

## Die Stereoskopie im Dienste der isochromen und heterochromen Photometrie<sup>1)</sup>.

Von C. Pulfrich, Jena.

(Fortsetzung.)

### 6. Einige bekannte Erscheinungen und Versuche, die die Abhängigkeit der Zeitdifferenz zwischen Lichtreiz und Empfindung von der Stärke des Lichtreizes dartun.

Daß ein auf die Netzhaut ausgeübter Lichtreiz Zeit braucht, ehe er im Gehirn zum Bewußtsein des Beobachters gelangt, bedarf keiner besonderen Begründung. Das ist mit allen Nervenreizen so, von welcher Stelle des Nervensystems der Reiz auch ausgehen mag. Wie und wo dieser Zeitverlust hauptsächlich zustande kommt, ob an der Reizstelle, auf der Nervenbahn oder im Gehirn auf dem Wege zum Bewußtsein, läßt sich wohl schwerlich entscheiden. Der Zeitverlust ist da, und er wird noch größer, wenn die bewußte Empfindung im Gehirn sich zu einer bestimmten Vorstellung entwickeln soll, wenn also z. B. das vom Ohr aufgenommene gesprochene Wort nicht nur eine Lautempfindung, sondern auch bestimmte Gedanken erwecken soll. Auch weiß man, daß gerade der hierdurch hervorgerufene Zeitverlust bei manchen Personen mit sog. „langer Leitung“ nicht unbedeutliche Werte annehmen kann.

Ich werde im folgenden an einigen mehr oder weniger allgemein bekannten optischen Erscheinungen zeigen, wie sich dieser Zeitverlust zwischen Reiz und Empfindung und seine Abhängigkeit von der Stärke des Lichtreizes kundtut.

Eine Beobachtung, die wohl jeder schon oft an sich selbst gemacht hat, ist die, daß man bei schlechter Beleuchtung nicht so gut in einem Buche lesen kann wie bei voller Tageslichtbeleuchtung. Gewiß wird dieser Mangel in erster Linie durch die geringere Sehschärfe der Augen bei schlechter Beleuchtung hervorgerufen. Aber das ist nicht die einzige Ursache. Es kommt auch der Umstand in Anrechnung, daß bei dem schnellen Hinweggleiten der Augen über die einzelnen Buchstaben und Worte die Empfindung nicht so schnell dem Lichtreiz auf der Netzhaut nachfolgen kann, wie das bei voller Beleuchtung der Fall ist. Beim Lesen empfindet man diesen Unterschied in der Beobachtung nicht in dem Maße, daß ein Lesen unmöglich erscheint. Will

<sup>1)</sup> Im Auszuge vorgetragen auf dem Physikertage in Jena am 21. IX. 1921.

man aber im Dämmerlicht nach unbekanntem Noten Klavier spielen, so muß man bald aufhören, denn der Klavierspieler ist gezwungen, in der zeitlichen Aufeinanderfolge der Töne bestimmte stets wechselnde Zeitintervalle einzuhalten, die hinsichtlich ihrer Größenordnung nicht allzuweit entfernt sind von den bei schwachen Lichtreizen vorkommenden Zeitintervallen zwischen Erregung und Empfindung.

Die Zeitdifferenz zwischen Erregung und Empfindung spielt auch in der *Astronomie* bei der Beobachtung von Sterndurchgängen durch die Meßfäden des Meridianinstrumentes, welche Durchgänge vom Beobachter durch Herabdrücken eines Stiftes auf einen gleichmäßig sich bewegenden Papierstreifen registriert werden, als sog. „*persönliche Gleichung*“ eine wichtige Rolle, und man weiß auch, daß diese in Rechnung zu stellende Korrektur als sog. „*Helligkeitsgleichung*“ abhängig ist von der Helligkeit der Sterne und von der Geschwindigkeit — diese am größten am Himmelsäquator — mit der die Sterne durch das Gesichtsfeld des Fernrohres hindurchgehen, so daß man bei dem Anschluß ungleich heller Sterne vorzieht, diese Korrektur zu umgehen dadurch, daß man durch Blenden vor dem Objektiv die Helligkeit des helleren Sternes auf die des schwächeren herabdrückt.

Einen für unser Verfahren ganz eindeutigen und von der Willensbetätigung des Beobachters ganz unabhängigen *ad oculos-Beweis* für die Abhängigkeit der Zeitdauer zwischen Lichtreiz und Empfindung von der Stärke des Lichtreizes bringt folgender Versuch. Man zündet nach Verdunkelung des Saales vor dem unteren Ende des Projektionsschirmes eine elektrische, nach dem Zuschauerraum mit einer Blende-versehene Lampe an. Die Zuschauer werden dann, indem sie weniger auf die Lampe, sondern mehr auf den Schirm achten, den Eindruck erhalten, als breite sich das Licht nach oben auf dem Schirme aus, gleichsam als fliehe die Dunkelheit vor der Helle. Diese unter dem Namen der *fortlaufenden Schatten* längst bekannte Erscheinung hat mit der zeitlichen Ausbreitung des Lichtes nichts zu tun. Denn die Lichtausbreitung erfolgt mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km in der Sekunde, und ebenso schnell kommt von allen Teilen des Schirmes das reflektierte Licht auf der Netzhaut an. Wohl aber nimmt die Stärke der Beleuchtung des Schirmes sehr schnell von unten nach oben ab, und so entsteht, da die stärkeren Lichtreize früher zum Bewußtsein gelangen als die schwächeren, der Eindruck einer zeitlichen Ausbreitung des Lichtes.

Auch eine in der Praxis der Photometrie bekannte Erscheinung verdient hier erwähnt zu werden. Wenn man nämlich die miteinander zu vergleichenden, in scharfer Trennungslinie aneinanderstoßenden Felder im Gesichtsfeld eines Photometers unter einem Momentverschluß dem Anblick des Beobachters entzieht und dann den Verschluß öffnet und gleich darauf wieder verschließt, so gelangt die eine Hälfte des Gesichtsfeldes mit der größeren Helligkeit etwas früher zur Perzeption als die andere. Die Folge davon ist, daß der Helligkeitsunterschied stärker in die Erscheinung tritt als er in Wirklichkeit ist, ein Umstand, der der Einstellungsgenauigkeit zugute kommt.

Sehr wahrscheinlich erklärt sich in gleicher Weise auch die von Arago gemachte und von Helmholtz (Phys. Opt., II. Aufl., S. 264, 347 und 386) bestätigte Beobachtung, daß man beim Bewegen eines Objektes vor dem ruhenden Auge oder, was dasselbe ist, beim Hinweggleiten der Blickrichtung über das ruhende Objekt noch Helligkeitsunterschiede (bis auf  $\frac{1}{131}$  herab statt  $\frac{1}{100}$ ) erkennen kann, die man bei relativer Ruhe von Auge und Objekt nicht sieht. Damit ist unserer auf die Beobachtung einer bewegten Marke sich gründenden stereophotometrischen Methode ein günstiges Prognostikum gestellt, das auch im großen und ganzen durch die bisherigen Untersuchungen bestätigt wird.

#### 7. Den Vorgängen im beidäugigen Sehen analoge Vorgänge bei Tonempfindungen im beidöhrigen

##### Hören.

Im Jahre 1886 hielt auf der Naturforscherversammlung in Wiesbaden ein Herr in einer der Sitzungen der physikalischen Sektion einen Vortrag „über das stereoskopische Hören“, mit dem Erfolg, daß die Sitzung ein vorzeitiges Ende nahm. Man hat den Herrn nicht für ernst genommen, ob mit Recht oder Unrecht, kann ich jetzt nicht mehr sagen, da mir der Inhalt des Vortrages nicht in Erinnerung geblieben ist.

Mit dem beidäugigen Sehen ist das binaurale Hören natürlich nicht auf die gleiche Stufe zu stellen. Denn das beidäugige Sehen gibt innerhalb des stereoskopischen Sehbereichs einen unmittelbaren Aufschluß über das Neben- und Hintereinander der uns umgebenden sichtbaren Dinge, während es sich bei dem beidöhrigen Hören nur um die unmittelbare Wahrnehmung der Schallrichtung handelt. Auch ist die Genauigkeit der Richtungsbestimmung sehr gering im Vergleich zu der visuellen Richtungsbestimmung. Nach einer vor kurzem in den „Naturwissenschaften“ X, S. 107, 1922, erschienenen sehr interessanten Abhandlung von H. Hecht, Kiel, „Über die Lokalisation von Schallquellen“ beträgt die Unsicherheit in der binauralen Richtungsbestimmung für eine in der Sagittalebene des Beobachters ankommende Schallwelle  $\pm 3^\circ$ , das ist ungefähr das 400fache der optischen Unsicherheit.

Kommt die Schallwelle aus einer Richtung,

die mehr als  $3^\circ$  von der Sagittalebene des Beobachters abweicht, so ist die Unsicherheit in der Richtungsbestimmung noch viel größer und erreicht ihr Maximum (nach Hecht  $\pm 15^\circ$ ), wenn die Schallwelle mehr oder weniger senkrecht zur Sagittalebene verläuft. Während von der in der Sagittalebene verlaufenden Schallwelle die beiden Ohren des Beobachters zu der gleichen Zeit erreicht werden und das Trommelfell auf beiden Ohren in gleicher Stärke erregt wird, ist das für eine von der Seite ankommende Schallwelle nicht mehr der Fall. Denn jetzt wird das der Schallwelle zugewandte Ohr nicht allein früher von der Schallwelle erreicht, es wird auch stärker erregt als das andere, einmal deshalb, weil die Ohrmuschel des der Schallquelle zugewandten Ohres in ihrer Eigenschaft als Schallverstärker besser zur Geltung kommt, dann aber auch deshalb, weil das andere Ohr mit zunehmender Neigung der Schallrichtung zur Sagittalebene immer mehr in den Schallschatten des Kopfes tritt. Auch ist der hierdurch hervorgerufene Unterschied in der Stärke der Erregung des Trommelfells noch abhängig von der Tonhöhe, da mit der Höhe des Tones der Schallschatten immer wirksamer wird.

Übertragen wir unsere beim Auge gemachten Erfahrungen. — so wie das die Herren H. Carsten und H. Salinger vor kurzem in einer in den „Naturwissenschaften“ S. 329 veröffentlichten Besprechung der Hechtschen Arbeit unter Bezugnahme auf meinen Jenaer Vortrag bereits getan haben — auf das Ohr, so müssen wir sagen, daß das vorgehaltene Ohr den Schall früher empfindet als das andere Ohr, nicht allein deshalb, weil der Weg zu ihm kürzer ist als zum anderen, sondern auch deshalb, und ich füge hinzu, vielleicht hauptsächlich deshalb, weil auch hier der stärkeren Erregung die Empfindung schneller folgt als der schwächeren.

Das Verfahren, durch beidöhriges Hören die Richtung einer ankommenden Schallwelle zu bestimmen, hat im Kriege vielfach praktische Verwendung gefunden. Ich erwähne hier nur die sog. Schallweiser, die bei den Schallmeßtruppen im Gebrauch waren. Bei diesem auf eine horizontale Drehscheibe mit Teilkreis gesetzten Apparat war der natürliche Ohrenabstand durch seitlich aufgestellte Schallaufnehmer auf ein bestimmtes Vielfaches gebracht, wodurch die Genauigkeit der Richtungsbestimmung entsprechend gesteigert wird. Es ist mir mitgeteilt worden, daß die Angaben einzelner Beobachter oft ganz erheblich — bis zu  $20^\circ$  — voneinander abweichen, bis man dazu überging, jede Messung zu wiederholen in der Weise, daß man die zu den Ohren führenden Hörschläuche vertauschte und dann aus beiden Messungen das Mittel nahm.

Offenbar rühren diese Abweichungen daher, daß die beiden Ohren des Beobachters nicht die gleiche Hörschärfe haben, so daß selbst bei gleichzeitiger und gleichstarker Erregung des Trommelfells in beiden Ohren die Überleitung zum Gehirn in dem schwächeren Ohr längere Zeit in

Anspruch nimmt, als in dem anderen, normalhörigen Ohr. Es wiederholt sich also hier der gleiche Vorgang, den wir oben (S. 329) bei Beobachtern mit ungleicher Sehschärfe auf beiden Augen festgestellt haben. Indem der mit einem solchen Defekt behaftete Beobachter am Schallmeßgerät den Apparat nach der Seite dreht, auf der das normalhörige Ohr gelegen ist, gibt er dem schwächeren Ohr einen zeitlichen Vorsprung in der Aufnahme der alsdann schräg zur „Standlinie“ ankommenden Schallwelle, und bewirkt damit in einer bestimmten Stellung des Apparates, daß die Zeitdifferenz der beiden Empfindungen verschwindet. Vertauscht man die beiden Hörschläuche, so muß derselbe Beobachter den Apparat jetzt um den gleichen Winkel nach der anderen Seite drehen, um wieder Gleichzeitigkeit der Empfindungen herbeizuführen. Das Mittel der beiden Einstellungen muß also im großen und ganzen mit der Schallrichtung übereinstimmen.

Ich habe von diesen Überlegungen kürzlich folgende Nutzenanwendung gemacht. Ich bin auf dem linken Ohr etwas schwerhörig, besonders stark für die hohen Töne, auf dem rechten Ohr normalhörig. Bei mir ist daher, selbst bei gleichzeitiger Erregung des Trommelfells beider Ohren, eine Zeitdifferenz der Tonempfindungen sicher vorhanden<sup>1)</sup>. Infolgedessen habe ich seit einer Reihe von Jahren mit der Schwierigkeit zu kämpfen, in Konzerten die von Sängerinnen gesungenen Worte zu verstehen. Ich habe mir in solchen Fällen bisher so geholfen, wie das wohl auch andere tun, daß ich das normale Ohr vorhielt, um besser verstehen zu können. Neuerdings habe ich, gestützt auf die vorstehenden Überlegungen, einen anderen Weg eingeschlagen, den ich anderen Leidensgefährten zur Prüfung und zur Nachahmung empfehlen möchte. Ich habe meinen Kopf nach rechts gedreht, die Ohrmuschel des linken Ohres durch Anlegen der linken offenen Hand vergrößert, und war überrascht jetzt alles viel besser verstehen zu können. Bei diesem Versuch hatte ich unmittelbar hinter mir eine Wand, die für das rechte im Schallschatten des Kopfes liegende Ohr als Reflektor und damit als Wegverlängerer für die beim rechten Ohr wirksame Schallwelle diente.

#### 8. Die zu einer Gesichtswahrnehmung nötige Zeit und die Art des Anstieges der Lichtempfindung.

Während die vorstehend angeführten Argumente nur dazu dienen, den Nachweis der Ab-

<sup>1)</sup> Setze ich mich auf einen Drehschemel in meinem Wohnzimmer der laut tickenden Wanduhr gegenüber, schließe die Augen und suche die Richtung auf, aus der der Schall zu kommen scheint, so weicht die so gefundene Richtung immer nach rechts um ca.  $10^\circ$  ab. Verstärke ich die das linke Ohr treffende Schallwelle durch die hinter das linke Ohr gehaltene hohle linke Hand und wiederhole den Versuch, so fällt die gefundene Schallrichtung sehr nahe mit der wahren zusammen. Halte ich hinter das rechte Ohr die hohle Hand, so wird die Abweichung nach rechts erheblich größer als  $10^\circ$ .

hängigkeit der Zeitdifferenz zwischen Reiz und Empfindung von der Stärke des Reizes zu bringen, sind wir durch die Untersuchungen und Messungen, welche der jetzt noch lebende Wiener Physiologe, Herr Prof. *Sigmund Exner*, in jungen Jahren unter Leitung von *Helmholtz* im physiologischen Institut in Heidelberg ausgeführt hat, auch über die zu einer Gesichtswahrnehmung nötige Zeit und die Art des Anstieges der Lichtempfindung auf das genaueste unterrichtet. Die Arbeit ist in den Sitz-Ber. der Wiener Akad. d. Wiss. Bd. 58, 1868, erschienen, und *Helmholtz* hat darüber in seiner Physiologischen Optik, II. Aufl., S. 575, ausführlich berichtet. In der III. Auflage ist dieser Bericht ganz in Wegfall gekommen. In Anbetracht der großen Bedeutung dieser Untersuchungen für unsere Methode möchte ich daher im folgenden über die von *Sigmund Exner* benutzte Methode und die von ihm erhaltenen Resultate kurz referieren.

Zunächst die Methode. *Exner* benutzt zwei Scheiben, die in einigem Abstand hintereinander auf einer Achse angebracht sind und durch einen Motor so in eine gleichmäßige Rotation versetzt werden, daß die dem Beobachter abgewandte Scheibe 10mal schneller rotiert als die unmittelbar vor ihm befindliche. Die vordere Scheibe hat einen Sektorausschnitt, welcher dem Beobachter für einige Sekunden den Durchblick nach der zweiten Scheibe freigibt, während welcher Zeit die zweite Scheibe einmal ihre Umdrehung ausführt. Die zweite Scheibe ist ebenfalls mit einem Sektorausschnitt versehen, welcher dem Beobachter für eine Zeitlang den Durchblick nach einer dahinter befindlichen beleuchteten weißen Fläche von begrenzter Ausdehnung (z. B. nach dem Rechteck I in Fig. 9 oben links) gestattet. Dann folgt ein Sektor aus weißem Papier, der ebenso hell beleuchtet ist wie I und somit die Belichtung der durch I begrenzten Stelle der Netzhaut in der gleichen Stärke weiter fortsetzt, aber auch die Umgebung (II in Fig. 9) mit beleuchtet. Dann folgt als letzter ein dunkler Sektor, der die Belichtung von I und II gleichzeitig auslöscht. Durch ein zwischen den beiden Scheiben angebrachtes Linsensystem ist dafür gesorgt, daß das Bild der zweiten Scheibe mit dem Ort der ersten Scheibe zusammenfällt, so daß der Übergang von einem Sektor der zweiten Scheibe zum anderen jedesmal so erfolgt, wie wenn beide Scheiben sich unmittelbar vor der Pupillenöffnung des Auges befänden.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Scheiben drehen, war bekannt, und die Sektoren waren einzeln einstellbar. Aus ihrer Größe konnte daher ohne weiteres auf den Moment des Eintritts der Lichtreize und deren Zeitdauer geschlossen werden. Da die vordere Scheibe nur für wenige Sekunden den Durchblick gestattete, so herrschte für die übrige Zeit, mehrere Minuten lang, vollständige Dunkelheit, bis das Spiel wieder von neuem einsetzte.

Auf diesem Wege hat *Exner* gefunden, daß

für einen plötzlich einsetzenden und einige Zeit andauernden Lichtreiz der Anstieg der Lichtempfindung in einer Kurve (Fig. 9) erfolgt, deren Verlauf große Ähnlichkeit hat mit dem der Geschosßbahn. Beide Kurven tragen gleich bei Beginn den Keim des Todes in sich. An dem schräg aufwärtsfliegenden Geschosß zehrt die Schwere und zieht es abwärts, an der Empfindung des Lichtreizes die Ermüdung der Netzhaut.

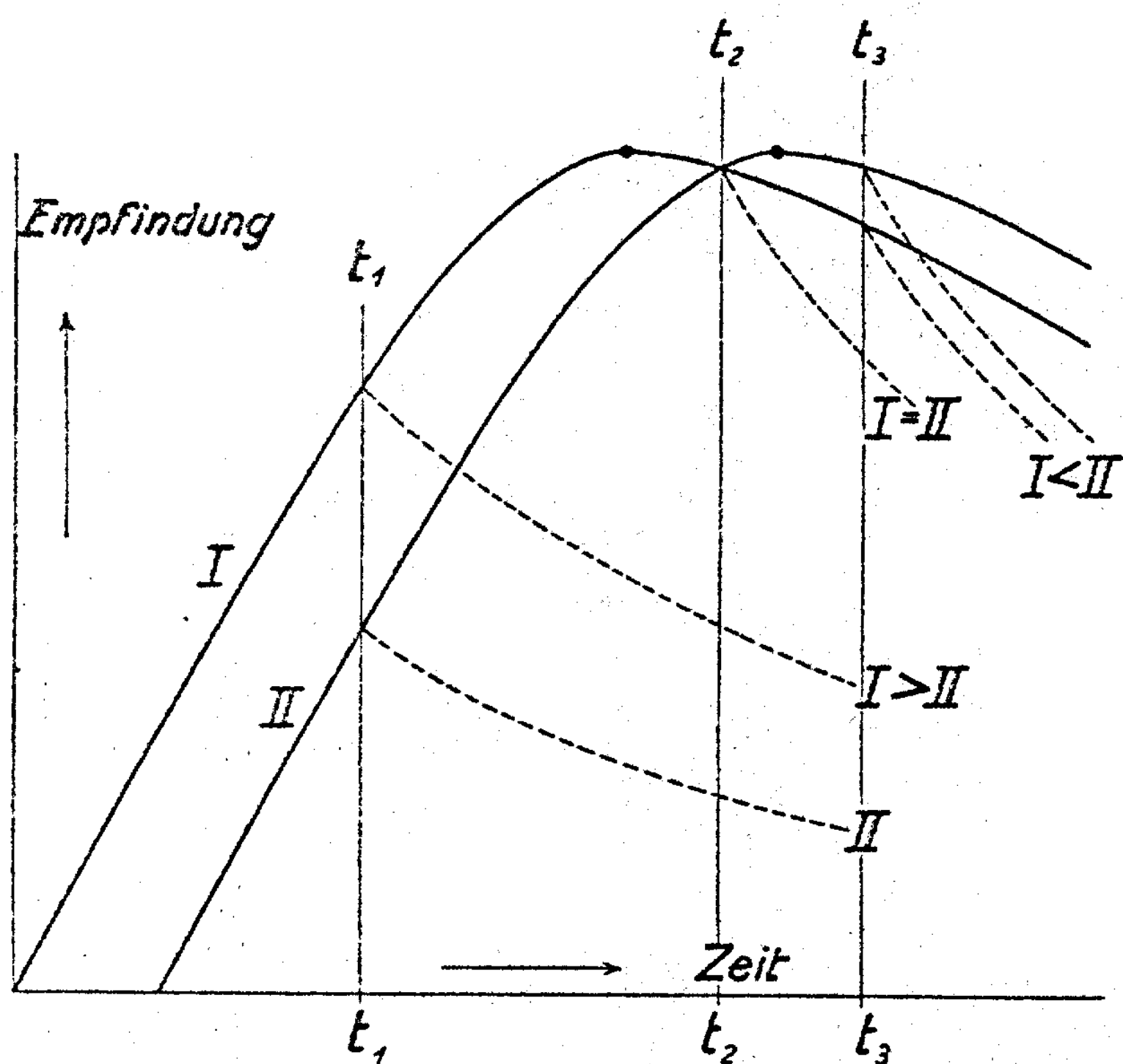
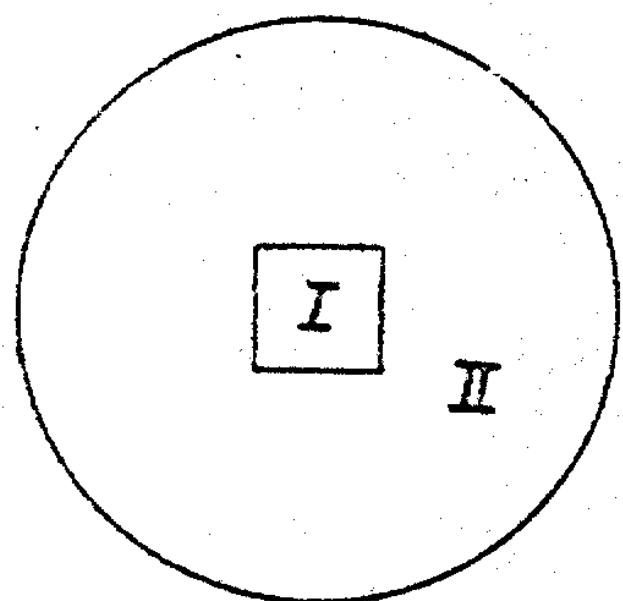


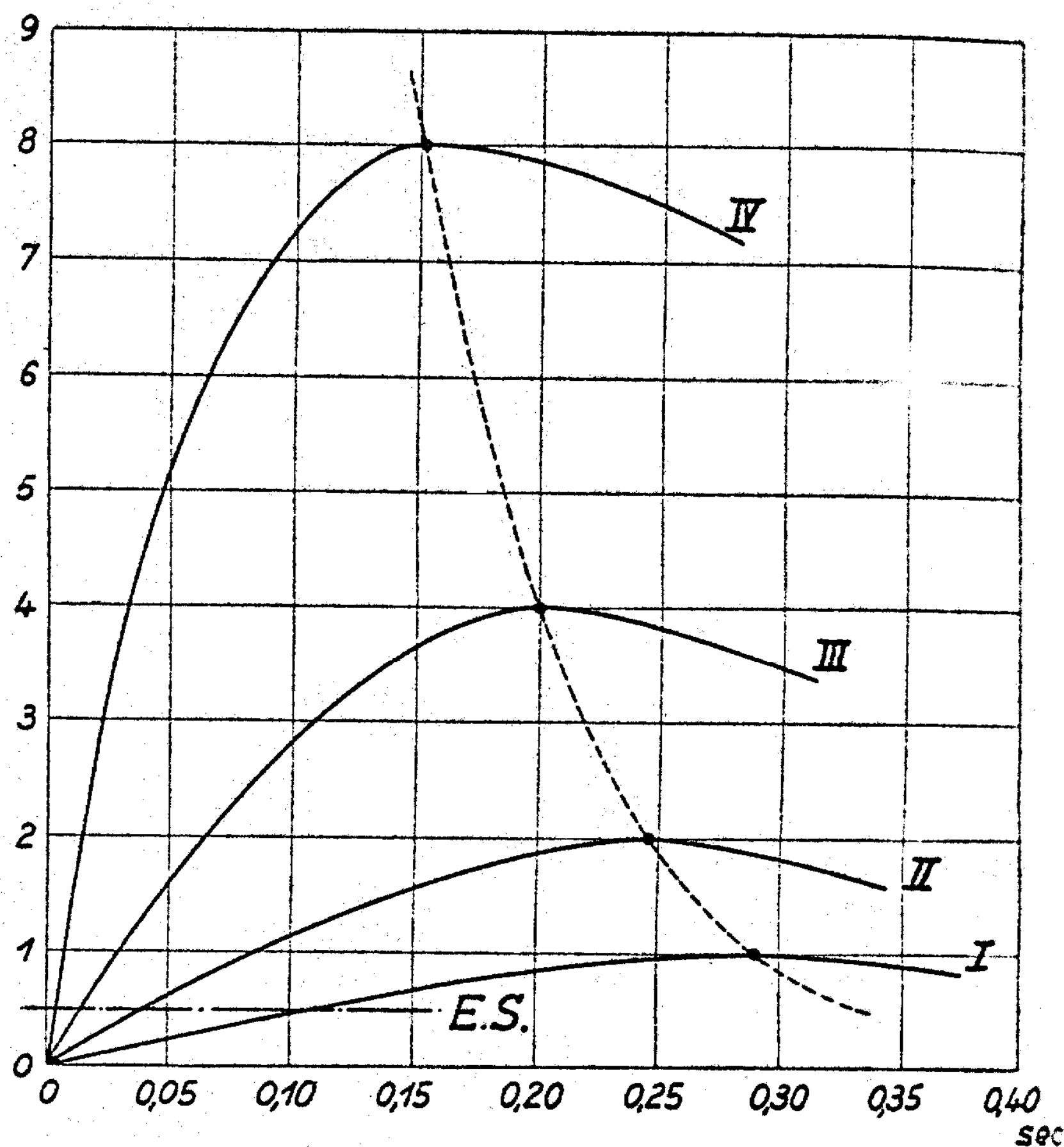
Fig. 9. Verlauf der Lichtempfindung (nach Sigm. Exner, 1868).

Beide Kurven erreichen ein Maximum, um von da aus, in dem einen Falle schneller als in dem anderen, wieder herabzugehen. Auf das Verfahren, wie Exner die einzelnen Teile der Empfindungskurve messend verfolgt hat, will ich hier nicht näher eingehen. Die Lage des Maximums der Empfindung bestimmte er in folgender Weise. Er achtete auf die unmittelbar nach der Verdunkelung auftretenden positiven Nachbilder — in ihrem Verlauf in Fig. 9 durch die punktierten Kurven angedeutet — und sah zu, wie sich die beiden Nachbilder von I und II in ihrem Helligkeitsverhältnis zueinander verhielten. Geschieht nämlich das Abschneiden der Belichtung vor dem Maximum der Empfindung (z. B. in  $t_1$  in Fig. 9), so erscheint im Nachbild das Viereck I heller als seine Umgebung. Geschieht es in der Nähe des Maximums (z. B. bei  $t_2$ ), so verschwinden im Nachbild die Umrisse

des Vierecks. Unvollkommen ist die Beobachtung  $II > I$ , wenn das Abschneiden hinter dem Maximum (bei  $t_3$ ) stattfindet, einmal deshalb, weil hier die beiden Nachbildkurven sehr nahe beieinander stehen, dann aber auch aus Gründen, die in der erst später erforschten Form dieser

Intensität des Lichtreizes	Zeit bis zur Erreichung des Maxim. der Empfindung
1	0,287 sec.
2	0,246 sec.
4	0,200 sec.
8	0,151 sec.

Intensität



Nachbildkurven liegen. Ich komme hierauf noch näher zurück.

Exner hat diese Anstiegskurven der Lichtempfindung dann noch für verschieden starke Lichtreize untersucht und gefunden, daß sie nicht allein verschieden schnell ansteigen, sondern daß auch die Zeit zwischen dem Einsetzen eines Lichtreizes und dem zugehörigen Maximum der Empfindung mit zunehmender Stärke des Lichtreizes immer kleiner wird, insonderheit für die untersuchten Intensitäten 1, 2, 4 und 8 abnimmt, von 0,28 bis 0,15 Sekunden.

So große Zeitunterschiede kommen bei unserem obigen Experiment der „kreisenden Marke“ allerdings nicht vor. Denn nach den Versuchen in Fig. 8 haben wir für den Zeitunterschied der Perceptionen im verdunkelten und nicht verdunkelten Auge Werte gefunden, die nur wenige Hundertstel Sekunden betragen. Wir müssen

daher annehmen, daß bei dem seinen Ort auf der Netzhaut beständig ändernden Lichtreiz nicht das Empfindungsmaximum, sondern die *Empfindungsschwelle* — in der Höhenlage etwa so, wie sie in Fig. 9 rechts durch die horizontale Gerade angedeutet ist — für das Zustandekommen der „kreisenden Marke“ maßgebend ist. Daß das Überschreiten der Empfindungsschwelle je nach der Stärke des Lichtreizes zu verschiedenen Zeiten erfolgt, ergibt sich aus dem verschiedenartigen Anstieg der Kurven in Bild 9 von selbst.

### 9. Das Ausklingen des positiven Nachbildes eines nur kurze Zeit andauernden Lichtreizes.

Nach neueren Untersuchungen — ich verweise dieserhalb insonderheit auf die Ausführungen von Prof. F. W. Fröhlich-Bonn in „Grundzüge einer Lehre vom Licht- und Farbensinn“, Jena 1921 — hat sich nämlich herausgestellt, daß das Nachklingen eines nur kurze Zeit andauernden Lichtreizes nicht so, wie die punktierten Kurven in Bild 9 anzeigen, sondern in einer wellenförmigen Kurve vor sich geht, die große Ähnlichkeit hat mit dem in den *Gleitflug* übergehenden *Sturzflug eines Fliegers*. Der Verlauf richtet sich im einzelnen, ob mit einer oder mehreren Nachbildphasen, nach der Dauer, der Intensität und der Farbe der Belichtung, vor allem aber auch nach dem Adaptionszustand des Auges und anderen Dingen. Im allgemeinen sind die Erscheinungen nur wenig bekannt. Es kommt das daher, weil die positiven Nachbilder, die den nur kurze Zeit andauernden Lichtreizen unmittelbar nachfolgen, am Tage sehr viel schwerer zu beobachten sind, als die durch länger andauernde starke Lichtreize hervorgerufenen negativen Nachbilder. Ich will daher einen einfachen *Versuch* angeben, der das positive Nachbild eines nur kurze Zeit andauernden Lichtreizes und die Art seines Abklingens bequem und in größter Deutlichkeit zu beobachten gestattet.

Die beste Zeit hierfür ist die Stunde vor der Morgendämmerung. Man bleibt im Bett liegen und richtet sich nur soweit auf, daß man mit dem ausgestreckten Arm die auf dem Nachttischchen stehende elektrische Lampe erreichen kann. Die Hauptsache für das Gelingen des Versuches ist, daß man eine bestimmte dem Licht ausgesetzte Stelle des Bettuches schon vor dem Anzünden der Lampe ins Auge faßt und nicht erst nachher aufsucht, da durch das Umherirren der Blickrichtung während der Belichtung mehrere sich gegenseitig störende Nachbilder entstehen. Aus demselben Grunde macht man den Versuch auch nicht mit beiden Augen gleichzeitig, sondern hält ein Auge mit der Hand geschlossen. Unter diesen Vorsichtsmaßregeln zündet man die Lampe an und löscht sie gleich wieder aus. Auch kann man den Versuch in der Weise machen, daß man die Lampe brennen läßt, beide Augen eine Zeitlang mit den Händen zudeckt — die Augen immer

offen gehalten — und dann für einen Moment ein Auge freigibt. Beschränkt man die Belichtung auf eine tunlichst kurze Zeit, so nimmt die Helligkeitsempfindung den bereits oben erwähnten und in Bild 10 durch die ausgezogene Kurve angedeuteten Verlauf. Dem ersten Helligkeitsmaximum folgt nach etwa 1 Sekunde ein zweites, das von dem ersten durch einen dunklen Zwischenraum getrennt erscheint<sup>1)</sup>. Manchmal habe ich aber auch den Eindruck, als erfolge der Abfall der Empfindung nach der in Bild 10 punktiert gekennzeichneten Kurve. Das letzte Helligkeitsmaximum klingt dagegen sehr langsam und

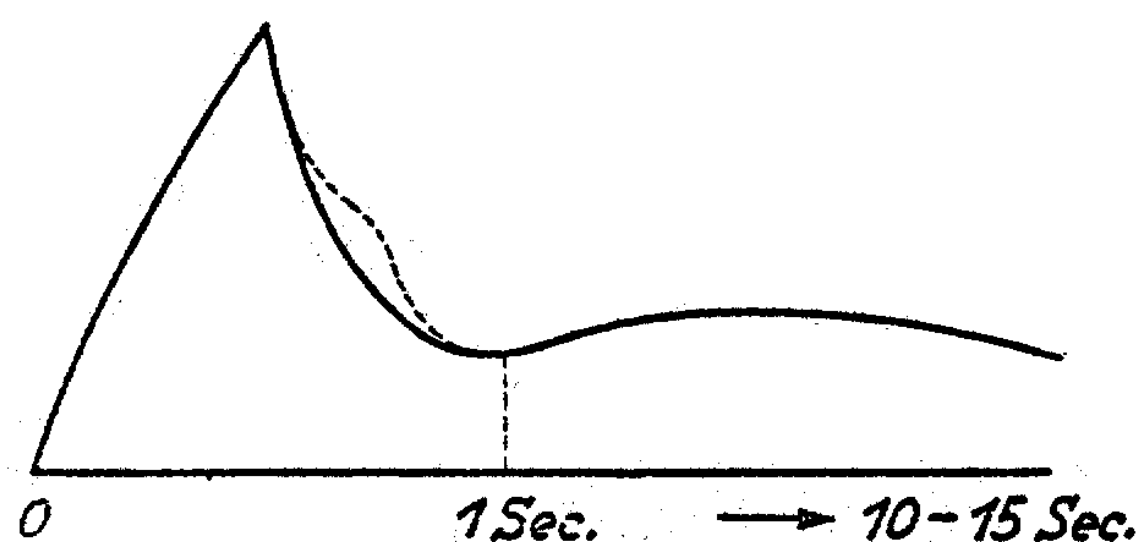


Fig. 10. Das Ausklingen des positiven Nachbildes. Auf die relative Höhe der einzelnen Ordinaten dieser Kurve ist bei Anfertigung der Kurve kein Gewicht gelegt worden. Nach den Untersuchungen von C. v. Hefß geht das Minimum der Empfindung noch unter die Abszissenachse herab, entsprechend dem im Text angegebenen dunklen Zwischenraum zwischen den beiden Maximalwerten der Empfindung.

gleichmäßig aus, wobei nur zu beachten ist, daß während der ganzen bis zu 15 Sekunden dauernden Erscheinung die Blickrichtung unverändert festgehalten wird und das Auge offen bleibt. Auch gilt diese im Verhältnis zur Belichtungszeit sehr lange Dauer des Nachbildes nur für vollständige Dunkelheit des Zimmers. Legt man bei Beginn der Morgendämmerung gleich nach der Belichtung einen dunklen Gegenstand, z. B. einen Bleistift, auf das Bettuch, so sieht man von dem Bleistift zunächst nichts, er wird erst nach einiger Zeit sichtbar. Diese Zeit nimmt mit der Helligkeit der Morgendämmerung immer mehr ab. Vielleicht läßt sich dieses Verfahren, entsprechend ausgebildet, für die *Photometrie schwacher Lichterscheinungen* verwerten.

Die beiden Hauptempfindungsmaxima in Fig. 10 unterscheiden sich, abgesehen von ihrem Verlauf, auch noch in anderer Beziehung. Wenn

<sup>1)</sup> Man kann die zeitlich aufeinander folgenden Nachbilder *auch räumlich nebeneinander legen*, und zwar dadurch, daß man den Lichtreiz auf der Netzhaut seinen Ort schnell sich verändern läßt. So sieht man z. B. bei der Projektion der sich drehenden Scheibe (Fig. 3) die Nachbilder wie kleine Fähnchen unmittelbar hinter den Markenspitzen herlaufen. Die erste Phase eines solchen Nachbildes kann unter besonderen Umständen sogar ein dem ersten nahezu gleichwertiges zweites Bild des Gegenstandes hervorrufen. Das ist z. B. der Fall bei einem Versuch, den E. Hering in Pflügers Archiv 26, S. 604, 1909, veröffentlicht hat. Es werden zwei in festem Abstand voneinander befindliche Nadeln seitwärts mit einer solchen Geschwindigkeit bewegt, daß das Nachbild der ersten Nadel mit dem primären Bild der zweiten Nadel zusammenfällt. Hierbei wird dann das Nachbild der zweiten Nadel so verstärkt, daß es wie eine dritte Nadel erscheint.

man nämlich den Versuch, in angemessenen Ruhepausen natürlich, öfters wiederholt, so merkt man bald, daß die beiden Maxima verschieden gefärbt sind. Das erste Maxima hat die natürliche Farbe, die man auch bei Dauerbelichtung beobachtet, das zweite und das ganze Nachbild ist weiß, ohne irgendwelche Färbung. Mache ich den Versuch mit einem grünen oder roten Glase, das ich schon vor der Belichtung vor das Auge halte, so habe ich die Empfindung der Farbe nur für die kurze Dauer des ersten Helligkeitsmaximums. Das langandauernde Nachbild ist auch hier weiß, ohne irgendeine Andeutung der Farbe. Dieser Farbenunterschied erweckt unwillkürlich den Verdacht, als habe man es hier mit zwei nebeneinander herlaufenden Empfindungen zu tun, von denen die eine durch die Erregung der farbentüchtigen Zapfen der Netzhaut, die andere durch die Erregung der farbenuntüchtigen Stäbchen hervorgerufen wird. Ob das wirklich so ist, vermag ich nicht zu beurteilen. Nach *Fröhlich* (l. c.) spielen bei diesen Vorgängen die Reflexwirkungen des Zentralnervensystems eine große Rolle<sup>1)</sup>

(Fortsetzung folgt.)