

ULB Halle
Zwb. Klin.
Kröllwitz

Aug

Em

28



Em 28.



Martin-Luther-Universität
Zweigbibliothek der ULB
Klinikum Kröllwitz
Ernst-Grube-Str. 40
06120 Halle (Saale)

Aug Em 28

Über die Wirkung der räumlichen Vertheilung des Lichtreizes auf die Netzhaut.

Von Ernst Mach.

(Vorgelegt in der Sitzung am 3. October 1865.)

(Mit 3 Tafeln.)



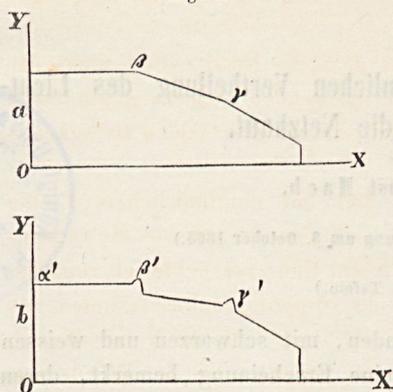
Ich habe zufällig an rotirenden, mit schwarzen und weissen Sektoren versehenen Scheiben eine Erscheinung bemerkt, deren weitere Verfolgung mich zu einem allgemeineren Gesetze der physiologischen Optik geführt hat.

Ich will zunächst die hierher gehörigen Erscheinungen beschreiben.

Wenn man die Scheibe 1 *a* oder 1 *b*, Taf. I, um ihren Mittelpunkt in rasche Rotation versetzt, so gibt sie das Bild 1 *c*. Sie zeigt ein gegen den Rand an Dunkelheit zunehmendes Grau, welches jedoch an den Stellen, wo die schwarzen Sektoren in Spitzen endigen oder Knickungen zeigen, durch schmale, hellere, etwas verwaschene Ringe unterbrochen ist. Die Erscheinung der helleren Ringe muss jeden überraschen, der sie theoretisch zu erklären versucht. Man bemerkt leicht, dass die beiden Scheiben 1 *a* und 1 *b*, in Rotation versetzt, nach dem Talbot-Plateau'schen Gesetze ¹⁾ dieselben Helligkeitsverhältnisse darbieten müssen. Vom Centrum α bis zu dem durch β gehenden Ring sollen sie gleichförmig weiss erscheinen. Bei β setzen die schwarzen Sektoren ein und bedingen ein bis γ an Dunkelheit gleichförmig zunehmendes Grau. Von γ an, wo der Sector geknickt ist, beziehungsweise ein neuer einsetzt, soll die Dunkelheit rascher wachsen. Man würde a priori die Ringe β , γ nicht heller vermuthen als die Umgebung. Sie sollten vielmehr der Helligkeit nach zwischen den nächst äussern und nächst innern Ringen liegen. Sie würden demnach die Continuität der Beleuchtung nicht aufheben.

¹⁾ Talbot, Philosophical Magazine. Ser. III. Vol. V. p. 321. — Plateau, Bulletin de l'acad. roy. des sciences de Bruxelles. 1835. Nr. 2. p. 52 — Nr. 3, p. 89.

Fig. 1.



Der wirkliche Anblick der rotirenden Scheibe ist wie gesagt ein anderer. Fig. 1 *a* (im Text) gibt die Helligkeit der rotirenden Scheibe nach dem Talbot-Plateau'schen Gesetze, wobei der Radius als Abscisse (x), die Lichtintensität als Ordinate (y) aufgetragen ist. Fig. 1 *b* macht in gleicher Weise den wirklichen Anblick der rotirenden Scheibe anschaulich. Zu bemerken ist noch, dass bei der Rotation der innerste Kreis nicht weiss, sondern graulich und der zwischen den beiden hellen Ringen liegende Theil fast gleichförmig grau (am äusseren Rande nur wenig dunkler) erscheint.

Die Scheiben 2 *a*, 2 *b* auf Taf. I sind die negativen Bilder von 1 *a*, 1 *b* und geben auch in Rotation versetzt die Fig. 2 *c*, welche das negative Bild von 1 *c* ist. Diese Scheiben zeigen also dunkle Ringe an jenen Stellen, wo die früheren helle zeigten. Construirt man wieder, wie vorher, die Curve der Lichtintensität, so findet man, dass den dunklen Ringen wieder Knickungen der Lichtcurve entsprechen, aber solche, welche gegen die Abscissenaxe convex sind.

Man kann auf rotirenden Scheiben und auf der Mantelfläche eines rotirenden Cylinders die Lichtintensität mit Hilfe schwarzer und weisser Sektoren von verschiedener Form nach jedem beliebigen Gesetze von Stelle zu Stelle variiren lassen und sich so von der Allgemeinheit der erwähnten Erscheinung überzeugen. Überall wo die Lichtcurve einen Knick hat, erscheint die Stelle heller oder dunkler als die Umgebung. Heller ist die Stelle, wenn die Knickung gegen die Abscissenaxe concav, dunkler ist sie, wenn die Knickung gegen die Abscissenaxe convex ist.

Fig. 3 *a* auf Taf. II stellt die abgewickelte Mantelfläche eines Cylinders vor, dessen Axe man sich parallel zu $\alpha\beta$ zu denken hat. Fig. 3 *b* gibt die Ansicht der rotirenden Fläche. Der Knickung γ entspricht ein heller Streif.

Fig. 4 *a* verwandelt sich durch Rotation in 4 *b*. — Man wird nun sofort errathen, wie die Fig. 7, 8, 9 auf Taf. III als Mantel-

flächen von rotirenden Cylindern aussehen werden. Alle bestätigen das eben aufgestellte Gesetz.

Man kann nun leicht zeigen, dass die Erscheinung nicht den rotirenden Scheiben und dem intermittirenden Lichte eigenthümlich ist, sondern überall auftritt, wo sich die entsprechenden Helligkeitsverhältnisse finden.

Ich trachtete mir ruhende und mit continuirlichem Lichte beleuchtete Flächen von denselben Lichtabstufungen wie die rotirenden Scheiben zu verschaffen. Zu diesem Ende versuchte ich zunächst meine Scheiben während der Rotation zu photographiren, indem ich annahm, dass sich das photographische Papier wie die Netzhaut nach dem Talbot-Plateau'schen Gesetze verhalten würde. Wurde nun diese Vermuthung schon dadurch bestätigt, dass diese Photographien vollkommen den rotirenden Scheiben glichen, so gelang es mir zudem dieselbe durch einige Experimente noch strenger zu beweisen. Ich habe dabei immer die Methode im Auge, nach welcher zuerst eine negative Matrice und von dieser das positive Bild abgenommen wird.

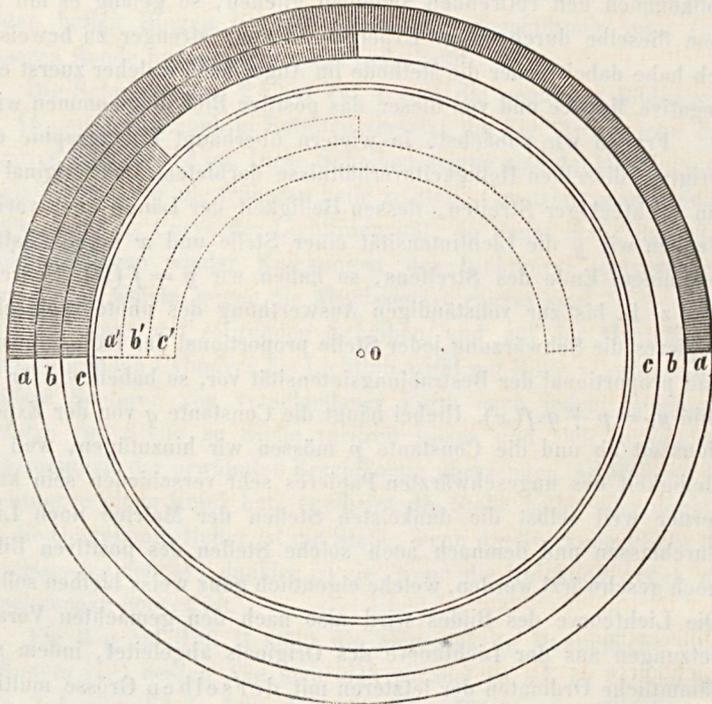
Fragen wir zunächst, in wiefern überhaupt Photographie und Original dieselben Helligkeitsverhältnisse darbieten. Das Original sei ein rechteckiger Streifen, dessen Helligkeit der Länge nach variiert. Nennen wir y die Lichtintensität einer Stelle und x deren Abstand von einem Ende des Streifens, so haben wir $y = f(x)$. Schreitet nun z. B. bis zur vollständigen Auswerthung des photographischen Papierses die Schwärzung jeder Stelle proportional der Expositionszeit und proportional der Bestrahlungsintensität vor, so haben wir für das Bild $y_1 = p + q \cdot f(x)$. Hiebei hängt die Constante q von der Expositionszeit ab und die Constante p müssen wir hinzufügen, weil die Helligkeit des ungeschwärzten Papierses sehr verschieden sein kann, ferner weil selbst die dunkelsten Stellen der Matrice noch Licht durchlassen und demnach auch solche Stellen des positiven Bildes noch geschwärzt werden, welche eigentlich ganz weiss bleiben sollten. Die Lichtcurve des Bildes wird also nach den gemachten Voraussetzungen aus der Lichtcurve des Originals abgeleitet, indem man sämtliche Ordinaten der letzteren mit derselben Grösse multiplicirt und dann die ganze Curve parallel zur Ordinate verschiebt. Die neue Curve ist der alten affin. Da nun hiebei

$$\frac{dy_1}{dx} = q \cdot \frac{dy}{dx}, \quad \frac{d^2y_1}{dx^2} = q \cdot \frac{d^2y}{dx^2} \text{ u. s. w.}$$

so sieht man, dass die Lichtcurve des Bildes dieselben Steigungs- und Krümmungsverhältnisse haben wird, wie jene des Originales. Auch die Knickungen müssen bleiben, indem diese bloß specielle Fälle der Krümmungen sind.

Übergehen wir nun zum Photographiren der rotirenden Scheiben. Ich photographirte zunächst eine Scheibe, wie sie Helmholtz¹⁾ und Brücke²⁾ zu ihren Untersuchungen über intermittirende Lichtreize verwendet haben. Sie war in sechs concentrische Ringe getheilt. Jeder Ring war zur Hälfte schwarz, zur Hälfte weiss. Der innerste Ring hatte 1, der folgende 2, der nächste 4 schwarze Sectoren u. s. f. bis zu 32. Ich exponirte diese Scheibe eine bis fünfzehn Secunden

Fig. 2.



1) Helmholtz, physiolog. Optik.

2) Brücke, über den Nutzeffect intermittirender Netzhautreizungen. Sitzb. der Wiener Akademie. 49. Band.

und liess sie eine bis dreissig Umdrehungen in der Secunde machen. In allen diesen Fällen wurde das Bild der Scheibe gleichförmig grau. Im Bilde konnten die concentrischen Ringe nicht unterschieden werden. Gibt es also für das photographische Papier ein Anklingen oder Abklingen wie für die Netzhaut, was nach Bequerel's Versuchen über Fluorescenz kaum zu bezweifeln ist, so muss dies in ausserordentlich kleinen Zeiten erfolgen. Es hängt also der photographische Effect bei übrigens gleicher Lichtintensität nur von der Bestrahlungszeit ab, gleichgiltig in welchen Unterbrechungen die Bestrahlung erfolgt.

Es handelt sich nun noch um den Einfluss der Helligkeit. Eine weisse Scheibe (Fig. 2 im Text) war mit drei concentrischen Ringen a, b, c versehen. Der äusserste a war zur Hälfte schwarz. Vom zweiten b war ein Viertheil, vom dritten c ein Achttheil geschwärzt. Der centrale Theil der Scheibe blieb weiss. Die Scheibe wurde in der Rotation photographirt. Es entstanden drei ungleich helle Ringe. Dieselben wurden von der Photographie abgeschnitten. Aus denselben wurden Ringe geformt, die auf den centralen weissen Theil der Photographie aufgeklebt wurden. Der aus a geschnittene Ring a' bedeckte ein Achttheil der Peripherie, der aus b gebildete Ring b' ein Viertheil und der aus c geformte c' die Hälfte. Wurde nun die Photographie gedreht, so erschienen a', b', c' gleich hell.

Dieses Experiment beweist folgenden Satz. Wenn eine rotirende Scheibe nach dem Talbot-Plateau'schen Gesetze die Helligkeitscurve $y=f(x)$ darbietet, so gibt die in der Rotation aufgenommene Photographie derselben die Helligkeitcurve $y=p+q.f(x)$. Diese Curve bietet also dieselben Steigungs-, Krümmungs- und Knickungsverhältnisse, wie jene des Originalen.

Für unsere Zwecke ist übrigens die genaue Erfüllung dieser Bedingung gar nicht nöthig. Wir brauchen blos anzunehmen, dass die Lichtintensität in der Photographie irgend eine stetige Function der Bestrahlungsintensität und Expositionszeit sei und dass auch der Differentialquotient dieser Function stetig sei. Hat man nun für die Lichtcurve des Originalen $y=f(x)$, so hat man für jene der Photographie $y_1 = F(y)$ und es folgt $\frac{dy_1}{dx} = \frac{dF(y)}{dy} \cdot \frac{dy}{dx}$. Wird für irgend ein x , $\frac{dy}{dx}$ discontinuirlich, so muss es auch $\frac{dy_1}{dx}$ werden, d. h. auch

dann noch müssen den Knickungen in der Lichteurve des Originales Knickungen in der Lichteurve der Photographie entsprechen.

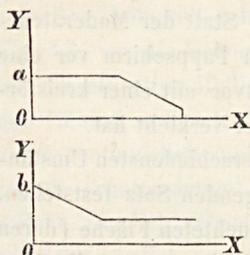
Die Photographien meiner rotirenden Scheiben erscheinen genau so wie die rotirenden Scheiben selbst. Nehme ich die Scheibe 1 *a* Taf. I auf, so gibt mir die Matrice das Bild 2 *c* und das hievon abgenommene positive Bild ist 1 *c*. Natürlich, denn die Matrice gibt das negative Bild, also die rotirende Scheibe 2 *a*. Man darf daraus, dass die hellen und dunklen Ringe auch in der Photographie erscheinen, nicht auf die Objectivität derselben schliessen. Im Gegentheile, da ich gezeigt habe, dass sich die Photographie objectiv nach dem Talbot-Plateau'schen Gesetze verhält und da die Ringe aus diesem Gesetze nicht erklärbar sind, ist deren Subjectivität bewiesen. Wenn die Photographie objectiv nur dieselben Helligkeitsverhältnisse gibt wie die rotirende Scheibe, muss sie auch subjectiv gleich erscheinen. Beide müssen ja unser Auge passiren. Ich würde dies nicht besonders erwähnen, wenn ich nicht sehr oft diese Einwendung hätte hören müssen.

Die Photographien zeigen die hellen und dunklen Ringe sehr schön und deutlich. Dieselben treten aber noch viel schärfer hervor, wenn man die Photographien in ganz gleicher Weise wie die Originale in Rotation versetzt. Der einfache Grund hievon ist der, dass hiebei die kleinen störenden Ungleichmässigkeiten verschwinden. Ich habe überhaupt noch nie so schöne gleichmässige Flächen gesehen wie an rotirenden Scheiben. Die Rotation ist eine wahre Ausgleichungsmethode der Fehler. — Man macht umgekehrt an den rotirenden Originalscheiben die Ringe undeutlicher, wenn man sie mit einem ungleichmässigen Fensterglase beschattet.

Ausser den Photographien lassen sich noch andere ruhende und continuirlich beleuchtete Flächen herstellen, welche bei analogen Helligkeitsverhältnissen analoge Erscheinungen aufweisen. Fig. 5, Taf. II, ist ein System von feinen verticalen, nahe an einander liegenden, parallelen schwarzen Linien. Dieselben bleiben von $\alpha\beta$ an nach abwärts gleich dick. Von $\alpha\beta$ an nach aufwärts aber verdicken sie sich allmählich. Wenn man nun dies System durch eine cylindrische Linse mit verticaler Cylinderaxe betrachtet, welche blos in horizontaler Richtung zerstreuet wirkt, so erscheint bei $\alpha\beta$ eine hellere horizontale Linie. Dasselbe geschieht auch schon, wenn man die Zeichnung nur in etwas grössere Entfernung bringt, so dass die Striche undeut-

lich werden und das Blatt grau erscheint. Die Umstände, welche die Erscheinung bedingen, sind offenbar dieselben, wie bei den rotirenden Scheiben und bei den Photographien. Bilden wir die Lichtcurve des

Fig. 3.

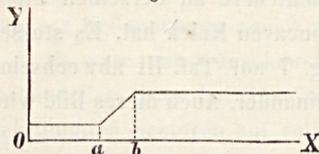


Streifens Fig. 5 unter dem Einflusse der Zerstreuungslinse, indem wir die Abstände vom unteren Ende als Abscissen (x), die entsprechenden Lichtintensitäten als Ordinaten (y) auftragen, so erhalten wir Fig. 3 a (im Text). An der Stelle des Knicks erscheint die helle Linie. — Der Streifen Fig. 6 auf Taf. II zeigt bei $\alpha\beta$ eine dunkle Linie.

Von $\alpha\beta$ an nach abwärts verdünnen sich nämlich allmählich seine schwarzen Linien. Die Lichtcurve dieses Streifens gibt Fig. 3 b (im Text).

Kennt man einmal die Erscheinung der hellen und dunklen Linien, so findet man sie leicht unter den gewöhnlichsten Umständen. Man kann sie z. B. fast an jedem Schatten beobachten, welcher von einer ausgedehnten und hellen Lichtquelle geworfen wird. Construiren wir die Lichtcurve eines Schattens. Von

Fig. 4.



0 bis a (Fig. 4 im Text) reiche der Kernschatten. Wir haben also daselbst eine kleine constante Ordinate aufzutragen. Von a bis b finden wir den Halbschatten, dessen Lichtintensität gegen

b hin wächst. Bei b beginnt der vollständig erleuchtete Raum. An der Grenze von Kernschatten und Halbschatten muss also eine dunkle Linie auftreten, welche schwärzer ist als der Kernschatten selbst. Die Grenze des Halbschattens nach aussen aber wird durch eine helle Linie gebildet, die selbst den vollkommen erleuchteten Raum an Lichtintensität übertrifft. Man findet die Erscheinung wirklich so wie ich sie theoretisch construiren, wenn man den Schatten der Kante eines Hauses bei unbewölktem Himmel mit einem glatten weissen Papier auffängt. Der Grund, auf welchen der Schatten zufällig geworfen wird, ist meist zu ungleichmässig, um die Linien deutlich zu zeigen. Dieselben werden noch schärfer, wenn man den Schatten mit einer weissen rotirenden Scheibe auffängt.

Man kann mit Hilfe von Schatten leicht Beleuchtungen erzeugen, welche einen ganz ähnlichen Anblick bieten, wie Fig. 1 c und 2 c

auf Taf. I. Wirft man z. B. mit Hilfe einer Moderateurlampe von einer kreisförmigen kleinen Pappscheibe einen Schatten auf ein glattes Papier, so hat man einen kreisförmigen, von einer schwarzen Linie umschlossenen Kernschatten, an welchen sich ein grauer Ring schliesst, der in einer hellen Kreislinie endigt. Statt der Moderateurlampe mit einer Kugel kann man auch einen Pappschirm vor eine Kerzenflamme stellen, wenn man denselben zuvor mit einer kreisförmigen Öffnung versehen und diese mit Ölpapier verklebt hat.

Da sich nun die Erscheinung unter den verschiedensten Umständen gezeigt hat, können wir unbedenklich folgenden Satz feststellen. Überall wo die Lichtintensitätcurve einer beleuchteten Fläche (deren Lichtintensität nur nach einer Richtung variirt) einen gegen die Abscissenaxe concaven oder convexen Knick hat, erscheint die betreffende Stelle heller, beziehungsweise dunkler als die Umgebung.

Eine bereits lange bekannte Erscheinung lässt sich als specieller Fall dieses Gesetzes betrachten. Fig. 11 *a* auf Taf. III als Mantelfläche eines rotirenden Cylinders, gibt nämlich den Anblick 11 *b*. Jeder Streifen erscheint, wo er an den dunklern grenzt, heller. Dies rührt einfach daher, dass hier die Lichtcurve an derselben Stelle immer zugleich einen convexen und concaven Knick hat. Es stossen hier die dunklen Linien, welche in Fig. 7 auf Taf. III abwechselnd und getrennt auftreten, unmittelbar an einander. Auch dieses Bild wird von der Photographie wiedergegeben.

Knickungen sind nichts weiter als sehr starke Krümmungen. Ich kann mir also die Frage stellen, ob die Erscheinung nicht auch schon im geringeren Grade durch Krümmungen der Lichtcurve bedingt werde? Das Experiment antwortet mit ja. Sektoren, welche statt Knickungen an den betreffenden Stellen blos Krümmungen haben, geben auf rotirenden Scheiben die Erscheinung, nur treten jetzt die hellen und dunklen Linien in Gestalt schwacher, verwaschener Schatten auf. Concavitäten gegen die Abscissenaxe bedingen Vermehrung, Convexitäten Verminderung der Helligkeit. Was wird nun an einem Wendepunkte zu sehen sein? Einerseits eine Concavität, andererseits eine Convexität, im Wendepunkt selbst gar keine Krümmung. Der Wendepunkt muss also eine scharfe Grenze zwischen Licht und Schatten geben. Und in der That ist es so, wenn er zwischen zwei ziemlich starken Krümmungen liegt, welche plötzlich in einander umschlagen.

Versetzen wir Fig. 10 auf Taf. III auf einem Cylinder in Rotation, so sehen wir bei $\alpha\beta$ eine Grenze zwischen hell und dunkel. Der obere Theil erscheint sehr wenig heller als der untere, obgleich er objectiv sogar dunkler ist. Erst gegen den Rand zu macht sich die objective Helligkeit geltend. Deutlicher sieht man die Erscheinung an Fig. 13, wo die Krümmung stärker ist, noch deutlicher an Fig. 12, wo die objective Helligkeit in demselben Sinne wirkt. Die Fig. 14 und 15 sind so construirt, dass die objective Helligkeit von oben nach unten continuirlich zunimmt. Nichts desto weniger zeigen sich horizontale schattenartige, abwechselnd hellere und dunklere Streifen, welche ziemlich scharf an einander grenzen. In den Wendepunkten schlagen nämlich convexe Kreisbögen plötzlich in concave um ¹⁾.

Für die Schule lassen sich sämmtliche Phänomene sehr schön an den rotirenden Cylindern Fig. 7, 11, 15 auf Taf. III demonstriren. Die Sektorencurven sind hier zugleich die Lichtcurven und bieten alle Arten von Knickungen, Krümmungen und Wendepunkten dar.

Unser Satz gestaltet sich also gegenwärtig so. Gegen die Abscissenaxe concave Krümmungen der Lichtcurve bedingen für diese Stelle nach Massgabe der Krümmung eine Vermehrung der Lichtempfindung, convexe Krümmungen eine Verminderung.

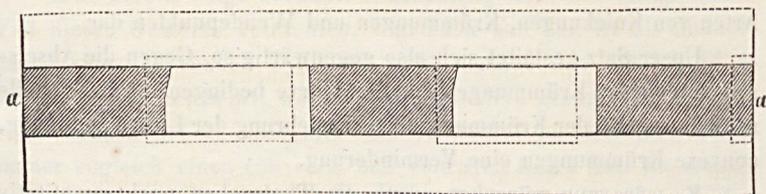
Es wäre nun wünschenswerth die Thatsachen noch quantitativ festzustellen. Dies hat aber seine Schwierigkeit. Messungen an bloß gekrümmten Sektoren auf rotirenden Scheiben erwiesen sich als unausführbar. Die Aufhellung und Verdunklung ist hier zu gering, um sich exact messen zu lassen. Die Störung durch Nebenumstände ist zu bedeutend. Die quantitativen Schlüsse aber von Knickungen auf Krümmungen werden unsicher.

Ich muss mich demnach darauf beschränken, drei leicht constatirbare Facta in Betracht zu ziehen, welche glücklicher Weise eine hinreichende Basis für quantitative Schlüsse abgeben, so lange eigentliche Messungen nicht vorliegen. — 1. Zunächst bemerkte ich, dass die hellen und dunklen Ringe, so wie die Schattenstreifen auf meinen rotirenden Scheiben in allen Beleuchtungsintensitäten, bei welchen überhaupt noch gesehen werden konnte, gleich deutlich waren. Ich habe im hellen Sonnenschein, in der Dämmerung und bei Kerzen-

1) Der Übergangspunkt verschieden starker Krümmungen in einander, wirkt natürlich wie ein Wendepunkt.

licht experimentirt. Die Ringe heben sich also immer gleich gut von dem an objectiver Intensität ihnen gleichen umgebenden Grunde ab. Nennen wir die Intensität des Grundes i und stellen wir uns einen Zuwachs objectiver Helligkeit Δ vor, so dass i und $i + \Delta$ eben so deutlich zu unterscheiden wäre, wie der Ring und sein Grund. Wächst nun die Beleuchtung um das q fache, so muss auch die fingirte objective Helligkeitsdifferenz des Ringes nach psychophysischen Gesetzen 1) um das q fache wachsen. Es wird nun qi und $qi + q\Delta$ so gut unterschieden, wie vorher i und $i + \Delta$. Gegen diese bloß mathematische Fiction einer objectiven Helligkeitsdifferenz von Ring und Grund, welche nach psychophysischen Gesetzen der subjectiven entsprechen würde, lässt sich nichts einwenden; sie berührt eben die Thatsachen gar nicht. — 2. Man betrachte die Vorrichtung Fig. 5 im Text. Eine

Fig. 5.



Reihe schwarzer Sektoren mit leichten Knickungen befinden sich auf der Mantelfläche eines Cylinders. Dieselbe ist mit einem durch die Punktirung angedeuteten Papierring überzogen, welcher mit den Sektoren entsprechenden Ausschnitten versehen ist und verschoben werden kann. Ist der Papierring schwarz, so kann man die weissen, ist er weiss, so kann man die schwarzen Theile fast ganz zum Verschwinden bringen. Es zeigt sich nun, dass der an der Knickung sichtbare, kaum merkliche Streifen durch Vermehrung des Schwarz deutlicher wird, bei Vermehrung des Weiss aber verschwindet. Man darf sich nicht durch den Anblick von Fig. 7, Taf. III, täuschen lassen. Da erscheint bei γ ein dunklerer Streif als bei α , bei β ein hellerer Streif als bei δ . Es ist jedoch zu bedenken, dass bei γ die Dunkelheit, bei β die Helligkeit des Grundes sich hinzuaddirt. Dafür ist der Streif δ schärfer als β . Am ausgesprochensten ist γ , weil hier alle günstigen

1) Fechner, Elemente der Psychophysik.

Umstände zusammenwirken. — 3. Endlich bringe ich in Erinnerung, dass mit der Verstärkung der Krümmungen ihre Wirkung, wie bereits erwähnt, wächst.

Betrachten wir nun diese drei Facta. Aus 1. folgt, dass die Ringe unverändert bleiben, wenn die Lichtcurve

$$i = f(x)$$

übergeht in

$$i = qf(x).$$

Aus 2. folgt, dass man die Ringe zum Verschwinden bringen könne, wenn man die Lichtcurve

$$i = f(x)$$

übergehen lässt in

$$i = p + f(x),$$

wobei p positiv und gross gedacht wird.

Die Thatsache 3. mathematisch ausgedrückt besagt, dass die Deutlichkeit der Ringe eine directe Function sei von $\frac{d^2i}{dx^2}$.

Setzen wir nun das vorhin erwähnte $\Delta = k \cdot \frac{\left(\frac{d^2i}{dx^2}\right)^2}{i}$, wobei k constant, so haben wir ihm alle Eigenschaften gegeben, welche es aufweisen soll. Lassen wir $i = f(x)$ übergehen in $i = qf(x)$, so wird $\Delta = k \frac{\left(q \frac{d^2i}{dx^2}\right)^2}{qi} = q \cdot k \frac{\left(\frac{d^2i}{dx^2}\right)^2}{i}$, d. h. Δ übergeht in $q\Delta$, d. h. der bemerkbare Unterschied zwischen Grund und Ring bleibt derselbe. Verwandeln wir $i = f(x)$ in $i = p + f(x)$, so wird beim Wachsen von i das Δ kleiner. Es vermindert sich also der bemerkbare Unterschied zwischen Ring und Grund. Endlich hat unser Δ die Eigenschaft zu wachsen, wenn $\frac{d^2i}{dx^2}$ (die Krümmung) wächst. Wir brauchen nur mehr festzusetzen, dass Δ das entgegengesetzte Zeichen von $\frac{d^2i}{dx^2}$ haben soll, man könnte dies ausdrücken durch die Schreibweise $\Delta = -k \frac{\left(\sqrt{\rho} \frac{d^2i}{dx^2}\right)^2}{i}$, wobei ρ den Richtungscoefficienten von $\frac{d^2i}{dx^2}$ bedeuten würde.

Nehmen wir die von Fechner¹⁾ gegebene Formel für die Lichtempfindungsintensität als richtig an, und denken wir uns eine

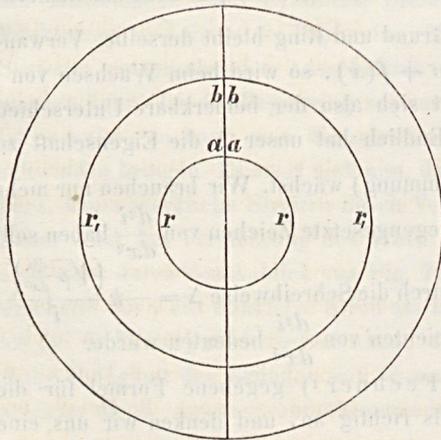
1) A. a. O.

Fläche, deren Beleuchtungsintensität nur nach der Richtung x variiert, so haben wir für die jeder Stelle entsprechende Empfindung e den Ausdruck:

$$e = a \cdot \log \left\{ \frac{i}{b} \pm k \cdot \frac{\left(\frac{d^2 i}{dx^2} \right)^2}{i} \right\}.$$

In dieser Formel sind a , b die bekannten Fechner'schen Constanten; das obere oder untere Zeichen ist zu wählen, je nachdem $\frac{d^2 i}{dx^2}$ negativ oder positiv ist. Die Formel stellt unsere Thatsachen vollständig dar. Sie ist nur in dem Falle unbrauchbar, wenn $\frac{d^2 i}{dx^2}$ unendlich wird, wenn wir es also mit einer wirklichen Spitze zu thun haben. Abgesehen davon, dass eine solche in keiner Lichtcurve wirklich vorkommt, würde sie, wenn sie auch da wäre, durch die dioptrischen Unvollkommenheiten des Auges wieder vernichtet. Man kann übrigens für diesen Fall unserer Formel eben so wenig strenge Richtigkeit zumuthen, als der Fechner'schen für den Fall eines unendlichen Reizes. Zudem ist sie gewiss nur eine Näherungsformel. Denn die Netzhaut besteht ja nach der allgemeinen Ansicht aus einer endlichen Zahl empfindender Elemente von endlicher Ausdehnung. Wenn es sich also um Eigenschaften der Netzhaut handelt, kann nicht mehr von di , dx , sondern nur von Δi , Δx die Rede sein.

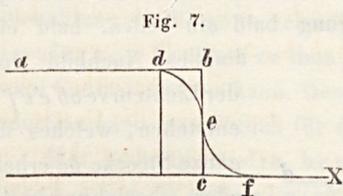
Fig. 6.



Man bemerke, dass das aufgestellte Gesetz für das Sehen von nicht geringer teleologischer Bedeutung ist. Es sind nach demselben hauptsächlich starke Krümmungen und Knickungen der Lichtcurve, welche durch hervorstechende Aufhellung oder Verdunklung die Aufmerksamkeit auf sich ziehen. Die Steigung ist von geringerem Einflusse. Flächen von gleichförmig nicht zu rasch ansteigender Beleuchtung werden sogar oft für gleichförmig hell gehalten. Ihre Helligkeit wird, wie mir aus einem vorläufigen Versuche

vorzugehen scheint, der mittleren Helligkeit gleichgeschätzt. — Auf meiner rotirenden Scheibe Fig. 1 c, Taf. I, so wie auf der Photographie derselben erscheint der Raum zwischen den beiden hellen Ringen rr , r_1r_1 (Fig. 6 im Text) fast gleichförmig grau, obgleich er am äusseren Rande bedeutend dunkler ist. Man bemerkt kaum eine Differenz zwischen den Stellen aa , bb . Diese erweist sich aber sofort als bedeutend, wenn man die Photographie diametral zerschneidet und die beiden Hälften so gegen einander verschiebt, dass die mit a und b bezeichneten Stellen unmittelbar neben einander zu liegen kommen. Es sind also die Knickungen und Krümmungen viel auffallender als die Steigungen. Ich möchte sagen die Steigungen machen sich stets nur durch ihr Endresultat geltend, während die Krümmungen und Knickungen unmittelbar wirken. Offenbar treten nun die letzteren hauptsächlich an den Contouren der Netzhautbilder auf, und gerade diese Contouren sind für die Erkenntniss der äusseren Objecte am wichtigsten.

Helmholtz ¹⁾ hat bemerklich gemacht, dass die von der chromatischen Abweichung des Auges herrührenden Zerstreungskreise ihrer eigenthümlichen Lichtvertheilung wegen sehr wenig stören.



Wäre z. B. (Fig. 7 im Text) abc die Lichtcurve für ein scharfes Netzhautbild, so ist sie nach Helmholtz in Folge der Farbenabweichung etwa $adef$. Helmholtz schreibt die Deutlichkeit des Bildes dem scharfen Ab-

fall der Curve an der Grenze bei e zu. Ich muss nach meinen Erfahrungen auch noch den Übergang von concav zu convex und den Wendepunkt bei e für sehr wesentlich halten. Diese Verhältnisse lassen sich für die Schule sehr schön an den rotirenden Cylinderflächen Fig. 13, 14, 15 auf Taf. III erläutern.

Das Sehorgan zeigt ein gewisses unverkennbares Streben zu Schematisiren, indem es bloß auffallende Ungleichförmigkeiten beachtet. Dasselbe Streben äussert sich wie in den Details so auch im grossen Ganzen. Es wäre sonst nicht möglich, dass ein in Linien- oder Punktmanier behandelter dunkler Grund, so lange die Details noch deutlich sichtbar sind, als gleichförmig aufgefasst würde. Eben so

¹⁾ Helmholtz, physiologische Optik.

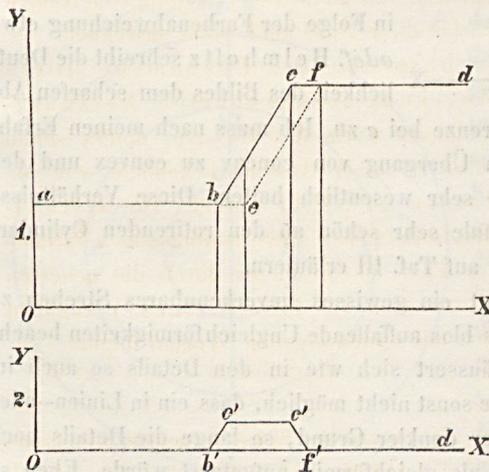
wenig könnten punktirte Figuren vom Grunde als für sich bestehende Gestalten abgehoben werden. Auch die Gestalten werden durch das Auge schematisirt, wie die Muropietographien aller Welttheile beweisen.

Versuchen wir nun der Ursache der betrachteten Erscheinungen näher zu kommen. Zunächst kann, wie bereits bemerkt, an der Subjectivität derselben kein Zweifel sein. Ihre Ursache liegt nicht in den Objecten, sondern im Sehorgane. Es werden Stellen heller oder dunkler gesehen, welche mit ihrer nächsten Umgebung von gleicher Intensität sind, oder welche, um auch das intermittirende Licht zu erwähnen, in gleichen Zeiten gleiche Lichtmengen aussenden, wie ihre nächste Umgebung.

Da es stets die Umgebung ist, welche die Wirkung einer Stelle bestimmt, so können wir unsere Erscheinungen einstweilen zu den Contrastphänomenen rechnen. Und es handelt sich nun darum, ob sie dem successiven oder dem simultanen Contrast angehören.

Es sei $abcd$ (in Fig. 8, 1 im Text) eine Lichtcurve. Gesetzt es würde durch eine leise Augenbewegung das Netzhautbild verschoben, so dass es nun nach $aefd$ zu liegen kommt. Offenbar muss hiebei je nach der Richtung der Augenbewegung bald ein helles, bald ein

Fig. 8.



dunkles Nachbild von der Lichtcurve $ob'e'f'd'$ entstehen, welches die ganze Strecke bc erhellt oder beziehungsweise verdunkelt. Dies ist nicht das beobachtete Factum.

Als successiven durch Augenbewegung bedingten Contrast können wir unsere Erscheinung nicht auffassen. Es müssten dann dieselben Ringe an den Scheiben bald hell bald dunkel auftreten, sie könnten ferner nicht

so schmal sein, wie sie wirklich erscheinen, und könnten nur stückweise der Richtung der Augenbewegung entsprechend sichtbar werden.

Um die Augenbewegung vollständig auszuschliessen, habe ich meine photographirten Scheiben mit dem elektrischen Funken beleuchtet und beobachtet. Man sieht aber hiebei die Ringe entweder gar nicht oder nur sehr schwach und verwaschen. — Dagegen sind die hellen und dunklen Streifen an den Fig. 5, 6, Taf. II, auch bei elektrischer Beleuchtung zu sehen. Nur erscheinen sie als breite verwaschene Bänder. An letzteren Figuren sind die Streifen überhaupt immer deutlicher als an den Photographien. — Es scheint hiernach, dass zum Zustandekommen unserer Erscheinung eine gewisse Zeit nöthig ist. Auch an den rotirenden Scheiben sieht man bei langsamer Drehung, so lange die Scheiben noch flimmern, die Ringe zwar heller aber breiter und verwaschener als bei rascher Rotation. Das genaue Studium des Sehens bei Beleuchtung mit dem elektrischen Funken scheint mir sehr viel versprechend. Man müsste hiebei die Netzhaut auf vielen Vorgängen so zu sagen ertappen.

Würde die Erscheinung auf Augenbewegung beruhen, was übrigens aus den schon erwähnten Gründen nicht zugegeben werden kann, so müsste sie bei Beleuchtung mit dem Funken der Leydnerflasche vollständig verschwinden. Ausserdem müsste eine kurze Beleuchtung die Ringe verschmälern. Wir haben es also jedenfalls mit simultanem Contrast zu thun, wenn man diese Erscheinung überhaupt Contrast nennen kann. Den von Brücke¹⁾ eingeführten Namen Induction kann man füglich für diese Fälle auch nicht anwenden.

Mir scheinen die besprochenen Phänomene allein durch eine Wechselwirkung benachbarter Netzhautstellen erklärbar. Die ganze Form des Gesetzes deutet schon darauf. Ich muss mich also zu einer Ansicht bekennen, wie sie ähnlich schon von Plateau aufgestellt worden. Die Wechselwirkung der Netzhautstellen fordert aber einen anatomischen Zusammenhang derselben. In der That scheint dieser durch die neuesten Untersuchungen festgestellt zu sein. Ich lasse Ritter's²⁾ Angaben über die Structur der Retina mit seinen eigenen Worten folgen.

1) Brücke, Pogg. Ann. 84. Bd.

2) C. Ritter (in Worpsswede), die Structur des Retina, dargestellt nach Untersuchungen über das Wallfischeauge. Leipzig. W. Engelmann. 1864. — Vergl. ferner: Helmholtz, physiol. Optik. — Wundt, Physiologie, S. 490. — Kölliker, Gewebelehre, Leipzig, 1863. S. 661. — Fick, Anatomie der Sinnesorgan. Labr. 1864. S. 182.

„Das Nervengewebe der Retina bildet eine sehr regelmässig gebildete, überall übereinstimmende Gewebsform, welche sich bei allen Wirbelthieren mit nur geringen Abweichungen wiederholt. Von der Nervenfasern, welche innerhalb des Opticus verlaufend in die Retina eintritt, bis zur Stäbchenschicht erstreckt sich eine fortlaufende Verbindung; die mannigfachen Verbindungsglieder dienen nur, um Theilungen der einfachen Fasern vorzubereiten oder um der Leitungsfaser einen höheren physiologischen Werth beizulegen.“

„Die Opticusfasern bilden zunächst nach aussen von der Limitans eine schmale Schicht, welche neben dem Opticuseintritt am stärksten ist, gegen die Peripherie hin stetig abnimmt und zuletzt nur noch ein vielfach durchlöchertes Gitterwerk darstellt. Ohne dass die Fasern andere Verbindungen eingehen, endigen sie als innere Fortsätze der Ganglienzellen. Noch liegen darüber keine Untersuchungen vor, ob an jeder Ganglienzelle nur eine Nervenfasern oder mehrere ihre Endigung finden. Bis jetzt ist immer nur eine Faser an eine Zelle gefunden. Jedenfalls aber gehört zu jeder Ganglienzelle eine Nervenfasern.“

„Die Ganglienzellen folgen zunächst nach aussen auf die Nervenfaserschicht; sie liegen meist in einer einfachen Schicht; an bestimmten Stellen (gelber Fleck des Menschen und Affen) und bei bestimmten Thierclassen (Vögeln), welche sich durch scharfes Gesicht auszeichnen, bilden sie eine doppelte und mehrfache Schicht. Gegen die Peripherie nimmt die Zahl der Zellen in regelmässiger Proportion ab, sie liegen nicht mehr eng an einander, sondern werden durch wachsende von Bindegewebsfasern erfüllte Zwischenräume getrennt. Eine kurze Strecke von der *ora serrata* hören sie endlich ganz auf. Constant schicken die Ganglienzellen nach der inneren und äusseren Seite Fortsätze ab, seitliche Verbindungszweige zwischen den Zellen finden sich nur selten. Die inneren Fortsätze sind Opticusfasern, die äusseren treten in die Faserschicht ein und bilden im Centrum der Retina einen grossen, gegen die Peripherie einen kleiner werdenden Theil derselben. Die äusseren Fortsätze sind an jeder Stelle stets mehrere, nur im gelben Flecke des Menschen lässt sich die Möglichkeit der Verbindung zu einer Zelle mit einem äusseren Faden zugeben; bewiesen ist es aber auch hier noch nicht. Oft entspringen mehrere solcher Fortsätze aus einem dickeren Aste, welcher sich so lange zwei- und dreifach theilt, bis die Endäste die jedem Thiere zukommende geringste

Breite der äusseren Fortsätze erreicht haben. Der Ursprung der Zellenäste geschieht unter den verschiedensten Winkeln, sie durchsetzen die Faserschicht in allen Richtungen, nur einzelne an jeder Zelle laufen ziemlich radiär. Das Ende seines Verlaufes findet jeder Fortsatz an einer Körnerzelle und zwar tritt immer nur ein Fortsatz an eine solche Zelle.“

„Die Körnerzellen liegen der Faserschicht zunächst nach aussen an. Von der äussern Seite dieser kleinen Zellen entspringen dann ein oder zwei feine Fasern, welche sich wahrscheinlich in eine kleine, bestimmte Zahl Faden theilen und radiär die Körnerschicht durchsetzen. Innerhalb der Faden liegen mehrere Körner, d. h. runde oder ovale Anhäufungen, eines wahrscheinlich nervenmarkähnlichen Inhaltes. Der Faden setzt sich dann nach aussen in die Hüllen der Stäbchen und Zapfen fort und endigt nahe ihrer äusseren Begrenzung mit einer knopfförmigen Anschwellung.“

„Dieser Zusammenhang des Nervengewebes findet sich in der Retina aller Wirbelthiere.“ —

Nach den in Ritter's Schrift, S. 46, angegebenen Zählungen dürften sich etwa 7 Stäbchen mit einer Körnerzelle; 13 Körnerzellen mit einer Ganglienzelle zusammenlaufend verbinden. Eine Opticusfaser läuft demnach in etwa hundert Stäbchen aus. Wir finden eine systematische Verästelung gegen die Peripherie zu. Sind die Stäbchen wirklich die empfindenden Endelemente, so müssen ihre Erregungen entschieden eine Reihe von Wechselwirkungen erfahren, bevor sie in die Opticusfaser übergehen. Ich möchte sagen, die Netzhautelemente machen es zum Theile unter sich aus, welche Empfindung sie weiter leiten. Bestimmtere Vermuthungen würde ich vorläufig nicht wagen.

Ich zweifle nicht, dass manche Physiologen geneigt wären, die besprochenen Phänomene, statt durch die Structur der Retina und physikalische Processe in derselben, durch unbewusste Schlüsse und Urtheile zu erklären, falls sich nur irgend ein Princip dafür auffinden liesse. Ich halte auch diese Auffassung der Sinnesorgane gewissermassen für einen Fortschritt. Warum sollten auch die Sinnesorgane nicht eine gewisse Logik haben? Warum sollten die Ganglienzellen dieser Organe sich anders verhalten, als jene des übrigen Nervensystemes und des Gehirnes? Ich kann nur damit nicht einverstanden sein, dass man für die Schlüsse der Sinnesorgane, nachdem man sie

(Mach.)

2

für unbewusste Analogien der bewussten Schlüsse erklärt hat, Prämissen von einer Art aufsucht, auf welche sich eben nur bewusste Schlüsse bauen lassen, statt die wahren Prämissen so wie die entsprechenden physikalischen Vorgänge und Organe in den Sinnesapparaten selbst aufzusuchen. Das heisst doch dem Auge zu viel zumuthen, wenn es wissen soll, dass Briefpapier weiss ist, dass ein durch dasselbe hindurchschimmernder Körper in seiner Farbe modificirt werde, dass das Weiss sich aus Complementärfarben zusammensetzt u. s. f. Alles dies weiss ich als Physiker recht gut und doch begreife ich nicht, wie so die Contrasterscheinungen für mein Auge dieselben bleiben, auch wenn ich es nicht weiss. Woher soll das Auge diese Studien über Farbenlehre haben? Und im Auge liegen doch diese Urtheile, sonst müssten die Experimente durch bewusste Überlegung modificirt werden.

Man hat vor nicht gar langer Zeit alles Psychologische als Thatsache gar nicht anerkannt; es wurde was die Thatsächlichkeit betrifft zu allem Physikalischen als incommensurabel betrachtet. Noch kürzlich hat ein sehr angesehener Gelehrter sich über meine Experimente gewundert. „Wozu das? Das müssen doch nur Täuschungen sein!“ — Diese Zeiten sind vorbei. Wir wissen, dass auch „Täuschungen“ Thatsachen sind, und Gesetzen unterliegen. Wir thun jetzt des Guten sogar etwas zu viel und vergessen mitunter, dass jedem Psychischen ein Physisches entsprechen müsse, welches aufzusuchen sehr wünschenswerth ist. —

Es sei mir erlaubt hier gelegentlich ein heuristisches Princip der psychophysischen Forschung ¹⁾ auszusprechen, welches ich öfter stillschweigend und vielleicht nicht ganz ohne Glück angewendet. — Jedem Psychischen entspricht ein Physisches und umgekehrt. Gleichen psychischen Processen entsprechen gleiche physische, ungleichen ungleiche. Wenn ein psychischer Vorgang sich auf rein psychologischem Wege in eine Mehrheit von Qualitäten *a, b, c* auflösen lässt, so entsprechen diesem eine eben so grosse Zahl verschiedener physischer Prozesse $\alpha, \beta, \gamma, \dots$. Allen Details des Psychischen correspondiren Details des Physischen.

1) Eine Andeutung dieses Principes findet sich schon in meinem Compendium der Physik. Wien, 1863.

Diese Annahmen haben mich zu meiner Ansicht über die Accommodation des Ohres und die Bildung der Tonreihe, zu Betrachtungen über den Zeitsinn und das räumliche Sehen geführt. — Würde man nach diesem Principe die Farbenlehre behandeln, so müsste es zur Young'schen Theorie führen. Es würden sich aber dann als Grundfarbenempfindungen Roth, Gelb, Grün, Blau ergeben, da man nur in diesen bei der blossen Betrachtung keine anderen Farben erkennt. Ausserdem müsste für die Empfindung Weiss und Schwarz ein besonderer physiologischer Process statuirt werden. Denn im Weiss ist keine andere Farbe erkennbar. Wenn demselben auch in der Netzhaut mehrere Erregungen entsprechen, der letzte Vorgang in der physiologischen Kette, welcher den einfachen psychischen Process der Empfindung Weiss bedingt, muss einfach gedacht werden wie dieser.

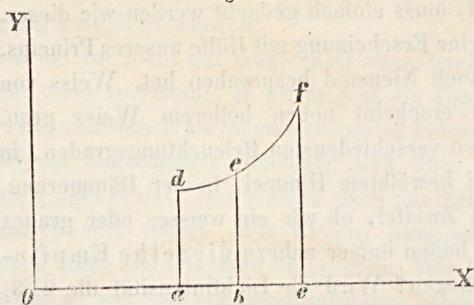
Beleuchten wir noch eine Erscheinung mit Hülfe unseres Princips, welche meines Wissens noch Niemand besprochen hat. Weiss von geringerer Lichtintensität erscheint neben hellerem Weiss grau. Andererseits sind wir bei den verschiedensten Beleuchtungsgraden, in hellem Sonnenscheine, bei bewölktem Himmel, in der Dämmerung, bei Kerzenlicht niemals im Zweifel, ob wir ein weisses oder graues Papier vor uns haben. Wir haben immer nahezu dieselbe Empfindung. Woran kann dies liegen? Wird die Lichtintensität die 2, 3, n -fache, so ist das Netzhautbild des weissen Papiere 2, 3, n mal heller, aber auch das ganze übrige Gesichtsfeld und die ganze Netzhaut erhält die 2, 3, n -fache Beleuchtung. Das Verhältniss der Lichtquantität der gesammten Netzhaut und des Papierbildes bleibt unter übrigens gleichen Umständen constant. Ich denke mir demnach einen Vorgang ausgelöst, dessen Intensität von diesem Verhältniss abhängt und welcher die Empfindung Weiss für das Netzhautbild bedingt. Die Helligkeit des Netzhautbildes wird so zu sagen gegen die Gesamterregung abgeschätzt. Dies ist ein Urtheil, die psychologische Seite der Sache. Die physische ist der erwähnte Vorgang. Er ist noch nicht aufgefunden.

Man bemerke, dass meine Behauptung eigentlich schon in der Fechner'schen Fundamentalformel liegt. Nach ihr erfolgen die elementaren Urtheile der Sinnesorgane, wie Wundt richtig bemerkt.

Wenn wir die eben erwähnte Thatsache mit unseren Ringerscheinungen zusammenhalten, so erfahren letztere einigermassen eine Erklärung. Es ist nämlich nicht unwahrscheinlich, dass schon

kleine Theile der Netzhaut sich ganz ähnlich verhalten, wie das ganze Auge. Ist doch, wie die specielle und vergleichende Anatomie von Tag zu Tag mehr nachweist, der ganze Organismus nach einem Plane gebaut, eine wahre Homoiomeria. Nehmen wir an, es könne die Helligkeit eines Stäbchens gegen die Gesammthelligkeit eines Stäbchenbündels (etwa 100 Stäbchen nach Ritter) so abgeschätzt werden, wie das erwähnte Netzhautbild gegen die ganze Netzhaut, oder mit anderen Worten, es werde für jedes Stäbchen ein Vorgang ausgelöst, dessen Intensität abhängt von dem Verhältniss der Lichtmengen des Stäbchens und des Stäbchenbündels; so können wir unsere Erscheinungen schon begreifen.

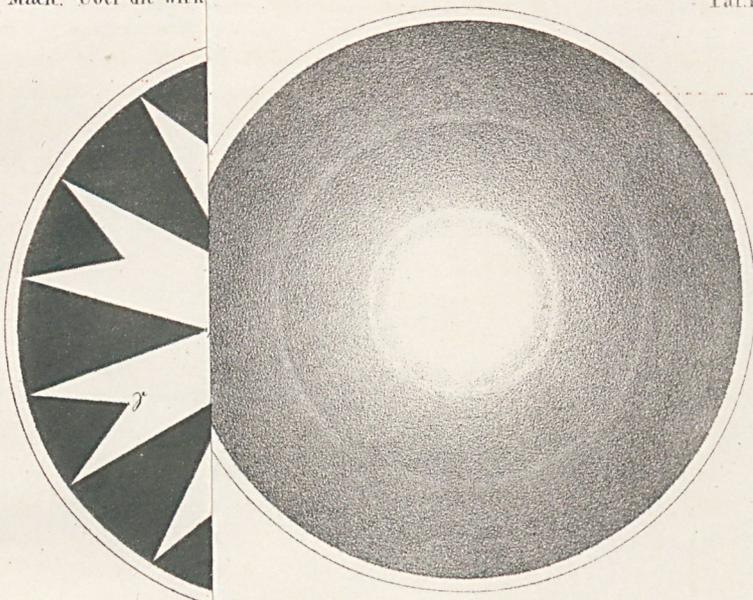
Fig. 9.



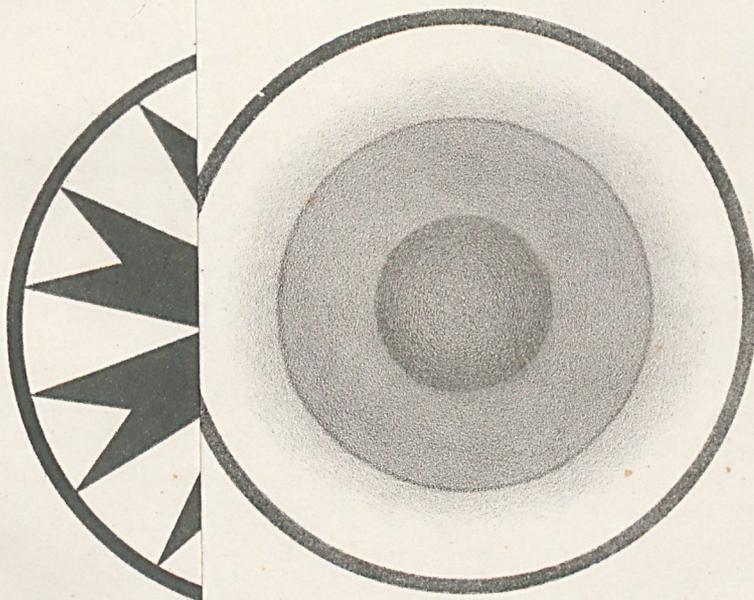
Das Stäbchen b (Fig. 9 im Text) werde von der Lichtintensität be affeirt und auf die ganze Stäbchenstrecke abc , welche wir uns mit b in anatomischem Zusammenhange denken, falle der gegen die Abscissenaxe convexe Theil der Licht-

curve. Offenbar muss nun die Helligkeit des Stäbchens b unter die mittlere Gesammthelligkeit der Stäbchenstrecke abc fallen, es wird also dunkler geschätzt (psychologisch gesprochen). Umgekehrt wäre es, bei gegen die Abscissenaxe concaver Krümmung der Lichtcurve. Ich will mich auf diese Andeutung beschränken.

Schliesslich muss ich noch erwähnen, dass mein Zuhörer, Herr Joseph Křížan, fast die sämtlichen für die Arbeit nöthigen mühsamen Zeichnungen und Constructionen sorgfältig ausgeführt, ferner dass Herr Dr. Fr. Dawidowsky, Director der Handelsakademie zu Graz, mit dankenswerther Freundlichkeit einen Theil der Photographien angefertigt hat. Einige besonders nette und genaue Bilder wurden mir von Herrn L. Bude, Photographen zu Graz, hergestellt.

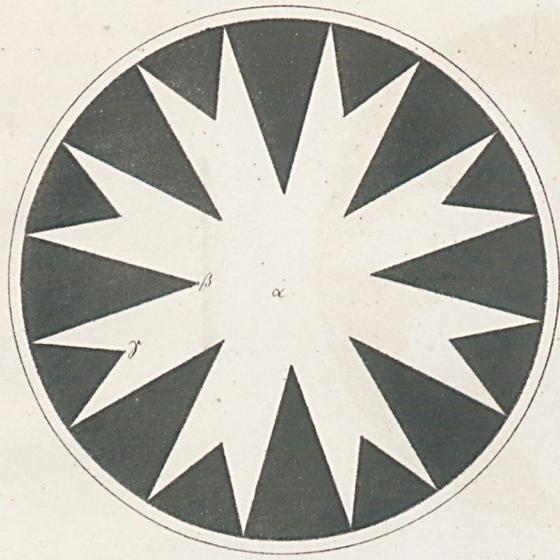


1. c.

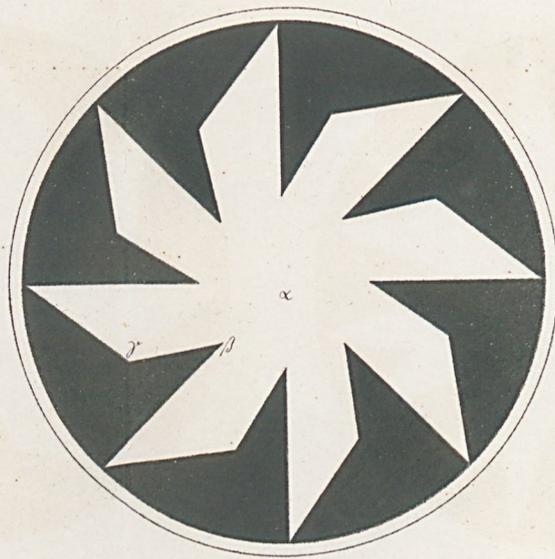


2. c.

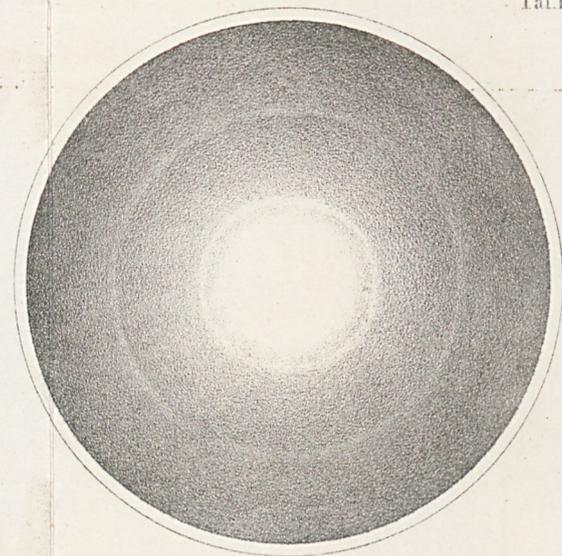
AMS d. K. K. Hof- u. Staatsdruckerei



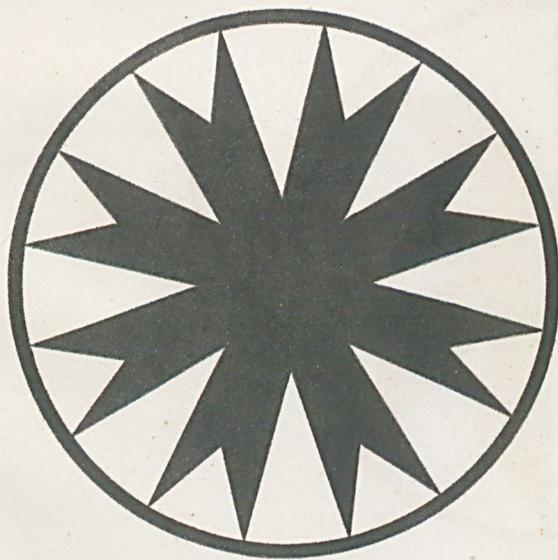
1. a.



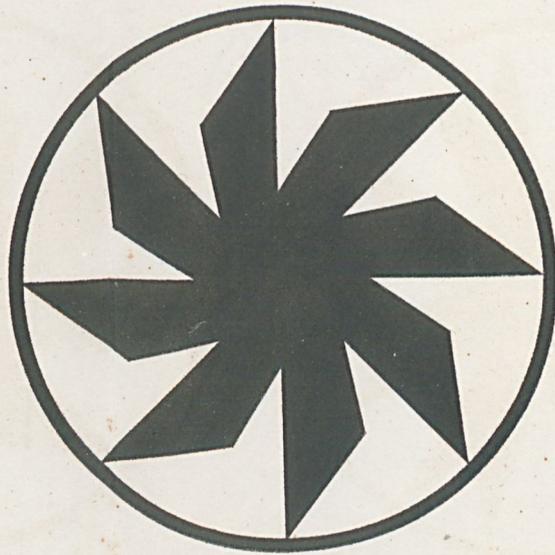
1. b.



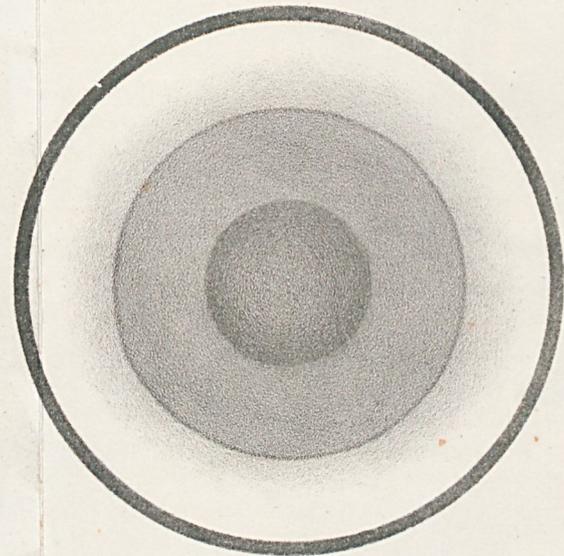
1. c.



2. a.



2. b.



2. c.

Sitzungsb. d. k. Akad. d. W. math. naturw. Cl. LII. Bd. II. Abth. 1865.

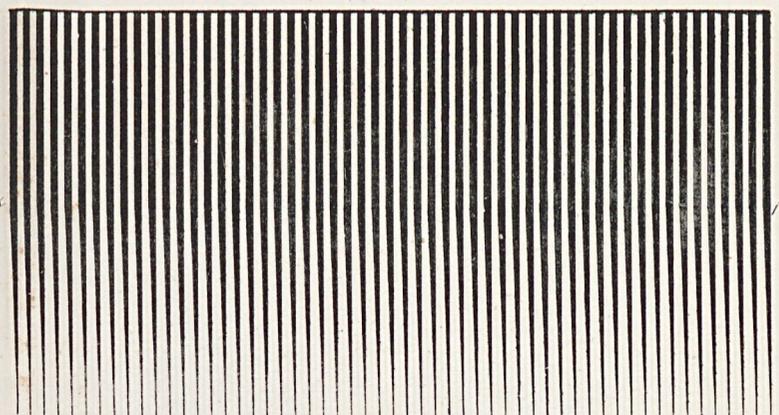
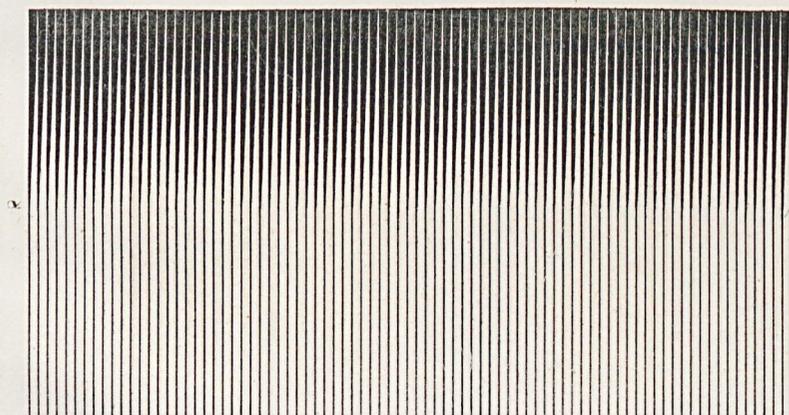
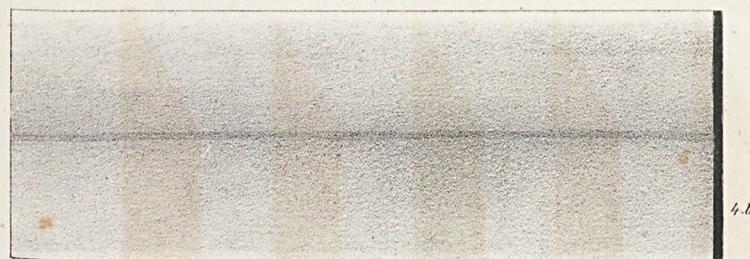
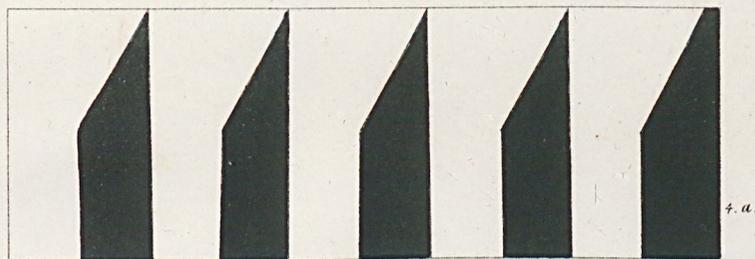
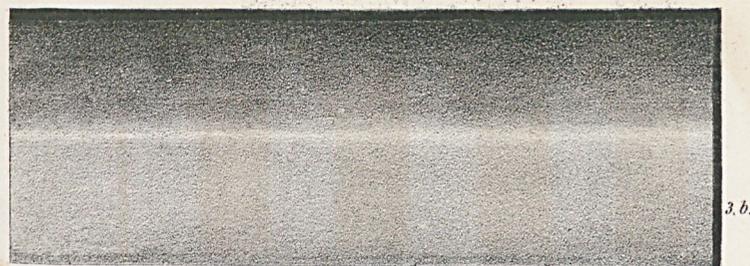
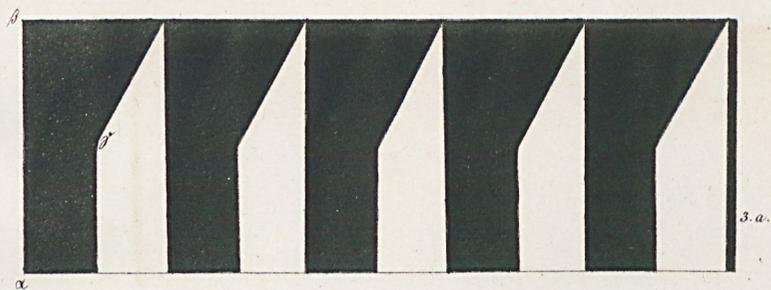
Aus d. k. k. Hof- u. Staatsdruckerei





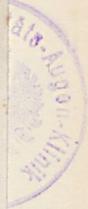


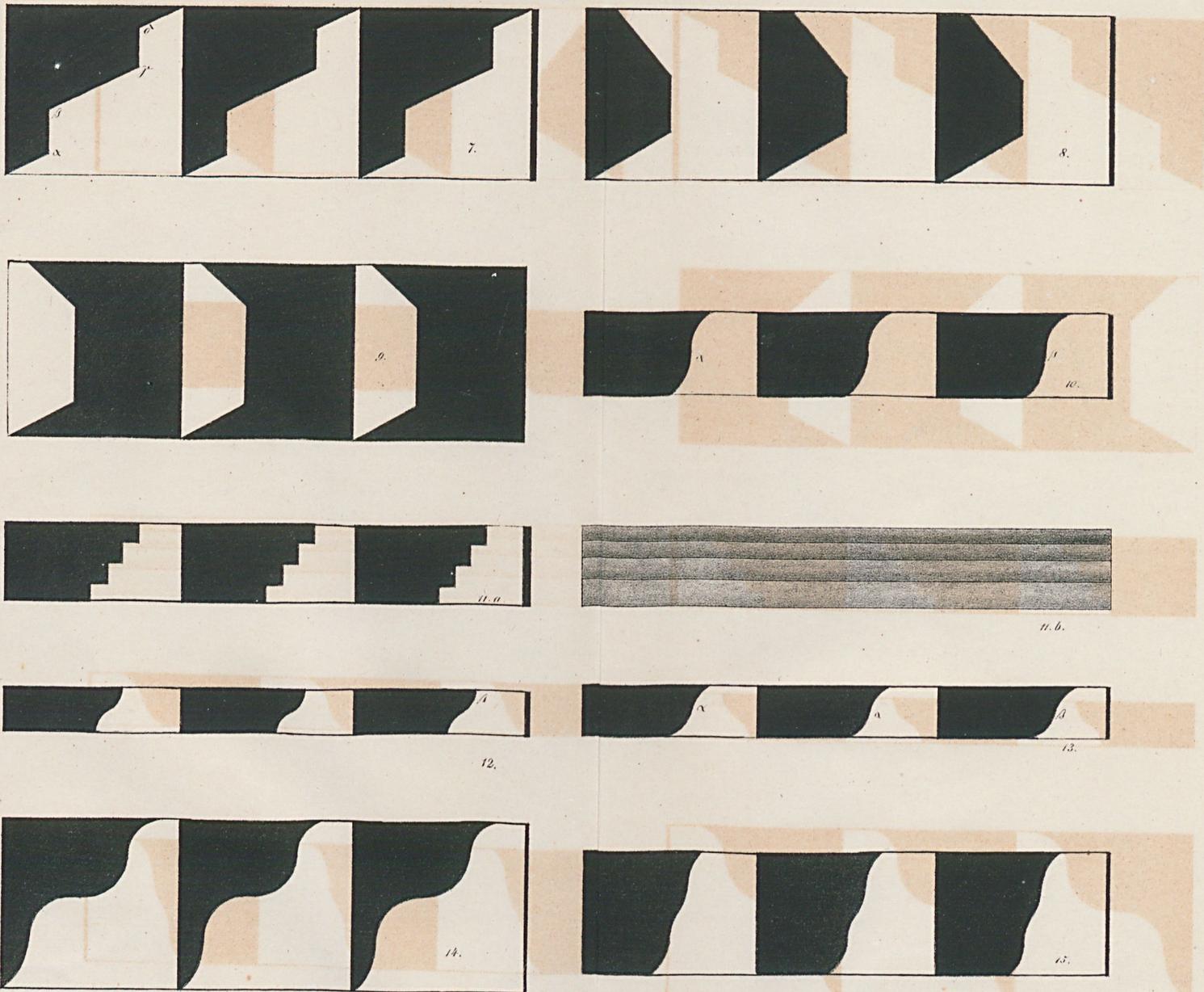












Aus d. k. k. Hof- u. Staatsdruckerei.





Martin-Luther-Universität
Zweigbibliothek der ULF
Klinikum Kröllwitz
Ernst-Grube-Str. 40
06120 Halle (Saale)

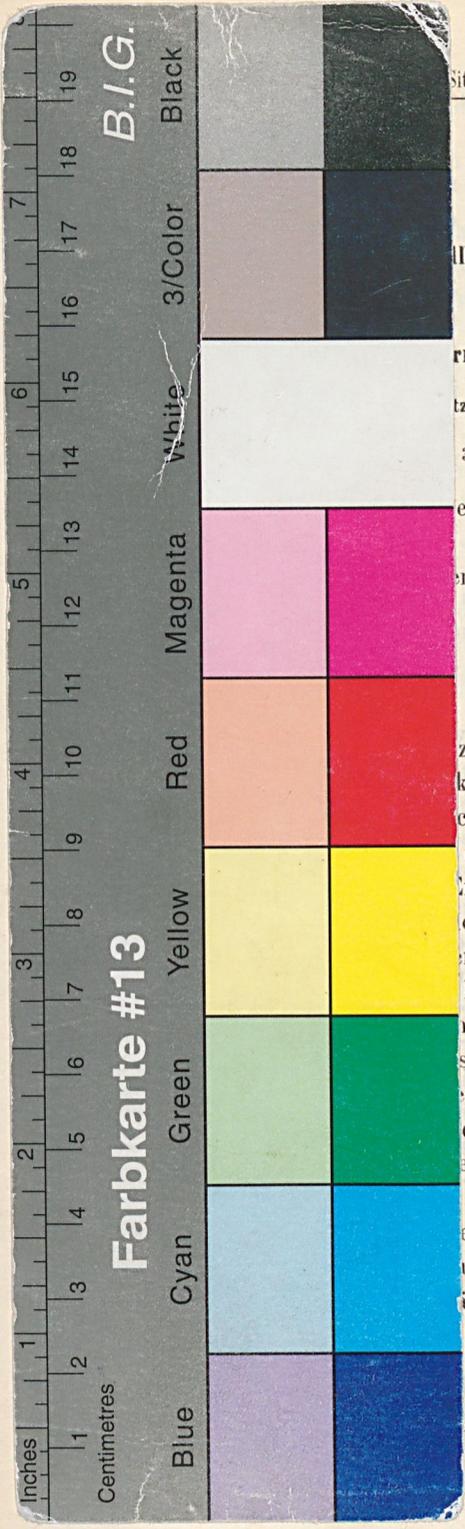


ULB Halle

3/150

003 013 37





Umlichen Vertheilung des Licht-
die Netzhaut.

Ernst Mach.

(Vorgelesen am 3. October 1865.)

(3 Tafeln.)



enden, mit schwarzen und weissen
eine Erscheinung bemerkt, deren
im allgemeineren Gesetze der physio-
hier gehörigen Erscheinungen

a oder *1 b*, Taf. I, um ihren Mittel-
zt, so gibt sie das Bild *1 c*. Sie zeigt
kelheit zunehmendes Grau, welches
schwarzen Sektoren in Spitzen endigen
schmale, hellere, etwas verwaschene
Erscheinung der helleren Ringe muss
eoretisch zu erklären versucht. Man
en Scheiben *1 a* und *1 b*, in Rotation
Plateau'schen Gesetze ¹⁾ dieselben
n müssen. Vom Centrum α bis zu dem
sie gleichförmig weiss erscheinen. Bei
en ein und bedingen ein bis γ an Dun-
des Grau. Von γ an, wo der Sector
ein neuer einsetzt, soll die Dunkelheit
priori die Ringe β , γ nicht heller ver-
e sollten vielmehr der Helligkeit nach
und nächst innern Ringen liegen. Sie
it der Beleuchtung nicht aufheben.

Ser. III. Vol. V. p. 321. — Plateau, Bulletin
Axelles. 1835. Nr. 2. p. 52 — Nr. 3, p. 89.