hielt die Farben für objectiv, weil in der That die blauen Schatten, wenn sie von dem Lichte des blauen Himmels erleuchtet werden, objectiv blau gefärbt sind. Daß wirklich das blaue Licht des Himmels in vielen Fällen Grund der blauen Schatten ist, zeigte namentlich BEGUELIN.⁷ RUMFORD⁸ scheint zuerst die subjective Natur der Farbe

¹ LEONARDO DA VINCI, *Trattato della pittura*. 1651. Cap. CC. — Farbige Schatten in Cap. CLVI. und CCCXXVIII.

² GUERICKE, *Exper. Magdeb.* p. 142. 1672.

³ BUFFON, *Mém. de l'Acad. de Paris*. 1743. p. 217.

⁴ MAZEAS, *Abh. der Akad. zu Berlin*. 1752.

⁵ MELVILLE, *Edinb. Essays*. Vol. II. p. 75. 1760.

⁶ BOUGUER, *Traité d'Optique*. p. 368. 1760.

⁷ BEGUELIN, *Mém. de l'Acad. de Berlin*. 1767. p. 27.

⁸ RUMFORD, *Philos. Transact.* LXXXIV. 107; *Gren's neues Journal der Physik*. II. 58.

des einen Schattens entdeckt zu haben, indem er ihn durch ein enges Rohr betrachtete; derselben Ansicht schlossen sich GOETHE,¹ GROTHUSS,² BRANDES,³ TOURTUAL⁴ an. Dagegen stritten noch längere Zeit andere Beobachter für die objective Natur beider Schattenfarben, so v. PAULA SCHRANK,⁵ der die Farbe des blauen Schattens der Diffraction zuschrieb, ZSCHOKKE,⁶ OSANN⁷ und POHLMANN,⁸ welcher sich BEGUELIN'S Ansicht wieder anschloß. Dagegen führte namentlich FECHNER⁹ den Beweis von der subjectiven Natur dieser Erscheinungen, er wies unter anderem auch nach, wie durch eine Thätigkeit des Urtheils die einmal hervorgetretene Contrastfarbe festgehalten werden könne, und bereicherte die Zahl der Beobachtungen, doch wagte er noch keine Theorie dieser Erscheinungen aufzustellen. PLATEAU¹⁰ zog die Contrasterscheinungen mit in seine Theorie der Nachbilder hinein; wie die Netzhaut der Zeit nach in entgegengesetzte Gegenstände überginge, sollte sie es auch der Fläche nach thun, so daß zunächst um die erregte Stelle die gleiche Phase stattfindet, welche sich in den Irradiationserscheinungen kund gebe, und in weiterer Entfernung die entgegengesetzte, welche den Contrast hervorruft.

Die Ansicht, daß die Contrasterscheinungen sich durch Nachbilder erklärten, wurde schon von JURIN¹¹ vorgetragen, später von BRANDES. Sie war für einen Theil der Erscheinungen richtig, aber nicht für alle, und FECHNER namentlich zeigte, daß auch ohne vorhergehende Ermüdung der betreffenden Netzhautstelle Contrastfarben entstehen könnten.

§ 25. Verschiedene subjective Erscheinungen.

418

Es bleiben noch einige subjective Gesichterscheinungen zu beschreiben übrig, deren Erklärung für jetzt unmöglich oder wenigstens ziemlich zweifelhaft ist, und welche deshalb in die vorausgegangenen Paragraphen nicht eingereiht werden konnten.

1. Erscheinungen des gelben Flecks. Der gelbe Fleck bildet eine in vielen Beziehungen ausgezeichnete Stelle der Netzhaut. Die Eigentümlichkeiten seiner anatomischen Structur sind auf S. 34—36 beschrieben. Ferner zeichnet er sich physiologisch aus durch die Schärfe in der Wahrnehmung kleiner Bilder, worin sein Centrum, die Netzhautgrube, alle anderen Stellen der Netzhaut bei weitem übertrifft. Dadurch erhält er auch seine Bedeutung als Fixationspunkt. Wie er im entoptischen Bilde sichtbar gemacht werden kann, ist schon im § 15 (S. 192—196) auseinandergesetzt; er zeichnet sich bei dieser Beobachtungsweise dadurch aus, daß die Gefäße in seinem Centrum fehlen, und außerdem durch den Schatten, den die seitlichen Abhänge der Netzhautgrube bei schiefer Beleuchtung werfen. Betreffs der Empfindungen dieser Netzhautstelle haben wir schon erwähnt, daß sie bei der elektrischen Durchströmung des Auges je nach der Strömungsrichtung bald dunkel auf hellem Grunde, bald hell auf dunklem Grunde sich

¹ GOETHE, *Farbentheorie*. S. 27.

² GROTHUSS, *Schweigger's Beiträge zur Chemie und Physik*. III. 14. 1811.

³ BRANDES, *Gehler's neues Wörterbuch*. Art. Farbe. 1827.

⁴ TOURTUAL, *Die Erscheinungen des Schattens*. Berlin 1830.

⁵ v. PAULA SCHRANK, *Münchener Denkschr.* 1811 und 12. S. 293, und 1813. S. 5.

⁶ ZSCHOKKE, *Unterhaltungsblätter für Natur- und Menschenkunde* 1826. S. 49.

⁷ OSANN, *Pogg. Ann.* XXVII. 694. 1832; XXXVII. 287. 1836; XLII. 72.

⁸ POHLMANN, *Ebenda*. XXXVII. 1836. 319—341.

⁹ FECHNER, *Ebenda*. XLIV. 221. 1838. L. 483. 1840.

¹⁰ PLATEAU, *Ann. de chim. et de phys.* LVIII. 339. 1834. *Pogg. Ann.* XXXII. 543; XXXVIII. 626. 1836.

¹¹ JURIN, *Essay on distinct and indistinct vision*. p. 170. 1738.

abzeichnet, ferner dafs sie bei mäfsig schnell intermittirendem Lichte sich durch eine eigenthümliche sternförmige Zeichnung in den schillernden Figurenmustern der Netzhaut hervorhebt.

Es ist jetzt noch zu erwähnen, dafs sie auch bei gleichmäfsig ausgebreiteter, namentlich blauer Beleuchtung sich eigenthümlich abzeichnet. Es erscheinen hierbei verschiedene Theile des gelben Flecks, nicht immer alle gleichzeitig, unter verschiedenen Bedingungen verschieden deutlich. Das Centrum des gelben Flecks ist die Netzhautgrube, in deren Grunde die Netzhaut sehr dünn, durchsichtig und ungefärbt ist. Ihr Durchmesser ist nach KOELLIKER 0,180 bis 0,225 mm. Ihr Abstand vom hinteren Knotenpunkte des Auges ist 15 mm, also im Mittel 75 mal so grofs als ihr Durchmesser. Ihre scheinbare Gröfse im Gesichtsfelde ist also ein Kreis, dessen Durchmesser 40 bis 50 Minuten beträgt. Sie erscheint, wenn sie sichtbar wird, gewöhnlich als ein gut begrenzter regelmäfsiger Kreis. Die Netzhautgrube umgebend erscheint oft ein dunkler Hof, dessen Gröfse ungefähr der gefäfs- 419 losen Stelle des gelben Flecks entspricht, wie sie erscheint, wenn man die Gefäfsse entoptisch sichtbar macht. Die äufsere Begrenzung dieses Hofes, den wir den gefäfslosen nennen wollen, ist verwaschen, sein Durchmesser ungefähr dreimal gröfser als der der Netzhautgrube, beträgt also etwas über 2 Winkelgrade. Bald erscheint seine Grenze ziemlich kreisförmig, namentlich bei schwachem Lichte, bald einem Rhombus ähnlicher, dessen längere Diagonale horizontal liegt. In letzterer Weise erscheint sie mir selbst namentlich bei stärkerem Licht. Es entspricht diese Stelle anatomisch dem mittleren intensiv gelb gefärbten Theile des gelben Flecks, dessen horizontaler Durchmesser von H. MÜLLER in zwei Augen gleich 0,88 und 1,5 mm, der verticale gleich 0,53 und 0,8 gefunden wurde. Übrigens breitet sich die gelbe Färbung noch viel weiter aus, ist aber schwach und verwaschen.

Endlich sieht man bei stärkerem Licht den dunklen gefäfslosen Hof noch umgeben von einem hellen Hofe, dessen äufsere Begrenzung sehr unbestimmt bezeichnet ist, und die mir selbst ebenfalls mehr rhombisch, als kreisförmig erscheint. Ihre beiden Durchmesser sind etwa dreimal so grofs, als die des dunklen gefäfslosen Hofes. Ein anatomisch wohlbegrenztes Substrat dieser Stelle läfst sich nicht bezeichnen. Die gelbliche verwaschene Färbung der äufseren Theile des gelben Flecks fällt mit diesem hellen Hofe einigermafsen zusammen. Doch läfst sich über die Congruenz ihrer Gröfse nichts sagen, da die Ausdehnung der schwachen gelben Färbung zu breite individuelle Abweichungen zuläfst. Vielleicht verdankt dieser äufserste helle Hof seinen Ursprung auch nur einer Contrastwirkung, wir können ihn nach seinem Entdecker, dem er kreisförmig erschien, den LOEWESCHEN Ring nennen.

LOEWE¹ entdeckte diesen Ring, indem er durch eine klare seladongrüne Auflösung von Chromchlorid nach einer hellen Fläche sah. Der Ring erschien

¹ Haidinger in *Pogg. Ann.* LXX. 403. LXXXVIII. 451. *Wiener Sitzungsber.* IX. 240.

im Vergleich zu dem grünlichen Grunde violett, den mittleren dunkleren Hof umgebend, so daß ihn HAIDINGER mit einem Abbilde der Iris vergleicht, die die dunkle Pupille umgiebt. HAIDINGER zeigte, daß dichromatische Mittel zur Herstellung der Ringe nicht nöthig seien, daß sie im homogenen Blau des prismatischen Spectrum erscheinen, und auch in gemischtem Licht, welches genügend Blau enthält. In letzterem zeigen sie verschiedene Farbenunterschiede von dem übrigen Grunde, je nach der Beschaffenheit der dem Blau zugemischten Farben. Verschiedenen Augen scheint dieser Ring mit verschiedener Deutlichkeit zu erscheinen, so daß viele ihn überhaupt nicht sehen können. Ich selbst sehe ihn nur bei einer gewissen mittleren Helligkeit, derjenigen etwa, die mir zum Schreiben und Lesen bequem ist. Wenn ich vor die Augen ein blaues Glas halte, sie durch Verschluss der Lider eine Weile ausruhe und dann durch das Glas nach einer weißen Papierfläche sehe, erblicke ich deutlich den gefäßlosen Hof als einen rhombischen schattigen Fleck, umgeben von einem rhombischen, heller blauen Streifen, den LOEWESCHEN Ring. Bei etwas größerer und etwas kleinerer Helligkeit
420 erscheint mir der LOEWESCHEN Ring schmaler, bei noch größeren Abweichungen der Helligkeit sehe ich nur den dunklen gefäßlosen Hof ohne helle Umäumung.

Der dunkle gefäßlose Hof ist der constanteste Theil der Erscheinung. Sein Verhalten ist zuerst von MAXWELL¹ genauer untersucht worden. Wenn man homogenes Licht anwendet, erscheint er nach ihm nur im Blau, nicht in anderen Farben. Übrigens erscheint er auch in gemischten Farben, wenn sie Blau reichlich enthalten, namentlich auch, freilich schwach, im Weiß. Wenn man das ausgeruhte Auge nach einer blauen Fläche hinwendet, erscheint er und schwindet bald wieder, bei heller Beleuchtung schneller, als bei schwacher. MAXWELL empfiehlt, abwechselnd vor das Auge blaue und gelbe Gläser oder blaue und gelbe Papiere zu bringen. Im Blau erscheint der Fleck, im Gelb verschwindet er. Ich selbst sehe ihn am schönsten am Abendhimmel, wenn die ersten Sterne zu erscheinen anfangen, und man sich schon längere Zeit im Freien befindet, so daß die Augen hinreichend ausgeruht sind. Wenn man sie einige Augenblicke schließt und dann nach dem Himmel hin öffnet, sieht man den gefäßlosen Hof einige Zeit lang sehr deutlich, die Netzhautgrube in seinem Innern auch häufig, und zwar als einen etwas helleren Fleck von reinerem Blau, ziemlich scharf begrenzt. Dabei ist es eigenthümlich, daß, wie schon MAXWELL bemerkt hat, der Lichteindruck in den centralen Stellen der Netzhaut einen Moment später zur Empfindung kommt, als in den peripherischen Theilen. MAXWELL liefs zu dem Ende eine Reihe dunkler Streifen vor einem blauen Felde mit gewisser Geschwindigkeit vorbeigehen. Man sieht es aber auch beim einfachen Aufschlagen der Augen. Das Dunkel der geschlossenen Augen

¹ Athenäum. 1856. p. 1093. Edinb. Journ. (2) IV. 337. Inst. 1856. p. 424. Rep. of British Association. 1856. II. 12.

schwindet deutlich von der Peripherie des Gesichtsfeldes nach dem Centrum hin, und der letzte Rest desselben bleibt als der MAXWELLSche Fleck bestehen. Bei gewissen Helligkeitsgraden, namentlich dem oben bezeichneten des Himmels, wenn die ersten Sterne sichtbar werden, ist die Erscheinung beim Aufschlagen der Augen noch complicirter. Während nämlich in der beschriebenen Weise das Dunkel von der Peripherie nach dem Centrum schwindet, sieht man auch noch entweder die Netzhautgrube allein, oder den ganzen MAXWELLSchen Fleck hell aufblitzen. Vielleicht geht das helle Aufblitzen der dunklen Erscheinung etwas voraus, aber die Zeit ist so kurz, daß beides scheinbar gleichzeitig eintritt, wie auch AUBERT an Nachbildern bei der Beleuchtung durch den elektrischen Funken ähnliches bemerkt hat.

Zuweilen, wenn die Netzhautgrube recht deutlich erscheint, sehe ich in dem gefäßlosen Hofe noch schwache Linienzeichnungen, ähnlich den Umrissen einer vielblättrigen Blume (z. B. einer Georgine, Dahlia). Es sind dies wohl Andeutungen derselben Zeichnung, welche deutlicher bei intermittirendem Lichte zum Vorschein kommt.

Eine ähnliche, aber regelmässiger und bestimmtere Art von Zeichnungⁿ die aber einen viel größeren Theil des Gesichtsfeldes einnahm, beschreibt Hr. A. KOENIG.¹ Er hat sie mehrfach beim Aufwachen in einem halbdunklen Zimmer gesehen vor dem ersten Öffnen der Lider. Er sah dann das Gesichtsfeld mit regelmässigen Sechsecken ausgefüllt, die durch breite schwarze Linien von einander abgegrenzt waren. Der Grund der Zeichnung erschien graublau und die von rechts oben nach links unten gerichteten Linien hatten einen ziemlich breiten gelben Saum. Jedes Sechseck enthielt ein meist etwas oberhalb seines Centrum stehendes schwarzes Pünktchen. In etwa 30° Abstand von dem Fixationspunkt wurde die Zeichnung undeutlich. Der scheinbare Durchmesser jedes Sechsecks wurde auf etwa 1° geschätzt. Die Zellen des Pigmentepithels der Netzhaut würden etwa nur unter 5' Durchmesser erscheinen können. Ein Stück des mittleren, deutlichsten Theiles dieser Erscheinung ist in *Fig. 3* auf *Taf. II* abgebildet.

Endlich muß ich noch bemerken, daß ich den MAXWELLSchen Fleck oft⁴²⁰ zufällig des Morgens nach dem Aufstehen, wenn ich das Auge zuerst auf ein helles Fenster mit breiter lichter Fläche geheftet hatte, und es dann nach einem dunklen Orte wendete, hell auf dunklem Grunde gesehen habe. Absichtlich⁴²¹ die Erscheinung hervorzurufen, ist mir bis jetzt nicht gelungen. Es erscheint hierbei ein blendend heller Kreis von der Größe des gefäßlosen Hofes, nach den Rändern hin abschattirt und mit Andeutungen der strahligen Zeichnung. Diese letztere Erscheinung läßt schliesen, daß, wenn das Auge recht erholt und reizbar ist, der Lichteindruck im gelben Fleck länger anhält, als in den übrigen Theilen der Netzhaut, während andererseits der Lichteindruck an derselben Stelle auch später zu beginnen scheint, wie die beschriebenen Erscheinungen beim Öffnen des Auges zeigen. Daß der stark gefärbte

¹ ARTHUR KOENIG, Eine bisher noch nicht bekannte subjective Gesichtserscheinung. *Graefes Archiv*, Bd. 30 (3), S. 329.

Theil des gelben Flecks auf einem blauen Felde dunkel erscheint, scheint der Absorption des blauen Lichts durch das gelbe Pigment zugeschrieben werden zu dürfen. Gelb gefärbt sind hier gerade die Theile, welche vor den eigentlich lichtempfindlichen Theilen, den Zapfen, liegen. Dafs der Fleck übrigens subjectiv nur schwach gezeichnet und schnell vorübergehend erscheint, erklärt sich in derselben Weise, wie das flüchtige Erscheinen der Gefäfsfigur. Das zuweilen vorkommende helle Aufblitzen des gelben Flecks dagegen beim Öffnen des Auges läfst sich noch nicht erklären.

Wie bisher beschrieben, verhalten sich die Erscheinungen im nicht polarisirten Lichte. Wenn man dagegen das Auge auf ein Feld richtet, von wo polarisirtes Licht kommt, so erscheinen Haidingers Polarisationsbüschel im Fixationspunkte. Man sieht diese z. B., wenn man durch ein Nicolsches Prisma nach einem gut beleuchteten weifsen Papierblatte oder nach einer hellen Wolkenfläche blickt. Die Büschel sind auf *Taf. II, Fig. 4* abgebildet, wie sie liegen, wenn die Polarisationsebene des Lichtes vertical ist. Die helleren durch zwei zusammengehörige Hyperbeln begrenzten Flecke erscheinen auf weifsem Felde bläulich, der dunkle Büschel, der sie trennt und, im Centrum an schmalsten, nach seinen Enden hin breiter ist, ist dagegen gelblich gefärbt. Wenn man das Nicolsche Prisma dreht, dreht sich die Polarisationsfigur um den gleichen Winkel. Nach einer Bemerkung von Brewster, die ich für mein Auge bestätigen kann, ist der dunkle Büschel in seiner Mitte viel schmaler, wenn er horizontal (d. h. der Verbindungslinie beider Augen parallel) gerichtet ist, als wenn er senkrecht steht, wie in der Abbildung. Die Fläche, welche von der Polarisationsfigur bedeckt wird, erscheint Maxwells und meinem Auge an Gröfse dem gefäfslosen Hofe des gelben Flecks gleich. Der Rand der Netzhautgrube geht ungefähr durch die hellsten Stellen der blauen Flächen hindurch. Brewster giebt den Durchmesser der Polarisationsbüschel etwas gröfser an, nämlich 4° , und Silbermann 5° , was vielleicht damit zusammenhängt, dafs sie in verschiedenen Augen sehr verschiedené Deutlichkeit zu haben scheinen, und deshalb die schwächsten Teile der Figur am äufsersten Rande von einigen wahrgenommen werden, von anderen nicht. Ich selbst habe unmittelbar nach Haidingers Entdeckung mit der gröfsten Mühe nichts von den Büscheln wahrnehmen können, und 12 Jahre später, als ich es wieder versuchte, sah ich sie beim ersten Blick durch ein Nicolsches Prisma. Auch ist in meinem linken Auge die Mitte des dunklen Büschels viel dunkler, als im rechten. Daran ist vielleicht die veränderliche Färbung des gelben Flecks Schuld. Wenn man sie übrigens sieht, so schwinden sie doch immer bald wieder, wie jede subjective Erscheinung, die an eine Structur der Netzhaut gebunden ist. Sie treten dann neu hervor, wenn man den Polarisator um 90° dreht.

Individuen, welche die Büschel recht deutlich wahrnehmen, sehen sie auch in solchem Lichte, welches nur theilweise polarisirt ist, auf glänzenden Flächen, am Himmel u. s. w., und sind dadurch im Stande, überall gleich die

Richtung der Polarisationsebene zu erkennen. Von den verschiedenen Farben homogenen Lichts zeigt aber, wie STOKES gefunden hat, nur das Blau die Polarisationsbüschel. In den weniger brechbaren Theilen des Spectrum kommen sie nicht zur Erscheinung. In einem blauen Felde erscheinen die bläulichen Hyperbelflächen hell, der gelbe Büschel dazwischen dagegen dunkel, so z. B., wenn man durch ein stark gefärbtes blaues Glas und den Polarisator nach einer weissen Fläche blickt. Ich selbst sehe die Büschel nicht blos nicht in homogenem Grün, Gelb, Roth, sondern auch nicht einmal in den gemischten, aber ziemlich gesättigten Abstufungen dieser Farbentöne, welche gefärbte Gläser geben. Es folgt daraus, daß auch im weissen Licht die Erscheinung von den Veränderungen des Blau herrührt. Am Orte der gelben Büschel fehlt das Blau, und diese erscheinen eben deshalb gelb und dunkler.

Wenn Licht durch Refraction, Reflexion oder Doppelbrechung polarisirt wird, werden stets sämmtliche Farben nahehin gleichmäfsig von der Polarisation betroffen. Nur bei der Absorption farbigen Lichts in doppeltbrechenden Körpern kann es vorkommen, daß das Licht gewisser Farben polarisirt wird, das Licht anderer Farben dagegen nicht. Das bekannteste Beispiel solcher Absorption ist der Turmalin, welcher so häufig als Mittel, Licht zu polarisiren, gebraucht wird. Es ist diese Eigenschaft übrigens unter den doppeltbrechenden gefärbten Körpern sehr verbreitet, man kann sie durch Färbung derselben künstlich erzeugen, und sie beruht darauf, daß bald wie im Turmalin der ordentliche, bald wie im Rutil und Zinnstein der außerordentliche Strahl stärker absorbirt wird. Nun sind aber die meisten organischen Fasern und Membranen schwach doppeltbrechend, und zwar verhalten sich beide meist wie einaxige Krystalle, deren Axe in den Fasern parallel ihrer Länge, in den Membranen senkrecht zu ihrer Fläche steht. Die Erscheinung der Polarisationsbüschel ist nun zu erklären, wenn man annimmt, daß die gelbgefärbten Elemente des gelben Flecks schwach doppeltbrechend sind, und daß der außerordentliche Strahl von blauer Farbe in ihnen stärker absorbirt werde, als der ordentliche Strahl.

Geht blaues Licht von beliebiger Polarisation durch eine Fasermasse von dieser Eigenschaft in Richtung der Fasern, so wird es stark absorbirt; geht es dagegen senkrecht gegen die Richtung der Fasern hindurch, so wird es stark absorbirt werden, wenn es parallel den Fasern polarisirt ist, schwach dagegen, wenn seine Polarisationsrichtung ebenfalls senkrecht zur Richtung der Fasern ist. Nun verlaufen im gelben Fleck die sogenannten radiären Fasern von H. MÜLLER, welche an anderen Stellen der Netzhaut senkrecht gegen deren Fläche stehen, schräg, indem ihr hinteres Ende sich der Netzhautgrube nähert.¹ In der Centralgrube fehlen die Körnerschichten und die Zwischenkörnerschicht entweder ganz, oder sind wenigstens sehr dünn, da-

¹ BERGMANN in *Henle und Pjeuffer Zeitsch. für rat. Med.* (2) V. 245; (3) II. 83. — MAX SCHULTZE, *Observationes de Retinae structura penitiori.* Bonn. 1859. p. 15.

gegen ist die innere Körnerschicht und die Zwischenkörnerschicht in der Umgebung der Netzhautgrube dicker als an anderen Stellen; ähnlich verhält sich die Schicht der Ganglienzellen, obgleich diese auch in der Centralgrube doch noch 3 Reihen Zellen hinter einander enthält, so daß es scheint, als ob die zu den Zapfen der Centralgrube gehörigen anderen Elemente in der Umgebung dieser Grube angehäuft seien und deshalb die Verbindungsfasern sowohl nervöser als bindegewebiger Natur schräg verlaufen müssen. An dem Rande der Netzhautgrube nun, wo die Fasern überwiegend eine schräg gegen ihr Centrum verlaufende Richtung haben, würde nach der gemachten Annahme das Licht stärker dort absorbirt werden, wo die Fasern der Polarisationsebene parallel laufen. Ist letztere vertical, so werden also über und unter der Netzhautgrube sich dunklere Stellen bilden, rechts und links hellere. Ebenso würden die Stellen dunkler werden müssen, wo die Fasern nicht mehr schräg gegen die Fläche der Netzhaut liegen, also im Centrum der Grube selbst, und nach dem äußeren Rande des gelben Flecks hin. In der That entspricht die Erscheinung der Polarisationsbüschel diesen Folgerungen.

Man hat noch andere Ansichten über die Entstehung der Polarisationsbüschel aufgestellt. Unter diesen ist namentlich die von ERLACH angedeutete, von JAMIN specieller ausgeführte, ziemlich günstig aufgenommen worden. Beide meinten, die Büschel herleiten zu können von den vielfachen Refractionen, die das Licht an den brechenden Flächen des Auges erleidet. In der That würde senkrecht polarisirtes Licht, welches von oben oder unten her in das Auge dringt, stärker reflectirt und weniger eingelassen werden, als solches, welches von rechts oder links her kommt, und demnach müßte der obere und untere Quadrant des Gesichtsfeldes etwas dunkler erscheinen, als der rechte und linke. Aber wenn Polarisation durch Refraction der Grund wäre, müßten erstens die Büschel in allen homogenen Farben nahehin gleich deutlich erscheinen, während sie dies nur im Blau thun. Zweitens müßten sie nach den Rändern des Gesichtsfeldes hin continuirlich an Stärke zunehmen. Im Gegentheil sind sie auf einen sehr kleinen centralen Theil beschränkt. Drittens müßte ihr Centrum im Axenpunkte des Auges liegen, nicht im Fixationspunkte, der von jenem, wie es scheint, in allen Augen verschieden ist. Es haben auch schon STOKES, BREWSTER und MAXWELL auf das Ungenügende dieser Erklärung aufmerksam gemacht, und die beiden letzteren haben bemerkt, daß die Ausdehnung der Büschel mit der des gelben Flecks übereinkomme. Allerlei andere, aber nicht klar durchgeführte Erklärungen sind auch von HAIDINGER und SILBERMANN gegeben.

HAIDINGER beschreibt im blauen Felde, wo man die LOEWESCHEN Ringe sieht, auch noch helle Andreaskreuzlinien, über die noch keine Beobachtungen von anderen Augen vorliegen. Ich selbst kann sie nicht sehen.

424 2. Helle bewegliche Punkte erscheinen im Gesichtsfelde, wenn man, namentlich während angestrengten Gehens oder anderer Leibesbewegung, eine große gleichmäßig erleuchtete Fläche, z. B. den Himmel oder Schneefelder, starr ansieht. Die Pünktchen springen an verschiedenen Orten des Gesichtsfeldes auf und laufen in sehr verschiedenen, meist nicht ganz geraden Bahnen ziemlich schnell fort. Dabei erscheinen auf dem Wege, den eines eingeschlagen hat, nach kurzen Zwischenzeiten neue, die auf demselben Wege

fortlaufen. PURKINJE bemerkt, daß, wenn man nach einer begrenzten lichten Fläche, z. B. gegen ein Fenster, schaut, jeder Punkt auf der von der Mitte des Sehfeldes abgekehrten Seite ein kleines Schattenbild nach sich zieht. Da sie feste Wege einzuhalten scheinen, sind sie von manchen Beobachtern (J. MÜLLER) für eine Erscheinung des Blutlaufs gehalten worden. Sie sind aber, wenigstens in meinem Auge, viel zu vereinzelt, als daß man sie für Blutkörperchen halten könnte, ihre Bahnen ebenfalls viel zu weit von einander entfernt, und ihre Bewegung zu schnell, als daß ihre Wege einem Capillarnetz entsprechen könnten. Wenn ihre Erscheinung wirklich mit dem Blutlauf zusammenhängt, könnte man höchstens daran denken, daß einzelne vielleicht fettreiche Lymphkörperchen, die durch größere Gefäßstämmchen hinfließen, sich in dieser Art zeigen. Diese Erscheinung scheint übrigens von den meisten Menschen leicht gesehen zu werden.

Die Blutkörperchen sind übrigens eben noch groß genug, um, wenn sie sich in der Netzhaut befinden und auf diese einen Eindruck machen, noch erkannt zu werden. Ihr Durchmesser beträgt im Mittel 0,0072 mm, und die Größe der kleinsten erkennbaren Distanzen ist 0,005 mm (siehe S. 256). Verschiedene Beobachter haben denn auch Reihen von fortlaufenden Kügelchen und unbestimmtere wallende und fließende Bewegungen bei verschiedenen Veranlassungen gesehen. Die eigenthümliche Erscheinung in einander verschlungener Strömungen, welche bei intermittirendem Lichte eintritt und von VIERORDT auf den Blutlauf der Aderhaut bezogen wird, ist schon oben erwähnt. Ähnliches sieht man übrigens auch zuweilen ohne intermittirendes Licht, wenn man in eine helle Fläche hineinstarrt, besonders nachdem man durch Bücken das Blut nach dem Kopf getrieben hat. Sobald durch den Lichteindruck die Netzhaut so weit ermüdet ist, daß die Fläche dunkel wird, erscheint gleichsam hinter der hellen Fläche, welche verschwindet, eine gefleckte röthliche Fläche, deren Flecken bald bewegt, bald ruhig sind. Reihen von fließenden Kügelchen haben STEINBUCH und PURKINJE,¹ namentlich bei schwachem Drucke auf das Auge, gesehn. Letzterer sah sie zuerst bei Beobachtung der dunklen Accommodationsfigur, welche bei ihm aus einem centralen weissen Kreise, umgeben von einem bräunlichen, unbestimmt begrenzten Hofe, bestand. Rechts und links neben dem weissen Kreise sah er zwei senkrechte lichte Linien, in denen sich Reihen von Kügelchen bewegten, rechts abwärts, links aufwärts. Ich habe bis jetzt nichts Ähnliches sehen können. JOHANNES MÜLLER² sah bei Congestionen nach dem Kopfe, oder wenn er sich gebückt hatte und sich plötzlich aufrichtete, ein Springen und Fahren, wie von dunklen geschwänzten Körpern in den mannigfaltigsten Richtungen, und vergleicht diese Erscheinung mit dem Ameisenlaufen in den Gefühlsnerven.

Ein Flimmern wie von kleinen bewegten Körpern sehe ich auch zuweilen

¹ PURKINJE, *Beobachtungen und Versuche*. I. 127.

² JOHANNES MÜLLER, *Physiologie*. II. 390.

vor einer mit grobem Kalk beworfenen und sehr schief durch ein kleines Fenster beleuchteten Wand, die daher mit einer Menge kleiner schwarzer unregelmäßiger Punkte übersät erscheint. Aber hier könnten es vielleicht Nachbilder der Pünktchen sein, welche durch unvermeidliche kleine Schwankungen des Auges aufblitzen.

PURKINJE beschreibt noch andere Erscheinungen, die bei Aufregung des Gefäßsystems oder Anstrengung der Augen eintreten. Seine Beschreibung lautet:¹ „Wenn ich bei hellem Tage eine viertel bis halbe Stunde im Freien stark gegangen bin, und ich trete plötzlich in einen finsternen oder wenigstens stark verdunkelten Raum, so wallt und flackert im Gesichtsfelde ein mattes Licht, gleich der auf einer horizontalen Fläche verlöschenden Flamme von ausgegossenem Weingeiste, oder gleich einer im Finstern schwach flimmernden, mit Phosphor bestrichenen Stelle. Bei schärferer Betrachtung bemerke ich, daß der flackernde Nebel aus unzählbaren, äußerst kleinen, unregelmäßig lichten Pünktchen besteht, die sich in verschiedenen Linien unter einander bewegen, sich bald da, bald dort anhäufen, unbestimmt begrenzte Flecke bilden, die sich wieder zertheilen, um sich anderwärts zu versammeln. Jeder Punkt läßt eine lichte Spur seiner Bewegung hinter sich, welche Spuren, sich mannigfaltig durchschneidend, Netze und Sternchen bilden; 426 so wimmelt es eine große Strecke im Innern des Gesichtsfeldes und hindert das deutliche Sehen. Am ähnlichsten dieser Erscheinung ist das Gewimmel der sogenannten Sonnenstäubchen.“

Er sieht dasselbe bei bedecktem rechten Auge, wenn er mit dem schwach- und fernsichtigen linken eine helle Fläche fixirt, ferner bei allmählig verstärktem Druck auf das linke Auge. Die Pünktchen erscheinen lebhafter bei offenem als bei geschlossenem Auge, besonders wenn dasselbe nach einer nicht gänzlich verdunkelten entfernten Stelle hinsieht. Das äußere Licht ist also der Erscheinung förderlich.

Pulsirende Kugeln, zwei an der rechten Seite des Gesichtsfeldes, eine Reihe an der unteren, drei an der linken Seite, erscheinen ihm auf der hellen Himmelsfläche, wenn er gelaufen ist, bei Druck auf das Auge oder bei angestrengtem Husten. Auch pulsirt der Fixationspunkt, und es erscheinen noch graue Streifen, theils kreisförmig den Fixationspunkt umgebend, theils radiale Gefäßstreifen.²

3. Figuren, die bei gleichmäßig erleuchteter Netzhaut sichtbar werden. PURKINJE³ bemerkt, daß, wenn er nach einer großen etwas blendenden Fläche starr hinsieht (z. B. auf den gleichmäßig mit Wolken überzogenen Himmel oder in eine ganz nahestehende Kerzenflamme), in einigen Secunden wiederholt in der Mitte des Gesichtsfeldes lichte Punkte aufspringen, die, ohne ihre Stelle geändert zu haben, schnell wieder verschwinden und schwarze Punkte zurücklassen, die ebenso schnell wieder vergehen. Wendete

¹ PURKINJE, *Beobachtungen und Versuche*. I. 63.

² *Ebenda* I. 134.

³ *Ebenda* I. 67.

er, während die Lichtpunkte hervorspringen, das Auge gegen eine stark verdunkelte Stelle, oder schloß er es, so setzte sich die Erscheinung auf gleiche Weise fort, nur in einem gemilderten Lichte, als würden durch das erste Hinsehen die Punkte nur entzündet und glimmten dann für sich allein ab. Ich selbst habe ebenfalls häufig solche vereinzelt lichte Punkte, die nicht Nachbilder sein konnten, weil entsprechende kleine helle Gegenstände im Gesichtsfelde fehlten, die dunkle Nachbilder hätten zurücklassen können, zufällig gesehen; aber meist nur einen auf ein Mal, und im Ganzen selten sich wiederholend.

Hierher gehört ferner PURKINJES Kreuzspinnengewebefigur,¹ aus lichten röthlichen Linien auf rothem Grunde gebildet, die das Gewebe einer Kreuzspinne bald einfacher, bald complicirter nachbildete. Um die Figur gut zu sehen, hatte sich PURKINJE so gelagert, daß die Strahlen der aufgehenden Sonne seine Augenlider treffen mußten. Beim Erwachen sah er hinter den geschlossenen Lidern die Figur.

Überhaupt ist das Werk von PURKINJE außerordentlich reich an subjectiven Beobachtungen ähnlicher Art und wird noch lange eine Hauptfundgrube für ähnliche Beobachtungen bleiben. Aber viele von den Erscheinungen, die er beschreibt, sind von anderen Augen noch nicht wieder aufgefunden worden, und für diese bleibt es also vorläufig fraglich, ob sie nicht auf individuellen Eigenthümlichkeiten seiner Organe beruhen.²

¹ PURKINJE, *Beobachtungen und Versuche* II. 87.

² Siehe noch die Erscheinungen in No. XXII des ersten, in No. IV, V, XV des zweiten Bandes seiner *Beobachtungen und Versuche*.