

Psychologische Analyse der stroboskopischen Erscheinungen.

Von

Otto Fischer.

Hierzu Taf. II.

Die Erfindung des Stroboskops ist an die Namen Stampfer und Plateau geknüpft. Durch Zufall hatten Stampfer¹⁾ in Wien und Plateau²⁾ in Brüssel zu gleicher Zeit den Gedanken, mittelst einer geeigneten Vorrichtung die Vorstellung von Bewegungen gemalter Thiere, Maschinentheile u. s. w. künstlich hervorzurufen. Stampfer gab seinem Apparat den Namen »stroboskopische Scheibe«, Plateau nannte den seinigen »Phaenakistoskop, Phantasmaskop oder Phantaskop«. Diese beiden Apparate stimmen im Wesentlichen vollständig überein. Beide bestehen aus einer Scheibe, welche nahe an der Peripherie mit n kleinen, radial verlaufenden Fensterchen versehen ist. Auf einem nicht zu breiten, concentrischen Kreisring der Scheibe, der sich dicht an diese Ausschnitte nach dem Centrum hin anschließt, befinden sich dann in gleichen Abständen verschiedene Phasen eines bewegten Gegenstandes aufgezeichnet, deren Anzahl bei diesen Apparaten gewöhnlich auch gleich n ist. Dreht man die

1) Stampfer, Die stroboskopischen Scheiben oder optischen Zauberscheiben, deren Theorie und wissenschaftliche Anwendung. Jahrbuch des k. k. polytechnischen Instituts zu Wien Bd. 18. Juli 1833. — Die erste stroboskopische Scheibe hat Stampfer jedoch schon im December 1832 verfertigt.

2) Die erste Idee zu Plateau's Phänakistoskop findet sich vor in der Correspondance mathématique et physique de l'observatoire de Bruxelles. T. VII. p. 365. Januar 1833. Plateau sandte schon im November 1832 ein Exemplar seines Apparates an Faraday.

mit der bemalten Seite einem Spiegel zugewandte Scheibe und blickt dabei auf der Rückseite durch die Fenster, so sieht man im Spiegel n Gegenstände, welche in einer Bewegung begriffen sind, die genau den aufgezeichneten Phasen entspricht.

Diesem Apparat gab später Horner¹⁾ eine zweckmäßigere Gestalt, welche vor allem den Spiegel entbehrlich macht und außerdem sich durch größere Schärfe der sich bewegenden Figuren vor jenen Scheiben von Stampfer und Plateau auszeichnet, — weshalb, werden wir später erkennen. In der Form, die der Apparat von Horner erhalten hat, ist er noch heute als Kinderspielzeug sehr verbreitet. Er besteht aus einem hohlen Cylinder mit Fenstern in gleichen Abständen, der auf den Rand einer in horizontaler Lage drehbaren Kreisscheibe aufgesetzt und befestigt ist. Die Figuren, welche die Phasen der Bewegung eines Gegenstandes darstellen, zeichnete Horner auf die Innenfläche des Cylinders in die Zwischenräume benachbarter Fenster ein; heutzutage zeichnet man sie auf einen Papierstreifen auf und legt dann den letzteren an die Innenfläche des Cylinders unterhalb der Oeffnungen an. Horner gab seinem Apparat den Namen Dädaleum, da er, wie er sagt, ähnlich dem Kunstwerk, welches jener berühmte Künstler des Alterthums erfunden haben soll, Gestalten von Menschen und Thieren schafft, die sich bewegen; jetzt ist er unter den Namen Wundertrommel, Zoëtrop, Wheel of life bekannt.

Die im Voraufgehenden beschriebenen Apparate schienen mir nun für den Zweck einer genaueren Untersuchung der auftretenden Erscheinungen aus dem Grunde nicht sehr geeignet, weil bei ihnen allen während der Rotation die Geschwindigkeit der Oeffnungen einerseits und der Figuren andererseits genau gleich ist, und zwar bewegen sich die Oeffnungen, durch die man beobachtet, und die Figuren bei den Apparaten von Stampfer und Plateau in derselben Richtung, beim Dädaleum in entgegengesetzter Richtung; dies ist auf die Erscheinung selbst nicht ohne Einfluss. Um nun einen Apparat zu haben, bei dem man das Verhältniss der Geschwindigkeiten sowie die Richtung der Bewegung von Spalten und Figuren beliebig variiren kann, benutzte ich zwei Scheiben; die eine trug nahe der Peripherie die aufgezeichneten

1) Poggendorff's Annalen, Bd. 32, pag. 650.

Bewegungsphasen eines Gegenstandes, die andere allein die Oeffnungen. Die erstere, die wir kurz als Bildscheibe einführen wollen, wurde mittelst eines Uhrwerks in annähernd gleichmäßige Rotation in verticaler Ebene versetzt, während die andere, die wir Spaltscheibe nennen wollen, parallel mit der Bildscheibe vor derselben in einiger Entfernung so angebracht wurde, dass der Beobachter sie um eine horizontale Axe, welche die Verlängerung der Rotationsaxe der Bildscheibe bildete, an einem Griff mit der Hand beliebig drehen konnte. Die Spaltscheibe war auf der Rückseite mit weißem, auf der vorderen (dem Beobachter zugekehrten) Seite mit schwarzem Papier beklebt. Bei den Versuchen, die ich anstellte, war es vollständig genügend, die vordere Scheibe mit der Hand zu drehen, indem man aus dem Geräusch des Uhrwerks, welches die Bildscheibe in Bewegung setzte, genau den Verlauf einer Umdrehung merkte und danach die Rotation der Spaltscheibe einrichten konnte.

Die vordere Scheibe trug nun 12 schmale Spalten, die sich gleichweit von einander entfernt in radialer Richtung zwischen zwei concentrischen Kreisen mit dem Drehpunkt der Scheibe als Mittelpunkt und den Radien von 165 mm und 260 mm hingen. Um möglichst einfache Verhältnisse zu haben, mit denen allein sich eine derartige Untersuchung wird rein durchführen lassen, hatte ich auf der Bildscheibe in einem ganz entsprechenden Kreisring n Phasen eines auf- und abschwingenden Punktes resp. schwarzen Kreises angebracht. Die Phasen waren einmal so gezeichnet, dass, wenn man sich den Kreisring auf der Bildscheibe an einer Stelle in radialer Richtung aufgeschnitten und dann in ein Rechteck deformirt denkt, dieselben auf dem Stück einer Sinuslinie liegend erscheinen würden, etwa so, wie es Figur 1 (Taf. II) andeutet. Ein anderes Mal waren die Phasen so aufgezeichnet, dass sie nach dem beschriebenen Deformationsprocess auf einer gebrochenen Linie liegen würden, so, wie es Figur 2 versinnlicht. Damit ich in bequemer Weise die Zahl n variiren konnte, hatte ich auf der einen Seite der Bildscheibe, die wir Seite S nennen wollen, in den obigen Kreisring eine solche geschlungene Linie, welche bei der Deformation in das Stück einer Sinuslinie ($y = \sin x$; $x = 0$ bis 2π) übergeht, auf der anderen Seite der Scheibe, die Seite G heißen möge, eine solche, welche bei der Deformation in eine gebrochene Linie übergeht, stark aufgezeichnet. Man brauchte dann

nur über die betreffende, so bemalte Seite der Bildscheibe eine zweite Scheibe aus undurchsichtigem weißen Papier mit n Spalten, die ganz in der Weise wie die Spalten der Spaltscheibe ausgeschnitten waren, aufzulegen, um dann genau n Phasen eines auf- und ab-schwingenden Punktes hervortreten zu lassen (vgl. Figur 3).

Zunächst ließ ich auf solche Art gerade 12 Phasen auf Seite S der Bildscheibe erscheinen und setzte diese letztere durch das Uhrwerk, die Spaltscheibe aber mit der Hand in nicht zu langsame Bewegung. Drehte ich die Spaltscheibe in derselben Richtung und mit derselben Geschwindigkeit wie die Bildscheibe, so sah ich, in gleichen Winkelabständen von der Größe $\frac{\pi}{6}$, 12 oder weniger Punkte auf- und ab-schwingen; dieselben schienen nicht ganz scharf umgrenzt und, sobald sich das Auge nicht direct vor der Spaltscheibe befand, etwas breiter, als sie in der That waren. Drehte ich dagegen die Spaltscheibe in der zur Rotation der Bildscheibe entgegengesetzten Richtung, aber ebenfalls mit derselben Geschwindigkeit wie letztere, so erschienen nicht 12, sondern nahezu die doppelte Anzahl von Punkten in Bewegung, und zwar waren sie diesmal viel schärfer begrenzt, gleichgültig, ob sich das Auge ganz nahe an der Spaltscheibe oder in einiger Entfernung befand. Im ersten Falle haben wir die stroboskopische Scheibe oder das Phaenakistoskop, im letzten Falle das Dädaleum. — Der Unterschied zwischen beiden Versuchen ist nun der, dass im ersten Falle jedes Phasenbild nur dann eine relativ kurze Zeit auf das Auge wirkt, wenn man das Auge direct am Spalt hat, und dass es um so länger vor dem Auge bleibt, je weiter dasselbe vom Spalt entfernt ist; könnte man aus dem Unendlichen die beiden in gleicher Bewegung begriffenen Scheiben betrachten, so würde man offenbar nur 12 dunkle Ringe sehen, vorausgesetzt, dass die einzelnen Bilder alle verschiedene Abstände vom Centrum besitzen und die Spalten gerade vertical vor die Bilder gebracht sind; denn es würde dann jedes Bild immer in Sicht bleiben, genau so, als wenn wir die Bildscheibe allein während der Rotation betrachteten. Anders verhält es sich mit der Erscheinung im zweiten Falle, wo beide Scheiben sich zwar mit derselben Geschwindigkeit, aber in verschiedener Richtung bewegen. Hier sieht man die Erscheinung viel besser, wenn man das Auge etwas entfernt von der vorderen Scheibe hält. Befindet sich das

Auge vor derselben, so dass man immer nur durch einen einzigen Spalt auf einmal sehen kann, so erkennt man auch nur 12 Punkte. Sobald man aber das Auge etwas entfernt, so dass durch mehr als einen Spalt die hintere Scheibe sichtbar wird, sieht man sofort eine größere Anzahl von Punkten in Bewegung; die sich scheinbar bewegenden Punkte rücken desto näher an einander, je weiter man sich von der vorderen Scheibe entfernt, bis schließlich bei unendlicher Entfernung des Auges die Punkte gerade um $\frac{\pi}{12}$ von einander ab stehen würden. Der Grund dafür ist leicht einzusehen. Er liegt darin, dass bei entgegengesetzter Richtung, aber gleicher Geschwindigkeit der Rotation beider Scheiben nach Drehung von $\frac{\pi}{12}$ immer wieder ein Spalt gerade vor ein Phasenbild zu liegen kommt; allgemein bei n Phasenbildern würde dieses nach Drehung um $\frac{\pi}{n}$ stattfinden.

Aus dem Gesagten ist ersichtlich, dass das Dädaleum insofern der stroboskopischen Scheibe von Stampfer vorzuziehen ist, als es gestattet, dass man sich weiter vom Apparat entfernt, und dass somit mehrere Personen zu gleicher Zeit bequem die Erscheinungen beobachten können. Neben diesen mehr äußerlichen Vorzug stellt sich ein werthvollerer, der sich auf die Deutlichkeit der Bilder bezieht. Bei gleicher Richtung der Bewegung von Spalten und Figuren ist der Phaseneindruck ein viel längerer als bei entgegengesetzter Richtung. Da man nun im letzten Falle den gemalten Gegenstand viel deutlicher erkennt, so ist also eine Hauptbedingung für das Eintreten der Erscheinung die kurze Dauer des Lichteindrucks.

Wir wollen im Folgenden nun immer die Scheiben in verschiedener Richtung, aber zunächst noch mit derselben Geschwindigkeit gedreht denken.

Die Erscheinung, wie sie beschrieben wurde, dass man an m verschiedenen, gleichweit von einander entfernten Stellen einen Punkt sich auf- und abbewegen sieht, trifft nur zu, so lange die gemeinsame Geschwindigkeit der beiden Scheiben eine gewisse Grenze nicht übersteigt. Wächst die Geschwindigkeit über diese Grenze, so sieht man auf einmal zwei dicht unter einander gelegene Punkte gemeinsam dieselbe Bewegung ausführen; vergrößert man

die Geschwindigkeit noch mehr, so gesellt sich zu diesen beiden Punkten noch ein dritter, ein vierter u. s. f. Alle diese Punkte sieht man direct unter einander, gleichsam eine Kette bildend, die sich auf- und abwärts bewegt. Trägt man die Phasen abwechselnd mit zwei verschiedenen Farben auf¹⁾ und gibt den Scheiben eine solche Geschwindigkeit, dass man zwei Punkte unter einander sieht, so tauschen diese beiden, welche verschieden gefärbt sind, bei der Auf- und Abbewegung fortwährend ihre Farben aus, und zwar während einer Umdrehung gerade so oft, als man Phasen aufgezeichnet hat. Gibt man den Phasen allgemein abwechselnd k verschiedene Farben, wobei k natürlich Theiler der Anzahl n der Bilder sein muss, und lässt die Scheiben so schnell rotiren, dass man k Punkte unter einander sieht, so permutiren sich die Farben bei der Bewegung cyklich.

Zeichnet man endlich von vornherein immer zwei Phasen auf denselben Radius der Scheibe dicht unter einander auf und gibt dann den Scheiben die Geschwindigkeit, die man nöthig hatte, um bei einer aufgezeichneten Phasenreihe zwei Punkte unter einander zu sehen, so erblickt man bei der scheinbaren Bewegung 3 Punkte auf demselben Radius u. s. w. Hat man insbesondere im letzten Falle die beiden Phasenreihen, die auf zwei um $\frac{2\pi}{n}$ verschobenen Sinuslinien²⁾ liegen, mit verschiedener Farbe aufgetragen, etwa sämmtliche Phasenbilder der einen Sinuslinie blau, sämmtliche der anderen roth, so wird bei der Bewegung von den 3 unter einander liegenden Punkten der vorangehende immer eine und dieselbe Farbe besitzen, ob die rothe oder die blaue, das hängt von der Richtung der Rotation ab; der mittelste wird dagegen in einer Mischfarbe (mein Roth und Blau gaben ein röthliches Violett) zu sehen sein, während der letzte von blauer Farbe ist, wenn der erste roth war, und umgekehrt. An den Stellen, wo die Bewegung sich umkehrt, sieht man einen Moment nur 2 Punkte, was man übrigens auch beobachten konnte, wenn bei einer

1) Wozu ich natürlich nicht mehr die frühere Bildscheibe benutzen konnte, sondern auf derselben eine neue Scheibe aus weißem Papier befestigte, welche die verschieden gefärbten Phasen trug.

2) Unter Sinuslinie soll der Kürze der Darstellung halber auch eine solche Curve verstanden sein, die in der früher beschriebenen Weise aus einer mathematischen Sinuslinie entsteht, wenn man die beiden aufgezeichneten Tangenten der letzteren in zwei concentrische Kreise verwandelt.

aufgezeichneten Phasenreihe die Scheiben so schnell gedreht wurden, dass sich 3 Punkte unter einander einstellten.

Die beschriebenen Erscheinungen setzen es außer Zweifel, dass wir es hier, wie bei allen stroboskopischen Phänomenen mit einer Wirkung von Nachbildern zu thun haben. Betrachten wir z. B. die Entstehung der Erscheinungen, welche eine solche doppelte Phasenreihe, wie sie eben angeführt wurde, hervorbringt. Die aufgezeichneten Phasen werden sich auf dem Kreisring etwa so gruppieren, wie es Figur 4 darstellt. Dabei ist der Uebersichtlichkeit halber wieder der Ring in ein Rechteck deformirt worden. Nimmt man an, dass die Rotation mit solcher Geschwindigkeit vor sich geht, dass immer noch ein sehr deutliches Nachbild der vorhergehenden Phasenfigur vorhanden ist, wenn das folgende Bild in das Gesichtsfeld tritt, so wird man während einer ganzen Umdrehung die in Figur 5 verzeichneten 12 Gesichtseindrücke haben; damit ist aber das früher Gesagte bestätigt. Natürlich erhält man die Erscheinung nur dann in dieser Reinheit, wenn die Punkte ganz genau construirt sind. Verwendet man complementäre Farben, so wird der mittelste Punkt im Allgemeinen grau erscheinen.

Selbst in dem Falle, dass man immer nur einen Punkt in verticaler Richtung sich bewegen sieht, kann man Nachbilder direct bei langsamer Drehung des noch zu beschreibenden, für den Zweck genauer Messungen construirten Dädaleums wahrnehmen.

Lässt man an dem Apparat mit den zwei Scheiben die letzteren allmählich langsamer rotiren, so kommt man schließlich zu einer Geschwindigkeit, bei der nicht mehr der Eindruck eines sich auf- und abbewegenden materiellen Punktes gewonnen wird. Andererseits, wenn man die Scheiben anfangs ganz langsam bewegt, wobei man deutlich die einzelnen aufgezeichneten Phasen erkennt, ohne den Eindruck der Bewegung ein und desselben Punktes zu haben, und dann die Geschwindigkeit der Rotation allmählich vergrößert, so gelangt man schließlich zu einer Geschwindigkeitsgröße, bei der die Erscheinung der Bewegung eines Punktes sich plötzlich ganz zwingend aufdrängt. Aus dem Einflusse der Uebung und der sich geltend machenden Trägheit des Bewusstseins gegenüber dem Wechsel der Erscheinungen kann man a priori schließen, dass die letztere Geschwindigkeitsgrenze

einen Werth hat, der größer ist als im ersten Falle, wo man von schneller Drehung der Scheiben ausging.

Für genauere Messungen in dieser Hinsicht erwies sich die Anwendung der beiden Scheiben nicht günstig, da eine nothwendige Bedingung für solche Messungen die ist, dass beide Scheiben mit derselben Geschwindigkeit, oder doch mit einem bekannten constanten Geschwindigkeitsverhältniss rotiren. Dies lässt sich jedoch nur mit Hülfe eines sehr genauen und complicirten Mechanismus realisiren. Deshalb ging ich bei den Messungen auf das Dädaleum zurück, wo in der That die Bilder einerseits und die Spalten andererseits sich mit genau entgegengesetzt gleicher Geschwindigkeit bewegen. Die Außenseite des Dädaleumcyinders verband ich durch einen Schnurlauf mit einer Axe meines Uhrwerks, die einen beträchtlich kleineren Radius besaß als der Cylinder am Dädaleum; dadurch wird erreicht, dass die Geschwindigkeiten dieser beiden durch den Schnurlauf verbundenen Kreiscylinder sehr verschieden sind, und zwar die des Dädaleums um so viel mal kleiner als die der Walze, wie der Radius der Walze am Uhrwerk kleiner ist als der Radius des Dädaleumcyinders. Man ist somit in der Lage, langsame Rotationen des Dädaleums an den schnellen, bequem messbaren Umdrehungen des Uhrwerks zu messen.¹⁾

Das Verhältniss der Geschwindigkeiten beider Walzen wurde auf folgende Weise ganz genau ermittelt. Zwei gegenüberstehende Fenster des Dädaleums deckte ich mit schwarzen Papierstreifen zu, in denen je ein verticaler Einschnitt angebracht war, durch welchen man zwar nicht blicken, aber doch den Schein eines dahinter stehenden sehr hellen Lichtes wahrnehmen konnte. Außerhalb des Dädaleums stellte ich mittelst eines Stativs einen ebenfalls mit einem sehr feinen Einschnitt versehenen schwarzen Papierstreifen vertical auf und hinter diesen ein Licht. Dann brachte ich das Dädaleum in eine solche Lage, dass man gerade durch diese 3 verticalen Einschnitte einen Lichtschimmer wahrnahm; derselbe war in der That nur in einem kurzen Moment zu sehen. Am Uhrwerk markirte ich in dieser Stellung durch ein Loth die Lage der Bildscheibe, welche direct an jener den Schnurlauf tragenden Walze befestigt war und jetzt nur den Zweck hatte, eine gleich-

1) Hierzu benutzte ich eine Uhr, welche Zeitgrößen bis auf 0,2" genau abzulesen gestattete.

mäßigere Drehung der beiden Walzen herzustellen. Nun drehte ich den Cylinder des Dädaleums gerade 10 mal herum, bis wieder der Lichtschimmer durch die 3 Papiereinschnitte sichtbar wurde, zählte dabei die Umdrehungen der Bildscheibe des Uhrwerks und maß schließlich den Winkel, den jetzt ein in der Axe der Bildscheibe befestigtes Loth mit der ursprünglichen, von der Anfangsstellung her markirten Lage dieses Lothes bildete.

Auf diesem Wege ermittelte ich mit, für meine Messungen bei weitem hinreichender Genauigkeit als Verhältniss der Geschwindigkeiten beider Walzen die Zahl 22,860. Wenn also die Bildscheibe am Uhrwerk einmal herumgedreht worden ist, hat das Dädaleum erst $1 : 22,860$ seiner ganzen Umdrehung vollendet; braucht die kleinere Walze τ Secunden zu ihrer Umdrehung, so dreht sich der Dädaleumcylinder erst in $22,860 \cdot \tau$ Secunden einmal herum. Das von mir ursprünglich benutzte Dädaleum besaß 13 Spalten; daher werden in diesem Falle die einzelnen Phasenbilder in einer Zeit von $\frac{22,860}{13} \cdot \tau$ Secunden dem Auge dargeboten. Man braucht somit nur die Zeit τ zu messen, in der sich an der gesuchten Grenze der Bewegungserscheinung die Scheibe des Uhrwerks gerade einmal herumdreht, um durch Multiplication mit $22,860 : 13 = 1,758$ die Zeit zu erhalten, in der zwei aufeinanderfolgende Phasenbilder am Auge vorüber streichen. Auf die Ermittlung dieser Zeit kann es doch offenbar bei derartigen Versuchen nur ankommen. Die Zahl 1,758 ist die aus den Dimensionen des Apparates resultirende Constante des Versuchs.

Indem ich nun die betreffenden Zeitgrenzen mit diesem Apparat ermitteln wollte, erwies sich derselbe bei wiederholten Versuchen nicht geeignet, die geringen Unterschiede zwischen den beiden Zeitgrenzen anzugeben. Das mochte eines Theils an den geringen Dimensionen, anderen Theils an der ungenauen Construction desselben liegen. Aus diesem Grunde baute ich ein Dädaleum von viel bedeutenderen Dimensionen als das bisher benutzte auf. Der Durchmesser des Cylinders betrug 760 mm; auf dem Cylinder befanden sich 72 Spalten von 150 mm Länge und 3 mm Breite, die in genau gleichen Abständen von 33 mm ausgeschnitten waren. Um in bequemer Weise die Anzahl der Fenster verringern zu können, hatte ich an jedem eine

Einrichtung angebracht, welche es gestattete, ohne Mühe dasselbe zu verdecken. Dieses neue Dädaleum befestigte ich concentrisch auf dem alten und ließ den Schnurlauf in der beschriebenen Weise von der Walze des Uhrwerks um das alte Dädaleum herumgehen. Das Verhältniss der Geschwindigkeiten der Umdrehung des neuen Dädaleumcyinders einerseits und der Walze des Uhrwerks andererseits blieb demnach immer noch dasselbe, nämlich 22,860. Je nachdem aber 72, 36, 24, 18, 12 etc. Spalten am neuen Dädaleum beim Versuch benutzt wurden, betrug die Constante des Versuchs jetzt wie man nach den früheren Ueberlegungen ohne weiteres berechnet, bezüglich 0,3175, 0,6350, 0,9525, 1,270, 1,905 etc.

Um die eine Zeitgrenze zu messen, versetzte ich die Scheibe des Uhrwerks in schnelle Rotation. Die Geschwindigkeit dieser Rotation nahm nur allmählich ab, so dass ich bequem den Zeitpunkt erwarten konnte, bei dem die Erscheinung der Bewegung eines materiellen Punktes verschwand. Die Zeit τ , welche in diesem Moment die Scheibe des Uhrwerks gebrauchte, ergab dann, mit der betreffenden Constanten des Versuchs multiplicirt, die Zeitgröße, in welcher, unter den durch die Dimensionen des Apparates bestimmten Verhältnissen, zwei auf einander folgende Phasenbilder dem Auge dargeboten werden müssen, damit wir sie gerade noch als Bewegungsphasen ein und desselben Gegenstandes deuten. Wie schon erwähnt wurde, ist a priori zu schließen, dass diese Zeitgrenze t größer ist als die Zeitgrenze t' , welche sich herausstellt, wenn man mit langsamer Rotation beginnend die Uhrwerkscheibe allmählich schneller dreht. Aus diesem Grunde wollen wir t die obere Zeitgrenze und t' die untere Zeitgrenze für diese Erscheinung nennen.

Es sei gleich von vornherein bemerkt, dass ich alle im Folgenden angeführten Beobachtungen nur mit einem Auge anstellte, da sich bei der Benutzung beider Augen die Verhältnisse in Folge der doppelten Netzhautbilder und der getheilten Aufmerksamkeit wesentlich compliciren. Sollte diese Arbeit später wieder aufgegriffen werden, so würden hauptsächlich diese Verhältnisse einer eingehenderen Untersuchung unterworfen werden müssen.

Zur bequemeren Darstellung der Versuche soll ferner schon jetzt angeführt werden, dass 5 verschiedene aufgezeichnete Phasenreihen

eines sich auf- und abbewegenden Punktes, oder vielmehr dunkelblauen Kreises vom Durchmesser 9 mm benutzt wurden. Die auf Streifen von entsprechender Dimension gezeichneten Phasen waren in der schon früher angegebenen Weise auf Sinuscurven vertheilt. Der eine Streifen, den wir S_1 nennen wollen, enthielt 72 Phasenbilder auf eine Periode der Sinuscurve vertheilt, der zweite Streifen, S_2 , 72 Bilder auf 6 Perioden, der dritte, S_3 , 36 Bilder auf 3 Perioden, der vierte, S_4 , 24 Bilder auf 2 Perioden und der fünfte, S_5 , 12 Bilder auf 1 Periode der Sinuscurve vertheilt.

Eine Messung mit Hülfe des Streifens S_1 führte zu keinem Resultat, weil dabei die Phasen zu wenig in ihrer Lage von einander verschieden waren, was bedingt, dass die Zeitgrenzen zu groß sind, als dass sie mit einiger Genauigkeit durch diesen Apparat ermittelt werden könnten. Wurde dagegen Streifen S_2 benutzt und beim Versuch durch eine im Innern des Cylinders angebrachte Blending nur ein auf- und abschwingender Punkt sichtbar gemacht, so ergaben sich für 10 Messungen der oberen Zeitgrenze die Werthe:

0,197 Sec.	}	Das arithmetische Mittel davon ist 0,210 Secunden.
0,216 »		
0,203 »		
0,216 »		
0,210 »		
0,203 »		
0,210 »		
0,222 »		
0,210 »		
0,210 »		

Als untere Zeitgrenze stellte sich bei 10 Messungen heraus:

0,178 Sec.	}	wovon das arithmetische Mittel 0,189 Secunden.
0,191 »		
0,197 »		
0,191 »		
0,191 »		
0,197 »		
0,197 »		
0,191 »		
0,178 »		
0,184 »		

Wurde die Oeffnung der Blending so erweitert, dass 2 neben einander auf- und abschwingende Punkte zu sehen waren, so stellten sich folgende Zeitgrenzen heraus:

Ob. Ztgr. (in Secunden) ¹⁾		Unt. Ztgr. (in Secunden)	
0,184	} arithm. Mittel: 0,186"	0,184	} arithm. Mittel: 0,175"
0,191		0,171	
0,184		0,171	
0,171		0,178	
0,197		0,171	
0,191		0,171	
0,191		0,178	
0,184		0,171	
0,184		0,178	
0,184		0,171	

Wurden 12 neben einander schwingende Punkte sichtbar gemacht, so ergaben sich die Zahlen:

Ob. Ztgr.		Unt. Ztgr.	
0,140	} ar. Mittel: 0,133"	0,102	} ar. Mittel 0,109"
0,140		0,108	
0,140		0,108	
0,133		0,108	
0,127		0,108	
0,127		0,114	
0,133		0,108	
0,133		0,108	
0,127		0,108	
0,127		0,114	

Wurde endlich die Blendung ganz entfernt, so war eine Messung nicht mehr möglich, indem man bei den durch den Apparat messbaren Geschwindigkeiten der Rotation theils die Erscheinung vieler neben einander auf- und abschwingender Punkte hatte, theils nur den eingelegten Streifen durch die Fenster hindurch sich mit all seinen Phasenbildern herumdrehen sah. Es lag dabei ganz in der Willkür des Beobachters, sich die eine oder die andere Erscheinung zu verschaffen. Wenn man z. B. erst durch Abblenden mit der Hand eine geringere Anzahl Punkte sichtbar machte und dem Apparat eine solche Umdrehungsgeschwindigkeit ertheilte, dass man diese Punkte in Bewegung sah, so konnte man stets auch nach Entfernung der vorgehaltenen Hand alle sichtbaren Punkte sich auf- und abbewegen sehen.

Aus den oben angeführten Zahlen ist ersichtlich, dass die Bilder in um so kürzeren Zeitintervallen vor

1) Da alle bei den folgenden Messungen auftretenden Zahlen Secundenanzahlen bedeuten, so soll bei ihnen die Benennung fortgelassen werden.

dem Auge erscheinen müssen, wenn man gerade die Erscheinung der Bewegung von Punkten haben will, je mehr Punkte oder allgemein Bilder neben einander zu gleicher Zeit sichtbar sind.

Ist nur ein Punkt zu sehen, so hat man gar keine Wahl, wie man die einzelnen am Auge vorüberstreichenden Bilder einander zuordnen soll. Wenn dagegen immer mehrere Bilder nebeneinander zu gleicher Zeit sichtbar werden, so ist bei geringer Geschwindigkeit der Rotation kein so großer Zwang vorhanden, gerade die Phasenbilder auf einander, oder vielmehr auf ein und denselben bewegten Punkt zu beziehen, welche successiv auf derselben Verticalen erscheinen; man hat die Wahl, die Phasenbilder auf verschiedene Weise einander zuzuordnen, da eine Bewegung, welche 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 treffen; die einfachste Art der Zuordnung war aber bei den benutzten Bilderstreifen gerade die beim Aufzeichnen der Bilder beabsichtigte. Durch dieses Wahlmoment werden natürlich die Zeitgrenzen verkleinert, und zwar um so mehr, je mehr Phasenbilder zu gleicher Zeit neben einander zu sehen sind. Ein bestimmtes Gesetz aus den angegebenen Zahlen ableiten zu wollen — selbst, wenn noch mehr verschiedene Fälle untersucht worden wären — schien mir nicht angebracht, weil das, was über den Versuch ohne Blendung gesagt wurde, auch in gewissem Maße von den Versuchen gilt, bei denen nur eine geringe Anzahl neben einander schwingender Punkte sichtbar waren. Auch hierbei wird der Beobachter zum Theil willkürlich in die Erscheinung eingreifen können.

Eine weitere Versuchsreihe hatte den Zweck, festzustellen, welchen Einfluss die Dauer der erhaltenen optischen Eindrücke auf die stroboskopischen Erscheinungen hat. Die bei allen Versuchen angewandten Bilder, die wir immer der Kürze halber als Punkte bezeichneten, waren, wie schon erwähnt wurde, dunkelblaue Kreise vom Durchmesser 9 mm. Die Breite der Spalten betrug 3 mm und der Durchmesser des Dädaleumcyinders 760 mm. Das Auge war von der Spaltenreihe 250 mm bis 300 mm entfernt. Da die Entfernungen des Auges vom Spalt einerseits und vom Phasenbild andererseits sich

nahezu wie 1 : 4 verhielten, so sah man durch den Spalt hindurch auf dem Bildstreifen ein vertical stehendes, rechteckiges Stück von 12 mm Breite. Bei der Drehung des Apparates war deshalb jedes Phasenbild in unverkürzter Größe so lange Zeit sichtbar, als ein Punkt des Dädalumcyinders braucht, um einen Weg von $\frac{12-9+3}{2}$ mm zu beschreiben. Die Entfernung der Spalten von einander betrug, auf der Peripherie gemessen, 33 mm; deshalb war bei den angeführten Versuchen das Phasenbild in jedem Falle während der Zeitdauer von $\frac{12-9+3}{2 \cdot 33} t = \frac{1}{11} t$ resp. $\frac{1}{11} t'$ ganz in Sicht. Es wird jedoch auch noch ein Phasenbild, von dem ein geringer Theil unsichtbar ist, in Folge von Association reproducirter Vorstellung des fehlenden Theiles genau denselben Eindruck machen wie ein vollständig sichtbares Bild; deshalb können wir in erster Annäherung als die Zeit, in der das Phasenbild auf das Auge wirkt, $\frac{1}{10} t$ resp. $\frac{1}{10} t'$ annehmen.

Es lässt sich nun mit Hülfe der Einrichtung des Apparates, um beliebige Spalten ausschalten zu können, leicht die Dauer des Eindrucks variiren. Benutzt man nämlich nur 36 Spalten, so werden dieselben eine Entfernung von 66 mm von einander haben; demnach wird, in Folge der früheren Betrachtungen, jedes Phasenbild dem Auge nur eine Zeit von $\frac{1}{20} t$ resp. $\frac{1}{20} t'$ Sec. dargeboten werden, wo t und t' die ein für allemal festgesetzte Bedeutung haben. Da wir sahen, dass die Erscheinung viel besser gelingt, wenn wir an dem zuerst benutzten Apparat den beiden Scheiben die entgegengesetzte Richtung der Rotation ertheilten, als wenn wir sie in gleicher Richtung rotiren ließen, was ja eben einen Unterschied der Dauer des optischen Eindrucks bedingt, so können wir schon im voraus erkennen, dass die Zeitgrenzen, die sich bei den Versuchen mit 36 Spalten herausstellen, größer werden als die der ersten Versuchsreihe. Somit wird bei den folgenden Messungen sich die Dauer des Phaseneindrucks nicht genau als die Hälfte der Dauer bei der ersten Messungsreihe herausstellen, sondern größer als die Hälfte. Andererseits werden die sich hierbei ergebenden Zeitgrenzen t und t' Werthe haben müssen, die zwar größer als die der früheren Versuchsreihe, aber kleiner als das Doppelte der letzten sind; denn, wären sie gerade

doppelt so groß, so würden ja die Phaseneindrücke dieselbe Zeit dauern wie bei der ersten Versuchsreihe. Aus diesem letzteren Grunde müssten sich dann aber nothwendig dieselben Werthe t , t' wie früher herausstellen, was einen Widerspruch ergibt.

Bei den folgenden Versuchen ist durch eine Blendung immer erreicht worden, dass nur ein bewegter Punkt sichtbar war. Bezeichnet man die beiden Zeitgrenzen für den früher beschriebenen Versuch mit 72 Spalten und 72 Bildern (Streifen S_2), bei dem auch nur ein Punkt sichtbar gemacht war, mit t_0 und t_0' ($t_0 = 0,210''$; $t_0' = 0,189''$), so weiß man jetzt, dass ein Versuch mit 36 Spalten und 36 Bildern (Streifen S_3) Zeitgrenzen ergeben wird, die zwischen t_0 und $2t_0$, resp. t_0' und $2t_0'$ liegen. Die Zeitgrenzen eines Versuches mit 24 Spalten und 24 Bildern (Streifen S_4) werden, wie man durch ganz analoge Betrachtungen findet, zwischen t_0 und $3t_0$, resp. t_0' und $3t_0'$ und die Zeitgrenzen beim Versuch mit 12 Spalten und 12 Bildern (Streifen S_5) zwischen t_0 und $4t_0$, resp. t_0' und $4t_0'$ gelegen sein.

Der Versuch mit Streifen S_3 und 36 Spalten ergab:

Ob. Ztgr.	Unt. Ztgr.
0,318	0,267
0,305	0,241
0,279	0,254
0,305	0,267
0,292	0,254
0,292	0,279
0,279	0,292
0,305	0,279
0,318	0,279
0,318	0,254
} ar. Mittel: 0,302"	} ar. Mittel: 0,267"

der Versuch mit Streifen S_4 und 24 Spalten:

Ob. Ztgr.	Unt. Ztgr.
0,362	0,324
0,243	0,305
0,362	0,305
0,381	0,324
0,362	0,305
0,381	0,324
0,324	0,343
0,362	0,324
0,343	0,324
0,381	0,343
} ar. Mittel: 0,360"	} ar. Mittel: 0,322"

und endlich der Versuch mit Streifen S_5 und 12 Spalten:

Ob. Ztgr.		Unt. Ztgr.
0,419	} ar. Mittel: 0,431"	0,381
0,457		0,343
0,457		0,305
0,381		0,419
0,457		0,381
0,457		0,419
0,381		0,381
0,419		0,381
0,419		0,381
0,457		0,381

Während somit bei einer Dauer des Phaseneindrucks von 0,021" resp. 0,019" die Zeitgrenzen 0,210" resp. 0,189" betragen, ergeben sich für die Phaseneindrücke von der Dauer: 0,015" resp. 0,013" die Zeitgrenzen 0,302" resp. 0,267" 0,013" resp. 0,011" » » 0,360" resp. 0,322" 0,011" resp. 0,009" » » 0,431" resp. 0,377".

Aus diesen Zahlen ergibt sich das, natürlich nur approximativ gültige, Gesetz, dass bei zwei Versuchen, die nur in der Dauer des Eindrucks jeder einzelnen Phase auf das Auge von einander abweichen, die Zeitgrenzen sich umgekehrt verhalten wie die Zeiten, während welcher die Phasenbilder auf das Auge wirken können.

Wie früher (pag. 132 u. 33) erwähnt wurde, stellen sich bei großer Geschwindigkeit der Umdrehung des Stroboskops zwei oder mehrere Punkte unter einander ein. Wiederholte Messungen der Zeitgrenzen, bei denen sich zwei Punkte untereinander einstellten, ergaben, unter Benutzung des Streifens S_2 und aller 72 Spalten, folgende Werthe:

Ob. Ztgr.		Unt. Ztgr.
0,108	} ar. Mittel: 0,116"	0,089
0,114		0,095
0,114		0,089
0,114		0,095
0,121		0,095
0,114		0,102
0,114		0,095
0,114		0,095
0,121		0,095
0,121		0,089

Diese beiden Messungsreihen geben die Zeitgrenzen an, bei denen die unter den gegebenen Bedingungen (Dauer des Phaseneindrucks 0,012" resp. 0,009" u. s. w.) erhaltenen Nachbilder noch stark genug sind, um neben den directen Phaseneindrücken objectivirt werden zu können; sie haben also ein allgemeineres psychologisches Interesse. Wollte man sich überhaupt einmal damit beschäftigen, zu untersuchen, in welcher Zeit unter allen möglichen Bedingungen ein Nachbild noch so stark ist, um neben einem directen optischen Eindruck nicht zu verschwinden, so würde sich hierzu voraussichtlich das Stroboskop sehr gut eignen. —

Nach Messungen von Plateau¹⁾ und Emsmann²⁾ beträgt die Dauer eines Nachbildes, welches durch einen Lichteindruck von mittlerer Helligkeit erzeugt wird, 0,3" bis 0,35". Da ich die Bildreihe immer durch eine innerhalb des Dädaleumcyinders befindliche sehr helle Gasflamme erleuchtete, so arbeitete ich mit einer Helligkeit, die eine mittlere Größe durchaus überstieg. Bedenkt man nun, dass die Dauer der Nachwirkung in geradem Verhältniss mit der Intensität des Gesichtseindrucks zunimmt³⁾, so erkennt man, dass die bei allen angeführten Versuchen gefundenen Zeitgrenzen durchweg die Maximaldauer der Nachbilder nicht überstiegen.

Hieraus kann man schließen, dass nur dann eine bezweckte Bewegungsvorstellung erzeugt wird, wenn immer schon eine neue Phasenfigur ihr Bild auf die Netzhaut wirft, so lange das Nachbild der vorhergehenden noch nicht ganz verschwunden ist. Es ist dabei aber nicht nöthig, dass das Nachbild noch eine so bedeutende Stärke besitzt, dass wir es neben den directen Eindrücken objectiviren, sondern es würde dies im Gegentheil die Vorstellung stören, da wir dann immer mehrere Objecte unter einander bei der Bewegung sehen müssten. Bei einer möglichst vollkommenen stroboskopischen Bewegungsvorstellung wirkt also vielmehr gerade der Umstand mit, dass wir die

1) J. Plateau, Dissertation sur quelques propriétés des impressions produites par la lumière etc. Liège 1829.

2) Emsmann, Ueber die Dauer des Lichteindrucks. Pogg. Ann. Bd. 91, pag. 611.

3) Vgl. Ruete, Lehrbuch der Ophthalmologie, Bd. I, pag. 162.

letzten Stadien des Nachbildes, die in die Phase des neuen Eindrucks herüberreichen, im allgemeinen vernachlässigen.

Der obige Satz wird allgemein für die Entstehung der Bewegungsvorstellungen bei ruhendem Auge gelten. Von einem sich bewegenden Körper der Außenwelt sehen wir nicht alle Phasen der Bewegung, weil das Auge unter einer gewissen Grenze der Lageveränderung der äußeren Dinge unempfindlich für dieselben ist. Wir nehmen nun erst dann die Bewegung eines Körpers der Außenwelt unmittelbar wahr, wenn die Geschwindigkeit eine gewisse Grenze überstiegen hat, nämlich erst von dem Moment an, in dem zwei für unser Auge bemerkbare aufeinanderfolgende Phasen der Bewegung in kürzerer Zeit Bilder auf die Netzhaut werfen, als das Nachbild der ersten Phase dauert. —

Es ist ferner von Interesse, zu untersuchen, wie weit die beiden noch im genügenden Zeitintervall erschienenen Bilder zweier aufeinanderfolgender Phasen auf der Netzhaut höchstens von einander entfernt sein dürfen, um doch noch den Eindruck zu erwecken, als wären sie Bilder zweier Bewegungsphasen ein und desselben Gegenstandes. Um zunächst einmal einen Ueberblick über die Resultate, die sich bei diesbezüglichen Messungen einstellen, zu gewinnen, benutzte ich das kleinere 13 fenstrige Dädaleum. Den schon früher verwendeten Bilderstreifen mit 13 Phasen eines auf- und abschwingenden Punktes veränderte ich so, dass nur die verticalen Abstände der einzelnen Phasen von einander in entsprechender Weise vergrößert wurden. Um dies zu ermöglichen, zeichnete ich die Bilder auf einen in den Dädaleumcylinder passenden Papiercylinder von beträchtlicher Höhe auf, nachdem aus demselben genau in der Weise wie am Dädaleumcylinder 13 Fenster ausgeschnitten waren. Eine erste derartige Einlage, E_1 , hatte dieselbe Höhe, eine zweite Einlage, E_2 , nahezu die dreifache Höhe als der Dädaleumcylinder. Während ein Messversuch mit Einlage E_1 schon sehr schwankende Resultate ergab, erwies sich ein solcher mit Einlage E_2 als unmöglich. Es zeigte sich im letzten Falle wieder, dass man nach Willkür die Erscheinung abändern konnte; die Uebung und die Richtung der Aufmerksamkeit üben einen zu störenden Einfluss aus, so dass man nicht im Stande ist, eine correcte Messung hierbei auszuführen. Man hat sich daher darauf zu beschränken, die Zeitgrenzen für geringere Phasenabstände zu untersuchen.

An meinem großen Messapparate lassen sich auch in bequemer Weise die Phasenabstände innerhalb gewisser Grenzen vergrößern. Benutzt man nämlich den Streifen S_2 (mit 72 Bildern), aber nur 36 Spalten, so wird zur Hervorrufung der Bewegungserscheinung immer nur die Hälfte der Bilder in Frage kommen, jedes einzelne wirksame Bild vom nächsten also um einen Phasenabstand weiter entfernt sein, als beim Versuch mit 72 Spalten. Verwendet man nur 24 Spalten, so wird nur der dritte Theil der Phasenbilder auf die Erscheinung wirken u. s. f. Wenn man auf diese Art eine Vergrößerung der Phasenabstände hervorruft, so nimmt man allerdings dabei in Kauf, dass von der einmaligen Auf- und Abbewegung des Punktes bei 36 Spalten nur 6, bei 24 Spalten nur 4, bei 12 Spalten nur 2 Phasen vorhanden sind. Wollte man aber in der früheren Weise 12 Phasen haben, so würde die Forderung größerer Phasenabstände bedingen, dass man viel höhere Bilderstreifen benutzt, so dass man wieder mit den Spalten des Apparats in Conflict kommen würde.

Eine Messung mit Streifen S_2 und 36 Spalten ergab die Zeitgrenzen:

Ob. Ztgr.		Unt. Ztgr.	
0,292	} ar. Mittel: 0,302"	0,254	} ar. Mittel: 0,271"
0,305		0,267	
0,292		0,267	
0,292		0,267	
0,279		0,279	
0,330		0,279	
0,305		0,267	
0,305		0,267	
0,305		0,279	
0,318		0,279	

eine Messungsreihe mit 24 Spalten und Streifen S_2 :

Ob. Ztgr.		Unt. Ztgr.	
0,305	} ar. Mittel: 0,293"	0,305	} ar. Mittel: 0,272"
0,286		0,248	
0,286		0,267	
0,286		0,248	
0,305		0,286	
0,286		0,267	
0,305		0,267	
0,286		0,286	
0,286		0,286	
0,305		0,267	

während eine Messung mit 12 Spalten und Streifen S_2 sich als illusorisch herausstellte. — Wollte man umgekehrt die Phasenabstände allmählich verkleinern, so könnte man dies durch weiteres Entfernen des Auges vom Apparat erreichen, nur würde sich dann auch der Einfluss der verminderten Deutlichkeit und Helligkeit der Bilder geltend machen.

Die ersten beiden Zeitgrenzen (vor. S.) stimmen nahezu überein mit denen, welche bei den Versuchen mit 36 Spalten und Streifen S_3 (pag. 142) auftraten, während man doch vermuthen sollte, dass die zuletzt gefundenen Zeitgrenzen kleinere Werthe besitzen als jene, wie sich in der That im zweiten Falle beim Vergleich der Zeitgrenzen des Versuches mit 24 Spalten und Streifen S_2 einerseits und der des Versuches mit 24 Spalten und Streifen S_4 andererseits herausstellt. Aus dieser Uebereinstimmung wage ich keinen Schluss zu ziehen; vielmehr glaube ich, dass dieselbe eine Folge der Uebung ist, unter den vorliegenden Verhältnissen die betreffende Erscheinung der Bewegung des Punktes zu sehen, so dass die fehlenden Phasenbilder unwillkürlich reproducirt und den directen Eindrücken associirt wurden. Beim Versuch mit 24 Spalten und Streifen S_2 macht sich eine solche Association reproducirter Vorstellungen nicht so geltend, weil zu viel Phasen gegenüber dem Versuch mit Streifen S_4 fehlen.

Es geht daraus hervor, dass man höchstens durch sehr sorgfältige, alle möglichen Nebenumstände berücksichtigende Versuche in der Lage sein wird, die Maximalabstände der Phasenbilder auf der Netzhaut, bei denen gerade noch die Erscheinung sich einstellt, zu messen. Es ist daher anzurathen, erst später, nachdem man längere Zeit keine Versuche angestellt hat, diese Messungen wieder aufzugreifen. Erwähnen will ich nur noch, dass auch sehr viel Einfluss auf diese Maximalentfernung der Abstand der vorausgehenden Phasenbilder hat. Je geringer der letzte, desto kleiner wird die Maximalentfernung der Phasenbilder auf der Netzhaut sein. Wenn ich z. B. von einem auf- und abwärtsschwingenden Punkte nur die äußersten Phasen auf die Bildscheibe des Scheibenapparats aufgezeichnet hatte, so nahm ich, sofern die Radiendifferenz beider Phasenbilder eine gewisse Größe, die ziemlich variabel war, nicht überstieg, immer noch eine stetige Bewegung ein und desselben Punktes wahr. Zeichnete ich dagegen in gleichen Abständen in den Raum zwischen die oberste und

unterste Phase eine Anzahl Zwischenphasen ein, dagegen nicht in den folgenden Raum zwischen die unterste und oberste Phase (vgl. Fig. 6), so sah ich nicht mehr einen einzigen Punkt auf- und absteigen, sondern es schienen fortwährend neue Punkte in einer gewissen Höhe aufzutauchen und herunterzufallen. Derartige Versuche habe ich eine große Anzahl angestellt, um die oben angeführte Bemerkung zu verificiren.

Es lag nun nahe, zu untersuchen, ob die Nachbilder, welche die stroboskopischen Erscheinungen vermitteln, unter Umständen complementär ausfallen können. So zahlreiche Versuche aber auch in dieser Hinsicht mit verschiedenfarbigen Punkten von mir angestellt worden sind, so habe ich doch in keinem einzigen Falle ein complementär gefärbtes Nachbild beobachten können. Der Lichteindruck ist bei allen diesen Erscheinungen so kurz, dass nur ein gleichfarbiges Nachbild entstehen kann.¹⁾ —

Bei den beschriebenen Versuchen hatte ich immer die schwarze Seite der Spaltscheibe dem Auge zugekehrt. Jetzt drehte ich die Spaltscheibe um, brachte sie also so vor die Bildscheibe, dass das Auge stets die weiße Seite erblickte, und versuchte alle die beschriebenen Experimente am Scheibenapparat unter dieser Modification zu wiederholen. Das Resultat war jedoch geradezu null; ich sah nur zuweilen einmal einen ganz schwachen Punkt durch die weiße Scheibe hindurch aufleuchten, sonst aber absolut nichts. Die Netzhaut wird nämlich dabei zu sehr durch die helle Seite der Spaltscheibe, von der fortwährend Lichtstrahlen in's Auge fallen, afficirt, so dass sie für so kurz dauernde Lichteindrücke, wie sie hier auftreten, ganz unempfindlich geworden ist. Jetzt erklärte es sich mir auch, warum beim Dädaleum die Außenseite immer mit einem schwarzen Lack überzogen ist, und warum man ferner mit einer Bildscheibe nicht durch einen ruhenden Spalt die Erscheinungen bekommen kann. Der Grund für letzteres liegt eben darin, dass in jedem Zeitintervall zwischen zwei auftretenden Phasenbildern das Auge durch die zwischen beiden Phasenbildern liegende weiße Farbe zu sehr gereizt wird. Dies brachte mich auf den Gedanken, dass man unter Umständen doch dieselbe

1) Vgl. Wundt, Grundzüge der physiolog. Psychologie, 2. Auflage, Bd. I, pag. 435.

Erscheinung bei ruhendem Spalt haben müsste, nämlich, wenn die Zwischenräume zwischen zwei Phasenbildern dunkel erscheinen. Ich nahm daher geradezu eine schwarze Scheibe, versah dieselbe mit Löchern, welche genau die Phasen eines auf- und abschwingenden Punktes darzustellen geeignet waren, und legte sie auf eine weiße Papierscheibe auf, so dass ich jetzt im Besitze einer schwarzen Bildscheibe mit weißen Punkten war. Beobachtete ich dann die letztere während der Rotation durch einen dicht davor angebrachten ruhenden Spalt, so sah ich, wie ich vermuthet hatte, einen sich auf- und abwegenden weißen Punkt; dass derselbe etwas lichtschwach war, rührte offenbar daher, dass man den ruhenden Spalt ziemlich nahe an die Bildscheibe bringen musste, damit man nicht einen viel breiteren Raum von letzterer sah, als der Durchmesser eines solchen weißen Punktes betrug (sonst würde natürlich der Punkt verzerrt erscheinen müssen); dadurch wurde aber der Bildscheibe nicht so viel Licht zugeführt, als zum klaren Erkennen nöthig ist. Man könnte letzteres gewiss erreichen, indem man die Löcher transparent durch eine dahinter stehende helle Flamme erleuchtet.

Das Resultat der angeführten Untersuchungen lässt sich mit folgenden Worten resumiren:

»Um die Bewegung eines Gegenstandes künstlich nachzuahmen, ist nothwendig und hinreichend, dass man in kurzer Aufeinanderfolge von verschiedenen, nahezu in gleichen, nicht zu großen Abständen liegenden Phasen der Bewegung desselben kurze Lichteindrücke bekommt, und dass das Auge in der Zwischenzeit durch keine anderen Lichtreize afficirt wird.«

Sind diese Bedingungen erfüllt, dann verschmelzen die verschiedenen aufeinanderfolgenden Phasenbilder auf der Netzhaut zu der Vorstellung der Bewegung ein und desselben Gegenstandes.

Wir hatten bisher angenommen, dass beide Scheiben mit derselben Geschwindigkeit bewegt werden. Wenn man nun die erste Scheibe plötzlich etwas schneller oder langsamer bewegt, was man bei der beschriebenen Einrichtung ja vollständig in der Hand hat, so bewegt sich der Punkt nicht mehr geradlinig auf und ab, sondern in einer Sinuslinie vorwärts oder rückwärts, je nachdem die vordere

Scheibe etwas schneller oder langsamer als die Bildscheibe, aber immer in entgegengesetzter Richtung, bewegt wird. Es wird nicht nöthig sein, auf diese Erscheinungen näher einzugehen, da man sie sich in jedem Falle vorher ganz genau theoretisch construiren kann. Erwähnen will ich nur noch, dass man beim Dädaleum ein solches Vor- und Rückwärtsschreiten dadurch bewirkt, dass man die Anzahl der Bilder etwas größer oder kleiner nimmt als die Anzahl der Spalten. Hierbei ist jedoch vorausgesetzt, dass die Anzahl der Bilder nicht gerade ein Vielfaches der Zahl n der Spalten ist; denn hat man allgemein $k \cdot n$ Figuren, wo k eine ganze Zahl ist, so ist der Unterschied der Erscheinungen, welche verschiedenen Werthen von k entsprechen, nur der, dass man immer $k \cdot m$ Punkte sich auf- und abbewegen sieht, wenn bei $k = 1$ scheinbar m Punkte die Bewegung ausführten.

Hat man auf der Bildscheibe m Phasenbilder, während die Anzahl der Spalten der Spaltscheibe n ist, so kann man dieselben Erscheinungen hervorrufen, die man bei gleicher Anzahl von Bildern und Spalten bekam, wenn man die Geschwindigkeiten beider Scheiben so einrichtet, dass sie im Verhältniss $n : m$ stehen.

Die zahlreichen Erscheinungen, welche man einerseits durch Veränderung der Geschwindigkeiten beider Scheiben, andererseits durch Veränderung der Anzahl der Bilder oder der Spalten hervorrufen kann, lassen sich alle mit mathematischer Genauigkeit vorausbestimmen; sie gehören mehr einem Capitel der Kinematik an, als dass sie in einer psychologischen Analyse der stroboskopischen Erscheinungen ihren Platz finden müssen; daher werden wir hier auch nicht weiter auf dieselben eingehen.

Wir wollen endlich noch kurz die Aenderung der Erscheinungen anführen, wenn wir statt der Seite S unserer eingangs beschriebenen Bildscheibe (pag. 3) die Seite G zur Sichtbarmachung der Phasen des schwingenden Punktes verwendeten. Solange man nur eine geringe Anzahl Phasen sichtbar macht, etwa 12, ist keine Modification der Erscheinung mit Seite S zu merken; sobald man aber die Phasenanzahl vermehrt, etwa auf 24, 36 u. s. w., wobei man die vordere Scheibe zur Erzeugung einer geradlinigen Bewegung entweder genau so schnell, oder etwa nur halb, ein Drittel u. s. w. so schnell als die Bildscheibe dreht, so sieht man nicht mehr ein so stetiges Auf- und Absteigen, wie bei Benutzung der Seite S , sondern der Punkt scheint

in den beiden äußersten Phasen immer gewaltsam zurückgestoßen zu werden. Es ist das dieselbe Erscheinung als die, welche sich einstellt, wenn man während der Eisenbahnfahrt das scheinbare Auf- und Absteigen der Telegraphendrähte beobachtet; sobald eine Telegraphenstange vorbeifliegt, scheint der bewegte Draht immer gewaltsam in seiner Bewegung gestört zu werden. Es rührt dies jedenfalls daher, dass wir gewöhnt sind, in der Natur immer nur stetige Bewegungen zu beobachten, und eine derartige Unstetigkeit in der Bewegung, wie sie bei den angeführten Erscheinungen auftritt, für uns etwas Ungeohntes, sogar Unlustgefühl Erregendes an sich hat.

Die stroboskopischen Erscheinungen sind von mir deshalb einer Untersuchung unterworfen worden, weil ich in der ganzen Literatur über diesen Gegenstand fast immer nur Andeutungen über die Anwendbarkeit des Stroboskops, selten aber über die psychologische Bedeutung desselben vorfand. Der Einzige, der hauptsächlich auf letztere eingegangen ist, scheint Stricker gewesen zu sein. Die betreffende Arbeit von Stricker¹⁾ muss um so mehr an dieser Stelle Berücksichtigung finden, als der Verfasser derselben gerade in den stroboskopischen Erscheinungen einen Hauptbeleg findet für seine neue Theorie der Bewegungsvorstellungen; letztere hält er selbst für eins der wichtigsten Probleme der Philosophie. Der betreffende Abschnitt der Stricker'schen Arbeit ist überschrieben: »Das Stroboskop, ein Apparat, um die Association von Muskelgefühlen mit Sinneswahrnehmungen zu erweisen.«²⁾

Stricker wendet sich hauptsächlich gegen die nahe liegende Annahme, dass die verschiedenen Phasenbilder auf der Netzhaut die Bewegungsvorstellung auslösen, und glaubt einen Hauptbeweis für seine Behauptung darin zu finden, dass man die Scheinbewegung der gemalten Figuren (er arbeitete nur mit complicirten Phasenbildern, wie die von springenden Männchen, nach Kugeln schnappenden Hunden u. s. w.) nicht auch bekommt, wenn man direct den bewegten Streifen im Dädaleum anblickt, oder wenn man den Streifen an die Außenseite aufklebt³⁾ und direct oder etwa durch eine Papierrolle

1) Studien über die Bewegungsvorstellungen, Wien 1882.

2) l. c. pag. 28.

3) l. c. pag. 30.

beobachtet. Weshalb dies nicht sein kann, wenn die Figuren auf einen weißen Streifen gemalt sind, wie es bei den von Stricker benutzten Phasenbildern der Fall war, haben wir oben gesehen; wir haben zu gleicher Zeit kennen gelernt, unter welchen Umständen man auch durch einen ruhenden Spalt die Erscheinung beobachten kann. Eine Papierrolle würde schon deshalb untauglich sein, weil man dann eben jede Figur so lange im Gesichtsfeld behält, dass sie auf Kosten der Deutlichkeit verbreitert erscheinen muss.

Stricker behauptet nun, dass die Bewegungsvorstellung am Stroboskop nur dadurch hervorgerufen wird, dass uns die verschiedenen vor dem Auge vorüberziehenden Phasen zwingen, unsere Augen ganz in der Weise zu bewegen, wie es ein fixirendes Verfolgen des auf- und abspringenden Männchens erfordern würde, und dass uns nur die Muskelgefühle, die dabei ausgelöst werden, zu der Bewegungsvorstellung veranlassen. Er behauptet in Folge dessen sogar, dass die Täuschung nicht eintritt, wenn die Augen sich nicht den gezeichneten Phasen entsprechend bewegen.¹⁾ Dieser Punkt der Stricker'schen Theorie erschien mir am meisten anfechtbar. Ich construirte daher eine Spaltscheibe, die kleiner war als die Bildscheibe meines Apparats, so dass man in bestimmter Entfernung durch die n Spalten hindurch gerade den ganzen bemalten Kreisring der Bildscheibe auf einmal übersehen konnte, d. h. also zum Theil im indirecten Sehen. Auf der Bildscheibe selbst brachte ich die Phasen eines auf- und abschwingenden Punktes so an, dass sie auf dem Stück einer Sinuslinie lagen, welche nicht wie früher einen Wellenberg und ein Wellenthal, um mich so auszudrücken, umfasste, sondern deren je 2. Betrachtete ich dann die beiden rotirenden Scheiben, etwa den Drehpunkt der vorderen fixirend, so sah ich zu gleicher Zeit $2n$ Punkte sich auf- und abbewegen, und zwar so, dass zwei diametral gegenüberliegende sich immer zu gleicher Zeit vom Centrum entfernten. Es bewegten sich somit, da $n = 12$ war, 24 Punkte in 24 verschiedenen Richtungen, die unter gleichen Winkelabständen vom Centrum ausliefen resp. in demselben zusammentrafen. Dies widerspricht aber offenbar der Hypothese von Stricker; denn wäre dieselbe zutreffend, so müssten sich die Augen zu gleicher Zeit in 24 verschiedenen Richtungen bewegen können.

1) l. c. pag. 33.

Wir sahen, welche wichtige Rolle zur Hervorrufung der stroboskopischen Erscheinungen die einzelnen Fenster spielten. Wenn nun Stricker zum Schluss seiner sich auf das Stroboskop beziehenden Auseinandersetzungen sagt:¹⁾ »Warum die Augenbewegung gerade durch die Fenster angeregt wird, will ich hier nicht erörtern; das ist eine Angelegenheit, die gar nicht hierher gehört u. s. w.«, so zeigt dies, dass Stricker das wahre Wesen der stroboskopischen Erscheinungen verkennt und dass er den angefangenen Versuch einer Erklärung dieser Erscheinungen am Ende wieder aufgibt.

Auf die vielfachen physikalischen Anwendungen, welche die stroboskopischen Scheiben erfahren haben, näher einzugehen, ist hier nicht der Ort; es würde das zu weit von meinem eigentlichen Thema abschweifen. Ich will nur kurz erwähnen, dass Plateau und Doppler²⁾ unabhängig von einander die Anwendung derselben für die Analyse der Oscillation rasch vibrierender Körper gezeigt haben, und Töpler³⁾ dieselben zuerst zur Untersuchung der singenden Flammen verwandte. Poppe⁴⁾ benutzte das stroboskopische Princip zur Darstellung der Interferenzfiguren und stehenden Gebilde feiner regelmäßiger Wellensysteme tropfbarer Flüssigkeiten, und Magnus⁵⁾ zur Analyse des ausfließenden Wasserstrahls. Müller⁶⁾ in Freiburg endlich verwandte die stroboskopische Scheibe dazu, durch geeignete Zeichnungen Wasserwellen, stehende und fortschreitende Seilwellen, fortschreitende Schallwellen, stehende Luftwellen in offenen und gedeckten Pfeifen u. s. f. darzustellen. — Bisher hat man sich nur mit der Darstellung periodischer Bewegungen beschäftigt; ich halte es jedoch nicht für unmöglich, sich auch aperiodische Bewegungen mit Hülfe der stroboskopischen Scheiben zu verschaffen. Zu diesem Zwecke könnten wir beispielsweise unsere Bildscheibe mit der aufge-

1) l. c. pag. 33.

2) Abhandlungen der böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften, V. Folge, Bd. 3.

3) Töpler, Das Princip der stroboskopischen Scheiben als vortheilhaftes Hilfsmittel zur optischen Analyse tönender Körper. Pogg. Ann. Bd. 128, pag. 108.

4) Poppe, Das verbesserte Interferenzoskop. Pogg. Ann. Bd. 88, pag. 223.

5) Magnus, Hydraulische Untersuchungen. Pogg. Ann. Bd. 106, pag. 18.

6) J. Müller, Anwendung der stroboskopischen Scheibe zur Versinnlichung der Grundgesetze der Wellenlehre. Freiburg, 1846. Pogg. Ann. Bd. 67, pag. 271.

zeichneten Sinuscurve verwenden. Wir machten früher durch Auflegen einer weißen Spaltscheibe die Phasen eines sich bewegenden Punktes sichtbar; man könnte ja nun auch die weiße Spaltscheibe in eine Rotation versetzen, welche unabhängig von der der Bildscheibe ist, dann würden immer neue Phasenbilder zum Vorschein kommen. Denkt man sich die vordere, schwarze Spaltscheibe in einer bestimmten Richtung mit der Geschwindigkeit v bewegt, die weiße Spaltscheibe, welche sich dicht vor der Bildscheibe befindet, und welche den Zweck hat, die Phasen sichtbar zu machen, dagegen in eine Rotation der Geschwindigkeit $-v$ versetzt, so wird man eine aperiodische Bewegung sehen, wenn man außerdem der Bildscheibe eine eigene Rotation erteilt, deren Geschwindigkeit w mit v incommensurabel ist. Auf diese Weise ließen sich vielleicht auch genauere Messungen betreffs der Vergrößerung der Phasendifferenz anstellen.

Ich schließe diese Untersuchungen mit der kurzen Erwähnung einer Erscheinung, die mich selbst schon seit längerer Zeit beschäftigte und welche, wie ich jetzt glaube nachweisen zu können, im Grunde dieselbe Erscheinung ist, die wir am Stroboskop wahrnehmen.

Geht man an zwei hintereinander stehenden Staketenzäunen vorüber, so sieht man an dem vorderen Zaun oder zwischen beiden im Allgemeinen aufrechtstehende Schatten, ungefähr von der Größe und Form dreier nebeneinander gelegter Staketentäbe, mit einer gewissen Geschwindigkeit hingeleiten, welche die, mit der sich die beiden Zäune scheinbar an einander verschieben, weit übertrifft. Sehr häufig kommt es vor, dass diese Schatten sich während der Bewegung schief und schiefer stellen und zugleich breiter werden, bis sie sich endlich horizontal legen und gleichsam an einer Stelle des Zauns sich in den Erdboden hineinschieben. Nach einer solchen Stelle kommen auch von der anderen Seite in entgegengesetzter Richtung eben solche Schatten hingelaufen, um desgleichen im Erdboden scheinbar zu verschwinden. Die beschriebene Erscheinung ist so oft in der Natur zu beobachten und gewiss schon von den meisten Menschen beobachtet worden, dass ich mich wohl nicht weiter bei der Beschreibung aufzuhalten brauche, sondern gleich zur Erklärung übergehen kann.

Das Princip, nach welchem derartige Erscheinungen entstehen, lässt sich am besten an einem möglichst einfachen Fall darlegen. Wir

wollen annehmen, die Staketenstäbe stehen alle genau parallel, also etwa vertical, und die Breite jedes einzelnen Stabes beider Zäune sei durchweg dieselbe und zwar ebenso groß als die Breite des Zwischenraums zwischen zwei aufeinander folgenden Stäben. Die Entfernung des vorderen Zauns vom eignen Standort möge sich zu der Entfernung beider Staketenzäune von einander wie 4 : 1 verhalten.

Versuchen wir die aufeinander folgenden Staketenstäbe des vorderen wie des hinteren Zauns von einer bestimmten Stelle ab mit fortlaufenden Nummern, so werden sich in einem bestimmten Moment etwa die Eindrücke der Stäbe 1, 5, 9 etc. des vorderen Zauns mit denen je zweier Stäbe, bez. 1, 2; 6, 7; 11, 12 etc. des hinteren Zauns zu einem neuen Eindruck verbinden, den wir gewöhnlich als einen über den vorderen Zaun ausgebreiteten oder zwischen beiden Zäunen schwebenden Schatten deuten.¹⁾ Solche Schatten stellen sich auch ein, nur in viel complicirterer Form, wenn man zwei Drahtgitter übereinanderhält. Sie beruhen darauf, dass die beiden Staketenzäune, resp. die beiden Drahtgitter verschiedene Entfernung vom Auge besitzen, und man deshalb nicht im Stande ist, beide zu gleicher Zeit deutlich zu sehen. Fixirt man einen Punkt des vorderen Zauns, so sieht man die Punkte des hinteren in Zerstreungskreisen und umgekehrt. Fixirt man einen Punkt zwischen beiden Zäunen, so sieht man die Stäbe beider Zäune undeutlich und verbreitert. Die Anzahl und Größe dieser Schatten ist sowohl Function des Abstandes der beiden Staketenzäune von einander als auch Function des Abstandes des Beobachters vom vorderen Zaun. Bewegt sich der Beobachter nun fort²⁾, so werden sich die beiden Zäune gegen einander verschieben, so dass momentan die beiden Schatten verschwinden; die Combination der beiden Zäune befindet sich etwa dann in einem solchen Stadium, wo wir keine merklichen Schatten erkennen. Im nächsten Moment werden sich wieder neue Schatten und zwar an den Stellen der Stäbe 2, 6, 10 etc. des vorderen Zauns bilden; dabei sind jetzt die hinteren

1) Dabei ist stillschweigend die für die Erklärung dieser Erscheinungen unwesentliche Voraussetzung gemacht, dass die vorderen Basiskanten der Stäbe beider Zäune bez. nicht in gerader Linie, sondern auf zwei concentrischen Kreisen liegen, in deren gemeinsamen Mittelpunkt der Beobachter sich befindet.

2) resp. dreht er sich bei unserer Voraussetzung etwas um seine eigene Axe, so dass er im Mittelpunkt der beiden concentrischen Kreise bleibt.

Stäbe 2, 3; 7, 8; 12, 13 etc. wirksam, wovon man sich durch Aufzeichnen der beiden Zäune leicht überzeugen kann. Wir deuten nun diese neuen Schatten beziehungsweise als neue Phasen der Bewegung der früher aufgetretenen Schatten, so dass wir jetzt verstehen, wie bei weiterem Fortschreiten die Vorstellung der sich bewegenden Schatten entsteht. Dies geschieht ganz auf dieselbe Weise wie bei den Bewegungserscheinungen, die man mit Hülfe der stroboskopischen Scheiben hervorrufft.

Die Annahme, die wir über die gegenseitige Stellung der einzelnen Stäbe beider Zäune zu einander machten, treffen nun in Wirklichkeit gewöhnlich nicht zu; so werden in den meisten Fällen die Stäbe beider Zäune nicht genau parallel stehen, was zur Folge hat, dass die Schatten sich schief stellen u. s. w. Auf diese Einzelheiten soll hier nicht weiter eingegangen werden; es lag nur in meiner Absicht, das Princip anzuführen, nach welchem alle diese Erscheinungen erklärt werden müssen.

Fig. 1.

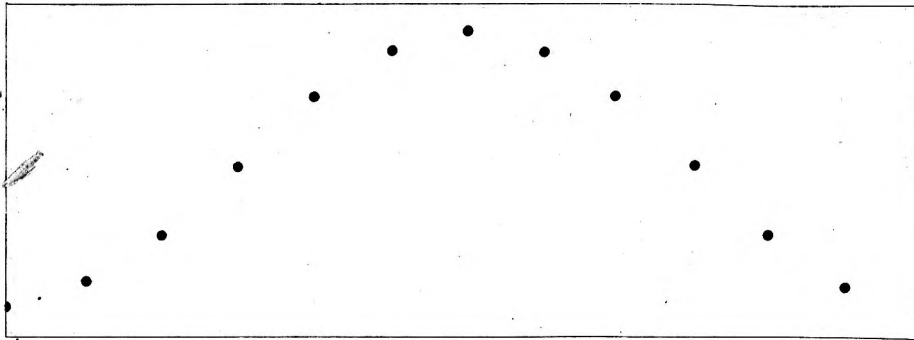


Fig. 2.

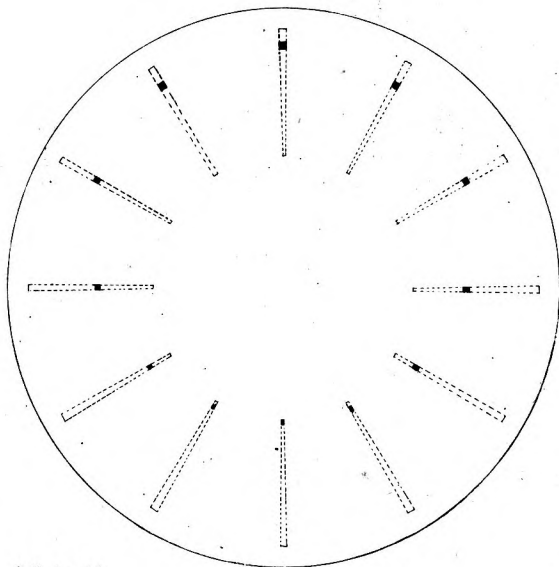
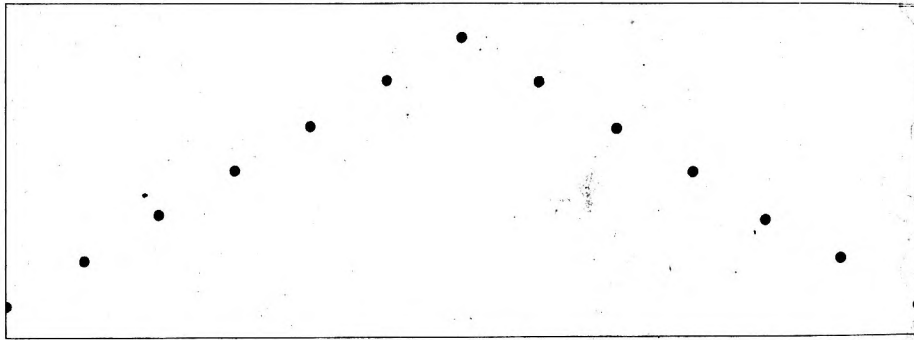
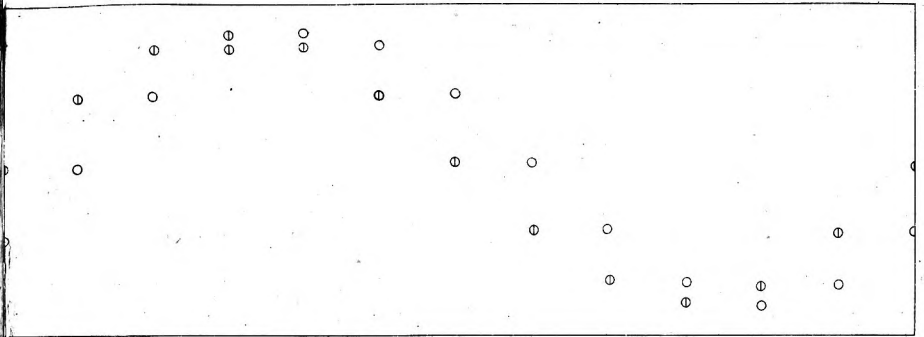


Fig. 3.

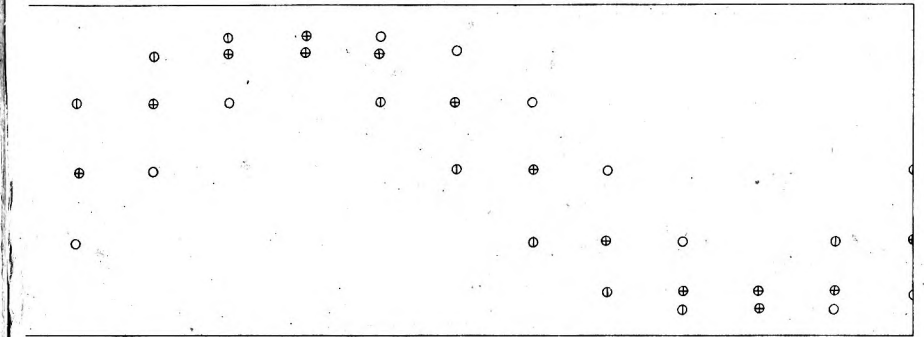
O. Fischer, del.

Fig. 4.



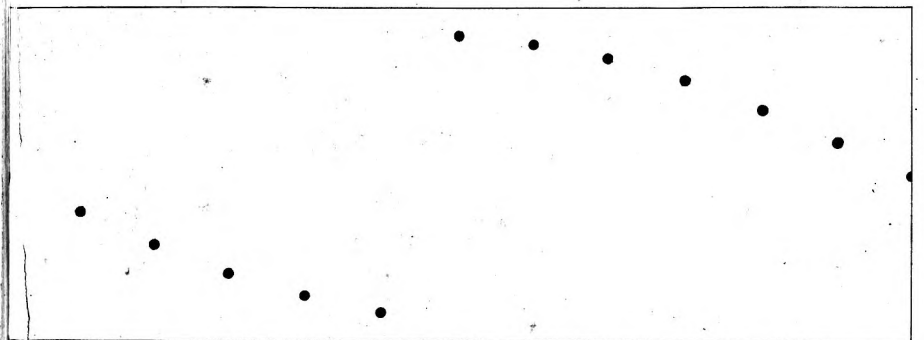
o bedeutet: roter Punkt, o blauer Punkt.

Fig. 5.



roter Punkt, o blauer Punkt, ⊕ violetter Punkt.

Fig. 6.



Verlag

Lith. Anst. v. J.G. Bach, Leipzig