

Theorie des Talbot'schen Gesetzes.

Von

Karl Marbe.

Mit einer Figur im Text.

Das Gesetz des Talbot.

Wenn zwei Lichtreize successive und periodisch denselben Punkt der Netzhaut treffen, so entstehen entweder der Reihe nach mehrere Empfindungen oder aber eine einzige intensiv und qualitativ constante Empfindung. Letztere ist identisch mit derjenigen Empfindung, welche entstehen würde, wenn das während einer jeden Periode wirkende Licht gleichmäßig über die Dauer der ganzen Periode vertheilt wäre¹⁾.

1) Die Richtigkeit dieses, in weniger allgemeiner Form zuerst von Talbot (Philos. Magaz. Nov. 1834 S. 327) ausgesprochenen und unter dessen Namen bekannten Gesetzes ist durch v. Helmholtz (Handbuch der physiologischen Optik 2. Aufl. p. 483 ff.), Plateau (Bulletin de l'Académie royale 1835 Nr. 2, S. 52 u. Nr. 3, S. 89 u. Pogg. Ann. Bd. 35, S. 457 ff.), Kleiner (Pflügers Archiv Bd. 18, S. 542 ff.), Lehmann (Philos. Stud. Bd. 4, S. 232 ff.), Wiedemann u. Messerschmitt (Wied. Ann. Bd. 34. [1888]. S. 463 ff.), G. N. Stewart (Proc. Roy. Soc. Edinb. 1888. 15, S. 441 ff.) experimentell bestätigt worden. — Dass, wenn die Reizdauern geringer als eine Achtmilliontelsecunde sind, eigenthümliche Farbenscheinungen auftreten (Stewart *ibid.*), kann man nicht gegen die allgemeine Gültigkeit des Gesetzes ins Feld führen, ebensowenig die bekannten Versuche von Adolf Fick (Müllers Archiv 1863 S. 739 ff.). Mit Recht erblickt Aubert (Physiologie der Netzhaut S. 350 f. u. Physiol. Optik S. 516) in denselben geradezu eine Bestätigung des Talbot'schen Satzes. Neuerdings hat E. S. Ferry (The physikal Review Bd. 1 [1894] S. 338 ff.) auf Grund von Experimenten behauptet, dass die nach dem Talbot'schen Satze berechneten Helligkeiten größer seien als

Für zwei successiv-periodische Reize, welche plötzlich und für alle Retinapunkte gleichzeitig mit einander abwechseln, gibt es vier Momente, welche das Entstehen einer constanten Empfindung begünstigen:

- 1) Die Verminderung der Reizdauern
- 2) Die Vergrößerung des Unterschiedes der Reizdauern
- 3) Die Verminderung des Unterschiedes der Reizintensitäten
- 4) Die Verstärkung der mittleren Intensität der beiden Reize.

Baader glaubte aus einer Reihe von Versuchen schließen zu können, dass die Zahl der während einer bestimmten Zeit erforderlichen Perioden mit der mittleren Intensität der Reize zunähme¹⁾. Hiernach würde die Verstärkung der Gesamtintensität nicht, wie ich unter 4) angegeben habe, für die Verschmelzung günstig, sondern vielmehr ungünstig sein. Allein die Baader'schen Versuche beweisen thatsächlich nichts für den Einfluss der Gesamtintensität auf die kritische Periodendauer. Wenn man nämlich, wie Baader, eine leuchtende und eine lichtlose Fläche abwechselnd auf das Auge wirken lässt, so verhalten sich, welche Lichtstärke man der leuchtenden Fläche auch geben mag, die mittleren Gesamtintensitäten der Reize ebenso wie ihre Unterschiede. Und wenn man, der anderen Baader'schen Versuchsanordnung entsprechend, einer aus

die direct beobachteten, für den Fall, dass man Licht und Dunkelheit periodisch und so schnell auf das Auge wirken lasse, dass eine constante Empfindung entstehe. Nach Ferry ist der Fehler um so größer, je kürzere Zeit das Licht im Verhältniss zur Dunkelheit einwirkt. Da er aber keine besonderen Vorkehrungen getroffen hat, um falsches Licht auszuschließen, so darf man wohl annehmen, dass die Dunkelheit zwischen den einzelnen Reizen keine absolute war, was Ferry nicht in Rechnung zog. Es ist klar, dass sich dieser Fehler um so mehr geltend machen musste, je länger die Intermissionen im Verhältniss zu den Reizen dauerten. Die fraglichen Versuche dürften daher eher gegen die Ferry'sche Versuchsanordnung als gegen das Talbot'sche Gesetz sprechen. — Die von Brücke constatirte, bekannte Thatsache, dass rotirende Scheiben bei Geschwindigkeiten, bei welchen noch keine constante Empfindung eintritt, heller erscheinen, als wenn sie eine constante Empfindung erzeugen (Moleschotts Unters. z. Naturlehre Bd. IX [1863] S. 367ff.), bildet gleichfalls keine Ausnahme des Talbot'schen Gesetzes. Denn sie erstreckt sich auf Successionsgeschwindigkeiten, auf welche das Talbot'sche Gesetz sich gar nicht bezieht.

1) Baader, Über die Empfindlichkeit des Auges für Lichtwechsel. Diss. Freiburg i. B. 1891. S. 27 ff. u. S. 38.

einem weißen und einem schwarzen Sector bestehenden Scheibe verschiedene Beleuchtungen gibt, so verhalten sich die mittleren Gesamttintensitäten nahezu ebenso wie die Unterschiede der Reize, weil der schwarze Sector durch die verschiedenen Beleuchtungen nur wenig an Helligkeit gewinnt und daher hinsichtlich seiner Intensität nahezu gleich Null ist. Wenn aber bei einer bestimmten Versuchsanordnung gleichen Aenderungen der mittleren Intensität gleiche oder doch nahezu gleiche Aenderungen der Reizunterschiede entsprechen, so kann man offenbar einen sichern Schluss über den Einfluss des einen oder andern der beiden Momente auf die kritische Periodendauer unter keinen Umständen ziehen und man darf die wachsende mittlere Intensität für die mit ihr parallel gehende Vergrößerung der in einer bestimmten Zeit erforderlichen Periodenzahl um so weniger verantwortlich machen, als es ja feststeht, dass die letztere mit wachsendem Reizunterschied größer wird¹⁾. Beweisen somit die Versuche Baader's nichts hinsichtlich des Einflusses der mittleren Helligkeit auf die kritische Periodendauer, so folgt das Gegentheil der Baader'schen These aus einem Satz, welchen ich früher experimentell bewiesen habe. Dieser Satz lautet:

Es ist für die Verschmelzung günstiger, wenn die Dauer des intensiveren Reizes, als wenn diejenige des weniger intensiven überwiegt²⁾.

Dies heißt nichts anderes, als dass (unter sonst vollkommen gleichen Bedingungen) die kritische Periodendauer mit wachsender mittlerer Intensität zunimmt.

Wenn man zur Erzeugung der successiven Reize Flächen anwendet, welche nacheinander am Fixationspunkt vorbeieilen, wie dies bei der Benützung rotirender Scheiben der Fall ist, so tritt zu den bisher genannten Momenten ein fünftes hinzu, das der Conturenbewegung. Je langsamer sich nämlich (unter sonst vollkommen gleichen Umständen, d. h. wenn die Reizdauer, ihre und der Reizintensitäten Unterschiede sowie die mittlere Intensität der

1) Baader a. a. O. S. 30 ff.

2) Philos. Stud. IX. S. 397 f. — Die Richtigkeit dieses Satzes habe ich unterdessen wiederholt mit Herrn Henri in Leipzig nachgeprüft und bestätigt gefunden.

beiden Reize für eine bestimmte Netzhautstelle unverändert bleiben) die Flächenconturen bewegen, desto weniger verschmelzen die Reize¹⁾.

Alles, was bis jetzt angeführt wurde, gilt in gleicher Weise für farbiges und für farbloses Licht. Für das Talbot'sche Gesetz ist dies seit langer Zeit²⁾ bekannt. Dass auch der Einfluss der S. 280 f. besprochenen fünf Momente auf die Verschmelzung bei farbigem Licht derselbe ist, wie bei farblosem, davon habe ich mich durch eine Reihe von Experimenten und Ueberlegungen überzeugt, welche ich im Anhang (S. 291 ff.) mitgetheilt habe³⁾.

1) Filehne, Graefe's Archiv, Bd. 31, Abt. 2, S. 20 ff.; Bellarminow, *ibid.* Bd. 35. S. 39 ff.; Baader a. a. O. S. 34 ff. Auch ich habe die im Text erwähnte Thatsache nach einer der früher (a. a. O. S. 386 ff.) beschriebenen ähnlichen Anordnung gemeinschaftlich mit Herrn Dr. Kiesow in Leipzig untersucht und bestätigt gefunden. Den von Filehne (a. a. O. S. 21) im speciellen angegebenen Verlauf der zusammengehörigen Sectoren- und Intermittenzahlen (vergl. Filehne a. a. O. S. 20) habe ich jedoch nicht constatiren können. Vielleicht waren meine Versuche in Folge der nothwendigen geringen Geschwindigkeiten der Scheibenumdrehungen zu ungenau.

Wenn man mittelst rotirender Scheiben Versuche über die vier zuerst (S. 280) genannten Momente anstellt, so bedeutet die Conturenbewegung eine Fehlerquelle (Stern, Zeitschr. f. Psych. u. Phys. d. Sinnesorg. Bd. 7. S. 215 ff.). Wenn man aber stets nur zwei Sectoren anwendet, so darf man diesen Fehler vernachlässigen. (Baader a. a. O. S. 34.)

Die vollständigste Zusammenfassung der über den Einfluss der für die Verschmelzung kritischen Momente handelnden Litteratur findet man bei Stern a. a. O. S. 251 ff. Vergl. außerdem die Arbeit von Kleiner, Züricher Vierteljahrsschrift. 1874. S. 105 ff.

2) v. Helmholtz, a. a. O. S. 485 f.

3) Aus den Arbeiten von Nichols (*American Journal of science* Bd. 28 [1884] S. 243 ff.) und Rood (*ibid.* Bd. 46 [1893] S. 173 ff.) folgt, dass der durch den Farbenunterschied bedingte Einfluss auf die zur Verschmelzung erforderliche Geschwindigkeit zweier successiv periodischer Reize verschwindend klein ist gegenüber dem Einfluss der Helligkeiten. Dass aber der Farbenunterschied zweier Reize als solcher für die Verschmelzung ungünstig ist, ist selbstverständlich: zwei successiv-periodische Reize, die sich nur durch die Lichtart unterscheiden, verschmelzen, wie wir gewiss ohne weiteres annehmen dürfen, nur, wenn die genannten fünf Momente genügend zur Anwendung gebracht sind. Die Untersuchungen des Einflusses des Farbenunterschiedes auf die zur Verschmelzung erforderlichen Verhältnisse würden für farbentheoretische Fragen von großer Fruchtbarkeit sein. Meine Bemühungen, die experimentellen Untersuchungen in dieser Richtung auszudehnen, sind bis jetzt an Versuchsschwierigkeiten gescheitert.

Allgemeine Theorie des Talbot'schen Gesetzes.

Eine vollständige Theorie des Talbot'schen Gesetzes hat erstens zu erklären, warum überhaupt bei einer gewissen Successionsgeschwindigkeit der Reize statt mehrerer successiver Empfindungen diejenige Empfindung entsteht, welche vorhanden wäre, wenn das während einer jeden Periode wirkende Licht auf die Dauer der ganzen Periode gleichmäßig vertheilt wäre, und zweitens, warum die erwähnten fünf Momente die kritische Periodendauer in dem angegebenen Sinn beeinflussen¹⁾.

Ich werde im Folgenden beide Aufgaben in Verbindung mit correcten physiologisch-psychologischen Grundanschauungen zu lösen versuchen. Dabei werde ich vom Einfluss der Conturbewegung zunächst absehen und denselben erst im dritten Capitel behandeln. Ich gehe aus von allgemeinen photochemischen That-sachen²⁾.

Wenn Licht einen Stoff bestrahlt, so bewirkt es mitunter eine chemische Zersetzung in demselben. Die Größe des zersetzten Theiles, die sogenannte photochemische Wirkung ist für Substanzen, welche nicht mit Hülfe anderer regenerirt werden, eine Function des photochemischen Gesamteffectes. Dieser ist gleich der Summe der in den einzelnen Zeiten wirkenden Lichtintensitäten oder der photochemischen Elementareffecte. Wenn somit ein Stoff

1) Die erste dieser Fragen suchte S. Exner (Pflüger's Archiv Bd. 3 S. 217 ff.) zu beantworten und zwar für den speciellen Fall, dass ein Reiz periodisch durch einen lichtleeren Zwischenraum unterbrochen wird. Es soll dann während des Reizes die Erregung um ebensoviel steigen, als sie während der Intermission fällt, und bei hinreichender Geschwindigkeit sollen die einzelnen Erregungsschwankungen nicht mehr bemerkt werden. Der Verlauf der Erregungen findet demnach nach Exner in einer sägeartigen Curve seinen Ausdruck und die constante Empfindung tritt bei einer gewissen geringen Größe der Sägezähne ein. Die obigen Ausführungen werden, wie ich hoffe, lehren, dass es überflüssig ist, so complicirte und exacte (vergl. Fick's a. a. O. S. 748, der übrigens vor Exner ganz ähnliche Betrachtungen angestellt hatte) Functionsweisen der Retina zu hypostasiren. — Auf den Exner'schen ähnlichen Anschauungen beruht der Beweis des Talbot'schen Satzes von F. Boas, Annalen der Physik und Chemie. Neue Folge, Bd. 16 (1882).

2) Die Terminologie der Photochemiker ist, wie man aus dem folgenden Text ersehen wird, dem vorliegenden Zweck entsprechend etwas modificirt worden.

während n Zeitelemente durch Licht bestrahlt wird, so ist der photochemische Gesamteffect gleich $i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_{n-2} + i_{n-1} + i_n$, wobei die einzelnen i -Werthe die photochemischen Elementareffecte repräsentiren ¹⁾.

Für den lichtempfindlichen Stoff in unserer Netzhaut, welcher zu denjenigen Substanzen gehört, deren Zersetzung gegebenen Falls mit Hülfe anderer regenerirt wird, ist die photochemische Wirkung (Erregung) keine Function des photochemischen Gesamteffectes. Denn wenn wir eine weiße Fläche zwei Secunden lang fixiren, so ist die Empfindung nach der zweiten Secunde nicht intensiver und die Erregung demnach nicht größer als nach der ersten. Auch sind die denselben Reizen entsprechenden Empfindungen jahraus jahrein gleich, was doch nicht möglich wäre, wenn die entsprechenden Erregungen Functionen der Summe aller früher zur Wirkung gelangter Elementareffecte wären.

Kommt für die einem bestimmten Zeitelement entsprechende retinale Erregung auch der photochemische Gesamteffect nicht in Betracht, so ist dieselbe doch nicht durch den dem Zeitelement entsprechenden Elementareffect bedingt. Denn wenn jede Erregung lediglich eine Function derjenigen Intensität wäre, welche während derselben gerade das Auge afficirt, so könnten niemals mehrere successive Reize eine constante Empfindung erzeugen und der Satz des Talbot würde niemals zutreffen.

Wenn die retinale Erregung in einem bestimmten Augenblick weder eine Function des photochemischen Gesamteffectes noch des dem betreffenden Augenblick entsprechenden Elementareffectes ist, so können wir vernünftiger Weise nur annehmen, dass sie eine Function des gleichzeitigen und einiger direct vorangehender Elementareffecte ist.

Wir rechnen das Zeitelement zu einer Tausendstelsecunde (1σ) und bezeichnen diejenigen Elementareffecte, welche für die Erregung

1) Der Satz, dass gleichen photochemischen Gesamteffecten gleiche Wirkungen entsprechen, scheint für intermittirendes, auf photographische Platten und dergl. wirkendes Licht unter gewissen Bedingungen falsch (Abney, »On a failure of the law in photography etc.« Proc. Roy. Soc. 54, 143—47 1893), unter andern (Scheiner, »Ein neues Sensitometer«, Zeitschr. f. Instrumentenkunde. 1894, S. 203f.) aber doch zutreffend zu sein.

in einem bestimmten Moment in Betracht kommen (mit Einschluss des dem betreffenden Zeitelement entsprechenden Effects), als die charakteristische Effectengruppe.

Ueber die Anzahl derjenigen Elementareffecte, aus welchen eine charakteristische Effectengruppe besteht, können wir uns aus Versuchen von S. Exner¹⁾ eine ungefähre Vorstellung bilden. Aus den fraglichen Experimenten ergibt sich, dass, wenn ein gewisser Reiz im Dunkeln 8 σ lang auf das Auge wirkt, am Ende der achten Tausendstelsecunde eine weniger intensive Empfindung und also eine geringere photochemische Wirkung entsteht, als wenn der Reiz länger währt. Ueberhaupt zeigt sich, dass mit der Dauer des Reizes die Erregung wächst, bis die Dauer einen bestimmten kritischen Werth erreicht hat; ob sie nur den letztern oder irgend einen größern Werth erreicht, ist für die Größe der Erregung gleichgültig. Exner fand nun als kritische Dauer für den untersuchten Reiz, dessen absolute Intensität übrigens nicht genau bestimmt wurde, den Werth 166 σ . Weil demnach in der hundertsechundsechzigsten Tausendstelsecunde der Reizwirkung die Erregung gerade eben nicht mehr durch die Dunkelheit bestimmt wird, so ist die Anzahl der zur charakteristischen Effectengruppe gehörigen Elementareffecte bei dem fraglichen Reiz und für das hundertsechundsechzigste auf die Dunkelheit folgende Zeitelement gleich 166. — Diese Zahl gibt uns, wie gesagt, nur einen ungefähren Anhalt für die Anzahl der charakteristischen Elementareffecte. Denn die Menge der für die Erregung in einem bestimmten Zeitelement factisch charakteristischen Elementareffecte schwankt offenbar mit der Größe und Anordnung derjenigen Elementareffecte, welche für die Erregung in einem bestimmten Moment möglicher Weise in Betracht kommen.

Dass nun die Erregungen in zwei verschiedenen Zeitelementen gleich sind, wenn sie durch gleiche charakteristische Effectengruppen bestimmt sind, ist selbstverständlich und bedarf keines Beweises. Nach unseren gesammten psychophysischen Erfahrungen müssen wir aber annehmen, dass nicht nur absolut gleichen charakteristischen Effectengruppen, sondern auch solchen, die sich nur wenig von

1) Sitzungsber. der Wiener Akademie Bd. 58 (1868) S. 620.

einander unterscheiden, gleiche Erregungen entsprechen, und in Anlehnung an unsere Kenntniss der Unterschiedsempfindlichkeit können wir schließen, dass der Unterschied, welchen zwei charakteristische Effectengruppen haben dürfen, um eben noch gleiche Erregungen zu erzeugen, mit der mittleren Größe der Elementareffecte der beiden charakteristischen Effectengruppen wächst¹⁾.

Bei successiv-periodischen Reizen sind die aufeinanderfolgenden charakteristischen Effectengruppen unter sich um so ähnlicher, je gleichmäßiger das Licht auf die Zeit, während welcher successiv-periodische Reize wirken, vertheilt ist. Mit der Gleichmäßigkeit der Lichtvertheilung wächst aber nicht nur die Aehnlichkeit der charakteristischen Effectengruppen unter sich, sondern auch die Aehnlichkeit mit denjenigen charakteristischen Effectengruppen, welche vorhanden wären, wenn das Licht absolut gleichmäßig vertheilt wäre.

Die Gleichmäßigkeit der Lichtvertheilung ist um so größer, je kleiner erstens die Zeiten sind, während welcher gleich viel Licht ins Auge fällt, und zweitens, je geringer die mittlere Variation der photochemischen Elementareffecte innerhalb dieser Zeiten ist.

Nach diesen Auseinandersetzungen können wir die Theorie des Talbot'schen Satzes direct ableiten und den Einfluss der vier zuerst genannten Momente (S. 280) auf das Verschmelzungsphänomen ohne weiteres verstehen.

Mit der Verminderung der Reizdauern nehmen nämlich auch die Zeiten ab, innerhalb welcher gleichviel Licht auf das Auge einwirkt. Je kürzer aber diese werden, desto gleichmäßiger vertheilt sich das Licht auf die gesammte Zeitstrecke, während welcher es die Retina bestrahlt. — Durch die Vergrößerung des Unterschiedes der

1) Manche Gelehrte nehmen an, dass die Thatsachen der Unterschiedschwelle nicht in den peripheren, sondern in den centralen Erregungsvorgängen oder auch in denjenigen der centripetalen Nerven oder endlich in allen drei Elementen ihr physiologisches Substrat finden; diese Forscher werden daher vielleicht den Satz, dass ähnliche charakteristische Elementareffecte unter Umständen gleiche Erregungen hervorrufen, nicht ohne weiteres für die retinalen Erregungen zugeben. Es ist aber leicht einzusehen, dass es für unser Problem gleichgültig ist, ob wir diese oder jene der vier genannten Auffassungen zu Grunde legen. Der Einfachheit wegen sind alle Ausführungen im Text lediglich auf die retinale Erregung bezogen worden.

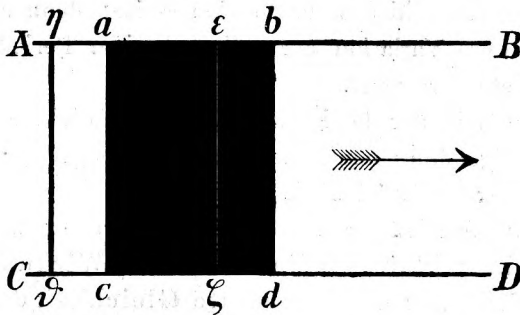
Dauern wird die mittlere Variation der während einer Periode wirkenden Elementareffecte vermindert. (Sind nämlich beide Reize gleich lang, so sind am wenigsten gleiche Elementareffecte vorhanden, die mittlere Variation derselben ist also am größten. Je mehr die Dauer eines Reizes auf Kosten derjenigen des andern wächst, desto mehr gleiche Elementareffecte sind vorhanden, desto geringer wird daher die mittlere Variation.) Mit der Verminderung der mittleren Variation der während einer Periode wirkenden Elementareffecte wird aber gleichfalls die Gleichmäßigkeit der Lichtvertheilung erhöht. — Dasselbe geschieht durch die Verminderung des Intensitätsunterschiedes der beiden Reize; denn auch dadurch wird die mittlere Variation der während einer Periode wirkenden Elementareffecte verringert.

Weil nun mit der Gleichmäßigkeit der Lichtvertheilung die aufeinander folgenden charakteristischen Effectengruppen unter sich ähnlicher werden und sich denjenigen charakteristischen Effectengruppen nähern, welche vorhanden wären, wenn sich das Licht gleichmäßig auf seine Wirkungszeit vertheilte, weil ferner nicht absolute Gleichheit der charakteristischen Effectengruppen, sondern nur hinreichende Aehnlichkeit für die Entstehung gleicher Erregungen nöthig ist, — so müssen Verminderung der Reizdauern, Vergrößerung des Unterschiedes derselben und Verminderung des Unterschiedes der Reizintensitäten, wenn sie genügend zur Anwendung gebracht werden, dieselben Erregungen erzeugen, welche bei absolut gleicher Lichtvertheilung vorhanden wären.

Durch die Verstärkung der Gesamtintensität der Reize werden die einzelnen Elementareffecte vergrößert; hiermit wachsen aber die Unterschiede, welche die charakteristischen Effectengruppen haben müssen, um verschiedene Erregungen zu erzeugen (S. 285). Es ist also auch begreiflich, dass durch die hinreichende Verstärkung der Gesamtintensität in den einzelnen Zeitelementen gleiche Erregungen entstehen können, und dass also die Verstärkung der Gesamtintensität die Verschmelzung begünstigt.

Theorie der Conturenbewegung.

Die Theorie, welche bisher vorgetragen wurde, gilt unter allen Umständen für jeden einzelnen Netzhautpunkt. Für den Fall, dass die beiden Reize gleichzeitig für alle Netzhautpunkte abwechseln (S. 280 f.), ist demnach nichts weiteres hinzuzufügen. Für den Fall der Conturenbewegung (S. 281), wo die nebeneinanderliegenden Netzhautpunkte in den einzelnen Zeitelementen teilweise verschieden gereizt werden, bedarf es jedoch weiterer Ausführungen.



Nehmen wir an, wir fixiren einen Punkt der Fläche $abcd$ (vgl. die Fig.). Ein Teil der Retina wird dann durch das von der Fläche ausgestrahlte Licht, ein anderer durch das weiße Licht der benachbarten Papierstellen afficirt. Wenn wir die Fläche so lange fixirt haben, dass vor der Fixation ins Auge gelangtes Licht für die Erregung in demselben nicht mehr in Betracht kommt, so sind die Erregungen für ein und denselben Netzhautpunkt in jedem Moment gleich und da, wo die Grenzen des Flächenbildes auf der Retina abgebildet werden, stoßen Netzhauttheile zusammen, für welche in jedem Zeitelement ganz verschiedene charakteristische Effectengruppen gelten. Wir sehen daher in jedem Zeitelement deutlich die Grenzen, welche die Fläche mit dem übrigen Gesichtsfeld bildet.

Nehmen wir nun an, die Fläche bewege sich ganz langsam auf der Bahn $ABCD$ in der Pfeilrichtung, während sich unser Auge in absoluter Ruhe befindet. Es fällt dann in jedem Zeitelement ebensoviel Licht ins Auge, als wenn sie sich nicht bewegt. Aber waren bei ruhender Fläche die charakteristischen Effectengruppen

für ein und denselben Netzhautpunkt in jedem Zeitelement gleich, stießen ferner in jedem Moment an den Bildern der Flächengrenzen Retinatheile mit ganz verschiedenen charakteristischen Effectengruppen und daher verschiedenen Erregungen zusammen, so wechseln jetzt die Erregungen an ein und demselben Netzhautpunkt, und an denjenigen Retinalinien, welche den objectiven Flächenconturen in jedem Zeitelement entsprechen, findet (natürlich sofern sie nicht der Bewegungsrichtung parallel laufen) kein plötzlicher, sondern ein allmählicher Uebergang der Erregungen statt.

Weil nämlich die Erregungen in jedem Zeitelement Functionen einer ganzen Reihe von Elementareffecten sind, so ist z. B. in dem Moment, wo ein Netzhautpunkt eben von dem dunkeln Licht der Fläche gereizt wird, auch noch das weiße Licht maßgebend, von welchem er kurz vorher gereizt wurde; und wenn ein Netzhautpunkt einige Zeit vom dunkeln Licht der Fläche und vorher vom weißen Licht der Umgebung gereizt wurde, so ist, wie groß die Anzahl der zu einer charakteristischen Effectengruppe gehörigen Elementareffecte in jedem Fall auch sein mag, die Erregung offenbar um so größer, je kürzere Zeit er vom dunkeln Licht gereizt wurde. Die Retinalinie, welche der objectiven Linie bd entspricht, bildet somit in jedem Moment der Bewegung nicht die Grenze zwischen gänzlich verschieden erregten Netzhautpunkten, sondern zwischen ihr und einer andern ihr parallelen, zwischen den Bildern von ac und bd verlaufenden Linie (etwa $\varepsilon\zeta$) gehen die Erregungen der nebeneinanderliegenden Netzhautpunkte allmählich von der Weißerregung zur Dunkelerregung über. — Aus ganz analogen Betrachtungen lässt sich schließen, dass in jedem Moment der Bewegung auch zwischen dem Netzhautbild von ac und dem einer andern Linie (etwa $\eta\vartheta$) die Erregungen der nebeneinanderliegenden Retinamente von der Dunkelerregung zur Weißerregung übergehen.

Die Größe, welche die Rechtecke $ac\vartheta\eta$ und $bd\varepsilon\zeta$ in jedem Zeitelement haben, ist (wie man nach den bisherigen Ausführungen von selbst einsehen wird) um so kleiner, je langsamer sich die Fläche $abcd$ bzw. ihre Conturen ac und bd bewegen; je kleiner nun die fraglichen Rechtecke in einem bestimmten Zeitelement sind, desto plötzlicher findet der Uebergang der Erregungen innerhalb dieser Rechtecke statt, desto verschiedener sind daher inner-

halb derselben die in der Bewegungsrichtung aneinanderstoßenden Netzhautpunkte in jedem Zeitelemente erregt.

Nehmen wir nun an, statt der einen Fläche $abcd$ bewegten sich eine Reihe dunkler Flächen in constanten Abständen ganz langsam am Fixationspunkt vorbei. An jedem idealen Conturenbild auf der Retina entstehen dann den Figuren $ac\eta\theta$ und $bd\varepsilon\zeta$ analoge Rechtecke. Mit abnehmender Bewegungsgeschwindigkeit der Flächen bzw. ihrer Conturen nimmt auch jetzt die Größe der besagten Rechtecke ab, während die Unterschiede der innerhalb der Rechtecke in der Bewegungsrichtung aneinanderstoßenden Retinapunkte wachsen. Mit den Erregungsunterschieden der den fraglichen Rechtecken zugehörigen Retinapunkte wachsen die mittleren Unterschiede der Erregungen der Netzhautpunkte schlechthin.

Wir haben bisher angenommen, dass sich die succedirenden Flächen nur ganz langsam bewegen. Dies ist nun freilich, wenn die Reize wirklich zur Verschmelzung gelangen, niemals der Fall. Die Verhältnisse liegen dann auch nicht so einfach als bei langsamer Bewegung der Flächen: die oft erwähnten Rechtecke überdecken sich. Aber, wie sehr dies auch der Fall sein mag, immer sind die Unterschiede der erregten nebeneinanderliegenden Netzhautpunkte um so größer, je langsamer sich die Conturen bewegen.

Weil dies der Fall ist, weil aber die Größe der einzelnen objectiven, weißen und schwarzen Flächen ohne Einfluss ist auf den mittleren Erregungsunterschied der verschiedenen Netzhautstellen, — so ist es für die Verschmelzung ungünstiger, wenn Flächen von der Größe a und der Geschwindigkeit b am Auge vorbeiziehen, als wenn solche von der Größe $2a$ und der Geschwindigkeit $2b$ am Fixationspunkt vorüberziehen. Die Verlangsamung der Conturenbewegung muss daher für die Entstehung constanter Empfindungen ungünstig sein ¹⁾.

1) Weil, wenn die Conturenbewegung unter Gleichbleiben der Momente 1—4 (S. 280) verlangsamt wird, die in jedem Zeitelement auf der Retina abgebildeten Flächen sich verkleinern und daher zu gleicher Zeit in demselben Retinalbezirk mehr verschieden helle Flächen abgebildet werden, hat Baader (a. a. O. S. 36) im Gegensatz zu Filehne (a. a. O. S. 22) es für möglich gehalten, dass dieser Umstand und nicht die Verlangsamung der Conturenbewegung als solche

Schlussbemerkungen. Wir sind hiermit am Ende unserer Theorie des Talbot'schen Satzes angelangt. Unsere Ausführungen gelten ebenso wie die Thatsachen, auf die sie sich beziehen, für farbiges und für farbloses Licht. Sie besagen, dass unser Gesetz insoweit durch centrale Vorgänge bedingt ist, als das Sehen überhaupt in solchen sein physiologisches Substrat findet. Die Thatsachen des Talbot'schen Satzes sind aber peripher, insofern das, was wir in jedem Zeitelement sehen, durch die in dem fraglichen Zeitelement vorhandenen Retinalerregungen bestimmt wird, oder besser (mit Berücksichtigung der Zeit, die zwischen den peripheren und den ihnen zugehörigen centralen Erregungen verfließt), insofern es durch diejenigen Erregungen bestimmt wird, welche kurz vor den ihnen entsprechenden Empfindungen in der Retina vorhanden sind.

Anhang.

(Experimente aus dem psychologischen Institut des Herrn Prof. Martius in Bonn.)

In der vorstehenden Arbeit (S. 282) sind Versuche erwähnt, aus denen ich geschlossen habe, dass farbiges successive und periodisch wirkendes Licht, sowie farbiges und farbloses unter denselben Bedingungen eine constante Empfindung erzeugt wie successive farblose Reize. Im Folgenden sollen nun eine Reihe von Tabellen, welche aus den fraglichen Versuchsergebnissen gewonnen sind, mitgetheilt werden.

Bei den Experimenten, auf welche sie sich beziehen, fungirten die Herren Christian Birch-Reichenwald-Aars und Friedrich Kretzmann und ich selbst als Beobachter.

Sämmtliche Versuche wurden bei Gasglühlichtbeleuchtung und in der Dunkelkammer ausgeführt. Als Beobachtungsobjecte benutzte ich rotirende Scheiben mit zwei verschiedenen Sektoren, von denen entweder nur einer oder beide farbig waren. Als Rotations-

für die Verschmelzung ungünstig sei. Für diese Annahme lässt sich meines Erachtens nichts positives angeben. Im Gegentheil, die größere Anzahl der zu gleicher Zeit die Netzhaut reizenden Flächen dürfte eher die Verschmelzung begünstigen (Synkrasie, Mischung durch Juxtaposition). — Ueber die mit der Theorie der Conturenbewegung zusammenhängende allgemeine Theorie der Bewegungswahrnehmung vgl. Stern a. a. O. S. 321 ff.

apparat diente ein von Herrn Mechaniker Zimmermann in Leipzig nach meinen Angaben gebautes Instrument¹⁾, welches durch einen Wassermotor getrieben wurde und mit einem großen, festen Windflügel und einem der Achse anliegenden Tourenzähler versehen ist. Die Umdrehungsgeschwindigkeit wurde dadurch variirt, dass der Assistent den Wasserleitungshahn mehr oder weniger öffnete, wodurch sehr feine Einstellungen erzielt werden können.

Im übrigen war der Gang der Versuche im wesentlichen identisch mit demjenigen, den ich früher²⁾ beschrieben habe. Auch die gesammte Versuchsanordnung war, abgesehen von den erwähnten Aenderungen, ebenso wie die in der fraglichen Arbeit benützte. Die Berechnung der Reizdauern wurde gleichfalls wie früher ausgeführt. Unter Dauer eines Reizes verstehe ich auch jetzt die Zeit, während welcher der betreffende Reiz einen Retinapunkt trifft. Die Zahlen in allen Tabellen bedeuten Tausendstelsekunden.

Die Tabellen I—V enthalten nun in der dritten Columne die für die Entstehung einer constanten Empfindung erforderliche Gesamtdauer. Wenn diese den notirten Werth oder einen geringeren erreicht hat, so verschmelzen die Reize. Die fraglichen Werthe sind jeweils die arithmetischen Mittel dreier Beobachtungsergebnisse. Die vierte Columne der Tabellen enthält die mittlere Variation der drei Zahlen, aus denen die dritte Columne gewonnen ist. Die Werthe in Columne 1 und 2 bezeichnen die Dauern der einzelnen Reize; sie sind aus Columne 3 durch Rechnung gewonnen.

Tabelle I—III beziehen sich auf Versuche, in denen als Reize Grau, Gelb und Blau verwandt wurden. Grau war viel heller als blau, aber dunkler als Gelb. Das Gemisch von 180° Blau + 180° Gelb ergab ein ganz ungesättigtes Gelb.

1) Der Preis desselben beläuft sich auf ca. 40 M.

2) Zur Lehre von den Gesichtsempfindungen, welche aus successiven Reizen resultiren. Philos. Stud. Bd. IX. S. 389 ff.: »Bei den Versuchen mit constanter Beleuchtung wurde folgendermaßen verfahren . . .«

Tabelle I.

Beobachter: Aars.		Reize: Gelb und Blau.	
Dauer des gelben	blauen Reizes.	Gesamtdauer.	Mittlere Variation.
3,5	59,8	63,3	3,6
13,5	40,5	54,0	0,0
20,7	20,7	41,3	0,9
43,0	14,3	57,3	0,9
71,1	4,2	75,3	7,2

Tabelle II.

Beobachter: Aars.		Reize: Gelb und Grau.	
Dauer des gelben	grauen Reizes.	Gesamtdauer.	Mittlere Variation.
3,9	66,1	70,0	0,0
11,5	34,5	46,0	5,3
20,4	20,4	40,8	0,7
43,5	14,5	58,0	2,7
71,1	4,2	75,3	1,8

Tabelle III.

Beobachter: Aars.		Reize: Grau und Blau.	
Dauer des grauen	blauen Reizes.	Gesamtdauer.	Mittlere Variation.
3,7	62,3	66,0	5,3
11,7	35,0	46,7	1,8
21,4	21,4	42,7	3,6
37,5	12,5	50,0	2,7
66,8	3,9	70,7	0,9

Aus allen drei Tabellen ergibt sich, dass bei einer gleichen Dauer der einzelnen Reize die geringste Gesamtdauer nöthig ist; mit wachsendem Unterschied der Dauer wächst auch die Gesamtdauer, welche die Reize haben dürfen, wenn sie noch verschmelzen sollen. Wenn man sich den oben eingetheilten Helligkeitsunterschied der Reize vergegenwärtigt, so sieht man sofort, dass eine geringere Gesamtgeschwindigkeit erforderlich ist, wenn der intensivere Reiz der kürzere von beiden ist, als im umgekehrten Fall.

Diese Versuche zeigen demnach, dass die Verminderung der Reizdauern, die Vergrößerung des Unterschiedes der Reizdauern und (vergl. S. 280f.) die Verstärkung der mittleren Intensität die Verschmelzung begünstigen.

Tabelle IV und V beziehen sich auf Versuche, bei denen Roth und Violett als Reize dienten. Roth war nur um weniges heller als Violett.

Tabelle IV.

Beobachter: Kretzmann.		Reiz: Roth und Violett.	
Dauer des rothen	violetten Reizes.	Gesamtdauer.	Mittlere Variation.
4,6	77,4	82,0	1,3
15,2	45,5	60,7	0,9
30,0	30,0	60,0	0,0
49,5	16,5	66,0	7,0
80,0	4,7	84,7	3,6

Tabelle V.

Beobachter: Verfasser.		Reize: Roth und Violett.	
Dauer des rothen	violetten Reizes.	Gesamtdauer.	Mittlere Variation.
5,7	97,6	103,3	6,0
19,3	58,0	77,3	3,6
36,7	36,7	73,3	3,6
66,0	22,0	88,0	2,7
120,2	7,1	127,3	7,5

Beide Tabellen lehren dasselbe wie die drei ersten; dass die Werthe der Gesamtdauer hier im allgemeinen größer sind als in Tabelle I—III, wird offenbar damit zusammenhängen, dass der Helligkeitsunterschied der Pigmente hier geringer war als dort.

Dass auch bei farbigen Sektoren die Verlangsamung der Conturenbewegung die Verschmelzung der Reize stört, habe ich gleichfalls durch Experimente festgestellt.

Als Reize dienten bei der einen Versuchsgruppe Purpur und Blaugrün, bei der andern Gelb und Grau und bei der dritten Roth und Blau. Purpur war wenig dunkler als Blaugrün, Blau nur wenig dunkler als Roth. Das benützte Grau war dunkler als das oben erwähnte und an Helligkeit viel schwächer als Gelb.

Die folgenden auf diesen Versuchen beruhenden Tabellen enthalten in der ersten Columne die Anzahl der unter sich stets gleichgroßen Sektoren, in der zweiten die größte mittlere Scheibenumdrehungsdauer, die bei der Verschmelzung eintritt. Die in Columne

zwei stehenden Werthe sind jeweils aus drei Versuchen gewonnen. Die dritten Columnen enthalten die mittlere Variation der Rohwerthe, auf denen die zweiten beruhen.

Tabelle VI.

Beobachter: Aars.		Reize: Blaugrün und Purpur.	
Sectorenzahl.	Dauer einer Scheibenumdrehung.	Mittlere Variation.	
2	77,3	3,3	
4	90,0	0,4	
6	120,7	7,2	

Tabelle VII.

Beobachter: Kretzmann.		Reize: Roth und Blau.	
Sectorenzahl.	Dauer einer Scheibenumdrehung.	Mittlere Variation.	
2	57,3	2,2	
4	102,7	6,7	
6	122,7	7,8	

Tabelle VIII.

Beobachter: Kretzmann.		Reize: Gelb und Grau.	
Sectorenzahl.	Dauer einer Scheibenumdrehung.	Mittlere Variation.	
2	48,0	0,0	
4	80,7	6,2	
6	112,7	4,9	

Die »Dauern einer Scheibenumdrehung« nehmen, wie man auf den ersten Blick sieht, langsamer zu als die Sectorenzahlen. Mit der Verlangsamung der Conturenbewegung nimmt also die Geschwindigkeit zu, welche die einzelnen Perioden haben müssen, damit eine constante Empfindung entsteht. Also auch bei farbigem Licht, sowie bei der Verbindung farbigen und farblosen Lichtes ist die Verlangsamung der Conturenbewegung für die Verschmelzung ungünstig. Die großen Werthe für die Dauer einer Scheibenumdrehung in den Tabellen VI und VII müssen offenbar wieder mit dem geringen Helligkeitsunterschied der benützten Pigmente zusammenhängen.

Dass die Verminderung des Helligkeitsunterschiedes farbiger Reize, sowie desjenigen farbiger und farbloser factisch die Entstehung einer constanten Empfindung begünstigt, folgt übrigens

auch aus der allgemein bekannten Thatsache, dass alle rotirenden Scheiben um so leichter verschmelzen, je weniger intensiv sie beleuchtet werden. Dies kann nur daher rühren, dass mit abnehmender Beleuchtung die Helligkeitsunterschiede der Reize abnehmen, wie aus der vorstehenden Polemik gegen Baader (S. 280 f.) und aus der Thatsache, dass auch bei farbigen Reizen die Verminderung der mittleren Helligkeit für die Verschmelzung ungünstig ist, unmittelbar einleuchtet. Auch bei farbigem Licht und bei der Mischung farbigen und farblosen Lichtes wird also das Entstehen einer constanten Empfindung durch die Verminderung des Unterschieds der Helligkeiten begünstigt¹⁾.

1) Vorstehende Arbeit ist Anfangs März dieses Jahres als Habilitationsschrift der Universität Würzburg erschienen.