

Die stroboskopischen Erscheinungen.

Von

Karl Marbe.

Historisches.

Im Jahre 1825 hat Roget¹⁾ eine »optische Täuschung« mitgeteilt, der zufolge die Speichen eines auf dem Boden fortrollenden Wagenrades ruhend und gekrümmt erscheinen, wenn das Rad durch eine Reihe vertical stehender Stäbe betrachtet wird. Dasselbe Phänomen tritt auch ein, wenn das Rad sich nur um seine Achse dreht, die Stäbe sich aber in horizontaler Richtung fortbewegen. Roget gibt eine richtige Erklärung dieser Thatsachen. Sie rühren daher, dass (abgesehen von denjenigen Speichen, die gerade den Stäben parallel sind), in jedem Zeitelement nur Bruchstücke der Speichen ihr Licht auf die Netzhaut werfen. Diese Bruchstücke beleuchten, wenn das Auge einen festen Punkt innerhalb der Radperipherie fixirt, immer dieselben Orte der Retina und bilden, wie Roget eingehend darlegt, Curven. Hieraus und aus den Thatsachen der intermittirenden Gesichtsreize ist es einleuchtend, dass wir bei einer gewissen Geschwindigkeit der Bewegung, statt gerader und bewegter, krumme und ruhende Speichen sehen²⁾.

1) Philosophical Transactions 1825. S. 131 ff., deutsch von Poggendorff in dessen Annalen Bd. V (der ganzen Folge einundachtzigstem), S. 93 ff.

2) Dieselbe Täuschung hat schon im Jahre 1821 der Herausgeber des Quarterly Journal of Sciences and Arts aus einem an ihn gerichteten Brief eines gewissen J. M. kurz mitgeteilt, ohne jedoch eine Erklärung derselben zu geben (vergl. a. a. O. Bd. X. S. 282 f.).

Im Jahre 1829 hat Plateau¹⁾ in einer umfangreichen Arbeit eine Reihe von Thatsachen behandelt, die mit dem Talbot'schen Gesetz aufs engste zusammenhängen. Bei dieser Gelegenheit theilt er einige Beobachtungen mit, die er zwar schon vor dem Erscheinen der Roget'schen Arbeit gemacht hatte, auf die er aber erst nach demselben Werth zu legen begann. Wenn man ein Rad, sagt Plateau, welches mit Zähnen versehen ist, die zur Ebene des Rades senkrecht stehen, in eine solche Lage zum Auge bringt, dass die eine Hälfte der Zähne durch die andere verdeckt wird, so erblickt man, wenn das Rad rotirt, eine ganze Reihe unbewegter Zähne. Wenn sich ferner zwei Räder hinter einander mit beträchtlicher Geschwindigkeit, aber in entgegengesetzter Richtung um eine und dieselbe Achse drehen, so erblickt man, wenn man das eine Rad durch das andere betrachtet, ein Rad mit unbewegten Speichen. Drehen sich die Räder um verschiedene Achsen, so bilden die ruhig gesehenen Zähne Curven.

Es ist klar, dass diese Beobachtungen auf ganz demselben Princip beruhen, wie die von Roget mitgetheilte: An einem und demselben Orte der Netzhaut erscheinen in kurzen regelmäßigen Intervallen dieselben Reize (Zähne oder Speichen), was zur Folge hat, dass man feste und ruhende Bilder sieht.

Ganz analoge Erscheinungen hat Faraday²⁾ im Anschluss an die Roget'schen, aber ohne Kenntniss der Plateau'schen Untersuchungen mitgetheilt. Dieser Forscher erwähnt aber auch den Fall, wo zwei Räder auf gleicher Achse sich mit verschiedener Geschwindigkeit drehen. Bringt man unter diesen Umständen das Auge in die Nähe des einen Rades, um das andere durch dieses zu betrachten, und bewegen sich beide Räder in entgegengesetzter Richtung, so erblickt man das zweite Rad in Bewegung und zwar zieht sich die Bewegung nach der Richtung hin, nach welcher sich das

1) Dissertation sur quelques propriétés des impressions, produites par la lumière etc. Liège 1829, deutsch von Poggendorff in dessen Annalen Bd. XX (der ganzen Folge sechshundneunzigstem), S. 304 ff.

2) Journ. of the Royal Instit. Bd. I. (1831), S. 205 ff., deutsch von Poggendorff in dessen Annalen Bd. XXII (der ganzen Folge achtundneunzigstem), S. 601 ff., ausführlicher von Baumgartner in der Zeitschr. für Physik u. Mathematik, Bd. X. S. 80 ff. (Letztere findet man auch unter dem Namen »Wiener Zeitschrift« citirt.)

schneller rotirende Rad dreht. Diese Erscheinung rührt, wie Faraday richtig erkannt hat, daher, dass die Mittelpunkte der gesehenen Zähne successive nicht auf gleiche, sondern auf neben einander liegende Netzhautstellen fallen¹⁾.

Roget's und Faraday's Versuche haben Stampfer²⁾ in Wien zur Erfindung der stroboskopischen Scheiben veranlasst. Diese Erfindung ist aber auch beeinflusst³⁾ durch ein zu jener Zeit offenbar verbreitetes⁴⁾ Spielzeug, dessen Erfinder ein gewisser Dr. Paris⁵⁾ ist, durch das sogenannte Thaumatrope. Dieses Instrument, das auch noch heutzutage gelegentlich auf Jahrmärkten und durch Hausirer in Wirthshäusern angeboten wird, besteht aus einer Cartonscheibe, an welcher in der Richtung eines Durchmessers zwei Fäden angebracht sind. Auf den beiden Seiten des Cartons befinden sich zwei einander correspondirende Zeichnungen, z. B. ein Vogel und ein Käfig oder dergl. Wird nun der Carton mit Hülfe der Fäden schnell um den durch die Fäden bestimmten Durchmesser gedreht, so erblickt der Beobachter die beiden Bilder vereinigt; er sieht also in unserem Falle einen Vogel in einem Käfig.

Stampfer construirte Scheiben, die an der Peripherie mit Löchern (Spalten) versehen sind und die unter den Löchern Bilder tragen. Blickt man bei der Rotation einer derartigen Scheibe durch die Löcher, so kann man in einem der Scheibe parallel gestellten Spiegel Bilder sehen, die entweder ruhend sind oder sich langsam

1) Die Gesamtheit der von Faraday angegebenen Versuche mit zwei Rädern lässt sich sehr schön ausführen, wenn man eine aus weißen und schwarzen Sektoren bestehende rotirende Scheibe beleuchtet und die Lichtquelle dadurch periodisch verdunkelt, dass man eine Scheibe, aus der einige Sektoren ausgeschnitten sind, vor ihr rotiren lässt. Die aus weißen und schwarzen Sektoren bestehende Scheibe entspricht bei diesen Versuchen demjenigen Rad in der Faraday'schen Anordnung, welches beobachtet wird, die andere demjenigen, durch welches der Beobachter hindurchblickt. Ich habe im Jahre 1894 derartige Versuche im Leipziger Laboratorium ausgeführt.

2) Stampfer, Die stroboskopischen Scheiben oder optischen Zauberscheiben, deren Theorie und wissenschaftliche Anwendung. Wien 1833; später (1834) im XVIII. Bd. der Jahrbücher des polytechnischen Instituts in Wien S. 237 ff. abgedruckt.

3) Stampfer a. a. O. § 1.

4) Pogg. Ann. Bd. X (der ganzen Folge sechsundachtzigster), S. 480.

5) Edinb. Journal, Vol. IV. S. 87.

bewegen. Stampfer hat eine Scheibe angefertigt, mittels deren man in einem Spiegel das Wort »Optik« deutlich sehen kann, obgleich die einzelnen unter den Spalten sich befindlichen Bilder nur Bruchstücke dieses Wortes enthalten. Eine andere Scheibe zeigt im Spiegel rotirende Zahnräder: hier sind die Scheibenbilder so eingerichtet, dass die Mittelpunkte der Zähne successive auf etwas verschiedene Netzhautstellen fallen. Es ist einleuchtend, dass diese Anordnungen auf denselben Principien beruhen, wie diejenigen von Faraday, die wir eben kennen lernten. Stampfer brachte unter seinen Spalten aber auch Bilder an, die im Spiegel als veränderliche Objecte gesehen wurden. So zeigt eine Scheibe ein Galopp tanzendes (oder vielmehr chassirendes) Paar, eine andere einen mit mehreren Kugeln arbeitenden Jongleur. Die einzelnen Scheibenbilder sind hier nicht nur so eingerichtet, dass sie der Reihe nach auf etwas verschiedene Netzhautstellen fallen, sondern sie sind auch selbst von einander verschieden¹⁾. — Stampfer's Scheiben wurden alsbald in Deutschland allgemein bekannt²⁾.

Stampfer hat, wie er berichtet³⁾, die erste stroboskopische Scheibe im December 1832 angefertigt. Mit dem Datum des 20. Januar 1833 hat dann Plateau einen Artikel publicirt⁴⁾, in welchem er den Gedanken des Stroboskops ausführt. Plateau's Mittheilung ist unabhängig von derjenigen Stampfer's. Ja Poggendorff berichtet in seinen Annalen⁵⁾, dass Plateau schon im November 1832 eine stroboskopische Scheibe an Faraday gesandt habe. Unter diesen Umständen und bei der Entfernung der Aufenthaltsorte der beiden Gelehrten (Wien und Brüssel) wird man, wie mit Recht thatsächlich geschieht, beide als selbständige Erfinder des Stroboskops bezeichnen müssen. — Auch Plateau kannte übrigens außer den

1) Stampfer ließ seine Scheiben im Jahre 1833 in der ehemaligen Kunsthandlung von Trentsensky et Vieweg in Wien erscheinen. Ein Theil dieser Scheiben ist noch heute in der Kunsthandlung von Trentsensky in Wien, Domgasse 2 käuflich. Eine Scheibe mit je einer Bilderreihe auf jeder Seite kostet 50 Kreuzer.

2) Gehler's Physikalisches Wörterbuch, Bd. VIII (1836), S. 772.

3) a. a. O. § 3.

4) Correspondance mathématique et physique de l'observatoire de Bruxelles. T. VII. S. 365.

5) Bd. XXXII (d. g. F. hundertundachter), S. 647.

bei rotirenden Rädern zu beobachtenden Thatsachen das Thaumatrope von Paris, das er schon im Jahre 1829 in der oben Seite 377 erwähnten Dissertation beschrieben hat.

Nach der Erfindung des Stroboskops haben eine Reihe Gelehrter sehr schöne wissenschaftliche Anwendungen desselben gemacht¹⁾. So hat Töpler²⁾ dasselbe zur Untersuchung der singenden Flammen benutzt. Auch hat man den stroboskopischen Vorrichtungen selbst mannigfache Formen gegeben. So brachte Horner³⁾ im Innern eines rotirenden Cylinders die Bilder und über denselben die Löcher an, durch welche die Bilder betrachtet werden. Horner gab diesem Apparat den Namen Dädaleum⁴⁾.

Diese Vorrichtung ist im Princip identisch mit derjenigen, welche unter dem Namen Schnellseher z. Z. durch die Actiengesellschaft Ottomar Anschütz (Berlin W. 8. Leipzigerstr. 116) in Handel gebracht wird. Bei diesen Apparaten ist indessen die Außenseite des Cylinders schwarz gefärbt, was zur Folge hat, dass die Bilder sehr deutlich hervortreten. Ferner sind die im Innern des Cylinders angebrachten Bilder auf photographischem Wege gewonnen. Den Bemühungen von Jansen, Muybridge und Anschütz selbst ist es nämlich gelungen, in sehr kurzen Zwischenräumen eine ganze Reihe Momentphotographien aufzunehmen und so die einzelnen Phasen periodischer Bewegungen (z. B. eines gehenden Menschen, eines springenden Pferdes u. dergl.) zu photographiren⁵⁾. Derlei Bilder sind im Innern der Anschütz'schen Apparate angebracht und gewähren bei der Rotation einen äußerst natürlichen und überaus interessanten Anblick.

Eine weitere Entwicklung hat das Stroboskop in den neuerdings

1) Vergl. Fischer, Philos. Studien, III. Bd. (1886). S. 153.

2) Pogg. Ann. Bd. CXXVIII (d. g. F. zweihundertundvierter), S. 108 ff.

3) Pogg. Ann. Bd. XXXII (d. g. F. hundertundachter), S. 650 ff.

4) Auf die Idee dieses Apparates hat schon Stampfer a. a. O. § 6 hingewiesen.

5) Die photographische Aufnahme der Bewegungsphasen ist für das Studium der animalischen Bewegungen sehr wichtig. Vergl. hierüber, sowie über die Geschichte der hierher gehörigen photographischen Erfindungen Marey, Le mouvement. Paris (Masson, Boulevard St. Germain 120), 1894. Vergl. auch Pizzighelli, Handbuch der Photographie. 1892. Bd. III. S. 393 ff. und David, Die Momentphotographie. 1898 (Heft 29 d. »Encyklopädie d. Photographie«), S. 138 ff.

von Edison construirten Apparaten gefunden. In den ersten Monaten des Jahres 1895 hat dieser Erfinder in den Großstädten Europas einen Apparat ausgestellt, in welchem man auf Grund der stroboskopischen Thatsachen und der Fortschritte der Momentphotographie nicht periodische Bewegungen, sondern ganze Scenen aus dem Leben (aus der Barbierstube, aus einem Ballet u. dergl.) erblicken konnte. Edison nannte diesen jetzt wohl allgemein bekannten Apparat Kinetoskop. Ein später erfundener Apparat von Edison (der Kinetograph) projicirt die Bilder an die Wand und ist jetzt gleichfalls viel verbreitet¹⁾.

Das Stroboskop ist auch mehrfach mit dem Stereoskop verbunden worden. Das sogenannte Stereophantoskop oder Bioskop ist eine Vereinigung des Wheatstone'schen Spiegelstereoskops mit dem Stroboskop²⁾. Dieses Bioskop hat offenbar Czermak³⁾ im Auge, wenn er von den Bemühungen spricht, die man in Paris zur Verbindung der beiden fraglichen Apparate mache. Er selbst beschreibt eine Vereinigung des bekannten Brewster'schen Prismenstereoskops mit dem Stroboskop⁴⁾. Im Jahre 1894 hat Münsterberg ein neues Stereoskop erfunden⁵⁾. Sein Apparat besteht aus zwei auf einer Achse rotirenden Scheiben. Auf der einen (schwarzen) Scheibe sind in zwei concentrischen Ringen je sechs Spalten angebracht und zwar so, dass auf einen Spalt des einen Ringes jeweils ein Spalt des anderen folgt. Auf der zweiten Scheibe befinden sich sechs Paar stereoskopischer Bilder. Sie sind alle in einem Kreise angebracht; aber die für das eine Auge bestimmten Bilder liegen auf denjenigen Radien, die den centralen Spalten gegenüberliegen, die für das andere Auge bestimmten auf denjenigen, welche den peripheren Spalten gegenüber liegen. Wenn man nun bei ganz langsamer Rotation der Scheiben mit dem linken Auge durch die peripheren, mit dem rechten

1) Die Idee, länger dauernde Handlungen, theatralische Scenen u. dergl. auf stroboskopischem Wege darzustellen, hat schon Stampfer (a. a. O.) § 4 c ausgesprochen. Die Projection stroboskopischer Bilder an die Wand hat schon Uchatius (Wiener Sitzungsberichte, Math.-naturw. Cl. Bd. X. [1853]. S. 482 ff.) ausgeführt.

2) Vergl. v. Helmholtz, Physiol. Optik. 2. Aufl. S. 836.

3) Wiener Sitzungsber. Math.-naturw. Cl. Bd. XV. S. 463.

4) a. a. O. S. 463 ff.

5) The Psychological Review, Bd. I. (1894.) S. 56 ff.

durch die centralen Spalten blickt oder umgekehrt, und wenn man einen festen Punkt des Ringes, auf dem die Bilder sich bewegen, binocular fixirt, so sieht jedes Auge intermittirend das ihm zukommende Bild an eben derselben Stelle des Raumes, an welchem nachher das andere Auge sein Bild sieht. Bei genügend schneller Rotation aber tritt der stereoskopische Effect ein, indem dann die Bilder auf der Netzhaut zur Deckung gelangen. Man sieht ohne weiteres, dass die Einrichtung dieses Stereoskops dem Stroboskop sehr verwandt ist. Um den Eindruck bewegter Objecte zu erhalten, braucht man, worauf Münsterberg mit Recht hinweist, nur die Bilder dieses Stereoskops in entsprechender Weise zu modificiren.

Der Vollständigkeit halber mag hier auch noch der Begriff der Charpentier'schen »Stroboscopie retinienne«¹⁾ erwähnt werden. Wenn man eine schwarze Scheibe, auf der sich in gleichen Entfernungen sechs weiße Sektoren à 3 Grad befinden, sich einmal in der Secunde drehen lässt, so erblickt man circa 36 ruhende Sektoren. Diese und andere ähnliche Gesichterscheinungen, die bei langsam rotirenden Scheiben entstehen, erklärt Charpentier durch die nach kurzen Reizen entstehenden retinalen Oscillationen, die von ihm²⁾ und anderen³⁾ untersucht worden sind. Die subjectiven Sektoren entstehen in unserem Beispiel nach Charpentier dadurch, dass die durch den weißen Sector gereizte Netzhautstelle in Folge innerer retinaler Vorgänge nach der Reizung periodische Erregungen erfährt. Diese periodischen, naturgemäß immer schwächer werdenden Erregungen werden durch den nächsten objectiven Sector wieder verstärkt u. s. f. Charpentier nennt die hierher gehörigen Erscheinungen Stroboskopie wegen ihrer Analogie mit den stroboskopischen Thatsachen; er bezeichnet sie als retinal, weil sie vorwiegend auf in der Netzhaut selbst vor sich gehenden Processen beruhen.

* * *

Wir haben bis jetzt gesehen, dass die stroboskopischen Thatsachen durch Erweiterung mehr gelegentlicher Beobachtungen ent-

1) Comptes rendus. Bd. CXXII. (1896.) S. 326 ff.

2) Siehe Archives de Physiologie, Vol. XXVIII. (1896.) S. 677 ff.

3) Vergl. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. Bd. IX. (1896.) S. 59 unten.

deckt wurden. Sie wurden dann zu wissenschaftlichen Zwecken benutzt und gaben Veranlassung zu mannigfachen Constructionen. Arbeiten, welche lediglich den Zweck hatten, die Theorie der stroboskopischen Erscheinungen näher zu begründen, haben wir bisher nicht kennen gelernt. Eine derartige Untersuchung hat zuerst O. Fischer¹⁾ im Jahre 1886 mitgetheilt²⁾. Dieser Forscher benutzte zu einem Theil seiner Untersuchungen zwei hinter einander rotirende Scheiben. Die eine (die Bildscheibe) trug nahe der Peripherie die aufgezeichneten Bewegungsphasen eines Gegenstandes, die andere (die Spaltscheibe) trug ebenso viel Oeffnungen, durch welche der Beobachter auf die Bildscheibe sehen sollte. Die Bildscheibe war weiß, die Spaltscheibe war in den meisten Fällen auf der dem Beobachter zugekehrten Seite schwarz.

Die Bilder waren Punkte. Einmal waren sie innerhalb eines Kreisringes so angebracht, dass sie, wenn man sich den Kreisring an einer Stelle aufgeschnitten und in ein Rechteck deformirt denkt, in einer Sinuslinie zu liegen schienen. Ein anderes Mal waren sie so angebracht, dass sie nach dem beschriebenen Deformationsprocess auf einer gebrochenen Linie zu liegen schienen. Die Zahl der Punkte (n) konnte mittels einer praktischen Vorkehrung variirt werden. Fischer's Ergebnisse sind folgende:

1) Wenn sich die Spaltscheibe in derselben Richtung, wie die Bildscheibe dreht, so sieht man in gleichen Winkelabständen circa n Punkte auf- und abschwngen. Dieselben erscheinen nicht ganz scharf umgrenzt und etwas breiter als sie thatsächlich sind.

2) Dreht man die Scheiben in verschiedener Richtung aber mit gleicher Geschwindigkeit und führt man die Beobachtung in einiger Entfernung von der Spaltscheibe aus, so erblickt man ungefähr die doppelte Anzahl von Punkten und zwar sind sie diesmal schärfer begrenzt als im ersten Fall.

3) Die eben beschriebene Anzahl von Punkten trifft nur zu, so lange die gemeinsame Geschwindigkeit der beiden Scheiben eine

1) Philos. Studien, Bd. III. (1886.) S. 128 ff.

2) Schon früher hat Stricker (Studien über Bewegungsvorstellungen. Wien 1882. S. 28 ff.) einige Versuche mitgetheilt, die beweisen sollen, dass der stroboskopische Effect durch Vermittelung von Augenbewegungen zu Stande komme. Die Darstellungen Stricker's sind unrichtig und bedürfen heute keiner Widerlegung mehr.

gewisse Grenze nicht übersteigt. Wächst die Geschwindigkeit über diese Grenze, so sieht man zwei dicht unter einander gelegene Punkte gemeinsam dieselbe Bewegung ausführen. Vergrößert man die Geschwindigkeit noch mehr, so gesellt sich unter die Punkte noch ein dritter u. s. f.

4) Dagegen zeigt sich, dass auch eine Minimalgeschwindigkeit erforderlich ist, unter welcher der stroboskopische Effect überhaupt nicht eintritt.

5) Durch geeignete größere oder geringere Verdeckung des Gesichtsfeldes ergab sich der Satz, dass die Erscheinung der Bewegung von Punkten schon bei um so geringerer Geschwindigkeit eintritt, je weniger Punkte neben einander zu gleicher Zeit sichtbar sind.

6) Unter sonst vollkommen gleichen Bedingungen tritt der stroboskopische Effect bei um so geringerer Geschwindigkeit ein, je kürzer die Zeiten sind, während welcher die Phasenbilder auf das Auge wirken.

7) Um die Bewegung eines Gegenstandes künstlich nachzuahmen, ist es nothwendig, dass zwischen den einzelnen Bildphasen kein Licht auf das Auge wirke.

Offenbar ohne Kenntniss der Fischer'schen Versuche hat später Grützner¹⁾ mit dem Stroboskop experimentirt. Er ließ wie Fischer zwei Scheiben hinter einander rotiren und er zeigte:

1) dass sich mittels des Stroboskops zwei oder mehrere Farben »auf Grund desselben Principes, das auch am Farbenkreisel Anwendung findet«, mischen lassen. »Sei beispielsweise der Grund der Bildscheibe blau und klebt man auf sie mehrere Reihen gelber gleich abständiger Punkte, in die äußerste Reihe etwa 20, in die mittlere 10, in die innerste Reihe 5, so sieht man beim Drehen der Scheiben drei concentrische Reihen von je 20 feststehenden Punkten. Die äußersten sind gelb; die mittleren sind grau, aus gleichen Theilen blau und gelb gemischt; die innersten sind blaugrau, aus drei Theilen blau und einem Theil gelb gemischt«.

2) theilt Grützner Versuche über den farbigen Contrast mit. Es zeigt sich, dass man die Thatsachen des farbigen Contrastes darstellen kann durch geeignete Wahl der Farben des Grundes der

1) Pflüger's Archiv. Bd. LV. (1893/94). S. 508 ff.

Bildscheibe und der Farbe der Punkte und dadurch, dass man einen Theil der Spalten mit farbigen Gelatinepapieren versieht.

3) berichtet Grützner, er habe eine Bildscheibe, welche darstellt, wie ein Knabe über einen anderen »Bock springt«, durch eine entsprechende Spaltscheibe betrachtet; er habe dann die Bilder derjenigen Knaben, welche gerade über den anderen schweben, mit weißem Papier verklebt und trotzdem gesehen, wie ein Knabe über den anderen hinüberfliege.

Berichtigungen älterer Versuchsergebnisse.

Die mitgetheilten Constructionen und Experimente habe ich im psychologischen Institut der Universität Würzburg in Gemeinschaft mit Herrn stud. phil. Ernst Dürr zum größten Theil nachgeprüft. Dabei zeigte sich, dass die oben unter 7) angeführte Behauptung Fischer's in ihrer Allgemeinheit unzutreffend ist. Wenn es auch zweifellos für die Deutlichkeit der stroboskopisch gesehenen Bilder förderlich ist, wenn das Auge zwischen den einzelnen Phasenbildern von Licht nicht afficirt wird, so muss diese Bedingung doch nicht nothwendiger Weise erfüllt sein, wenn die Bilder stroboskopisch gesehen werden sollen. Auch wenn das Auge zwischen der Einwirkung der Phasenbilder von ziemlich starkem Licht afficirt wird, tritt das stroboskopische Phänomen sehr schön ein, wofern sich die Phasenbilder nur deutlich vom Grund, auf den sie aufgetragen sind, abheben. Den besten Beweis für die Richtigkeit dieser Behauptung bildet die Stampfer'sche Vorrichtung, bei der beide Seiten der vor einem Spiegel zu betrachtenden Scheiben weiß sind. Allerdings sieht man bei diesen Scheiben die Phänomene besser, wenn man die dem Beobachter zugekehrte Scheibenseite mit grauem, und noch besser wenn man sie mit schwarzem Papier überzieht. Das fragliche Fischer'sche Ergebniss muss daher dahin modificirt werden, dass der stroboskopische Effect um so deutlicher eintritt, je geringer die Intensität des Lichtes ist, das zwischen der Wirkung der einzelnen Phasenbilder auf die Netzhaut fällt.

Auch die unter 3) angeführte Behauptung Grützner's bedarf wenigstens einiger Modificationen. Wir haben den Grützner'schen Versuch mit dem Anschütz'schen Schnellseher nachgeprüft und

benutzten als Bilder die photographirten Phasen eines eine Hürde nehmenden Reiters. (Streifen 3 der Anschütz'schen Collection.) Wenn man diejenigen Bewegungsphasen, in welchen sich der Reiter über der Hürde befindet, verdeckt, so glaubt man allerdings trotzdem den Reiter über die Hürde springen zu sehen. Um diesen Versuch auszuführen, ist es aber nicht nöthig, dass man, wie Grützner anzunehmen scheint, vorher die Serie der Phasen unverdeckt stroboskopisch betrachtet. Auch hat es bei verdeckten Phasen mit dem Sehen des Reiters eine eigene Bewandniss; stellt man sich nämlich die Frage, ob man wirklich den Reiter einen Moment über der Hürde sieht, so merkt man bei gespannter Aufmerksamkeit deutlich, dass dies nicht der Fall ist. Man kann also nicht wohl mit Grützner sagen, »das geistige Auge ergänzt . . . eine Bewegung, von der das leibliche nur Anfang und Ende sieht, zu einer vollkommenen Bewegung«, sondern man wird sich auf Grund unseres Versuches vielmehr besser so ausdrücken: Unter Umständen kann eine Reihe von an sich wichtigen Bewegungsphasen ausfallen, ohne dass der Beobachter es bemerkt. Dieser Ausfall der Bewegungsphasen kann aber bei genügender Aufmerksamkeit und geeigneter Richtung derselben bewusst werden.

Das Talbot'sche Gesetz.

Die stroboskopischen Erscheinungen beruhen theilweise auf den Thatsachen der successiv-periodischen Gesichtszreizung oder, wie wir (mit einer zweckmäßigen Erweiterung des ursprünglichen Begriffs) auch sagen können, auf den Thatsachen des Talbot'schen Gesetzes. Im folgenden mögen nun die hierher gehörigen Thatsachen und Theorien dargestellt werden. Dass ich nicht einfach auf meine früheren Arbeiten¹⁾ über diesen Gegenstand und auf die inzwischen erschienenen Untersuchungen anderer Autoren verweise, ist darin begründet, dass ich mich veranlasst sehe, meine älteren Darstellungen in einzelnen Punkten zu erweitern und ihnen einige polemische Bemerkungen hinzuzufügen.

Wenn zwei oder mehrere Gesichtszreize successive und periodisch

1) Philos. Studien, Bd. IX, S. 384 ff., Bd. XII, S. 279 ff. u. Bd. XIII, S. 106 ff.

die Netzhaut treffen, so gibt es eine gewisse kurze Periodendauer, bei welcher sie eben eine constante Empfindung erzeugen; diese Periodendauer heißt die kritische Periodendauer. Auch bei denjenigen Periodendauern, die kürzer sind als die kritische, erzeugen die beiden Reize constante Empfindungen.

Folgende vier Momente begünstigen das Entstehen einer constanten Empfindung:

- 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.

Je mehr diese Momente erfüllt sind, desto größer ist daher die kritische Periodendauer.

Meine Theorie des Talbot'schen Gesetzes sucht diese Thatsachen zu erklären. Ich verstehe unter photochemischem Elementareffect die in einem Zeitelement auf die Retina wirkende Lichtintensität. Wenn wir das Zeitelement zu 1σ rechnen, so ist die Empfindung für jeden Retinapunkt in jedem Zeitelement eine Function des gleichzeitigen und einiger direct vorangehenden Elementareffecte, d. h. der charakteristischen Effectengruppe. Dass nun gleichen charakteristischen Effectengruppen unter sonst vollkommen gleichen Bedingungen gleiche Empfindungen entsprechen, ist selbstverständlich. Aus den bekannten Thatsachen der Unterschiedsempfindlichkeit folgt aber, dass nicht nur absolut gleichen, sondern auch genügend ähnlichen charakteristischen Effectengruppen gleiche Empfindungen entsprechen. — Die während einer bestimmten Zeit (z. B. zwei Minuten) aufeinander folgenden charakteristischen Effectengruppen sind nun unter sich um so ähnlicher, je kleiner erstens die Zeiten sind, innerhalb welcher gleich viel Licht ins Auge fällt, und zweitens, je geringer die mittlere Variation der Elementareffecte innerhalb dieser Zeiten ist. Je mehr diese beiden Momente erfüllt sind, desto ähnlicher sind auch die charakteristischen Effectengruppen mit denjenigen, welche vorhanden wären, wenn die Lichtvertheilung während der zwei Minuten absolut gleichmäßig wäre. Denn eine absolut gleichmäßige Lichtvertheilung kann angesehen werden als Grenze einer ungleichmäßigen, bei welcher die mittlere Variation der einer charakteristischen Effectengruppe angehörigen Elementareffecte gleich Null wird, oder als Grenze

1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 1, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9... II

Wenn man den Unterschied der Reizdauern, der in I gleich Null ist, dadurch z. B. auf 4σ bringt, dass man die Dauer des Reizes 1 auf Kosten der Dauer des Reizes 9 vergrößert, so erhält man folgende Elementareffekte:

1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9... III

Wenn man drittens den Unterschied der Reizintensitäten vermindert, indem man z. B. statt des Reizes 9 den Reiz 8 verwendet, so erhält man folgende Elementareffekte:

1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 8, 8, 8, 8, 8, 8, 8, 8, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 8, 8, 8, 8, 8, 8, 8... IV

Vergleicht man nun die Reihen II, III, IV jeweils mit I, so sieht man, dass in II die Zeiten, innerhalb welcher gleich viel Licht ins Auge fällt, kleiner sind als in I, während in III und IV die mittlere Variation der Elementareffekte geringer ist als in I.

Es ist nun aber auch leicht einzusehen, dass in Folge dessen die charakteristischen Effectengruppen in II, III, IV unter sich ähnlicher sind als in I.

Die charakteristische Effectengruppe umfasse z. B. im Mittel 10 Elementareffekte. Dann haben wir folgende charakteristischen Effectengruppen zu verzeichnen:

Für I	Für II	Für III	Für IV
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.	1, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9.	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.	Dieselben wie für I, nur statt dass der Zahl 9 die Zahl 8 eintritt.
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 9.	1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 1.	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.	
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 9, 9.	1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 1, 1.	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.	
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9.	1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 1, 1, 1.	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 9.	
1, 1, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9.	1, 9, 9, 9, 9, 9, 1, 1, 1, 1.	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 9, 9.	
1, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9.	9, 9, 9, 9, 9, 1, 1, 1, 1, 1.	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9.	
1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9.	9, 9, 9, 9, 1, 1, 1, 1, 1, 9.	1, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9.	
1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9.	9, 9, 9, 1, 1, 1, 1, 1, 9, 9.	1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9.	
1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9.	9, 9, 1, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9.	1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9.	
1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9.	9, 1, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9.	1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9.	
9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9.	1, 1, 1, 1, 1, 9, 9, 9, 9, 9.	1, 1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9.	
9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 1.	u. s. w.	1, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 1.	
9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 1, 1.		9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 1, 1.	
9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 1, 1, 1.		9, 9, 9, 9, 9, 9, 9, 1, 1, 1.	
9, 9, 9, 9, 9, 1, 1, 1, 1, 1.		9, 9, 9, 9, 9, 1, 1, 1, 1, 1.	
9, 9, 9, 9, 1, 1, 1, 1, 1, 1.		9, 9, 9, 9, 1, 1, 1, 1, 1, 1.	
9, 9, 9, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.		9, 9, 9, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.	
9, 9, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.		9, 9, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.	
9, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.		9, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.	
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.		1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.	
u. s. w.		u. s. w.	

Die letzte Reihe einer jeden dieser Columnen ist identisch mit der ersten und entspricht ihr vollkommen. Man kann daher diese Columnen fortsetzen, wenn man auf die letzte Reihe die zweite, dann die dritte u. s. w. folgen lässt.

Die charakteristischen Effectengruppen von I enthalten nun auf 20 aufeinanderfolgende Gruppen auch 20 verschiedene. Die charakteristischen Effectengruppen von II aber enthalten auf 20 succedierende Gruppen nur 10 verschiedene. Die charakteristischen Effectengruppen von III enthalten auf je 20 auf einander folgende Gruppen 3 gleiche, während diejenigen von I alle von einander verschieden sind.

Die charakteristischen Effectengruppen von I, II, III sind aber nur in der eben angegebenen Richtung verschieden. Denn alle auf einander folgenden charakteristischen Effectengruppen in I, II, III sind, sofern sie überhaupt von einander differiren, in I ebenso von einander verschieden als in II oder in III, da in allen drei obigen Columnen zwei auf einander folgende unter sich verschiedene Effectengruppen lediglich (d. h. bei sonst analoger Anordnung und Größe der Elementareffecte) darin von einander abweichen, dass sie einen Elementareffect à 1 [9] mehr bzw. weniger enthalten.

Die charakteristischen Effectengruppen in II und III sind also unter sich ähnlicher als die in I. Dasselbe gilt nun auch von den charakteristischen Effectengruppen in IV; denn die Gruppen in IV und I unterscheiden sich einerseits lediglich dadurch, dass bei diesen der Werth 9 an Stelle des Werthes 8 steht, andererseits ist in IV die mittlere Variation der arithmetischen Mittel der zu einer Gruppe gehörigen Elementareffecte geringer als in I. Es ist also erklärlich, dass Verminderung der Reizdauern, Vergrößerung des Unterschiedes der Reizdauern und Verminderung des Unterschiedes der Reizintensitäten die Verschmelzung begünstigen.

Die charakteristischen Effectengruppen in II, III, IV sind aber auch mehr als diejenigen in I denjenigen charakteristischen Effectengruppen ähnlich, die vorhanden wären, wenn das während der successiven Reize wirkende Licht gleichmäßig auf die Dauer der Reizwirkung vertheilt wäre.

Folgende Zahlen bedeuten die arithmetischen Mittel der Ele-

mentareffecte derjenigen charakteristischen Effectengruppen, die in den obigen Columnen mitgetheilt sind.

Mittel für I	Mittel für II	Mittel für III	Mittel für IV
5	5	4,2	4,5

Folgende fettgedruckten Zahlen bedeuten daher diejenigen charakteristischen Effectengruppen, die in I, II, III, IV bei absolut gleicher Lichtvertheilung vorhanden wären.

I.	II.
5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5.	5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5.

III.

4,2. 4,2. 4,2. 4,2. 4,2. 4,2. 4,2. 4,2. 4,2. 4,2.

IV.

4,5. 4,5. 4,5. 4,5. 4,5. 4,5. 4,5. 4,5. 4,5. 4,5.

Man sieht nun ohne weiteres ein, dass die unter II, III und IV stehenden fettgedruckten Zahlen von den einzelnen ihnen correspondirenden Gruppenmitteln der obigen Columnen durchschnittlich weniger differiren, als die unter I stehende fettgedruckte Gruppe durchschnittlich von den arithmetischen Mitteln der Gruppen in Columnne I abweicht.

Wir haben somit an einem Beispiel gezeigt, dass durch Verminderung der Reizdauern, durch Vergrößerung des Unterschiedes der Reizdauern und durch Verminderung des Unterschiedes der Reizintensitäten die charakteristischen Effectengruppen nicht nur unter sich ähnlicher werden, sondern dass sie sich auch denjenigen charakteristischen Gruppen nähern, die vorhanden wären, wenn das Licht gleichmäßig auf die Zeit, innerhalb welcher es wirkt, vertheilt wäre. Da wir nun auf Grund der allgemeinen Thatsachen der Unterschiedsempfindlichkeit mit Recht annehmen, dass nicht nur absolut gleichen, sondern auch hinreichend ähnlichen Effectengruppen gleiche Empfindungen entsprechen, so ist es einleuchtend, dass die fraglichen drei Momente für die Verschmelzung günstig sein müssen.

Gegen meine erste Darstellung dieser Theorie¹⁾ hat Witasek²⁾

1) Philos. Studien, Bd. XII. (1896.) S. 279 ff.

2) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. Bd. XIII. (1897.) S. 116 ff.

einen bemerkenswerthen Einwand erhoben. Er hält die Heranziehung des Weber'schen Gesetzes als eines Erklärungsprincipes nicht für einwandfrei, weil sich dieses Gesetz nur auf graduelle Unterschiede beziehe; zwischen einer aus lauter gleichen Elementareffecten bestehenden Effectengruppe, z. B. 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3 und einer aus verschiedenen Elementareffecten bestehenden Effectengruppe, z. B. 2, 2, 2, 6, 2, 2, 2, 6 bestehe ein mehr als gradueller Unterschied. Auch könne man nicht sagen, dass die Verschiedenheit zwischen den charakteristischen Effectengruppen 2, 2, 2, 6, 2, 2, 2, 6 und 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3 geringer sei als die zwischen 4, 4, 4, 12, 4, 4, 4, 12 und 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6.

Ich glaube, dass dieser Einwand gegenüber der Form, in welcher die Theorie oben vorgetragen wurde, und gegenüber den an Zahlen versuchten Erläuterungen nicht mehr stichhaltig ist. Denn ich habe jetzt darauf hingewiesen, dass eine gleichmäßige Lichtvertheilung allerdings als Grenze einer ungleichmäßigen angesehen werden kann, bei welcher die mittlere Variation der Elementareffecte gleich Null wird, und dass sie auch als Grenze einer ungleichmäßigen betrachtet werden kann, bei welcher die Zeiten, innerhalb deren gleich viel Licht ins Auge fällt, unendlich klein sind. Auch zeigen die obigen Erläuterungen, dass man sehr wohl sagen kann, der Unterschied zwischen den charakteristischen Effectengruppen 2, 2, 2, 6, 2, 2, 2, 6 und 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3 sei geringer als zwischen den Gruppen 4, 4, 4, 12, 4, 4, 4, 12 und 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6. Der Unterschied zweier gleich großer charakteristischer Effectengruppen mit verschiedenen Elementareffecten wird bei analoger Anordnung der Elementareffecte bestimmt durch die Differenz der arithmetischen Mittel beider Effectengruppen, eine Thatsache, die ich, wie man sieht, in den obigen Erläuterungen benutzt habe¹⁾.

Die in diesem Abschnitt bisher vorgetragenen Thatsachen und Theorien gelten für den Fall, dass die successiven Reize gleichzeitig für alle Netzhautpunkte abwechseln. Wenn man jedoch zur Erzeugung der successiven Reize Flächen anwendet, welche nach einander am Fixationspunkt vorbeieilen, wie dies bei rotirenden Scheiben und

1) In Witasek's Kritik a. a. O. S. 118, Zeile 20 von oben ist statt 'größer' 'kleiner' zu lesen. In meiner 'Theorie des Talbot'schen Gesetzes', Philos. Studien, Bd. XII. (1896.) S. 293, Zeile 5 von unten ist statt 'kürzere' 'längere' einzusetzen.

bei den stroboskopischen Erscheinungen der Fall ist, so tritt zu den bisher genannten Momenten ein fünftes hinzu, das der Contourenbewegung. Je langsamer sich nämlich unter sonst vollkommen gleichen Umständen die Flächencontouren bewegen, desto weniger verschmelzen die Reize.

Ich habe¹⁾ diese Thatsache daraus erklärt, dass die neben einander liegenden Netzhautstellen in jedem Zeitelement durchschnittlich um so verschiedener gereizt werden, je langsamer sich die Contouren bewegen; je langsamer sie sich bewegen, desto größer sind daher (so lange keine Verschmelzung stattfindet) die Unterschiede der Erregungen der neben einander liegenden Netzhautpunkte. Je differenter aber die neben einander liegenden Netzhautpunkte bei einer Periodendauer, die größer ist als die kritische, erregt sind, desto ungünstiger liegen natürlich die Verhältnisse für die Verschmelzung, um so geringer wird daher die kritische Periodendauer sein müssen.

Mit dieser Theorie ist es in guter Uebereinstimmung, wenn nach Schenck²⁾ sich die Thatsachen der Contourenbewegung um so weniger geltend machen, je kleiner das Gesichtsfeld ist, dessen Helligkeit successive wechselt. Die Verschiedenheiten der Erregungen der neben einander liegenden Retinapunkte werden eben desto mehr geeignet sein, die kritische Periodendauer zu verkürzen, auf einem je ausgedehnteren Netzhautbezirk sie vorhanden sind.

Gegenüber meiner Theorie der Contourenbewegung haben Fick³⁾ und Schenck^{3,4)} sehr eigenthümliche Ansichten ins Feld geführt. Nach diesen Forschern sind meine Darlegungen über diesen Gegenstand deshalb unzutreffend, weil die Thatsachen der Contourenbewegung auf unbeabsichtigten, unwillkürlichen Augenbewegungen beruhen, die sich um so mehr geltend machen sollen, je langsamer sich die Contouren bewegen. Ich habe früher⁵⁾ meine Gründe gegen diese Ansichten und die vermeintlichen Beweise derselben dargelegt, jetzt

1) Philos. Studien, Bd. XII. (1896.) S. 288 ff. u. Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorg. Bd. XIII. (1897.) S. 369. Anm.

2) Pflüger's Archiv, Bd. 64. (1896.) S. 165 ff.

3) Pflüger's Archiv, Bd. 64. (1896.) S. 165 ff.

4) Pflüger's Archiv, Bd. 68. (1897.) S. 40 ff.

5) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. Bd. XIII. (1897.) S. 365 ff. und Bd. XVI. (1898.) St. 438 ff.

aber kann ich auf eine Reihe von Versuchen hinweisen, welche mir nichts geringeres, als die Vernichtung der Fick-Schenck'schen Augenbewegungstheorie zu bedeuten scheinen.

Vor einiger Zeit hat Grünbaum¹⁾ mitgetheilt, dass, wenn man einen Theil einer rotirenden Scheibe durch eine kleine kreisförmige Oeffnung betrachtet, die kritische Periodendauer um so geringer ist, je größer das Verhältniss des Durchmessers der Oeffnung zur Breite der Sektoren ist. Das heißt: Wenn man einen Theil einer rotirenden Scheibe durch eine Oeffnung betrachtet, so ist die kritische Periodendauer um so geringer, je centraler der beobachtete Scheibentheil gelegen ist.

Ich habe diese Thatsache auf folgende Weise nachgeprüft. Ich setzte eine aus 8 schwarzen und 8 weißen Sektoren bestehende Scheibe in rotirende Bewegung. Gegenüber der Scheibe, in ca. 30 cm Entfernung, wurde ein großer, ganz mit schwarzem Papier überzogener Spiegel aufgestellt. In dem Papier waren zwei kleine, unter sich gleiche, rechteckförmige Löcher von ca. 3,2 qmm Größe ausgeschnitten. Das eine war so angebracht, dass der Beobachter bei geeigneter Stellung der Augen durch dasselbe einen möglichst peripheren Scheibentheil im Spiegel abgebildet sah, das andere so, dass es dem Auge einen möglichst centralen Scheibentheil darbot. Wir gaben nun der Scheibe diejenige Geschwindigkeit, die nöthig war, um das Spiegelbild der peripheren Scheibentheile zur Verschmelzung gelangen zu lassen; dabei zeigte sich sowohl für Herrn Dürr als für mich, dass diese Geschwindigkeit ungenügend war, um auch das Spiegelbild der central gelegenen Scheibentheile zur Verschmelzung zu bringen. Derselbe Versuch wurde nun mit einer Reihe anders zusammengesetzter Scheiben angestellt. Alle diese Experimente zeigten dasselbe Resultat. Für das Verschmelzen einer rotirenden Scheibe ist es daher nach diesen Versuchen ungünstiger, wenn ein centraler als wenn ein peripherer Scheibentheil fixirt wird. Das Grünbaum'sche Ergebniss findet also in unseren Experimenten eine Bestätigung.

Wie unterscheiden sich nun für ein und dieselbe Scheibe die Spiegelbilder der Scheibenperipherie und des Scheibencentrums? Bei allen mitgetheilten Versuchen zeigte das Spiegelbild des Centrums

1) The Journal of Physiology. Vol. XXII. (1898.) S. 433 ff.

durchschnittlich kleinere Flächen als das Spiegelbild der Peripherie. Dieser Umstand kann aber für die Erklärung unseres Ergebnisses nicht in Anspruch genommen werden, da ja im Gegentheil, wie ich schon früher¹⁾ betonte, die Verkleinerung der Felder eher günstig als ungünstig für die Verschmelzung wirken muss. Das Spiegelbild der Scheibenperipherie differirt aber außerdem nur durch ein zweites Moment von demjenigen des Scheibencentrums, durch die Contourenbewegung. Im Centrum bewegen sich die Contouren langsamer als an der Peripherie. Wenn deshalb hier die Verschmelzung leichter eintritt als dort, so folgt hieraus, dass die langsame Contourenbewegung als solche für die Verschmelzung ungünstig ist, was meine Theorie eben verständlich zu machen sucht. Dass aber die Contourenbewegung erst durch Vermittelung der Fick-Schenck'schen Augenbewegungen die Verschmelzung beeinträchtigt, ist bei diesen Versuchen ausgeschlossen. Denn Augenbewegungen, die von Einfluss auf das Verschmelzungsphänomen sein können, finden jedenfalls dann nicht statt (und zwar auch nach Fick und Schenck nicht), wenn, wie es in unseren Experimenten der Fall war, dem Auge eine ganz kleine Fläche, d. i. ein fester Fixationspunkt, dargeboten wird. Wenn daher die Thatfachen der Contourenbewegung auch eintreten, wo offenbar die Fick-Schenck'schen Augenbewegungen ausgeschlossen sind, so wird man doch wohl schließen müssen, dass diese Augenbewegungen überhaupt nicht die Ursache für die sogenannten Thatfachen der Contourenbewegung sind²⁾.

1) Theorie des Talbot'schen Gesetzes. Philos. Studien, Bd. XII. (1896.) S. 290 Anm.

2) Ueber die Thatfachen des Talbot'schen Gesetzes handeln neuerdings auch Lummer und Brodhun, Zeitschr. f. Instrumentenkunde, Jahrg. XVI. (1896.) S. 299 ff. und J. E. Lough, Psych. Rev. Vol. III. (1896.) S. 484 ff. Beide Arbeiten bestätigen, wie viele andere (vergl. Philos. Studien, Bd. XII. S. 279), die Gültigkeit des Talbot'schen Gesetzes. Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen glaubte vor Kurzem Grünbaum (a. a. O. S. 438 ff.) die Ungenauigkeit des Talbot'schen Gesetzes bei starken Reizen beweisen zu können. Wenn sich seine Ergebnisse als richtig erweisen sollten, so müsste die Theorie des Talbot'schen Gesetzes einige Erweiterungen erfahren. — Uebrigens hat Grünbaum (wohl mangels genügender Kenntniss der deutschen Sprache) aus meinen Arbeiten sehr wunderliche Dinge herausgelesen; S. 439 sagt er: »Marbe has stated several theoretical reasons for considering the Talbot-Plateau law inaccurate«, was ganz falsch ist, und S. 447 heißt es: »Marbe states that it (nämlich Schwarz) is a stimulus of reconstitution

Theorie der stroboskopischen Erscheinungen.

Aus dem Talbot'schen Satz können wir einen großen Theil der stroboskopischen Gesetzmäßigkeiten ableiten.

Zunächst ist es klar, dass eine Minimalgeschwindigkeit erforderlich ist, unter welcher der stroboskopische Effect überhaupt nicht eintritt (vergl. Fischer's Resultate Nr. 4). Denn bei allen stroboskopischen Versuchen (mag es sich nun um die Darstellung von Bewegungen handeln oder um ruhend zu sehende Bilder, wie beim Stampfer'schen Versuch mit dem Wort »Optik«) werden dem Auge successive Gesichtsrize geboten, von denen eine Reihe zunächst einmal verschmelzen muss, wenn von einem stroboskopischen Effect die Rede sein soll. Vor allem darf die Unterbrechung der Bildphasen nicht mehr zum Bewusstsein kommen.

Es ist aber auch klar, dass, wenn man bei der Fischer'schen Anordnung die Geschwindigkeit immer mehr wachsen lässt (vgl. Fischer's Resultate Nr. 3), dass man dann 2 und bei größerer Geschwindigkeit noch mehr Punkte unter einander dieselbe Bewegung ausführen sieht. Will man die Sache so einrichten, dass man nur einen Punkt schwingen sieht, so muss man den Scheiben eine so geringe Geschwindigkeit geben, dass jeder Punkt eben zu verschwinden scheint, wenn der nächste sichtbar wird. Ist die Geschwindigkeit so groß, dass der vorhergehende Punkt immer noch wirkt,

of that material which is decomposed by white light«. Wann und wo habe ich mich über diesen Gegenstand überhaupt ausgesprochen? Meine Litteraturangaben in der Schrift »Theorie des Talbot'schen Gesetzes« hat Grünbaum gar nicht benutzt und nicht einmal zur Erkenntniss, dass es sich in dieser Schrift um eine Theorie des Talbot'schen Gesetzes handelt, scheint er vorgedrungen zu sein. — Eine Reihe anderer hierher gehöriger Arbeiten sind referirt in der Zeitschr. für Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. Bd. XVI. (1898.) f. — Meine früheren Bemühungen (Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. Bd. XIII. (1897.) S. 368), die That-sachen der Contourenbewegung für den Tastsinn nachzuweisen, sind gescheitert. Im Verlauf der Untersuchungen mit Zahnrädern zeigte sich, dass (obgleich einzelne Versuche im Sinne der Contourenbewegung ausgefallen waren) große Zahn-zahl für die Vergrößerung der kritischen Periodendauer günstig ist. Diese That-sache hängt offenbar damit zusammen, dass man unwillkürlich um so tiefer in die Räder eingreift, je weniger Zähne vorhanden sind, d. h. je größer die Zahn-lücken sind. Ueber die hierher gehörigen That-sachen des Tastsinns vergl. Va-lentin, Archiv f. physiol. Heilkunde, Jahrg. XI. (1852.) S. 438 ff. u. S. 587 ff.

wenn der nächste das Auge reizt, so sieht man zwei Punkte unter einander dieselbe Bewegung ausführen. Drehen sich die Scheiben so schnell, dass noch zwei Punkte nachwirken, wenn der dritte erscheint, so sieht man drei Punkte unter einander u. s. f.

Dass die Punkte schärfer begrenzt sind, wenn die Scheiben in entgegengesetzter Richtung sich drehen, als wenn sie in gleicher Richtung rotiren (vgl. Fischer's Resultate Nr. 1 und 2), liegt daran, dass die Punkte bei gleicher Rotationsrichtung an einem größeren Retinastück vorbeipassiren, als bei entgegengesetzter. Drehen sich die Scheiben daher so schnell, dass der stroboskopische Effect eintritt, so nähern sich bei gleicher Rotationsrichtung die Retinabilder der Punkte viel mehr der Gestalt von Linien, als dies bei verschiedener Rotationsrichtung der Fall ist. — Dass aber der kurze Phaseneindruck als solcher ganz allgemein für die Schärfe der stroboskopisch gesehenen Bilder günstig ist, was Fischer annimmt, darf nicht behauptet werden. Diese Ansicht gilt, wie man aus unserer Erklärung des fraglichen Phänomens direct ersieht, nur für diejenigen Versuchsanordnungen, bei welchen dem Auge die Bildphasen nicht ruhend, sondern bewegt geboten werden.

Dass man bei gleicher Rotationsrichtung der Scheiben und wenn man das Auge direct vor die Spiegelscheibe bringt, nur ungefähr n , bei umgekehrter Rotationsrichtung und entferntem Auge doppelt so viel Punkte in halber Entfernung von einander sieht (vergl. oben S. 383), — liegt (wie Fischer richtig ausführt) daran, dass im zweiten Falle das Auge durch mehrere Spalten zugleich sehen kann, und dass hier nach

Drehung der Scheiben um $\frac{\pi}{2n}$ immer ein neues Phasenbild sichtbar

wird, während im ersten Fall (bei gleicher Rotationsrichtung und wenn das Auge sich direct vor der Spaltscheibe befindet) das Auge nur durch einen Spalt zugleich sehen kann und daher hier erst nach

Drehung der Scheiben um $\frac{\pi}{n}$ ein neues Phasenbild erblickt.

Die Thatsache, dass der stroboskopische Effect unter sonst vollkommen gleichen Bedingungen um so leichter eintritt, je kürzer die Zeiten sind, während welcher die Phasenbilder auf das Auge wirken (vergl. Fischer's Resultate Nr. 6), ist nur ein specieller Ausdruck des allgemeinen Gesetzes, demzufolge die kritische Periodendauer für

successiv periodische Reize um so größer ist, je geringer die Differenz der Dauer dieser Reize ist. Die Reize, um die es sich hier handelt, sind je ein Phasenbild einerseits und der auf dasselbe folgende dunkle, durch die Spaltscheibe applicirte Lichtreiz.

Dass man, wenn man die successiven Punkte auf dieselbe Netzhautstelle fallen lässt (wie Grützner gethan hatte, vergl. seine Resultate Nr. 1 und 2), mit Hülfe der stroboskopischen Scheiben die Thatsachen der Farbenentstehung und des Farbencontrastes darstellen kann, ist ohne weiteres einleuchtend. Man hat es in diesem Falle einfach mit successiv-periodischen Gesichtsreizen zu thun, ebenso wie bei der Benutzung einfacher rotirender Scheiben. Man wird daher auch mittels der stroboskopischen Scheiben die Thatsachen darstellen können, die man bekanntermaßen mit Hülfe successiv-periodischer Reize darstellt.

Zu den successiv-periodischen Reizen ist aber in diesem Falle auch das Licht zu rechnen, welches die Netzhaut während der Zeit trifft, wo die Bildscheibe durch die Spaltscheibe verdeckt ist, ein Umstand, den Grützner bei der Erklärung seiner diesbezüglichen Ergebnisse nicht betont hat.

Wir haben jetzt eine Reihe von Sätzen, die sich auf das Stroboskop beziehen, direct auf das Talbot'sche Gesetz zurückgeführt und somit die alte allgemeine Ansicht im einzelnen bestätigt, dass die stroboskopischen Erscheinungen mit dem Talbot'schen Gesetz aufs engste zusammenhängen. Diejenigen stroboskopischen Erscheinungen, bei welchen es sich nicht um das Sehen bewegter Bilder handelt (wie z. B. die angeführten Grützner'schen Ergebnisse und die Stampfer'schen Versuche mit dem Worte »Optik«), beruhen im wesentlichen lediglich auf den Thatsachen des Talbot'schen Satzes. Diejenigen aber, bei welchen der Eindruck bewegter Objecte erzeugt wird (und dies sind ja die interessantesten und wichtigsten), beruhen noch auf einem zweiten Moment, nämlich darauf, dass wir unter Umständen continuirliche Bewegungen zu sehen glauben, auch wenn die einzelnen auf einander folgenden Bildphasen nicht auf neben einander liegende Netzhautstellen fallen. Wenn ein objectiver Gegenstand vor unserem Auge auf- und abschwingt, so beleuchtet er die entsprechenden neben einander liegenden Netzhautpunkte. Wenn wir mittels des Stroboskops aber den

Eindruck eines auf- und abschwingenden Punktes erzeugen wollen, so dürfen die nach einander die Netzhaut beleuchtenden Punkte einen gewissen Abstand von einander haben, ohne dass dadurch der stroboskopische Effect vereitelt würde. Wir können diese Thatsache auch so ausdrücken: Wenn wir Bewegungen stroboskopisch darstellen, so dürfen mehrere Bewegungsphasen ausfallen, ohne dass wir es bemerken.

Ich war eine Zeit lang der Meinung, diese Thatsache hänge mit dem Verhalten unserer Sehschärfe zusammen. Unter Sehschärfe versteht man bekanntlich die Fähigkeit des Auges, zwei leuchtende Punkte zu unterscheiden¹⁾. Ich nahm nun an, wir würden nur dann in der Lage sein, dem Auge stroboskopisch den Eindruck von Bewegungen zu verschaffen, wenn die Retinabilder zweier successiver Phasen so nahe bei einander lägen, dass ihre Distanz, auch wenn sie zu gleicher Zeit geboten würden, nicht zum Bewusstsein käme. Ich habe mich aber alsbald von der gänzlichen Unrichtigkeit dieser, wie ich glaube, naheliegenden Meinung überzeugt. Man kann nämlich z. B. bei der Fischer'schen Anordnung mit dem schwingenden Punkte die Phasenbilder (ohne den stroboskopischen Effect zu stören) um mehr als ca. 5 mm entfernen, um eine Distanz also, die wir (natürlich bei normaler Entfernung des Apparates vom Auge) jedenfalls nicht in Folge unserer geringen Sehschärfe übersehen können.

Auf Grund des Grützner'schen Versuches mit den Bildern bockspringender Knaben, und unseres Experimentes mit den Bildern des Reiters bin ich nun zur Ansicht gelangt, dass der Ausfall von Bewegungsphasen in Folge centraler Ursachen unbemerkt bleibt. Das Experiment mit dem Reiter gab uns ein Beispiel dafür, dass eine Reihe von Bewegungsphasen unter Umständen ohne Nachtheil ausfallen kann, dass aber der Ausfall der Bewegungsphasen bei genügender Aufmerksamkeit und geeigneter Richtung derselben bewusst werden kann. Ebenso wie bei diesem Versuch verhält es sich bei den stroboskopischen Bewegungserscheinungen überhaupt. Der Ausfall von Bewegungsphasen bleibt, wenn der stroboskopische Effect eintritt, unbemerkt, kann aber bei genügender Aufmerksamkeit und

1) Eine übersichtliche Darstellung der wichtigsten Thatsachen der Sehschärfe giebt Nuel in Richet's Dictionnaire de Physiologie, Bd. I. (1895) S. 122—136.

geeigneter Richtung derselben zum Bewusstsein gebracht werden. Von der Richtigkeit dieser Anschauung kann man sich überzeugen, wenn man bei der Fischer'schen Anordnung mit den schwingenden Punkten auf der Bildscheibe einen ihr concentrischen Kreis zieht, so dass die Punkte der Bildscheibe ausschließlich auf beiden Seiten des Kreises liegen. Erzeugt man nun durch Bewegung der Scheiben den stroboskopischen Effect, so bemerkt man bei aufmerksamem Zusehen sogleich, dass man den schwingenden Punkt nie direct über dem Kreise sieht. Da deshalb der Satz, dass der Ausfall der Bewegungsphasen bei geeigneter Richtung und Stärke der Aufmerksamkeit bewusst wird, nicht nur bei dem Versuch mit dem Reiter, sondern auch bei dem elementaren Versuch mit dem schwingenden Punkt eintritt, so darf man wohl annehmen, dass er eine allgemeine Gesetzmäßigkeit der stroboskopischen Erscheinungen ausdrückt¹⁾.

Da nun der Ausfall der Bewegungsphasen bei geeigneter Richtung und Stärke der Aufmerksamkeit zum Bewusstsein kommt, so folgt daraus nothwendig, dass dieser Ausfall dann unter gewöhnlichen Umständen deshalb unbemerkt bleibt, weil es an einer geeignet gerichteten oder genügend intensiven Aufmerksamkeit fehlt. Der Ausfall der Bewegungsphasen bei den stroboskopischen Erscheinungen bleibt also in Folge rein centraler Ursachen unbemerkt.

Wir haben jetzt die Theorie der stroboskopischen Erscheinungen im wesentlichen erledigt. Wir haben gesehen, dass alle hierher gehörigen Vorgänge auf den Thatsachen des Talbot'schen Gesetzes beruhen. Der wichtigste Theil dieser Vorgänge, die stroboskopischen Bewegungserscheinungen beruhen außerdem auf der Thatsache, dass wir in Folge rein centraler Verhältnisse den Ausfall von Bewegungsphasen nicht bemerken. Wir haben jetzt nur noch zu Nr. 5 und Nr. 7 der Fischer'schen Ergebnisse einiges zu bemerken.

Dass die Erscheinung der Bewegung von Punkten bei der Fischer'schen Anordnung (vergl. dessen Ergebniss Nr. 5) um so leichter eintritt, je weniger Punkte neben einander zu gleicher Zeit sichtbar sind, hat schon Fischer richtig erklärt: Je mehr Punkte

1) Hiermit ist natürlich nicht gesagt, dass es uns immer möglich ist, der Aufmerksamkeit eine geeignete Richtung zu geben. So können wir z. B. bei der Fischer'schen Anordnung ohne Zuhülfenahme des Kreises oder dergl. den Ausfall der Bewegungsphasen nicht bemerken.

man zu gleicher Zeit sieht, eine desto größere Wahl hat man, wie man die Punkte einander zuordnen will, da eine Bewegung, die eine andere Zuordnung als die durch die Verticalen voraussetzt, ebenso gut möglich ist; erst bei größerer Geschwindigkeit macht sich ein Zwang geltend, bei der Häufung der Eindrücke die Zuordnung in der einfachsten Weise zu erklären.

Die Thatsache, dass der stroboskopische Effect um so deutlicher eintritt, je geringer die Intensität des Lichtes ist, das zwischen der Wirkung der einzelnen Phasenbilder auf die Netzhaut fällt (vergl. Fischer's Resultat Nr. 7 und meine Berichtigung dazu) ergibt sich aus unserer Unterschiedsempfindlichkeit. Wie wir den stroboskopischen Apparat auch einrichten mögen, und was für ruhende oder bewegte Bilder wir auch im Stroboskop sehen mögen, wir sehen die Bilder auf einem Untergrund und wir sehen sie um so deutlicher, je verschiedener ihre Helligkeit von derjenigen des Grundes erscheint. Die subjective Helligkeit des gesehenen Bildes wird nun (den Thatsachen des Talbot'schen Gesetzes entsprechend) durch die Lichtintensitäten des objectiven Bildes und der zwischen ihnen wirkenden Reize bestimmt; die subjective Helligkeit des Grundes wird ebenso bestimmt, nur dass hier an Stelle der Bilder eine homogene weiße, graue oder schwarze Fläche eintritt. Nun ist aus der Lehre von der Unterschiedsempfindlichkeit allgemein bekannt, dass der subjective Helligkeitsunterschied zweier benachbarter Flächen unter sonst gleichen Bedingungen um so größer ist, je schwächer das von diesen Flächen reflectirte Licht ist. Auch die stroboskopischen Bilder müssen sich daher um so deutlicher vom Grunde abheben, je geringer die objectiven Lichtintensitäten sind, die Bild und Grund entsprechen. Dies ist aber um so mehr der Fall, je schwächer die Intensität der — abgesehen von den Bildern — auf die Netzhaut wirkenden Reize ist. Die stroboskopischen Bilder müssen sich also um so deutlicher abheben, d. h. man muss die stroboskopischen Bilder um so deutlicher sehen, je geringer die Intensität des Lichtes ist, das zwischen den einzelnen Phasenbildern auf die Netzhaut fällt.
