

Zur Theorie der intermittirenden Netzhautreizung.

Von

Dr. Alfred Kleiner.

Historische Bemerkungen.

I.

Die Theorie von der Nachdauer des Lichteindruckes im Auge findet sich schon bei Newton¹⁾ erwähnt. Er erklärt damit das Erscheinen einer leuchtenden Linie, wenn eine glühende Kohle mit einer gewissen Geschwindigkeit geschwungen wird, und schätzte nach diesem Experiment die Nachdauer des Lichteindruckes auf $\frac{1}{2}$ — 1 Sec.

Die Versuche wurden nachher vielfach unter verschiedenen Formen wiederholt, führten aber zu verschiedenen Resultaten. So fanden nach derselben Methode Segner 30, d'Arcy²⁾ 8, Cavallo³⁾ 6, Tertien, Th. Young⁴⁾ ohne Angabe der Bestimmungsweise 0,01 — 0,5 Sec., je nach der Stärke des Reizes.

Plateau⁵⁾ und Emsmann⁶⁾ liessen zur genauern Bestimmung der Dauer des Lichteindruckes Scheiben mit

¹⁾ Optice lib. III prop. XIV.

²⁾ Mémoire sur la durée de la sensation de la vue; hist. de l'acad. des sc. 1796.

³⁾ Hist. nat.

⁴⁾ A course of lectures on natural philosophy and the mech. arts, lect. XXXVIII: on vision.

⁵⁾ Pogg. Ann. 20.

⁶⁾ Pogg. Ann. 91.

hellen Sektoren auf dunklem Grund so schnell rotiren, bis eine homogene Mischfarbe entstand und fanden bei weissem Licht für die Durchgangszeit eines schwarzen Sectors, wenn die Scheibe eben ein gleichmässiges Grau zeigte, die Zeiten :

Plateau 0,25 s. Emsmann 0,19 s.

Emsmann machte auch zuerst die Beobachtung, deren nähere Verfolgung Zweck dieser Arbeit ist, dass nämlich die Dauer der Intermission bei Lampenlicht grösser war, als bei Tageslicht. Es erschien ihm paradox, dass ein schwächerer Lichteindruck länger andauern sollte, als ein stärkerer, und daher erklärte er die Erscheinung aus dem grössern Contrast, den bei seiner Versuchs-Anordnung die mit der Lampe beleuchtete Scheibe gegen die dunkle Umgebung bot. Diese Beobachtung leitet, wie wir sehen werden, darauf hin, dass die Versuche nicht das beweisen, was sie beweisen sollen, dass mit rotirenden Scheiben die Dauer des Lichteindruckes nicht zu ermitteln ist.

Plateau¹⁾ und Emsmann dehnten die Versuche auch auf verschiedene Farben aus und fanden

¹⁾ Die Nachdauer des Lichteindruckes wurde von Plateau in fruchtbarer Weise benutzt, zur Erklärung vieler subjectiven Lichterscheinungen, zur Construction optischer Instrumente, wie der Thaumatrope etc. und die Beschäftigung mit intermittirenden Lichtreizen führte ihn zur Begründung der stroboscopischen Methode, die zu so schönen Untersuchungen geführt hat. Vgl. Pogg. Ann. 20; 22; 37; 78; 79; 30 und: Sur un nouveau moyen de déterminer la vitesse et les particularités d'un mouvement très-rapide, tel que celui d'une corde sonore.

Vgl. dazu: Doppler, Pogg. Ann. 72 und E. Mach, optisch-akust. Versuche. Wien 1874.

	Plateau	Emsmann
für gelb	0,199	0,27
roth	0,232	0,24
blau	0,295	0,29

Schafhäütl¹⁾ machte die Nachdauer des Lichteindruckes und deren Abhängigkeit von der Lichtstärke zur Grundlage einer photometrischen Methode und construirte ein Instrument, das genaue Messungen der Nachdauer des Lichteindruckes erlauben sollte. Es bestand aus einer Stahlfeder, welche oben einen Schirm mit Spalt trug. Der Spalt konnte zwischen einer Diopterröhre einerseits und einer Lichtquelle anderseits schwingen gelassen und dadurch intermittirendes Licht ins Auge geschickt werden. Die schwingende Feder und damit ihre Schwingungsdauer sollte dann so lange verkürzt werden, bis das ins Auge dringende Licht keine Unterbrechungen mehr erkennen liess, völlig ruhig erschien.

Schafhäütl stellte sich vor, dass die Nachdauer des Lichteindruckes abhängig sein werde von der Intensität des einwirkenden Reizes. Wie eine gezupfte Saite um so länger nachtönt, je stärker sie erregt wurde, so sollten auch die, durch Licht in Mitschwingung versetzten Nervenfasern der Retina um so langsamer zur Ruhe kommen, je intensiver das erregende Licht gewesen war. Die Zeit des Abklingens der Lichtempfindung sollte nach ihm proportional sein dem Quadrat der Amplitude der Lichtschwingungen.

Nun ergaben freilich die Versuche, wie bei Emsmann, das unerwartete Resultat, dass bei Steigerung der Licht-

¹⁾ Abbildung und Beschreibung des Universal-Vibrations-Photometers. Münchner Abh. VII.

stärke die Intermissionszeit verkürzt werden musste, um den Eindruck homogen zu erhalten. Diese, der Theorie widersprechende Beobachtung wurde dadurch erklärt, dass das Licht erst eine geraume Zeit einwirken müsse, um empfunden zu werden, und zwar um so länger, je schwächer es sei, und je complizirter seine Schwingungsform.

Die Thatsache war also richtig erkannt, aber es wurden keine genaueren Versuche angestellt, um die Abhängigkeit von Beleuchtungsintensität und Intermissionszeit zu ermitteln.

Bestimmte Angaben über die Abhängigkeit der Intermissionszeit, für welche aufeinanderfolgende Netzhautreize noch eben verschmelzen, von der Beleuchtungsstärke, ebenfalls mit rotirenden Scheiben, machte erst Helmholtz¹⁾; er fand $\frac{1}{48}$ Sec. für starkes Lampenlicht, $\frac{1}{20}$ Sec. für schwache Beleuchtung (ungefähr gleich der des Vollmondes). Zugleich erwähnt Helmholtz, dass die beobachteten Zahlen dieselben bleiben für verschiedenes Verhältniss der Breite der dunklen und hellen Sektoren der rotirenden Scheibe; es ergibt sich dies daraus, dass auf einer Scheibe, von der in *physiolog. Optik* pag. 340 angegebenen Gestalt, das Flimmern auf allen drei concentrischen Kreisringen bei gleicher Rotationsgeschwindigkeit verschwindet. Während die Zeit des Vorüberganges eines schwarzen Sektors nach den früheren Beobachtern die Zeit der Nachdauer des Lichteindruckes messen sollte, besagt dieser Versuch, dass jene Dauer sehr verschieden sein kann, je nach der Dauer der Einwirkung des Reizes, auch bei unveränderter Intensität des letztern. Daraus folgt, dass bei rotirenden Scheiben die Zeit des Vorüberganges eines

¹⁾ *Physiol. Optik* p. 344.

schwarzen Sectors nicht schlechtweg als Mass der Dauer der betreffenden Lichtempfindung genommen werden kann.

Helmholtz schlägt daher vor, bei derartigen Versuchen statt der Zeit des Vorübergangs eines schwarzen Sectors diejenige des Vorübergangs eines schwarzen und hellen Sectors anzugeben, weil diese Grösse für jede Beleuchtung constant ist, und weil damit die Erscheinung bei rotirenden Scheiben objectiv bezeichnet wird und von Hypothesen frei ist; sie wird damit definitiv getrennt von der Frage nach der Dauer des Lichteindruckes.

Es ist klar, dass die Nachdauer der Lichtempfindung nach dieser Methode bloss in dem Fall bestimmbar ist, wenn der Werth der Intensität der Nachempfindung während der Intermittenz von einem endlichen Werth auf 0 gelangt, nicht aber, wenn dieser Werth sich der Null asymptotisch nähert, für welch' letztere Anschauung wir allen Grund haben. Das Auftreten eines homogenen Eindruckes bei intermittirender Netzhautreizung wird daher schon bei einer Intermissionsgeschwindigkeit zu Stande kommen, für welche die Nachdauer des Lichteindruckes noch nicht aufgehört hat; dafür spricht besonders die, von den älteren Beobachtern nicht erklärte Beobachtung, dass die Intermissionszeit, für welche der gleichförmige Eindruck sich einstellt, sich verkürzt, wenn der Reiz verstärkt wird.

Es handelt sich nun darum, den physiologischen Vorgang bei rotirenden Scheiben so zu erklären, dass jene Beobachtung, die wir zu untersuchen beabsichtigen, begreiflich wird.

II.

Eine solche Erklärung ergibt sich aus der Auffassung intermittirender Netzhautreizung, wie sie zuerst von Fick¹⁾ gegeben wurde. Er zeigte, dass sowohl Entstehen, als Vergehen einer Netzhautempfindung Zeit braucht, und dass die Intensität der Empfindung sich beim Entstehen und Vergehen ausdrücken lassen muss durch eine Funktion der Zeit. Bei rasch intermittirenden Reizen reicht nun weder die Reizzeit, noch die Intermissionszeit hin, um die Empfindung alle Werthe von 0 bis zu der, dem Reiz bei genügend langer Einwirkung zukommenden Maximalintensität und von dieser bis 0 durchlaufen zu lassen. Wir haben bloss kurze Stücke des An- und Abklingens, deren Gesammtheit eine sägeartig gezackte Curve darstellt, in welcher jedem Zahne auf der Abscisse ein Sectorwechsel entspricht. Lässt man genügend rasch rotiren, die Zacken unserer Empfindungcurve immer kleiner werden, so werden schliesslich gar keine Empfindungsdifferenzen mehr wahrgenommen; die rotirende Scheibe flimmert dann nicht mehr.

Die mittlere Empfindungshöhe, um welche unsere Empfindungcurve oscillirt, wird bestimmt durch den Talbot'schen Satz, der in der Formulirung von Helmholtz heisst: »Wenn eine Stelle der Netzhaut von periodisch veränderlichem und regelmässig in derselben Weise wiederkehrendem Lichte getroffen wird und die Dauer der Periode hinreichend kurz ist, so entsteht ein continuirlicher Eindruck, der dem gleich ist, welcher entstehen würde,

¹⁾ Ueber den zeitlichen Verlauf der Netzhauterregung. Reichert und Dubois-Reymond. Arch. 1863.

wenn das, während einer jeden Periode eintretende Licht gleichmässig über die ganze Dauer der Periode vertheilt würde.«

Es lässt sich nun nicht entscheiden, ob dem Auftreten eines continuirlichen Eindrucks bei intermittirender Reizung ein materieller Vorgang entspricht, d. h. ob die unterbrochen einwirkenden Reize im Auge in einen continuirlich wirkenden verwandelt werden, oder ob wirklich Reiz- und Empfindungsdifferenzen bestehen (d. h. die Zacken unserer Curve bestehen bleiben), aber zu gering sind, um ins Bewusstsein zu gelangen. Die erstere Ansicht wird wahrscheinlich, wenn man annimmt, dass die Lichtstrahlen im Auge zunächst in chemische Arbeit umgesetzt werden; wir können uns dann vorstellen, dass die Entwicklung und die Diffusion der chemisch wirksamen Substanz bei genügend rascher Intermission schliesslich einen stationären Strom darstellt, der Reiz sich also wie ein continuirlicher verhält.

Nach Fechner¹⁾ wäre die zweite Ansicht wahrscheinlicher, weil die Annahme einer Reizschwelle dadurch nothwendig wird, dass unser Bewusstsein das Gefühl völliger Ungestörtheit darbieten kann, trotzdem eine vollständige Reizlosigkeit sich gar nicht vorstellen lässt.

Nehmen wir diese Ansicht an, so entsteht die Frage, ob der Empfindungsunterschied, der noch eben zum Bewusstsein kommt, constant, oder eine Function der Empfindungshöhe sei, analog, wie nach dem psychophysischen Gesetz für die Vergleichung nebeneinander bestehender Reize die Unterschiedschwelle eine Function der Reizstärke ist.

¹⁾ Psychophysik I p. 249.

Die Annahme,¹⁾ dass dasselbe Gesetz der Vergleichung gelte für gleichzeitige Reizung nebeneinander liegender Netzhautstellen, wie für nacheinanderfolgende Reizung derselben Netzhautstelle, ist jedenfalls eine vollständig willkürliche und existiren zur Feststellung derselben keine Versuche, und liegen keine zwingenden innern aprioristischen Gründe vor.

Die Anschauungen Fick's wurden bestätigt und weiter entwickelt von S. Exner,²⁾ welcher die Abhängigkeit der Empfindungsstärke von der Zeit des An- und Abklingens zunächst durch eine experimentell ermittelte Curve ausdrückte; später liess sich auch der analytische Ausdruck für jene Curve geben.³⁾

Nach dieser Betrachtungsweise des physiologischen Vorganges bei intermittirender Netzhautreizung erscheint es nun nicht mehr paradox, dass bei intensiverer Beleuchtung einer rotirenden Scheibe der Eindruck einer gleichförmigen Mischfarbe bei grösserer Rotationsgeschwindigkeit eintritt, als bei schwächerer Beleuchtung. Da nämlich bei stärkerem Reiz nach den Sätzen von S. Exner die Curve des Anklingens steiler ansteigt, die Nachbildcurve steiler abfällt, als bei schwächerem Reiz, so wird zur Erreichung des Schwellenwerthes der Empfindungsdifferenz bei stärkerem Reiz eine kürzere Zeit erforderlich sein, als bei schwachem Reiz.

¹⁾ Plateau: Ueber die Messung physischer Empfindung und das Gesetz, welches die Stärke dieser Empfindung mit der Stärke der erregenden Ursache verknüpft. Pogg. Ann. 150.

²⁾ Ueber die zu einer Gesichtswahrnehmung nöthige Zeit. Wiener Sitzgsber. 1868, und: Bemerkungen über intermittirende Netzhautreizung; Pflüger Archiv III.

³⁾ K. Exner: Ueber die Curven des An- und Abklingens der Lichtempfindungen. Wiener Sitzgsber. 1870.

Wir können diese Forderung graphisch darstellen, indem wir für zwei Empfindungscurven verschieden intensiver Reize die Empfindungsänderung für gleiche Intermissionszeit vergleichen; die fragliche Erscheinung wird Fig. 1 dadurch ausgedrückt, dass die Höhe des Dreiecks $a b c$ grösser ist, als die von $a' b' c'$.

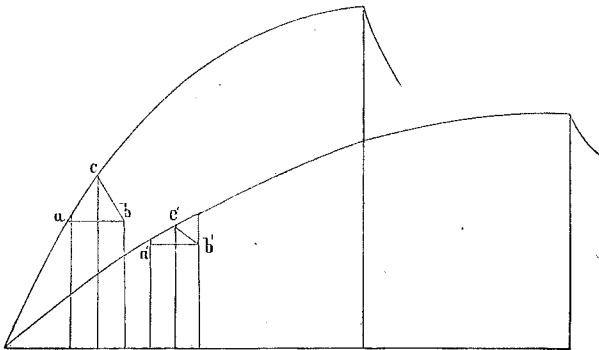


Fig. 1.

Ich habe nun durch vorliegende Arbeit versucht, die Abhängigkeit der Internittenzeit, für welche die Empfindungsschwankung aufhört, bewusst zu werden, von der Empfindungsstärke zu ermitteln, und daraus womöglich einen Schluss zu ziehen auf die Abhängigkeit des Schwellenwerthes der Empfindungsdifferenz von der bestehenden Empfindungshöhe.

Versuchsmethode.

III.

Ich machte die Versuche mit rotirender Scheibe mit schwarzen und hellen Sectors und bestimmte die Rota-

tionsgeschwindigkeit, bei welcher das Flimmern für eine Reihe bestimmter Helligkeiten eben verschwand.

Als Rotationsmaschine für die Scheibe diente eine kleine einfache Sirene, deren Zählwerk herausgenommen war; auf die freie Axe wurde eine kleine Nabe mit breitem Rand aufgesteckt und auf dieser die Scheibe durch blosses Andrücken befestigt. Die Sirene wurde zuerst durch einen Blasbalg getrieben; die Handhabung desselben war indessen sehr unbequem, besonders weil die Aufmerksamkeit schon anderweitig nach mehreren Richtungen getheilt war. Die Hauptschwierigkeit bestand aber darin, den Luftdruck im Blasbalg so zu reguliren, wie es für die Feststellung oder Veränderung einer gewünschten Rotationsgeschwindigkeit nothwendig erschien; es liesse sich auch durch Einschalten grosser Ballons nur schwierig eine annähernde Constanz der Tonhöhe erzielen.¹⁾ Daher wurde später die Sirene immer durch ein, von einem Schmid'schen Wassermotor getriebenes Centrifugalgebläse in Bewegung gesetzt. In den Verbindungsschlauch zwischen Gebläse und Sirene wurde ein Hahn eingeschaltet, der es ermöglichte, die beschleunigende Kraft des Gasdruckes in beliebigem Grad zu ändern; da sich bei jeder Hahnstellung bei einer gewissen Rotationsgeschwindigkeit der Sirene die beschleunigende Kraft des Gebläses und die verzögernde der Reibung der Sirene in den Axen und an der Luft das Gleichgewicht halten mussten, so konnte die Sirene auf jeden gewünschten Ton gebracht, letzterer beliebig lange constant erhalten oder beliebig schnell geändert werden.

¹⁾ Vgl. Boltzmann u. Töpler: Ueber eine optische Methode, die Schwingungen tönender Luftsäulen zu analysiren. Pogg. Ann. 143.

Die Rotationsgeschwindigkeit war nun gegeben durch den Ton der Sirene, welcher mit einer Stimmflöte ermittelt wurde. Der Fehler, welcher bei dieser Bestimmung begangen werden konnte, war klein. Wenn Flöte und Sirene in der Stunde 1 Schwebung machten, so war er gleich der reciproken Schwingungszahl des betreffenden Tones; die beobachteten Töne hatten 400—800 Schwingungen nach Angabe eines Helmholtz'schen Resonators.

IV.

Da die Beleuchtungsstärke der rotirenden Scheibe in genau gemessenen Verhältnissen abgestuft werden sollte, so war es nöthig, alles diffuse Tageslicht von der Scheibe abzuhalten, kein anderes, als graduirtes Licht auffallen zu lassen. Die Beobachtungen wurden daher immer im dunkeln Zimmer angestellt, was auch zur Schonung des beobachtenden Auges zweckmässig erschien. Weil aber zum Aufschreiben der Beobachtungen immer ein wenig Licht nothwendig war, so wurde zu grösserer Vorsicht die Sirene in einen dunkeln Kasten eingeschlossen.

Als Lichtquelle diente entweder eine Gaslampe im Dubosq'schen dunkeln Kasten, oder eine Petroleumlampe, die einem Zöllner'schen Photometer, wie sie jetzt von Ausfeld in Gotha construirt werden, entnommen war. Die Leuchtkraft beider war während der 1 — 2stündigen Versuchsreihen kleinen Aenderungen ausgesetzt. Bei Gaslicht änderte sich nicht selten der Druck des Gases. Die Petroleumlampe hingegen erhitzte sich gegen Ende des Versuchs dermassen, dass das Oel zu verdampfen anfang und die Flamme von Dämpfen eingehüllt wurde; sie zeigte also nicht die Constanz, wie zur Production eines künstlichen

Sternes im Photometer.¹⁾ Dort wird sie hauptsächlich dadurch gesichert, dass nur ein ganz kleines Stück der Flamme herausgegriffen wird, während ich ziemlich den grössten Theil der Flamme einwirken liess.

Diffuses Tageslicht oder directes Sonnenlicht wären jedenfalls inconstanter und unbequemer.

Die Graduirung und Beleuchtung dieser constanten Lichtquelle geschah zunächst durch absorbirende Gläser, die zwischen Lichtquelle und Scheibe eingeschaltet wurden. Um nun das Licht auf die Scheibe zu werfen, und um in möglichst bequemer Stellung beobachten zu können, was

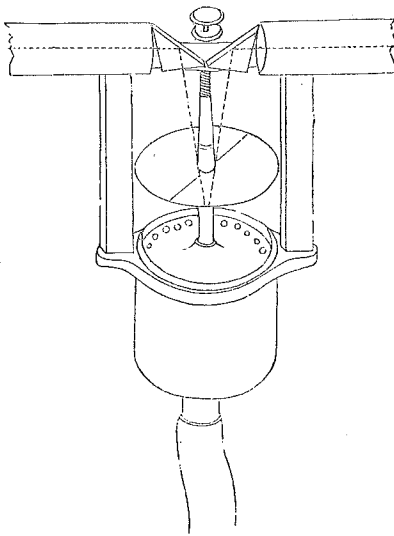


Fig. 2.

sich als wesentlich erwies,²⁾ wurden sowol die einfallenden, als die austretenden Strahlen

horizontal erhalten durch 2 Reflexionsprismen, welche am obern Rahmen der Sirene mit Wachs befestigt waren. (Vgl. Fig. 2.) Das der Lichtseite zugewendete Prisma entwarf dann auf der Scheibe einen vier-eckigen Lichtfleck, der durch das andere Prisma beobachtet wurde. Damit die beleuchtete

¹⁾ Vgl. Zöllner: Grundzüge einer allgemeinen Photometrie des Himmels.

²⁾ Vgl. dazu Bohn, Pogg. Ann. Ergänzungsband VI Stück 3.

und die beobachtete Stelle einander entsprechen, war nöthig, dass die Hypothenusenflächen der Prismen einen wenig stumpfen Winkel mit einander bildeten, dessen Grösse durch Probiren ermittelt wurde. Die Lichtstrahlen gingen nun von der Lichtquelle durch das Absorptionsglas und eine Röhre auf das erste Prisma, durch dieses auf die Scheibe, von da durch das zweite Prisma durch eine innen geschwärzte Röhre in's Auge. (Vgl. Fig. 2.)

Die benutzten absorbirenden Gläser setzten nach Bestimmungen mit dem Zöllner'schen Photometer, die Lichtstärke der Lichtquelle herab auf folgende Werthe:

No. 11,	1,	4,	8,	5,	9,	3,	2.
0,601	0,438,	0,377	0,333,	0,276,	0,201,	0,149,	0,132

Die Genauigkeit dieser Werthe wird dadurch beeinträchtigt, dass die Gläser sämmtlich ein wenig gefärbt waren, hauptsächlich blau oder grün, was der Schärfe der Vergleichung Eintrag that. Es zeigte sich bei der Bestimmung eine gewisse Unsicherheit, indem die vier Stellungen der Nicols, bei welchen die verglichenen Lichtpunkte gleich hell erschienen, bis auf 1° von einander abwichen. Es wurde daher immer aus diesen 4 Beobachtungen das Mittel genommen.

Um diese Unsicherheiten und die dadurch bedingten der Resultate zu controlliren, wurde die Variation der Beleuchtung noch auf eine andere, sicherere Methode bewerkstelligt, indem nämlich in den Gang der Lichtstrahlen statt der absorbirenden Gläser zwei gekreuzte Nicols eingeschaltet wurden. Sie konnten nun freilich nicht zwischen Lichtquelle und Scheibe gbracht werden, weil die Lichtstärke allzusehr herabgesetzt worden wäre, durch die Länge der Röhre, in welcher die Nicols steckten und

durch mehrere Diaphragmen in diesen Röhren; es liegt aber kein Grund vor, anzunehmen, dass der Effect auf die Netzhaut ein anderer werde, wenn die Helligkeit unmittelbar vor dem Auge modificirt wird.

Die Beleuchtung der Scheibe wurde daher constant gelassen, und zwischen das zweite Prisma und das Auge die beiden Nicols aufgestellt. Die auf das Auge wirkenden Helligkeiten verhielten sich dann wie die Quadrate der Sinus der Winkel, um welche die Polarisations Ebenen gegen einander gedreht waren.

Es war dabei bloss die Vorsicht zu nehmen, dass der dem Prisma näher gelegene Nicol zum feststehenden genommen wurde, weil das auf denselben fallende Licht als durch die totale Reflexion in den Prismen elliptisch polarisirt anzusehen war, und daher beim Drehen des zweiten Nicols wechselnde Lichtmengen auf den ersten gefallen wären, sodass dann das Absorptionsgesetz nicht mehr gültig gewesen wäre.

Die Stellung der Nicols zu einander wurde so gewählt, dass die in's Auge gelangenden Lichtintensitäten eine arithmetische Reihe bildeten, von 1 – 0,1: von da ab wurde noch beobachtet für 0,08, 0,05; 0, 0,03; 0,01. Die zu diesen Zahlen gehörenden Winkel der Polarisations Ebenen zu einander sind die Bogen der Sinusquadrate der betreffenden Zahlen.

Die rotirende Scheibe war eine kleine weisse Pappscheibe, deren eine Hälfte mit schwarzem Sammt bedeckt war. Wenn die mit der Sirene erreichbaren Rotationsgeschwindigkeiten nicht mehr ausreichten, so wurden wohl auch Scheiben mit 4 Sektoren angewandt, wodurch für dieselbe Rotationsgeschwindigkeit die Anzahl der Intermittenzen verdoppelt wurde.

Nach dem Vorgange von Fick¹⁾ werden in letzter Zeit für derartige Versuche keine schwarzen Sektoren mehr angewandt, weil kein vollständiges Schwarz herstellbar ist; man lässt statt dessen weisse Sektoren vor einem dunkeln Kasten rotiren. Bei unseren Versuchen war aber bloss bei den stärksten Beleuchtungen (wie sie in den Versuchen nie angewandt wurden, z. B. directes Sonnenlicht) das vom Sammt reflectirte Licht dadurch bemerkbar, dass sich der Rand des Diaphragma in der Beobachtungsröhre unterscheiden liess; für geringere Beleuchtungsstärken fiel es unter die Reizschwelle.

Ich dehnte die Versuche auch auf monochromatisches Licht aus und suchte zu dem Zweck farbige Scheiben anzuwenden; die Farben waren aber sämmtlich spectroscopisch sehr unrein und ein wenig glänzend; ferner musste bei jedem Wechsel der Farbe die rotirende Scheibe der Sirene herausgenommen werden. Es erschien daher vortheilhafter, das Licht durch ein gefärbtes Glas gehen und auf die weisse Scheibe fallen zu lassen; dadurch wurde eine gleichmässige Färbung erreicht und der Apparat musste nicht verändert werden; die Gläser lieferten freilich auch keine ganz reine Spectralfarbe.

Schliesslich handelte es sich noch darum, die, in verschiedenen Versuchsreihen für weiss oder eine bestimmte Farbe benutzten Beleuchtungsintensitäten in gemeinsamem Maass auszudrücken. Unsere Einrichtung erlaubte bloss, innerhalb einer und derselben Versuchsreihe Bruchtheile der Leuchtkraft anzugeben, welche der eben benutzten Lichtquelle zukam. Die Vergleichung der, bei verschiedenen Versuchsreihen angewandten Lichtquellen ergibt

¹⁾ l. c.

sich aber aus den Versuchsergebnissen selber. Da wir nämlich wissen, dass für das Zustandekommen einer homogenen Mischfarbe einer bestimmten Beleuchtungsstärke eine bestimmte Geschwindigkeit der Aufeinanderfolge der intermittirenden Reize entspricht, so können wir umgekehrt sagen, dass, wenn bei gleichem Zustand des Auges in zwei zeitlich getrennten Versuchen letztere Zeiten gleich sind, auch die zugehörigen Beleuchtungen dieselben sind. Finden wir daher in zwei Versuchsreihen für die gleichen Unterbrechungszeiten verschiedene Helligkeiten angegeben, so wird dies daher kommen, dass jene Helligkeiten in verschiedenem Maassstabe angegeben sind. (Die Einheiten unserer verschiedenen Scalen sind die jedesmaligen Lichtstärken der Lampen.) Multipliziert man alle Zahlen der Intensitäten, die für eine Versuchsreihe angegeben sind, mit dem Verhältniss dieser Maassstäbe, so müssten alle Zahlen gleich werden. Wurde nun die Lichtstärke irgend einer Versuchsreihe zur Einheit genommen, so wurde die Verhältnisszahl irgend einer andern gefunden, aus dem Mittel aller Verhältnisse, welche sich für die Intensitäten bei verschiedenen gleichen Zeiten ergaben. In einigen Versuchen wurde auch die Lichtquelle so regulirt, dass für einen bestimmten Ton bei bestimmter Absorption des vollen Lichts kein Flimmern zu bemerken war; dann war die Lichtstärke gleich der in anderen Versuchen, für welche dasselbe stattgefunden hatte.

Beobachtung.

V.

Die Beobachtungen wurden immer mit dem gleichen Auge angestellt, weil zu erwarten war, dass individuelle

Verschiedenheiten der Augen sich in den Beobachtungen geltend machen würden.

Die Vergleichbarkeit verschiedener Beobachtungen konnte aber für dasselbe Auge beeinflusst werden durch Ermüdung des Auges. Die Art dieses Einflusses lässt sich angeben, wenn man mit Helmholtz annimmt, »dass die Ermüdung der Sehnervensubstanz die Empfindung neu einfallenden Lichts ungefähr in dem Verhältniss beeinträchtigt, als wäre die objective Intensität dieses Lichtes um einen bestimmten Bruchtheil ihrer Grösse verändert.«

Diese Vermuthung ist seither bestätigt worden durch F. K. Müller¹⁾ indem er fand, »dass die grössere oder geringere Beleuchtungsintensität auf den Ermüdungsverlauf in der retina insoweit keinen Einfluss hat, als das relative Maass der Ermüdung dasselbe bleibt.«

Zur Prüfung dieses Satzes stellte ich zwei besondere Versuchsreihen an; eine mit möglichst ausgeruhtem und eine mit stark ermüdetem Auge. Die erstere wurde angestellt, nachdem das Versuchsauge zwei Stunden lang geschlossen gehalten war. Der Effect dieser Ruhe war ein bedeutender; als ich das Auge einen Moment öffnete, erschienen die Gegenstände im Contrast mit der Empfindung des andern Auges wie von der Sonne beleuchtet, während es schon stark dämmerte.

Für die andere Versuchsreihe wurde die Ermüdung dadurch bewirkt, dass bei hellerleuchtetem Zimmer beobachtet und vor jeder Beobachtung das Auge noch besonders durch maximales Flimmern²⁾ abgestumpft wurde. —

¹⁾ Versuche üb. den Verlauf d. Netzhautermüdung. Diss. Zürich.

²⁾ Vgl. Brücke: Ueber den Nutzeffect intermittirender Netzhautreizung. Wiener Sitzsber. 1863.

Die Resultate waren derart, dass die Werthe der zweiten Versuchsreihe durch Multiplikation mit einem constanten Factor denen der ersten nahe gleich wurden. Constante Unterschiede des Ermüdungszustandes des Auges in verschiedenen, zeitlich getrennten Versuchsreihen verhalten sich demnach wie Unterschiede der Lichtquellen und sind die daher rührenden Verschiedenheiten der Resultate nach derselben Methode zu vergleichen, wie jene. Wenn also zwei Curven, welche die Beobachtungsergebnisse darstellen, parallel verlaufen, so wird die parallele Verschiebung zum Theil auf Rechnung verschiedener Beleuchtungsstärken, zum Theil verschiedener Erregbarkeiten der retina kommen und können beide Abweichungen summarisch ausgeglichen werden nach der angegebenen Methode.

Da der allgemeine Ermüdungszustand sonach an- und für sich gleichgültig war, so wurde nicht weiter darauf geachtet; bloss erschien es vortheilhaft, bei einem mittleren Ermüdungszustand zu beobachten, weil nach den Resultaten von G. K. Müller¹⁾ sich ergeben hatte, dass die Ermüdungscurve um so steiler abfällt, je geringer die Ermüdung ist. Bei Beobachtungen mit ausgeruhtem Auge wird daher die einzelne Beobachtung schon hinreichen, den allgemeinen Ermüdungszustand bedeutend zu ändern und die Folge wird sein, dass die Erregbarkeit des Auges während einer ganzen Versuchsreihe allmählig abnimmt; auf das ermüdete Auge wird dieser Einfluss ein geringerer sein.

Um solche Aenderungen innerhalb einer Versuchsreihe, welche nicht zu controlliren sind, möglichst zu vermeiden, wartete ich zwischen den Beobachtungen einer

¹⁾ l. c.

Reihe immer so lange, bis bei geschlossenem Auge kein Nachbild mehr zu erkennen war. Das Versuchsauge wurde auch immer erst zur Beobachtung verwendet, wenn der entscheidende Moment nahe schien, während zu groben, vorläufigen Beobachtungen das andere Auge benutzt wurde.

Die Versuchsreihen wurden aus denselben Gründen später immer mit den schwachen Beleuchtungen angefangen.

VI.

Es wurde ferner Sorge getragen, die Beobachtungen immer mit derselben, und zwar einer eng begrenzten centralen Netzhautstelle zu machen. Vorläufige Beobachtungen hatten gezeigt, dass das Flimmern unter übrigens gleichen Umständen nicht bei derselben Rotationsgeschwindigkeit verschwand, wenn ein kleines Stück einer rotirenden Scheibe beobachtet würde, wie bei Beobachtung einer grossen Fläche. Es mag dies zum Theil daher kommen, dass bei Betrachtung einer ausgedehnten Fläche die Blickrichtung schwer zu fixiren ist; nun hat aber Aenderung des Blicks im Sinne der Drehung der Scheibe zur Folge, dass man momentan wieder Flimmern sieht, oder gar einzelne Sektoren deutlich aufblitzen, während sonst der Eindruck der einer homogenen Mischfarbe war.

Dann ist aber auch anzunehmen, dass die verschiedenen Netzhautpartien ungleich reagiren auf intermittirende Reize; bei einzelnen Versuchen drängte sich die Beobachtung auf, dass im indirecten Sehen noch Flimmern wahrnehmbar war, wenn im directen Sehen mit Sicherheit nicht mehr.

Zur Vermeidung dieser Fehlerquellen beobachtete ich durch ein rundes Diaphragma von 7^{mm} Durchmesser, wel-

ches am Ende der Beobachtungsröhre angebracht, und weit genug war, um keine Beugungserscheinungen zu veranlassen.

Die Eigenthümlichkeiten des indirecten Sehens zeigten sich am besten bei schwachen Beleuchtungen und zwar hauptsächlich mit blauem oder violetterm Licht, für welche indirect gesehen, das Flimmern noch lange sehr deutlich blieb, wenn es im directen Sehen schon längst verschwunden war. Diese Beobachtung wurde von B. Luchsinger bestätigt.

Um die Verschiedenheit der Beobachtungen für die verschiedenen Netzhautpartien zu vergleichen, stellte ich zwei Versuchsreihen im indirecten Sehen an, indem ich eine punktförmige Oeffnung in der Beobachtungsröhre fixirte, welche ein wenig Licht durchliess. Die graphische Darstellung der Resultate ist in der That beträchtlich verschieden von denen für directes Sehen. (Vgl. Fig. 7.)

Es liegen mehrere Beobachtungen über analoge Eigenthümlichkeiten der Perception peripherer Netzhautpartien vor¹⁾; bekannt ist z. B. die Thatsache, dass schwach beleuchtete Gegenstände, wie schwachleuchtende Fixsterne, im indirecten Sehen bemerkt werden, während im directen nicht.

Der Grund dieser Erscheinung könnte darin gesucht werden, dass die centralen Netzhautstellen in Folge stärkerer Bestrahlung (der auf die Pupille fallende Strahlenconus, der die indirecten Bilder hervorruft, umfasst einen kleinern Raumwinkel) und fortwährenden Gebrauch bestän-

¹⁾ Zöllner, Grundzüge einer allgemeinen Photometrie des Himmels. p. 2; S. Exner, Bemerkungen über intermittirende Netzhautreizung, Pflügers Arch. 1870 p. 235.

dig stärker ermüdet, daher weniger erregbar sind, als die peripheren, dass daher ihre Reizschwelle höher liegt; dafür spricht, dass die erwähnte Beobachtung gewöhnlich dann zufällig gemacht wird, nachdem man im directen Sehen recht angestrengt nach einem Gegenstand gesucht hat. Es ist aber auch möglich, dass es sich um specifische Verschiedenheiten der verschiedenen Netzhautpartien handelt, und dafür sprechen unsere Beobachtungsergebnisse, deren graphische Darstellung in der Form wesentlich verschieden ist von derjenigen für directes Sehen (Fig. 7.) Auf die Entscheidung der weiteren Frage, ob diese Eigenthümlichkeiten des indirecten Sehens bei intermittirender Reizung auf Abweichungen der Unterschiedsempfindlichkeit beruhen, oder auf verschiedenem Verlauf der Empfindungscurven und auf dem Zusammenhang der Erscheinungen für intermittirendes Licht, mit denen bei constantem Reiz, konnte nicht eingetreten werden, weil diese Streitfragen nur durch ausgedehnte Versuche zu entscheiden sind.¹⁾

VII.

Die Genauigkeit, mit welcher der Moment des Verschwindens der Flimmererscheinung angegeben werden konnte, erschien nach einiger Uebung befriedigend, besonders bei starken Beleuchtungen und unter Anwendung des

¹⁾ Vgl. Rupp: Ueber die Dauer der Nachempfindung an den seitlichen Theilen der Netzhaut. Exner, Pflügers Archiv III 1. c. Aubert, Physiologie der Netzhaut. p. 379.

Die Ergebnisse unserer Versuche würden für die stärkern Helligkeiten mit den Angaben von Rupp, für die schwächeren mit denen von Exner übereinstimmen. Vgl. dazu auch die neuesten Arbeiten von Rähmann, Gräffe, Arch. 1874.

Gebläses als Motor, wo es möglich war, den Ton beliebig langsam zu ändern. Ich merkte mir immer erst einen Ton, bei welchem mit Sicherheit gesagt werden konnte, dass kein Flimmern mehr zu sehen war, dann einen, bei welchem es noch ganz deutlich war, und näherte mich von diesen Grenzen, welche nie über einen halben Ton auseinander lagen, dem gesuchten Ton, bei welchem es eben verschwand. Dabei zeigte sich, dass das Wiedererscheinen des Flimmerns immer bei ein wenig tieferen Tönen wahrnehmbar wurde, wenn der Ton sank, als das Verschwinden, wenn er stieg. Diese Erscheinung zeigt sich überall bei psychophysischen Bestimmungen¹⁾.

Es wurden für einen bestimmten Helligkeitsgrad immer mehrere Bestimmungen gemacht und aus diesen das arithmetische Mittel genommen. Zur Veranschaulichung der Abweichungen unter den einzelnen Beobachtungen gebe ich einige Versuchsreihen, wie sie während des Versuchs aufgeschrieben wurden. Die Brüche bedeuten Bruchtheile von halben Tönen, die Helligkeiten sind durch die Nummern der eingeschobenen Gläser angedeutet.

No. des Glases	Ton
0	gis"; gis" ^{-1/8} ; gis" ^{-1/8} ; gis"; gis" ^{-1/8} .
1	g" ^{-1/8} ; fis" ^{-1/8} ; fis" ^{-1/2} ; fis"; fis"; fis".
4	f"; f"; f" ^{1/2} ; f" ^{1/8} ; f"; f"; f".
5	e"; e" ^{1/4} ; e" ^{1/8} ; e" ^{1/8} .
9	e" ^{-1/2} ; e"; e" ^{-1/8} ; e" ^{-1/8} ; e" ^{-1/2} ; e"; e" ^{-1/8} .
3	dis" ^{-1/8} ; dis" ^{-1/8} ; dis"; dis".
3+1	e" ^{-1/4} ; cis"; a".
3+2	b; b ^{1/4} ; b.

¹⁾ Vgl. Vierort, Zeitsinn.

Die Abweichungen der einzelnen Beobachtungen sind hierin jedenfalls so gering, dass der Sinn der Aenderung der Rotationsgeschwindigkeit kein zweifelhafter war.

Später wurden die Beobachtungen vollständiger und in umgekehrter Reihenfolge gemacht.

No:	Ton
3+5	h'.
3+2	gis'- ¹ / ₄ ; gis'+ ¹ / ₄ ; gis'- ¹ / ₄ ; gis'- ¹ / ₄ ; gis'.
3+2+5	e; e; e; dis; e.
3+1	c''+ ¹ / ₂ ; c''+ ¹ / ₂ ; c''; c''; c.
3	dis''; dis''; dis'' ¹ / ₄ .
2	d'' ¹ / ₂ ; d ¹ / ₄ ''; d ¹ / ₄ ''; dis''; d ¹ / ₂ ; d ¹ / ₄ .
9	f''; f' ⁻¹ / ₄ ; f'' ⁻¹ / ₄ ; e'' ¹ / ₂ .
5	f''; f'' ¹ / ₄ ; f'' ¹ / ₂ ; f''; f'' ¹ / ₂ .
8	f'' ¹ / ₂ ; f'' ¹ / ₄ ; f'' ¹ / ₂ ; f'' ³ / ₄ ; f'' ¹ / ₄ .
4	fis''; fis''; fis''; fis'' ¹ / ₄ ; fis'' ¹ / ₄ ; fis'' ¹ / ₄ .
1	fis'' ¹ / ₂ ; g''; fis'' ¹ / ₂ .
—	gis'' ¹ / ₂ ; gis'' ³ / ₄ ; gis'' ³ / ₄ .

Bei Anwendung der polarisirenden Nicols wurden weniger Bestimmungen gemacht; die Helligkeiten waren unmittelbar gegeben als Bruchtheile derjenigen, bei parallelen Polarisatious Ebenen; sie waren ziemlich geringer, als in den früheren Versuchen mit den Absorptionsgläsern.

Ich gebe auch hievon eine Reihe.

Intensität	Ton	Intensität	Ton
0,01	f'; f'; e'; dis' ¹ / ₂ ; f'; f'.	0,3	dis'' ¹ / ₂ ; e''.
0,05	a'; gis' ¹ / ₂ ;	0,6	f'' ¹ / ₄ ; f'' ¹ / ₈ .
0,1	h' ¹ / ₂ ; h' ¹ / ₂ .	0,8	fis'' ³ / ₄ ; fis''.
0,2	d''; d''.	1	fis'' ¹ / ₄ ; fis'' ¹ / ₄ .

Für andere Beobachter, welche ich der Controlle wegen ein paar Versuchsreihen machen liess, ergaben sich in der ersten Sitzung grössere Abweichungen unter den einzelnen Beobachtungen sowohl, als im Vergleich mit denjenigen, welche ich erhalten. Das zweite Mal zeigte sich ziemliche Uebereinstimmung. Um die Beobachtungen nicht durch den gehörten Ton beeinflussen zu lassen, wurde der Ton nach jeder Beobachtung vollständig sistirt. Ich liess den Ton langsam steigen, die Beobachter gaben ein Zeichen, wenn ihnen die Scheibe ein homogenes Grau zu zeigen schien, worauf ich den Ton bestimmte.

Ihre Angaben waren folgende:

Intensität	Luchsinger	Dr. Zürcher
	T o n	
0,01	h; d'; d'; dis'.	dis'; dis'; dis ^{1/4} '.
0,05	fis ^{1/4} ; g ^{3/4} ; g ^{1/4} ; g ^{1/4} .	f'; e'; f'; f'.
0,1	h'; h ^{-1/4} ; h ^{+1/4} .	g'; g ^{7/8} ; g ^{1/2} ; g ^{7/8} .
0,2	cis ^{11/2} ; cis ^{11/4} ; cis ^{11/4} .	b'; h ^{1/2} ; h'; h ^{7/8} .
0,3	d ^{113/4} ; cis ^{7/8} ; d ^{11/4} ; d ^{11/4} ; d ¹¹ .	c ^{11/2} ; c ¹¹ ; c ^{11/8} .
0,4	dis ^{3/4} ; e ¹¹ ; e ¹¹ .	c ^{113/4} ; c ^{117/8} ; cis ¹¹ ; cis ^{11/8} .
0,5	e ^{11/4} ; e ^{11/2} ; e ^{113/4} ; d ^{11/2} .	d ¹¹ ; d ^{11/8} ; cis ^{11/2} ; d ¹¹ .
0,6	f ¹¹ ; e ^{11/8} ; dis ¹¹ ; dis ¹¹ .	
0,7	f ^{11/2} ; f ^{11/2} ; f ¹¹ ; f ^{11/8} .	dis ^{11/8} ; dis ^{110/8} ; dis ^{11/8} .
1	f ^{11/2} ; f ^{113/4} ; f ^{113/4} .	dis ^{11/2} ; dis ^{11/2} ; dis ^{117/8} ; dis ^{11/2} .

Von den Farben zeigte sich besonders grün günstig zur Beobachtung; die Bestimmung des gesuchten Moments konnte mit gleicher Genauigkeit gemacht werden, wie mit weiss.

Anders verhielt sich's mit blau; um im directen Sehen einige Zahlen zu erhalten, erwartete ich bei fallendem

Ton den Moment, bei welchem sich das Flimmern plötzlich deutlich zeigte.

Für Violettt verschmolzen die direct gesehenen Eindrücke so leicht, die indirect wahrgenommenen so wenig und unsicher, dass es wegen dieses starken Contrastes beider Beobachtungen aufgegeben werden musste, bestimmte Zahlen zu eruiren. Für blau und violett konnte auch die angegebene Bestimmung der Helligkeiten nicht mehr gelten, weil die absorbirenden Gläser blau enthielten.

Resultate.

VIII.

Aus dem oben angegebenen Grunde wurden nach dem Vorgange von Helmholtz als Bedingung des Verschwindens der Flimmererscheinung nicht die Zeiten angegeben, die sich für den Durchgang eines schwarzen Sectors als nöthig ergaben, sondern die Zeiten für den Durchgang eines schwarzen und eines weissen Sectors zusammen.

Um diese Zeit aus der beobachteten Tonhöhe zu berechnen, war die Schwingungsdauer der Töne mit 20 zu multiplizieren, da die Scheibe der Sirene 20 Löcher hatte.

Für die graphische Darstellung wurden die für die Zeiten gegebenen Zahlen mit 1000, die der Beleuchtungsintensitäten mit 100 multiplicirt,

Die Maassstäbe der Helligkeiten wurden nach der angegebenen Weise auf diejenigen einer bestimmten Versuchsreihe bezogen. Die Factoren, durch welche diese Reduction geschah, sind oberhalb der zu reducirenden Columnen angegeben.

Für die mit absorbirenden Gläsern angestellten Beobachtungen ergaben sich für weiss folgende Zahlen:

Intensität	Z e i t e n				
	0,45. No. 9	10	11	12	1,5. 14
1	0,0240	0,0240	0,0232	0,0240	0,0247
0,438	0,0270	0,0255	0,0256	0,0262	0,0255
0,377	0,0373	0,0266	0,0263	0,0266	0,0262
0,333			0,0277		0,0280
0,276	0,030	0,0282	0,0282	0,0287	0,0287
0,201	0,0309	0,0300	0,0290	0,0303	0,0294
0,149	0,0341	0,0309	0,0320	0,0309	
0,132	0,0363		0,0333		
0,065		0,0374	0,0378	0,0350	
0,041	0,0476	0,0405	0,0405	0,0405	0,0331
0,019	0,0540	0,0429	0,0476	0,0455	0,0379
0,004	0,0685		0,0685	0,0606	0,0560

Die Darstellung dieser Zahlen durch Curven, in denen die Beleuchtungsintensitäten zu Abscissen, die Zeiten zu Ordinaten genommen sind, (vgl. Fig. 3), wo die 0-Ordinaten der einzelnen Curven gegen einander um 10 Einheiten verschoben sind. Um die Uebereinstimmung der Curven nach ihrer Reduction auf gleiche Lichtquelle und Ermüdungszustand des Auges zu veranschaulichen, sind alle 4 Curven, ohne Angabe ihrer Bestimmungspuncte aufeinandergelegt, Fig. 4.

Mit dem Polarisationsapparat ergaben sich für ausgeruhtes und stark ermüdetes Auge folgende Zahlen:

Intensität	Z e i t	
	Ausgeruht	Ermüdet
1	0,0266	0,0308
0,8	0,0276	
0,7		0,0323
0,6	0,0284	
0,5		0,0353
0,4	0,0298	
0,3	0,0340	0,0377
0,2	0,0341	0,0395
0,15		0,0429
0,1	0,0393	0,0455
0,05	0,0460	0,0511
0,03		0,0373
0,01	0,0616	0,0706

Diese Zahlen werden dargestellt durch die Curven Fig. 5. Die zweite derselben liegt höher, als die erste, geht ihr aber annähernd parallel. Nach dem oben Gesagten sind aber die Abscissen dieser zweiten Curve in dem Verhältniss zu gross genommen, als die Erregbarkeiten kleiner waren, als die für die erste Curve.

Um dies Verhältniss zu ermitteln, wurden die Reizstärken, welche zu den Intermittenzzeiten 350, 400, 450 gehörten, einander gleichgesetzt, sie sind aber ausgedrückt durch die Zahlen:

erstere	17,5	;	9,5	;	6,5
letztere	45	;	20	;	11

Verhältniss: 2,5 ; 2,1 ; 2,0

Mittleres Verhältniss: 2,2.

Dass das Verhältniss kein constantes ist, sondern stetig abnimmt, ist ein Beleg für die oben ausgesprochene Ansicht, dass nach den Ergebnissen von F. K. Müller die, durch die Versuche selber bedingte Ermüdung des Auges sich mehr geltend machen müsse für das ausgeruhte Auge, als für das ermüdete.

Multipliziert man die Intensitäten der zweiten Curve mit diesem mittleren Verhältniss und construirt die Curve wieder für diese neuen Abscissen, so zeigt sich ziemlich gute Uebereinstimmung. Vgl. Fig. 5.

Um schliesslich noch die so erhaltenen Curven mit den früher gefundenen zu vergleichen, bei welchen die Lichtquelle eine andere gewesen war, setzte ich die Intensitäten bei den Zeiten 40; 35; 30, gleich, was folgende Verhältnisse der Intensitätsmaassstärke ergab:

$$2, 2 \text{ — } 2, 2, 2.$$

$$\text{Mittel: } 2, 1.$$

Der Grad der Uebereinstimmung lässt sich ersehen aus Fig. 6.

Die Abweichungen unter den verschiedenen Beobachtungsreihen sind nicht so gross, um Zweifel zu erregen, dass es sich wirklich um ein bestimmtes Gesetz der Abhängigkeit der Zeiten von den Lichtstärken handle. Ungleich schnelle Ermüdung innerhalb der Versuchsreihen, wechselnde Beleuchtung, gemüthliche Disposition, geben genügende Gründe für die noch bestehenden Abweichungen der, zu verschiedenen Zeiten, unter verschiedenen Umständen entstandenen Beobachtungen.

Die Angaben der zugezogenen Beobachter werden durch folgende Zahlen dargestellt:

Intensität	Z e i t e n	
	Luchsinger	Dr. Zürcher
0,01	0,0708	0,0639
0,05	0,0507	0,0582
0,1	0,0449	0,0497
0,2	0,0355	0,0449
0,3	0,0339	0,0377
0,4	0,0305	0,0367
0,5	0,0298	0,0344
0,6	0,0289	
0,7		0,0319
0,8	0,0284	
0,8	0,0274	1,0311

Die diese Zahlen ausdrückenden Curven (Vgl. Fig. 7) verlaufen, besonders die letztere, flacher als die, welche ich aus meinen Beobachtungen erhalten. Dieser Charakter war aber in zwei früheren Beobachtungsreihen noch ausgesprochener; die Form dieser Curven nähert sich derjenigen, welche ich für fortgesetzte willkürliche Ermüdung der retina erhalten hatte, woraus zu schliessen ist, dass sich die Beobachter durch unausgesetzte Anstrengung der Augen zu sehr ermüdet hatten, dass sich somit zur Aenderung der Helligkeiten eine, einer Helligkeitsverminderung äquivalente progressive Netzhautermüdung addirte. Es ist anzunehmen, dass bei noch grösserer Vorsicht und Uebung bei der Beobachtung, ihre Resultate sich wahrscheinlich noch mehr den meinigen würden genähert haben, und dass unsere Curven eine allgemeine, durch die physiologische Constitution der Netzhaut bedingte Bedeutung haben.

IX.

Wesentlich verschieden von den bishergenannten Beobachtungen zeigten sich diejenigen für indirectes Sehen.

Die einzelnen Beobachtungen lassen sich freilich schlecht in eine Curve einreihen: es wäre jedenfalls grössere Uebung nöthig, um im indirecten Sehen mit derselben Sicherheit zu beobachten, wie im directen; aber der allgemeine Character des Curvenverlaufs lässt sich doch erkennen.

Die Netzhautstelle, mit welcher die erstgenannte Beobachtungsreihe gemacht wurde, was die stärker excentrische.

Intensität	Z e i t	
1	0,0440	0,0409
0,8		0,0482
0,7	0,0421	
0,6		0,0573
0,5	0,0573	
0,4	0,0643	0,0607
0,3	0,0690	0,0652
0,2	0,0726	0,0682
0,1	0,0765	0,0729
0,05	0,0800	0,0809

Aus der graphischen Darstellung dieser Beobachtungsergebnisse (vgl. Fig. 8) scheint hervorzugehen, dass diese Curven sich denen für directes Sehen bei schwachen Helligkeiten nähern und sie wahrscheinlich bei Weiterführung schneiden würden. Dadurch würde die Erfahrung

ausgedrückt, dass peripherische Netzhautpartien für schwache Beleuchtungen sich in gewissen Beziehungen empfindlicher zeigen, als die centralen.

X.

Für die Farben, mit welchen ich Beobachtungen anstellte, waren, bei Anwendung derselben Lichtquellen und der absorbirenden Gläser, wie früher, die Ergebnisse folgende:

Inten- sität	Z e i t						
	gelb	roth		blau		grün	
1	0,0278	0,0331	0,0287	0,0494	0,0595	0,0364	0,0370
0,601	0,0300		0,0309	0,0517		0,0208	0,0409
0,438	0,0315	0,9356	0,0331	0,0541	0,0599	0,0432	0,0421
0,377	0,0329	0,0377		0,0575	0,0616	0,0477	0,0438
0,333		0,0400					
0,276		0,0417	0,0350	0,0625		0,0500	0,0480
0,201	0,0350	0,0441	0,0360	0,0682	0,0686	0,0540	0,0534
0,149	0,0376	0,0510	0,0429	0,0725	0,0763	0,0575	0,0588
0,132	0,0405	0,0606					
0,065				0,0764	0,0764		
0,052	0,0438			0,0758	0,0832		0,0686
0,041		0,0716	0,0524		0,0850	0,0685	
0,019	0,0556		0,0620	0,0834		0,0833	
0,004	0,0626	0,102		0,0920			0,0817

Die absolute Grösse der Zeiten, welche zu gleich bezeichneten Lichtstärken gehören, ist hier sehr verschieden.

Die Reihenfolge der Farben stimmt mit der von Pla-

teau und Emsmann¹⁾ gegebenen überein; dagegen sind die Verschiedenheiten viel grössere, als die von jenen gegebenen.

Die absolute Grösse der Zahlen für die Intermissionszeiten ist bei früheren Beobachtern fast durchweg grösser, als wie wir sie bei den stärksten Beleuchtungen gefunden. Helmholtz fand für weiss $\frac{1}{24}$ Sec., für starkes Lampenlicht Lissajous $\frac{1}{30}$ sec; Brücke²⁾ erwähnt, dass der Maximal-Effect des Flimmerns bei circa $17\frac{1}{2}$ maligem Wechsel der Sektoren in 1 Sec. erreicht werde, während die homogene Mischfarbe bei der doppelten Anzahl erscheine. Diese Angabe liegt der unsrigen ziemlich nahe. Diese Zahlen sind natürlich nicht vergleichbar, weil Lichtstärken und Versuchsanordnung unbekannt oder nicht angebar sind.

Schlüsse.

Um die Abhängigkeit unsrer Intermissionszeiten von den Beleuchtungsstärken analytisch auszudrücken, verglich ich die, durch Versuche gefundenen Curven mit solchen von bekannter Gleichung; am meisten Aehnlichkeit schien sie mit der gleichseitigen Hyperbel zu haben; ich probirte daher die Gleichung

$$y = \frac{a}{x + b} + c.$$

c ist der Ordinatenwerth, für welchen die Curve parallel zur x Axe wird und in unserem Beispiel = 260; für b wurde als wahrscheinlichster Werth 0,05 genommen,

¹⁾ l. c.

²⁾ l. c.

und für α wurde aus derjenigen Curve, auf deren Bestimmungspuncte die meiste Sorgfalt verwendet worden war, der Mittelwerth genommen aus den einzelnen Werthen, welche der Gleichung genügten. Es ergaben sich für α folgende Werthe:

0,63; 1,86; 1,56; 1,71; 1,86; 2,02; 1,99; 2,0; 2,13

Mittel: 1,74.

Die aus diesen Elementen construirte Curve ist dargestellt und zur Vergleichung zusammengehalten mit der experimentell gefundenen auf Fig. 10.

Um nun aus der gefundenen Abhängigkeit der Intermittenzzeiten von den Belenchtungsstärken einen Schluss zu ziehen auf die Grösse des Minimums der Empfindungsdifferenz, welche noch zum Bewusstsein kommt, müssten wir die Form der Curven des An- und Abklingens der Netzhautempfindungen kennen für verschiedene Reizstärken; wir kennen sie aber bloss für eine nach den Versuchen von S. Exner; das Gesetz, nach welchem sich der Parameter der Curven für verschiedene Reizstärken ändert, ist nicht bekannt; wir können bloss sagen, dass, wenn die Stücke der an- und absteigenden Empfindungscurven, welche jene Empfindungsdifferenz bedingen, steiler verlaufen, die zugehörige Zeit kürzer wird, und dass sich diese beiden Aenderungen entgegenwirken, zu compendiren streben.

Genauer lässt sich die Abhängigkeit des Empfindungsunterschieds von diesen beiden Faktoren aus der Beobachtung von Helmholtz ersehen, dass die Sectorenbreite bei rotirenden Scheiben keinen Einfluss hat auf die Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe, für welche der Eindruck homogen wird.

Danach geschieht die graphische Darstellung des Em-

pfundungsverlaufs für verschiedenes Verhältniss der Sectorbreiten von $0 - \infty$ durch Dreiecke, welche gleiche Grundlinie (als gleiche Intermissionszeit) und an der Spitze einen gleichen Winkel haben. (Letzteres folgt aus der Congruenz der an- und absteigenden Empfindungscurve vgl. K. Exner, l. c.) Die Spitzen solcher Dreiecke liegen auf einem Kreis, womit die Höhe der Dreiecke, also unsere Empfindungsdifferenz veranschaulicht wird. Aendert sich also das Verhältniss der Sectorbreiten von $0 - \infty$ und damit die empfundene Lichtstärke von 0 bis zu der bei voller Beleuchtung ohne Unterbrechung, so nimmt der Empfindungsunterschied, welcher nicht mehr wahrnehmbar ist, zu, bis zum Verhältniss der Sektoren $\frac{1}{4}$ oder bis zur Erreichung der halben Maximalempfindung und nimmt von da ab wieder in gleicher Weise ab, wie er vorher stieg und ist gleich gross, für reciproke Verhältnisse. Je spitzer nun unsere Dreiecke, um so näher wird ihre Höhe constant bleiben; die ganze Argumentation hängt übrigens vom Talbot'schen Satz ab, der nach den Untersuchungen von A. Fick (l. c.) nicht streng gültig ist. Kennte man das Gesetz der Abhängigkeit der bewusstwerdenden Empfindungshöhe genau, so könnte man mit dessen Hülfe die Empfindungscurven für verschiedene Reizstärken construiren oder berechnen.

XII

Für die Versuche mit farbigem Licht ist interessant, dass die Reihenfolge, in welcher die, die Zeiten ausdrückenden Zahlen von gelb bis blau zunehmen, dieselbe ist, wie diejenige, in welcher die Purkinje'schen Nachbilder auftreten. Lässt man eine weisse, mit schwarzen Sektoren

bedeckte Scheibe langsam rotiren, so erscheinen die schwarzen Sektoren bei einer gewissen Rotationsgeschwindigkeit mit Farben überzogen, welche sich in der erwähnten Reihenfolge folgen. Plateau ermittelte die Zeit, welche für den Durchgang eines schwarzen Sectors nöthig war, damit eben kein Schwarz mehr sichtbar war, sondern die schwarzen Sektoren eben mit den betreffenden Sektoren überzogen waren; er fand, wenn er die weissen Sektoren mit farbigen ersetzt:

für gelb 0,35 Sec.
 » roth 0,34 »
 » blau 0,32 »

Die Reihenfolge ist hiebei die umgekehrte, d. h. die Dauer des positiven Nachbildes ist grösser bei gelb, als bei roth etc. Die Aufeinanderfolge der positiven Nachbilder bei weissem Licht wird so erklärt, dass die Intensität derselben für verschiedene Farben ungleich rasch abnimmt, dass sich daher die Nachbildcurven der in Weiss enthaltenen Farben an verschiedenen Stellen schneiden und eine um die andere höher liegt, als die übrigen. Dasselbe Moment, die Steilheit des An- und Absteigens bedingt nach unserer Anschauung die Intermissionszeit, für welche rasch aufeinanderfolgende Netzhautreize noch eben getrennt unterschieden werden.

Helmholtz bemerkt zu den, von Plateau für Farben gegebenen Zahlen, dass ihre Vergleichung keinen Werth habe, weil man kein Mittel besitze, die scheinbare Helligkeit der Farben zu vergleichen, während gerade sie von Einfluss ist. Dass wirklich die subjective Helligkeit die Verschiedenheit jener Zeiten bedingt, findet eine Stütze in den Angaben Plateau's über die Dauer der positiven Nachbilder jener Farben. Es erscheint auch a priori wahr-

scheinlich, dass die Nachdauer eines Gesichtseindrucks um so länger ist, je intensiver der Eindruck war, und dass die Steilheit des Verlaufs mit der Intensität zunimmt, folgt aus der Nachbildcurve von Exner und der Ermüdungscurve von F. K. Müller.

Man wird nun zur Frage gedrängt, ob der Verlauf der Curven des positiven Nachbilds bloss von der Intensität abhängt, oder ob den Empfindungselementen der verschiedenen Farben ein besonderes Gesetz zukommt.

Wäre das Letztere nicht der Fall, so müsste man die Beleuchtung rotirender Scheiben mit Farben so steigern können, dass die Curven der Rotationsgeschwindigkeiten, für welche ein homogener Eindruck zu Stande kommt, alle congruent werden, und man hätte darin ein Mittel, die subjectiven Helligkeiten zu vergleichen. Könnte man durch Steigerung der Helligkeit die Curven congruent machen, so würde daraus folgen, dass für dieselbe Empfindungshöhe die Empfindungscurven aller Farben congruent sind, und dass die Empfindungsdifferenzen, welche bewusst werden, für alle Farben dieselben sind.

Ich habe zur Prüfung dieser Frage die Steigerung der Beleuchtung durch directes Sonnenlicht zu erreichen gesucht; der Apparat eignet sich aber wenig zu Versuchen dieser Art, weil für starke Beleuchtungen kein Schwarz mehr erhalten wird und die Beobachtung nicht im Dunkeln angestellt werden konnte. doch schien mir, als würden die Curven für stärkere Beleuchtungen stärker gekrümmt, als wie die angegebenen es sind.

Die absolute Grösse unserer Zahlen lässt sich vergleichen mit denjenigen, welche für andere Sinne eine ähnliche Beziehung ausdrücken. Sie sind sämmtlich viel grösser, als die

von J. Bernstein¹⁾ für die Dauer einer, sich fortpflanzenden Reizwelle an einer bestimmten Stelle des motorischen Nerven für electriche Reize gegebene Zahl. Er fand, dass für intermittirende Reize die Anzahl der Reize unter 1600 in der Secunde fallen müsse, damit die Reize von einander getrennt empfunden werden können, weil bei dieser Anzahl die Reizwellen anfangen, sich zu decken; diese Forderung liess sich für Tast- und Hörnerven annähernd bestätigen. Für die Lichtempfindung genügt schon eine viel geringere Anzahl von Reizen in Folge des langsamen Verlaufs der Erregung. Als Ursache der Langsamkeit des Auges gegenüber andern Sinnesorganen kann die Umsetzung des Lichts in chemische Action angenommen werden.

Vergleichen wir unsere Intermissionszeiten mit den von S. Exner l. c. gefundenen Zeit, die nöthig ist, zur Wahrnehmung der vollen Intensität eines Reizes, so zeigen sie sich für starke Beleuchtungen 6mal kleiner, als jene, das Gleiche wird der Fall sein für Vergleichung mit der Dauer der Nachbildecurve. Damit ist nun aber unsere obige Behauptung erwiesen, dass die Dauer des Lichteindrucks im Auge nicht mit Hülfe rotirender Scheiben nach der eingeschlagenen Methode ermittelt werden kann.

Wir können von unseren gefundenen Zeiten noch eine Nutzenanwendung machen auf die Verwendbarkeit des Gesichtssinns als Zeitsinn. Vierordt²⁾ weist nach, dass der Gesichtssinn in dieser Beziehung hinter dem Tast- und Gehörsinn nachsteht. Unsere Zahlen zeigen nun, dass

¹⁾ Untersuchungen über den Erregungsvorgang im Nerven- und Muskelsystem.

²⁾ Der Zeitsinn: Organische Bedingungen der Zeitempfindungen. p. 171 u. f.

diess immer mehr der Fall sein wird, je weniger intensive Reize verwendet werden.

Nehmen wir an, dass von der »physiologischen« Zeit der grösste Theil auf Rechnung der Wahrnehmung einer Minimalempfindung kommt, (die Zeit der Fortpflanzung abgerechnet, die, wegen der Kürze der Leitung sehr klein sein wird und constant bleibt) und nehmen wir ferner an, dass die zur Wahrnehmung einer Empfindungsdifferenz von uns bestimmte nöthige Zeit ungefähr gleich der sein wird, die zu einer Minimal-Empfindung überhaupt nöthig ist, so können wir aus unsern Zahlen ersehen, wie die physiologische Zeit mit der Stärke des angewandten Reizes im allgemeinen sich wird ändern müssen. Die, Vierordt, Zeitsinn p. 172 für die physiologische Zeit erbrachten Zahlen liegen, wahrscheinlich für mittlere Reizstärke, zwischen 0,15 — 0,2. Für schwache Lichtreize und besonders für einzelne Farben, müssten sie nach unseren Curven grösser werden, vielleicht auf's Doppelte steigen.

Dieser Schluss wird durch die tägliche Erfahrung bestätigt. Bei gewöhnlichem Tageslicht werden wir uns der physiologischen Zeit gar nicht bewusst; wenn wir uns aber in grosser Dunkelheit bewegen, wo nach unsern Versuchen schon 10 Reize in der Secunde verschmelzen, so wird die Langsamkeit der Perception schon störend; wir müssen uns für jede Aenderung der Blickrichtung besonders und mit Anstrengung orientiren.

Die vorliegenden Versuche wurden im physikalischen Laboratorium des eidg. Polytechnikums ausgeführt.

Ich ergreife mit Freude die Gelegenheit, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. J. J. Müller hier öffentlich meinen tiefgefühlten Dank auszusprechen,

für die wohlwollende Theilnahme, mit der er meine Arbeit begleitete und für die freundlichen Rathschläge, durch die er sie förderte.

Astronomische Mittheilungen.

von

Dr. Rudolf Wolf.

XXXVI. Beobachtung der Sonnenflecken im Jahre 1873, sowie Berechnung der Relativzahlen und Variationen dieses Jahres; Vergleichung zwischen den 1870 bis 1873 in Christiania, München und Prag beobachteten Variationen mit den aus meinen neuen Formeln dafür folgenden Werthen; Untersuchung über die mittlere Ablaufszeit einer Sanduhr; Fortsetzung der Sonnenfleckenliteratur.

Die Häufigkeit der Sonnenflecken konnte von mir 1873 an 282 Tagen vollständig und mit dem seit Jahren dafür gebrauchten 2½ füssigen Pariser Fernrohr oder auf Excursionen mit einem annähernd equivalenten Münchner Fernrohr, — und noch an 10 Tagen bei bewölktem Himmel theilweise beobachtet werden; diese sämmtlichen Beobachtungen finden sich unter Nr. 313 der Literatur eingetragen und die den 282 vollständigen derselben, unter Anwendung des immer dafür zur Reduction auf meine früheren Zählungen am 4 füssigen Frauenhofer gebrauchten Factors 1,50 entnommenen Relativzahlen sind in die bestehende Tafel ohne weitere Bezeichnung aufgenommen worden. Zur Ergänzung dieser Beobachtungen lagen mir folgende anderweitige Reihen von Zählungen vor: 1^o. Eine von meinem Assistenten für Meteorologie, Herrn Robert Billwiller, am ebenerwähnten 4 Füsser erhaltene, unter 314