

# Grundzüge einer Farbentheorie.

Von

Prof. Dr. EGON RITTER VON OPPOLZER, Innsbruck.

I. Abschnitt.

## Allgemeine Grundlagen.

### § 1. Einleitung.

Nennen wir eine Elementarempfindung eine Empfindung, die auf eine Erregung einer einzelnen Opticufaser hin im Bewußtsein rege wird, so nimmt die hier nun zu erörternde Farbentheorie an, daß die Empfindung einer Farbe nur dann eintritt, wenn wenigstens zwei Elementarempfindungen verschmolzen in das Bewußtsein treten, und daß sofort jede Farbenempfindung aufhört, wenn bei der Reizung bloß eine Elementarempfindung psychisch wirkt. Im letzteren Falle tritt die farblose Grau-Weißempfindung, die in der Folge immer als die Weißempfindung kurzweg bezeichnet werden soll, auf. Die Empfindung der Farbe entsteht durch Zusammenwirken wenigstens zweier farbloser Empfindungen, aber in Folge der Verschmelzung dieser gelangt die zusammengesetzte Natur der Farbenempfindung nicht direct zur Beobachtung. Zwei oder mehrere Elementarempfindungen müssen nämlich immer vollständig verschmelzen, wenn ein bestimmter Reiz stets gleichzeitig diese isolirten Erregungen hervorruft; denn es ist dann eine psychische Trennung ausgeschlossen. Kann ein Reiz aber auch bloß eine einzige von diesen erregen und die anderen unerregt lassen, so wird dann beim Zusammenwirken der Elementarempfindungen die Verschmelzung nicht mehr so vollkommen eintreten. Aus diesem Grunde wird man annehmen müssen, daß im Gebiete der Gesichtsempfindungen, das scheinbar so einheitliche Empfindungen aufweist, die Elementarempfindungen nur äußerst selten isolirt vorkommen. Soweit ich die Er-

scheinungen überblicke, genügt es für unser normales Farbensystem bloß drei Elementarempfindungen anzunehmen und alle Farbenempfindungen auf die verschiedenen Stärkenverhältnisse, mit welchen sie gegenseitig ins Bewußtsein treten, zurückzuführen. Die Farbe verdankt ihre Entstehung nach dieser Auffassung einer inneren Gegensätzlichkeit, die je stärker entwickelt eine stärkere Sättigung und aufgehoben die Weißempfindung nach sich zieht.

Im ersten Momente dürfte es sonderbar erscheinen, eine farbige Empfindung aus bloß farblosen entstehen zu lassen. Sobald man aber die rein psychischen Vorgänge von den physikalischen zu trennen versteht, schwindet das Sonderbare. Unter Weißempfindung verstehen wir nicht die Empfindung eines weißen Objectes, sondern eines inneren Vorganges. Durch häufige Auseinandersetzungen mit Farbenblinden können wir ihre Farbenempfindungen nur deshalb bestimmen, weil die Farbenempfindungen von gewissen Gefühlen, ästhetischen Wirkungen, begleitet sind; aus der Uebereinstimmung dieser Wirkungen schließen wir auf das Vorhandensein desselben Empfindungsinhaltes. Wären diese Begleitgefühle nicht vorhanden, so hätte es überhaupt gar keinen Sinn „mit einem Farbenblinden von der Farbe zu sprechen“. Auf diese Weise erhalten wir die Gewißheit, daß ein total Farbenblinder nur farblose Helligkeiten, nur Weißempfindungen besitzt. Seine Gesichtsempfindungen lassen sich als eine eindimensionale Mannigfaltigkeit auffassen; sie unterscheiden sich alle trotz des Reizes verschiedener physikalischer Qualitäten (Wellenlängen) nur durch ihren Stärkegrad oder ihre Helligkeit. An und für sich könnte z. B. die Rothempfindung bei dem Totalfarbenblinden das eindimensionalabgestufte Empfindungsgebiet sein. Aber durch die Art, wie er seine Empfindungen beschreibt, was nur durch Angabe von ästhetischen Wirkungen möglich ist, erhalten wir die Gewißheit, daß er alles so sieht, wie wir, wenn wir Kreide, Schnee, Tageslicht ansehen. In diesem Sinne meinen wir, daß eine einzelne Optikufaser nur farblose Empfindungen vermitteln kann, d. h. also, daß jedweder Wellenlängenbezirk, der von uns als farbig bezeichnet wird, oder jedweder beliebig erleuchteter farbiger Gegenstand farblos empfunden wird. Das stets gleichzeitige Mit-Auftreten einer zweiten andersartigen Elementarempfindung muß nun ein zweidimensionales Empfindungsgebiet

schaffen; denn eine solche Doppelempfindung unterscheidet sich von einer anderen solchen durch zwei Bestimmungsstücke: durch ihre Stärke (Helligkeit) und durch ihre Zusammensetzung; diese Dimension wird als Qualität zu bezeichnen sein, als die Farbe; erstere als die Quantität, als die Helligkeit. Wir erklären also die Farbe nicht, indem wir wie die YOUNG'sche und zum Theil auch die HERING'sche Theorie das, was der Farbenkreisel thut, auch in unser Auge verlegen, sondern basiren die Farbeempfindung ganz auf das Phänomen der Verschmelzung. Dieses allein ruft eben neue Dimensionen unseres Empfindungsgebietes hervor, es schafft Qualitäten.

Das Phänomen der Farbe wird hiernach in physiologischer Hinsicht ganz analog dem akustischen der Klangfarbe. Beide verdanken ihr Entstehen dem gleichzeitigen Auftreten mehrerer Elementarempfindungen. Grundton und Obertöne erregen isolirte Nervenfasern und, da diese an und für sich farblosen Töne im allgemeinen gleichzeitig auftreten, so tritt eine Verschmelzung zu einer einzigen Tonempfindung ein, die dann „gefärbt“ erscheint. Die Verschmelzung wird jedoch nicht so vollkommen wie im Gebiete der Gesichtsempfindungen erfolgen, weil eben oft auch der Ton, der dem Oberton entspricht, ohne den Grundton auf unser Gehörorgan fallen kann. Würden alle Grundtöne in der Natur das Intervall einer Octave umfassen, so würde ein Heraushören der Obertöne, wie es geübte Ohren im Stande sind, unmöglich sein. Die Klangfarbe ändert sich stetig, wenn die einzelnen Elementarempfindungen in verschiedener Stärke in die Empfindung eintreten und man wäre dann ebenso berechtigt von einem Klangfarbenspectrum zu sprechen. So wird die folgende Theorie sich mit geringen Modificationen auch auf die Tonempfindungen anwenden lassen und überhaupt auf alle Empfindungen, die durch Verschmelzung einzelner Elementarempfindungen entstehen; ja man wird sagen können, daß in den seltensten Fällen reine Elementarempfindungen ins Bewußtsein treten, daß fast jeder Reiz eine „Farbe“ besitzt und von differenten Elementarempfindungen begleitet ist.<sup>1</sup> Die folgenden Untersuchungen dürften auch ein

---

<sup>1</sup> Berücksichtigt man, daß jede Empfindung stets von Gefühlen begleitet ist, so würde sich aus der Verschmelzung dieser mit den Empfindungen nicht nur die Qualität, sondern auch die Modalität — nach HELMHOLTZ'scher Terminologie — erklären.

Mittel angeben das Auftreten reiner Elementarempfindungen zu erkennen, so daß durch psychophysische Maafsmethoden die Mitwirkung mehrerer isolirter Fasern erschlossen werden kann.

Um diese Auseinandersetzungen nun mathematisch zu formuliren, müssen noch einige Voraussetzungen eingeführt werden:

Nennen wir die Stärken der Elementarempfindungen  $x$ ,  $y$  und  $z$  (das sind also die farblosen Helligkeiten, welche jede einzelne Elementarempfindung bei Ausschaltung der anderen zwei im Bewußtsein hervorrufen würde), so sei die resultirende Empfindung  $E$

$$E = x \cdot e_1 + y \cdot e_2 + z \cdot e_3,$$

wo die  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$  die Einheiten der Elementarempfindungen, die den Stärken  $x$ ,  $y$  und  $z$  entsprechen, bedeuten. Es wird hiermit eine additive Verknüpfung der Elementarempfindungen vorausgesetzt analog derjenigen, welche bei der Bildung neuer Zahlen aus verschiedenen Einheiten besteht. Einer derartigen Voraussetzung dürften keine ernstlichen Bedenken entgegenstehen; erstens liegt dasselbe Princip der Aufstellung der Farbgleichungen zu Grunde und zweitens tritt bei der Vertheilung eines Reizes auf mehrere Elemente indifferenter Elementarempfindungen das additive Princip ein. Als indifferente Elementarempfindungen sind solche zu bezeichnen, welche gleichzeitig von demselben Reize verursacht nicht isolirt zum Centrum fortgeleitet werden. Da erfolgt schon eine Verschmelzung in physiologischer Hinsicht. Wenn z. B. mehrere Endapparate vom Reize getroffen werden und die Fortleitung einer einzigen Faser überlassen bleibt, so wird die Empfindungsstärke proportional der Anzahl der Endapparate steigen; es tritt also dann die reine algebraische Summation ein. Dies dürfte dann das additive Princip bei isolirter Leitung, wo eine directe Summation nicht stattfinden kann, rechtfertigen. Es treten eben dann wirklich mehrere Einheiten ins Bewußtsein, die mit einander nichts zu thun haben. Die resultirenden Empfindungen können bildlich als Zahlen von mehreren Einheiten aufgefaßt werden, als „höhere Zahlen“, und dementsprechend ebenso geometrisch dargestellt und behandelt werden. So entspricht jeder normalen Farbenempfindung  $E$  ein Punkt im Raume, der auf ein rechtwinkliges Coordinatensystem bezogen durch die drei Coordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$ , die drei Elementar-

empfindungsstärken oder Elementarhelligkeiten, fixirt ist. Daraus ergibt sich sofort, daß die Stärke der resultirenden Empfindung  $H$  durch die Länge des Abstandes des Punktes  $E$  vom Ursprunge  $O$  des Coordinatensystems ermittelt werden kann. Wir wollen die Empfindungsstärke mit dem Begriffe der Helligkeit identificiren. Die resultirende Helligkeit  $H$  ist also durch die Helligkeiten der Elementarempfindungen gegeben, wie folgt:

$$H = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Wir wollen daran festhalten, daß Helligkeit in stets rein psychologischem Sinne gebraucht werden soll, im Gegensatze zu dem nun bald auftretenden Begriffe Intensität, welcher nur in rein physikalischem Sinne verstanden werden soll.<sup>1</sup> Ferner wird die Strecke  $OE$ , deren Länge ein Maafs für die Helligkeit ist und die einen Vector vorstellt, eine Richtung im Raume besitzen, die von dem gegenseitigen Verhältnisse der Elementarhelligkeiten  $x$ ,  $y$  und  $z$  abhängt. Diese Richtung definirt die Qualität der Empfindung. Die Qualität selbst ist wieder eine zweifache Mannigfaltigkeit und, wie wir später sehen werden, liegen alle Empfindungsqualitäten gleichen Tones in Ebenen, die gleicher Sättigung in bestimmten Flächen.

Diese Darstellung „höherer“ Empfindungen und ihre Zusammensetzung aus den einfachen Elementarempfindungen kann naturgemäfs auf alle anderen Sinnesgebiete übertragen werden. Sie beruht auf der complexen Zusammensetzung differenter Elementarempfindungen und drückt das Princip, das ich das Princip der complexen Zusammensetzung differenter Elementarempfindungen nennen möchte, aus. Dieses Princip gestattet nicht nur aus den Elementarempfindungen die Qualität der complexen Empfindung zu definiren, sondern auch ihre Stärke, ihre Helligkeit. Ferner zeigt es, daß schon zwei Elementarerregungen ein ganzes Qualitätsbereich schaffen. Eine Empfindung  $E$ , die durch zwei Elementarempfindungen (Dichromat) mit den Stärken  $x$  und  $y$  hervorgerufen wird, stellt sich als ein Punkt in der complexen Zahlenebene dar, dessen Coordinaten  $x$  und  $y$  sind, durch:

$$E = x \cdot e_1 + y \cdot e_2.$$

Den unendlich vielen durch den Ursprung gezogenen Geraden

<sup>1</sup> Es entspricht diese Bezeichnungsart auch der von H. EBBINGHAUS in seinen Grundzügen der Psychologie angewendeten.

entsprechen ebensoviele Qualitäten. Zwei Elementarempfindungen sind also im Stande bereits unendlich viele Qualitäten im Bewußtsein zu erzeugen, so daß zwei isolirte Fasern hinreichen zur Fortpflanzung unendlich vieler Qualitäten. Diese letzte Folgerung aus dem Principe wurde schon von mehreren Seiten (z. B. MACH) als ein specieller Satz ausgesprochen. Sie scheint im ersten Momente dem Satze der specifischen Sinnesenergien zuwiderzulaufen.

Eine weitere Grundlage für die mathematische Behandlung soll die Heranziehung des FECHNER'schen Gesetzes schaffen. Ich nehme an, daß das FECHNER'sche Gesetz für die Elementarempfindungen gültig ist und glaube hiermit ganz im FECHNER'schen Sinne zu handeln. Auf diese Weise gewinnen wir einen ganz bestimmten Zusammenhang zwischen den physikalischen Größen und den psychischen. Die Coordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$ , die Elementarempfindungsstärken, sind dann in einfacher Weise mit dem Logarithmus der Intensitäten des reizenden Lichtes verknüpft, hiermit wird aber auch eine einfache Beziehung dieser Logarithmen zu den Helligkeiten  $H$  und zu den Qualitäten (dem Farbentone und der Farbensättigung) der Farbenempfindungen gewonnen. Man kann dann ersehen, daß das FECHNER'sche Gesetz für die Helligkeiten complexer Empfindungen nicht mehr streng gilt, auch nicht das WEBER'sche, ferner daß durch Intensitätsänderungen Farbentonänderungen und Sättigungsänderungen erfolgen müssen. Bevor auf diese Folgerungen eingegangen wird, ist es doch vor Allen wegen des Begriffes der Lichtmischung nöthig auf das FECHNER'sche Gesetz selbst einzugehen (§ 3). Mischungen physikalischer Intensitäten bewirken keineswegs Additionen der gemischten Elementarempfindungen; schon das FECHNER'sche Gesetz verbietet die Empfindungen zu addiren, wenn die Intensitäten addirt werden. Es muß demnach erst das Mischungsgesetz für eine Elementarempfindung aufgestellt werden; dann wird aber die mathematische Formulirung der Mischung bei complexen Empfindungen keine principiellen Schwierigkeiten mehr bieten. Es müssen ganz bestimmte Bedingungen zwischen den Constanten des FECHNER'schen Gesetzes bestehen, auf daß das NEWTON'sche Mischungsgesetz erfüllt sei.

Wie die YOUNG'sche Farbentheorie so führt auch die vorliegende auf drei Elementarempfindungen, unterscheidet sich

aber wesentlich in dem Punkte, daß es weder Roth-, noch Grün-, noch Violettempfindende Nerven-elemente giebt, sondern nur lichtempfindliche. Ferner müssen nach unserer Theorie bei jeder Farbenempfindung mindestens zwei Erregungen gleichzeitig vorhanden sein. Dies scheint den bisher gewonnenen Resultaten zu widersprechen; sieht man sich nämlich die Elementarempfindungscurven z. B. die KÖNIG'schen an, so verschwinden in gewissen Partien des Spectrums zwei Erregungen und nur eine bleibt wirksam; man darf aber nicht vergessen, daß diese Curven erstens keine wahren Empfindungscurven sind, weil die Ordinaten Lichtintensitäten z. B. Spaltbreiten und nicht Empfindungsgrößen vorstellen, ferner daß die Curven unter der Voraussetzung gewonnen wurden, daß die Endstrecken reine Elementarerregungen sind. Gerade dieser letztere Umstand widerspricht direct unserer Annahme. KÖNIG schließt aus der Thatsache, daß an den Endstrecken nur mehr Helligkeitsunterschiede und keine Tonänderungen mehr wahrgenommen werden können, daß hier nur mehr eine einzige Erregung vorhanden ist; nach den YOUNG'schen Vorstellungen ist dieser Schluß nicht unberechtigt, doch macht KÖNIG selbst darauf aufmerksam<sup>1</sup>, daß seine Annahme keineswegs nothwendig ist, sondern daß „innerhalb einer oder beider Endstrecken zwei Elementarempfindungen in constantem Verhältnisse erregt werden“. Ja HELMHOLTZ gelangt durch theoretische Betrachtungen auf Grund der KÖNIG'schen Resultate zu der Schlussfolgerung<sup>2</sup>, „daß alle einfachen Farben die sämtlichen lichtempfindlichen Nerven-elemente des trichromatischen Auges gleichzeitig und mit nur mäßigen Intensitätsunterschieden erregen“. Diese Gleichzeitigkeit der Erregung, die ich als ein Postulat meiner Theorie betrachte, wird auch der allerdings nicht immer zuverlässigen inneren Beobachtung gerecht. Man versteht dann, daß die Farbe von specifischen Wirkungen begleitet ist, „die sich unmittelbar an das Sittliche anschließen“, wie sich GOETHE ausdrückt. Gewisse Farben stimmen regsam, lebhaft, strebend, andere ruhig. Voll und ganz rein wirkt nur die Weißerregung, wo nach unserer Theorie keine Differenz der Elementarempfindungen empfunden wird, wo eben die drei Empfindungs-

---

<sup>1</sup> KÖNIG u. DIETERICI. *Diese Zeitschrift* 4, S. 260. 1892.

<sup>2</sup> HELMHOLTZ. *Physiol. Optik*, II. Aufl., S. 457. 1896.

stärken der Elemente oder, wie wir uns auch ausdrückten, die Elementarhelligkeiten, untereinander gleich werden ( $x=y=z$ ). Vom Standpunkte der inneren Anschauung ist also die farblose Weißempfindung die einheitlichste und dies erklärt auch, weshalb GOETHE sich der NEWTON'schen Auffassung, daß das weiße Licht aus den Farben zusammengesetzt sei, nicht anschließen kann; es widerstrebt eben der Empfindung. Fassen wir die Farbe als einen Namen für die verschiedenen Lichtqualitäten (Wellenlängen) auf — und dies thut NEWTON —, so hat NEWTON zweifellos recht, ist sie aber ein Namen für den physiologischen Vorgang, so verliert NEWTON's Behauptung ihren Sinn. Nachdem aber GOETHE die Farben als ein Phänomen in uns betrachtet, so beruht der ganze Streit nur darauf, daß demselben Worte andere Vorstellungen zu Grunde gelegt werden. So bleibt die NEWTON'sche Farbenlehre in physikalischer Hinsicht wohl für ewige Zeiten wahr, sie ist ja nichts anderes als eine sehr vollkommene Beschreibung der Lichterscheinungen, indem sie die einzig richtigen Einheiten der Lichtqualitäten (Spectralbezirke) aufdeckt. Die physikalische Seite der GOETHE'schen Farbenlehre arbeitet ohne Elemente und ist deshalb wissenschaftlich unbrauchbar. GOETHE widerstrebt es den Spalt anzuwenden, er hält dies für einen gekünstelten Eingriff in die Natur, damit ist aber jede rationelle Erforschung ausgeschlossen.

Hingegen bietet der Theil, der sich mehr der inneren Anschauung zuwendet, großes Interesse. Wir lernen da GOETHE als feinen inneren Beobachter kennen, der wiederholt treffende Bemerkungen in physiologischer Hinsicht macht. Da verweise ich auf die Einleitung des ersten Bandes seiner Farbenlehre: „Die Farbe sei die gesetzmäßige Natur in Bezug auf den Sinn des Auges.“ Oder: „Die Farbe sei ein elementares Naturphänomen für den Sinn des Auges, das sich, wie die übrigen alle, durch Trennung und Gegensatz, durch Mischung und Vereinigung, durch Erhöhung und Neutralisation, durch Mittheilung und Vertheilung und so weiter manifestirt, und unter diesen allgemeinen Naturformeln am besten angeschaut und begriffen werden kann.“ Diese wenigen, allerdings höchst dunklen Sätze zeigen wohl zur Genüge, daß GOETHE die Farbe in der That als ein rein psychologisches Phänomen auffasst, das auf innerer Gegensätzlichkeit beruht.

Dadurch, daß wir die Elementarempfindungen als farblos

annehmen, fallen aber die von mehreren Seiten hervorgehobenen Schwierigkeiten gegen die Drei-Componententheorie weg, so erklärt sich die Farblosigkeit des monochromatischen Systems oder das Verschwinden der Farben bei sehr geringen Intensitäten und kleinen Feldern fast von selbst. Die mathematische Ausbildung der YOUNG'schen Theorie durch HELMHOLTZ ist jedoch von der hier gegebenen total verschieden. Statt der Elementarempfindungen werden von ihm Elementarerregungen, die der Lichtintensität proportional angenommen werden, eingeführt; daher entbehren die Erregungen einer psychischen Bedeutung und können nur eine rein physiologische besitzen. Eine nothwendige Folge der YOUNG'schen Theorie ist natürlich die, daß die Empfindungen umso gesättigter werden, je mehr der Vorgang bloß auf Kosten einer Elementarerregung stattfindet; da tritt nach unserer Theorie die Weißempfindung ein und wir werden sehen, daß die gesättigten Farbentöne die sind, wo sich die Elementarempfindungsstärken  $x$ ,  $y$  und  $z$ , wie  $1:2:3$  verhalten, beim Dichromaten, wie  $1:2$ . Dann ist nämlich die Bedingung der größten Gegensätzlichkeit unter den Elementarempfindungen erfüllt. Auch basirt HELMHOLTZ seine Betrachtungen auf das Mischungsgesetz, das sich als nicht exact herausgestellt hat und auf die GRASSMANN'schen Sätze, die, wie wir ebenfalls sehen werden, nur theilweise Gültigkeit besitzen. So wird sich auch ergeben, daß die Mischempfindung keineswegs allgemein auf der Verbindungsgeraden der Componenten liegen muß.

## § 2. Die Farbenperception.

Unsere Theorie erfordert mindestens drei Arten von Elementarempfindungen und diese Zahl scheint auch zur Erklärung der Gesichtsempfindungen zu genügen. Eine Elementarempfindung verdankt ihre Entstehung einer Erregung einer einzigen Opticusfaser. Da jeder Lichtreiz drei differente Elementarempfindungen auslösen soll, so müssen wir, wenn unsere Theorie nicht eine bloß mathematische Beschreibung der Erscheinungen liefern soll, an benachbarten Stellen der Retina drei lichtempfindliche Elemente aufweisen, die auf denselben Lichtreiz in verschiedener Stärke reagiren, und deren Erregungen in drei benachbarten Opticusfasern getrennt fortschreiten.

Die Pigmentepithelschicht mit ihrer tief dunklen die Lichtenergie verschluckenden Färbung scheint der Ausgangspunkt des

physiologischen Vorganges zu sein. Allerdings ist die Anwesenheit des Pigmentes nicht zur Lichtempfindung nöthig, wie dies ja die Gesichtsempfindungen der albinotischen Augen darthun. Das wesentlichste Element in der Epithelschicht scheinen die Kristalle zu sein. Darauf deuten die Wanderungen dieser gegen die Stäbchen und Zapfen hin, die erst eine Leitung zu den einzelnen Opticusfasern herstellen, ferner auch die Messungen von KÖNIG und ZUMFT (Berlin, *Sitzungsber.*, S. 167; 1894) über den Ort der percipirenden Elemente. Sie finden die Dicke der percipirenden Schicht etwas dicker als die Stäbchen- und Zapfenschicht.

Also in die Epithelschichte ragen die Zapfen — von den Stäbchen wollen wir vor der Hand absehen, da sie in Folge ihres Fehlens in der farbenempfindlichen Netzhautgrube zur Farberception nicht nöthig sind — hinein. Diese Organe leiten die in der Epithelschichte ausgelösten Veränderungen zu den Opticusfasern durch zwei Neuronen fort (siehe GRAEFKE-SAEMISCH, Handbuch der gesammten Augenheilkunde, II. Aufl., I. Bd., Kap. V, „die mikroskopische Anatomie des Sehnerven und der Netzhaut“ (GREEF), S. 87; 1900). Nach neuesten Ergebnissen entspricht einem Zapfen in der Fovea nur eine einzige Ganglienzelle und auch nur eine Opticusfaser, so daß vom Zapfen bis zur Opticusfaser eine isolirte Leitung besteht.

Unsere Theorie verlangt drei differente Erregungen benachbarter Fasern, also auch nach eben angeführten Resultaten auch drei differente Zapfen. Wir suchen daher eine chromatische Differenz zwischen benachbarten Zapfen. Gelingt der Nachweis, daß benachbarte Zapfen verschiedene Lichtdurchlässigkeit für die verschiedenen Wellenlängen des Lichtes besitzen, so ist in Bezug auf den physiologischen und psychologischen Vorgang alles Nöthige geleistet.

In der Retina des Hahns und der Taube ist dies sofort möglich. Hier durchdringt das Licht, bevor es auf das Pigmentepithel fällt, gefärbte Oelkügelchen. Es herrschen die drei Farbentöne roth, gelb und grün vor. Diese Kügelchen filtriren das weiße Licht und bei homogenem Lichte wird das an den Zapfen haftende Pigmentepithel verschieden afficirt und muß das Aufsenglied verschieden reizen, weil z. B. auffallendes grünes Licht durch das rothe Kügelchen stark, durch das gelbe schwächer und das grüne am schwächsten absorbirt wird. In der Pigment-

schicht des Hahns oder der Taube werden daher benachbarte Zapfen durch auffallendes homogenes Licht in verschiedenen Stärken gereizt. Da die Retina der Wirbelthiere sonst eine auffallende Uebereinstimmung zeigt, so ist kaum anzunehmen, daß einige Gattungen principielle Unterschiede bei der Entstehung der Farbenperception zeigen. So schliesse ich, daß auch unsere Zapfen chromatisch differenzirt sind, benachbarte Zapfen müssen für homogenes Licht verschiedene Durchlässigkeit aufweisen. Allerdings hat die bisherige Untersuchung der Zapfen ihre vollständige Farblosigkeit ergeben, dies kann aber in der vergänglichen Natur der Zapfenglieder oder vielleicht in der Untersuchungsmethode selbst liegen. Ich möchte da auf die Zapfenaussenglieder hinweisen, die aus Plättchen mit Dicken von der Ordnung der Lichtwellenlängen bestehen. Das Aufsenglied, das mit einer stark brechenden Flüssigkeit gefüllt ist, stellt eigentlich einen Plattensatz von dünnen Plättchen dar. Obwohl die Theorie eines solchen Plattensatzes noch nicht entwickelt ist, so läßt sich doch aus der Theorie der einfachen dünnen Plättchen ersehen, daß ein solcher Plattensatz geradezu wie ein exquisit vollkommener Strahlenfilter wirkt. Hat nämlich das dünne Plättchen die Dicke einer bestimmten Wellenlänge, so ergibt die Theorie, daß das Licht dieser Wellenlänge vollständig durchgelassen wird, daß nämlich für die betreffende Wellenlänge das Reflexionsvermögen thatsächlich Null wird, ein wohl höchst sonderbares Resultat, auf das meines Wissens noch nicht deutlich hingewiesen wurde. Das Licht einer etwas differenten Wellenlänge wird hingegen theilweise reflectirt und theilweise durchgelassen, so daß es bei einer gröfseren Anzahl von Plättchen stark geschwächt wird. Schliesslich bei sehr grofser Plattenzahl wird nur die homogene Farbe übrig bleiben, deren Wellenlänge der Dicke der Plättchen äquivalent ist. Somit wäre in den Plättchen der Zapfenaufsenglieder ein Strahlenfilter gefunden, der für die Erklärung der Farbenperception ausreichen könnte. Schon im Jahre 1867 hat ZENKER<sup>1</sup> diese Plättchen zur Erklärung der Farbenperception herangezogen, allerdings in einem ganz anderen Sinne; er dachte sich, daß dieselben zu stehenden Wellen Veranlassung geben, die direct percipirt werden, eine Annahme,

<sup>1</sup> ZENKER. Versuch einer Theorie der Farbenperception. *Archiv für mikroskopische Anatomie* 3, S. 249. 1867.

welche wohl heute verworfen werden muß. Ich möchte noch auf eine überraschende Thatsache hinweisen, welche meine Vermuthung wesentlich verstärkt: Herr GREEF<sup>1</sup> giebt für die Dicke der menschlichen Aufsengliedplättchen an, daß sie zwischen

0,00045      und      0,0006 mm

variirt, während die Wellenlängen des sichtbaren Spectrums in auffälliger Weise zwischen fast gleichen Grenzen:

0,00039      und      0,00069 mm

liegen. Fassen wir alles über die Farbenperception gesagte kurz zusammen, so geht sie folgendermaassen vor sich:

Das durch die Linse und den Glaskörper dringende im Allgemeinen gemischte Licht erreicht schliesslich die Aufsenglieder der Zapfen, hier erleidet es eine von Zapfen zu Zapfen verschiedene Durchsiebung und fällt chromatisch und der Intensität nach verschieden auf die, stark alle sichtbaren Strahlen absorbirende, Pigmentepithelschicht; diese wird durch die qualitativ und quantitativ verschiedenen Strahlen in verschieden starker Weise in der Umgebung der Zapfen afficirt z. B. lichtelektrisch beeinflusst und reizt durch die Hüllen der Zapfenglieder die benachbarten Zapfen in verschiedener Stärke, und diese Reizungen pflanzen sich nun in verschiedenen Optikusfasern isolirt bis zum Centrum fort. Jede Faser ruft im Bewusstsein eine Elementarempfindung hervor und diese Elementarempfindungen treten verschmolzen über die Schwelle.

Die Function der Stäbchen würde nach der hier gegebenen Theorie der Farbenperception ungefähr in Uebereinstimmung mit den herrschenden Ansichten sein. Ihre im Vergleiche zu den benachbarten Zapfen mindestens um das dreifache grössere Länge des Aufsengliedes vergrößert natürlich die Oberfläche auf das Neunfache und ermöglicht nicht nur ein tieferes Eindringen, sondern auch eine ausgiebigere Berührung mit der reizenden Epithelschicht, die den Lichtreiz zuerst einleitet; allerdings scheint diese hierdurch entstehende Erhöhung der Lichtempfindlichkeit auf Kosten der Farbenempfindlichkeit gewonnen zu werden. Denn dort, wo die Stäbchen auftreten, findet man, daß die Erregungen nicht mehr isolirt zu den Fasern fortgeleitet werden, sondern daß mehreren Stäbchen eine Ganglienzelle und

---

<sup>1</sup> GREEF. Handbuch der gesammten Augenheilkunde (GRAEFE-SAEMISCH). II. Auflage, Bd. I, S. 105. 1900.

auch eine Faser entspricht, daß eine Concentrirung des Lichtreizes auftritt; nach unserer Theorie muß hierdurch die Farbenempfindung wesentlich herabgesetzt werden, da dann nicht immer alle benachbarten Elemente differente Erregungen erzeugen können. So ist es leicht begreiflich, daß ein Herabgehen der Sehschärfe, die ja mit der Concentrirung innig zusammenhängt, ebenso innig mit einer Herabsetzung der Farbenempfindlichkeit Hand in Hand gehen muß (peripheres Sehen). Auffällig erscheint, daß bei den Stäbchen die Plättchen des Aufsengliedes ebenso entwickelt erscheinen, so daß die Stäbchen wohl auch farbenpercipirend wirken werden. Doch wird hier die Perception anders erfolgen durch den die Aufsenglieder erfüllenden lichtempfindlichen Sehpurpur. Durch diesen ist eigentlich ein fundamentaler Unterschied zwischen der Wirkungsweise der Zapfen, die ihn nicht enthalten, und der der Stäbchen geschaffen. Seine Anwesenheit scheint noch zur Erhöhung der Lichtempfindlichkeit beizutragen, die bei den Zapfen nur durch das Pigmentepithel erzeugt wird. Der Sehpurpur ist durch die Einwirkungen des Lichtes starken Veränderungen unterworfen, während das Zapfenaufsennglied mit einer stark lichtbrechenden, gegen die Lichteinwirkung indifferenten Substanz erfüllt ist; dies legt den Gedanken nahe, daß sowohl die Farben- als Lichtperception der Stäbchen schneller von statten geht, dafür aber auch weniger präzise und mit langsamerer Regeneration. Die Stäbchen scheinen rasch und sehr lichtempfindlich die Gesichtswahrnehmungen in roher Weise zu vermitteln, während den Zäpfchen dann die feinere Analyse des Wahrgenommenen überlassen bleibt. So werden auch die Ermüdungserscheinungen zuerst in den durch das Licht beeinflussten Stäbchen platzgreifen. Aus diesem Grunde werden Nachtthiere zum Vortheil mit Stäbchen, Tagthiere mit Zäpfchen und Stäbchen ausgestattet sein.

### § 3. Das FECHNER'sche Gesetz.

Wir wollen die FECHNER'sche psychophysische Fundamentalformel für die Elementarempfindungen als gültig annehmen; es dürfte jedoch angezeigt erscheinen auf ihre Ableitung einzugehen, weil nur dann die Bedeutung der in ihr auftretenden zwei Constanten klargelegt werden kann; überdies ist sie in letzter Zeit zum Theil berechtigten, zum Theil aber auch ganz unberechtigten Einwürfen ausgesetzt gewesen, so daß ihrer An-

wendung nicht mehr das nöthige Vertrauen entgegengebracht wird, um einer mathematischen Farbentheorie als Grundlage zu dienen.

Wenn ich zwei gleich grofse, von homogenem Lichte erleuchtete Felder ansehe, so kann ich eine Entscheidung treffen, ob das eine heller oder dunkler wie das andere ist; ich kann auch beide für gleich hell erklären; auch kann ich ein drittes Feld zwischen die beiden ersten geben und dessen Beleuchtung so reguliren, dafs es bezüglich seiner Helligkeit ebenso weit von dem ersten wie von dem zweiten abzustehen scheint; ich werde sagen, dafs ich auf die Helligkeitsmitte eingestellt habe; das heifst soviel, als dafs ich den Helligkeitsunterschied zwischen dem ersten und dritten, ferner dem dritten und zweiten als gleichgrofs empfinde. Nun kann ich noch ein viertes heranziehen und dieses auf die Helligkeitsmitte von eins und drei einstellen. Der Helligkeitsunterschied zwischen eins und vier wird dann als der vierte Theil des ursprünglichen (eins-zwei) betrachtet. Die Theilung kann weiter fortgesetzt werden und schliefslich kann ich einen beliebigen Theil als Einheit des Helligkeitsunterschiedes wählen; wird mir eine ganz andere Helligkeit vorgelegt, die in meiner Reihe noch nicht vorkommt, so kann ich die Anzahl Einheiten und eventuelle Bruchtheile angeben, welche auf diese neue Helligkeit kommen. Das ist aber nichts anderes als ein Messen der Empfindungsgröfsen, die bei Elementarempfindungen farblose Helligkeiten sind. Allen Helligkeiten kann ich durch physikalische Messung Intensitäten zuordnen und da zeigt sich, dafs gleichen Helligkeitsunterschieden sehr nahe gleiche Intensitätsverhältnisse entsprechen, dafs weiters mit der Gröfse des Helligkeitsunterschiedes das Intensitätsverhältnifs sehr nahe in einer ganz bestimmten Weise variirt und diese Variation sehr nahe durch die logarithmische Function ausgedrückt werden kann. Es kann der Helligkeitsunterschied sehr nahe

$$x - x' = A \log \frac{I}{I'}$$

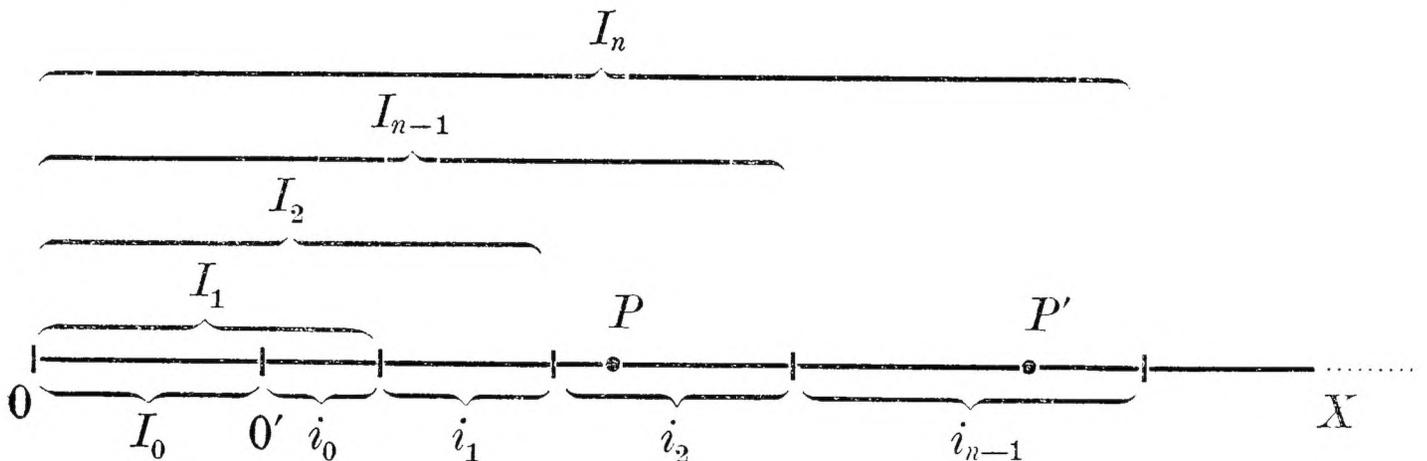
gesetzt werden, wo  $A$  eine von der Helligkeit unabhängige Constante und die  $I$  und  $I'$  die den Helligkeiten  $x$  und  $x'$  zugeordneten Lichtintensitäten bedeuten sollen. Das sind nackte Erfahrungsthatfachen, die sich nicht hinwegleugnen lassen. Bekanntlich haben photometrische Messungen der rein geschätzten Sterngröfsen, die also reine und zwar kleine Empfin-



Einfluß einer kleinen Steigerung der Intensität auf die Helligkeit, man findet dann den Helligkeitszuwachs:

$$\Delta x = 0,4343 \cdot A \cdot \frac{\Delta I}{I}$$

Hieraus ersieht man deutlich, daß die Constante  $A$  die eben bemerkte Bedeutung besitzt; denn sie giebt an, in welcher Stärke die Helligkeit auf eine procentuale Intensitätsänderung  $\frac{\Delta I}{I}$  reagirt. Uebrigens geht diese Bedeutung der Constanten  $A$  ganz deutlich aus Ableitungen des FECHNER'schen Gesetzes, die von anderer Seite<sup>1</sup> gemacht wurden und sich mit der folgenden fast decken, hervor.



Tragen wir uns auf der Geraden  $0X$  vom Punkte  $0'$  alle ebenmerklichen Intensitätsänderungen  $i$  auf, wenn die Intensität von  $I_0$  bis zu einem Werthe  $I_n$  anwächst, so erhalten wir z. B.  $n$  Intensitätsintervalle  $i_0, i_1, i_2 \dots i_{n-1}$ , so daß

$$I_0 + i_0 + i_1 + i_2 + \dots + i_{n-1} = I_n$$

ist. Die reizende Intensität der ersten Stufe heiße  $I_1$ , die der zweiten  $I_2$  u. s. w., so ist

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0 + i_0 \\ I_2 &= I_1 + i_1 \\ &\vdots \\ I_n &= I_{n-1} + i_{n-1}. \end{aligned}$$

Nach WEBER ist

$$\frac{i_k}{I_k} = s \quad k = 0, 1, 2 \dots, n-1$$

<sup>1</sup> z. B. WIENER. Die Empfindungseinheit zum Messen der Empfindungsstärke. *Wied. Ann.* 47, S. 659; 1892. — Oder G. F. LIPPS. Grundrifs der Psychophysik (GÖSCHEM, Nr. 98), S. 49; 1899.

eine Constante und ihre Einführung in die eben aufgestellten Gleichungen ergibt:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0 (1 + s) \\ I_2 &= I_1 (1 + s) \\ &\vdots \\ I_n &= I_{n-1} (1 + s), \end{aligned}$$

woraus durch successive Elimination folgt:

$$I_n = I_0 (1 + s)^n.$$

Ist nun die Anzahl Stufen  $n$  ein Maafs für die Gröfse des Helligkeitsunterschiedes,  $x - x'$  so erhält man durch Logarithmirung der eben erhaltenen Formel:

$$x - x' = n = \frac{1}{\log(1 + s)} \log \frac{I_n}{I_0}.$$

Die Constante des FECHNER'schen Gesetzes wird also in der That

$$A = \frac{1}{\log(1 + s)}.$$

Eine weitere Thatsache zeigt sich in der Existenz des Eigenlichtes des Auges. Bei geringen Helligkeiten ist seine Mitwirkung bei der Perception nicht zu vernachlässigen. Dieser innere Reizzustand ist einer gewissen Lichtintensität äquivalent, deren Gröfse  $a$  heißen möge. Führen wir diese Eigenlichtintensität  $a$  in die FECHNER'sche Formel ein, so erhalten wir den Helligkeitsunterschied einer Lichtquelle, deren Intensität  $I$  ist, gegen das Eigenlicht, das die Helligkeit  $x_0$  besitzen soll:

$$x - x_0 = A \log \frac{I + a}{a} = A \log \left( 1 + \frac{I}{a} \right).$$

Nun können wir den Nullpunkt der Helligkeitsscala beliebig wählen, für die Theorie ist es am praktischsten die Eigenlichthelligkeit  $x = 0$  zu setzen, weil dann negative Empfindungsgrößen fortfallen. Dann ist aber die Helligkeit definirt durch:

$$x = A \log \left( 1 + \frac{I}{a} \right).$$

Diese Formel kann als eine Maafsformel angesehen werden. Sie ordnet jeder Intensität eine Helligkeit in stetiger Weise zu. Für die Folge ist es wichtig zu bemerken, daß die Eigenlichtintensität sehr von der Adaptation des Auges abhängt. Man ist in keiner Weise berechtigt aus der Existenz der Unterschiedschwelle auf eine discontinuirliche Beschaffenheit des Helligkeits-

wachstums zu schliessen, da die Helligkeit innerhalb des Schwellenintervalles nicht als gleich angesehen werden darf; betrachten wir den im Intervall  $i_2$  liegenden Punkt  $P$ , diesem entspricht eine gewisse Helligkeitsempfindung, die für das ganze Intervall gleich erscheint, aber psychisch nicht gleich ist; ein zweiter Punkt  $P'$  im Nachbarintervall  $i_{n-1}$  stellt eine Helligkeit dar, die wieder für das ganze Intervall  $i_{n-1}$  gleich erscheint, aber nicht gleich ist. Nehmen wir den ersten Punkt am Anfange des Intervalles  $i_2$ ; den zweiten am Ende des Intervalles  $i_{n-1}$  an, so übertrifft die Distanz der beiden Punkte bereits die Intervalle der Unterschiedsschwellen und es wird in der That ein Helligkeitsunterschied sich bemerklich machen; liegen aber beide Punkte an der Grenze, wo die Intervalle  $i_2$  und  $i_{n-1}$  zusammenstossen, so verschwindet der Helligkeitsunterschied. Wäre nun die Helligkeit im Intervalle  $i_2$  überall gleich und ebenso in  $i_{n-1}$ , so müfste bei jeder Lage der Punkte der Helligkeitsunterschied gleich sein, was aber nach dem Dargelegten nicht der Fall ist. Die Unterschiedsschwelle misst eben die Gröfse der Unsicherheit der Empfindung. Mit demselben Rechte könnte ich einen sich in Folge von Temperatursteigerungen ausdehnenden Stab als discontinuirlich veränderlich ansehen, weil, so oft ich den Stab während seiner Ausdehnung messe, erst durch die beschränkte Genauigkeit der Messung eine gewisse endliche Vergröfserung der Länge eintreten mufs, um bemerkt zu werden.

Werden die reizenden Intensitäten sehr grofs im Zähler (z. B. von  $I = 100 \cdot a$  angefangen), so kann  $a$  gegen  $I$  vernachlässigt werden und die Maafsformel wird:

$$x = A \log \frac{I}{a}.$$

Unter diesen Voraussetzungen gelangt man also auf die FECHNER'sche Fundamentalformel; doch ist in ihr  $a$  nicht die untere Reizschwelle, sondern die Intensität des Eigenlichtes. Die Reizschwelle ist in die obige Maafsformel in folgender Weise einzuführen: Durch die Anwesenheit des Eigenlichtes wird erst eine merkliche Helligkeitszunahme stattfinden, wenn diese den Betrag der dem Eigenlichte entsprechenden Unterschiedsschwelle erreicht. Die Reizschwelle  $\alpha$  wird hierdurch

$$\alpha = a s \left( \text{oder } \frac{\alpha}{a} = s \right)$$

und steht mit der Unterschiedsschwelle und dem Eigenlichte in innigstem Zusammenhang. Führen wir durch die eben erhaltene Relation die Reizschwelle in die strenge Maafsformel ein, so ergibt sich:

$$x = A \log \left( 1 + s \cdot \frac{I}{\alpha} \right).$$

Für sehr kleine Intensitäten wird daher der Helligkeitsunterschied zwischen dem Reiz- und dem Eigenlicht:

$$x = A s 0,43429 \cdot \frac{I}{\alpha};$$

er wird nach der oben dargelegten Bedeutung von  $A$  weiter:

$$x = \frac{I}{\alpha},$$

also unabhängig von der Empfindlichkeit  $A$  und direct proportional der Intensität und verkehrt proportional der Reizschwelle. Bei sehr herabgesetzter Beleuchtung ist die Helligkeit gleich dem fundamentalen Reizwerth.

Von großer Wichtigkeit ist die Frage, wie groß die Mischhelligkeiten werden, wenn die Intensitäten  $I$  und  $I'$  der Mischlichter gegeben sind. Gehören diese demselben Spectralbezirk, d. h. derselben Wellenlänge an, so ist die Antwort auf die gestellte Frage sofort durch die FECHNER'sche Formel gegeben. Heiße die Helligkeit des gemischten Lichtes  $x_m$ , so ist offenbar:

$$x_m = A \log \left( 1 + \frac{I + I'}{\alpha} \right) = A \log \left( 1 + \frac{I}{\alpha} + \frac{I'}{\alpha} \right).$$

Wir wollen das Verhältniß  $\frac{I}{\alpha}$  kurz den Reizwerth nennen und erhalten als Regel, daß bei Mischung von zwei unter einander gleichartigen homogenen Lichtern als Reizwerth der Mischung die Summe der Reizwerthe der Componenten einzusetzen ist. Wirkt aber auf die die Elementarempfindung erzeugenden Endapparate eine Mischung von Lichtern verschiedener Wellenlänge, so muß zur Aufstellung der Mischformel eine allerdings sehr wahrscheinliche Voraussetzung herangezogen werden. Die Intensitäten einfach addiren geht selbstverständlich nicht, da man in keiner Weise berechtigt ist, Intensitäten verschiedenen Lichtes als physiologisch gleichwerthig anzusehen. Da machen wir für die Elementarempfindungen die Annahme, daß zwei gleich hell erscheinende Lichter einzeln zu

einem dritten Licht hinzugemischt wieder zwei gleich helle Lichter ergeben. Liegen also die beiden homogenen Lichter von der Wellenlänge  $\lambda$  und  $\lambda'$  und den Intensitäten  $I$  und  $I'$  vor, so ruft das erste die Helligkeit

$$x = A \log \left( 1 + \frac{I}{a} \right),$$

das zweite die Helligkeit

$$x' = A \log \left( 1 + \frac{I'}{a'} \right)$$

hervor. Dem zweiten Licht wird allgemein auch eine andere Eigenlichtintensität  $a'$  entsprechen. Dem zweiten Lichte entspricht gewiss eine „äquivalente“ Intensität  $I''$  des ersten Lichtes von der Wellenlänge  $\lambda$ ; es wird nämlich bei der Intensität  $I''$  das erste Licht dieselbe Helligkeit hervorrufen wie das zweite Licht bei der Intensität  $I'$ ; also wird sein:

$$A \log \left( 1 + \frac{I''}{a} \right) = A \log \left( 1 + \frac{I'}{a'} \right)$$

und daher:

$$I'' = \frac{a}{a'} \cdot I'.$$

Nach der obigen Voraussetzung kann ich nun bei der Mischung statt des Lichtes von der Wellenlänge  $\lambda'$  ein dem ersten gleichartiges von der Wellenlänge  $\lambda$  und der Intensität  $I''$  supponiren. Jetzt kann ich aber die Regel für die Mischung gleichartiger Lichter anwenden und erhalte für die Helligkeit des Mischlichtes

$$x_m = A \log \left( 1 + \frac{I + I''}{a} \right) = A \log \left( 1 + \frac{I}{a} + \frac{I'}{a'} \right).$$

Dies zeigt, daß auch bei verschiedenartigem Lichte die Regel erhalten bleibt, daß bei Elementarempfindungen der Reizwerth des Mischlichtes gleich der Summe der Reizwerthe der Komponenten ist. Die Intensitäten heterogenen Lichtes gehen bei der Mischung nicht mit gleichem Gewichte ein, sondern mit einem Gewichte, das der entsprechenden Eigenlichtintensität reciprok ist; für große Intensitäten wird die Formel wieder einfacher, indem der Einsler in der Klammer wegbleiben kann.

Die Voraussetzung, daß zu einem Lichte gleichhelle Lichter gemischt wieder ein gleichhelles Mischlicht geben, ist aber keine nothwendige. Ist z. B. die Empfindlichkeit  $A$  eine Function der

Wellenlänge, so fällt die Voraussetzung; denn zwei gleichhell aussehende heterogene Lichter werden, wenn wir jede ihrer Intensitäten auf das Doppelte steigern (d. h. soviel als wir mischen zu gleichaussehendem beiderseits gleichaussehendes —), ungleich hell. Ob es aber physiologisch möglich ist, daß derselbe Endapparat für verschiedenartiges Licht auch verschiedene Empfindlichkeiten besitzen kann, erscheint doch sehr fraglich und unwahrscheinlich. Jedenfalls genügt es vor der Hand für die Elementarempfindungen, welche ja nur farblose Helligkeitsunterschiede liefern, die Empfindlichkeiten als unabhängig von der Wellenlänge anzusehen.

Die photographische Platte zeigt z. B. die Ungültigkeit unserer Voraussetzung; zwei heterogene Lichter, die gleiche Schwärzungen erzeugen, erzeugen bei verdoppelter Lichtintensität verschiedene Schwärzungen. Doch erscheint mir die Erklärung dieser dem PURKINJE'schem Phänomen analogen Erscheinung darauf zu beruhen, daß die Platte aus unendlich vielen Elementen von ganz verschiedenen Empfindlichkeiten zusammengesetzt ist. Wir werden in der Folge sehen, daß die Empfindlichkeiten  $A$  für jede Elementarempfindung unserer Gesichtsempfindungen verschieden ist, und daß das PURKINJE'sche Phänomen gerade darin seine Ursache hat, ebenso wie auch die Abweichungen vom NEWTON'schen Mischungsgesetze und die Wanderung des neutralen Punktes der Dichromaten. Sollte aber sich herausstellen, daß die Empfindlichkeiten auch von der Wellenlänge abhängen, so bin ich derzeit nicht im Stande eine Mischformel anzugeben.

*(Eingegangen am 20. Mai 1902.)*

---