Chronophotische Studien über den Umgebungskontrast.

Von

Dr. Robert Stigler,

Assistent am physiol. Institute der Universität Wien.

(Mit 9 Textfiguren.)

Zur Analyse der Wechselbeziehungen zwischen einem durch Licht erregten Teile des Auges und seiner entweder in relativer Ruhe befindlichen oder gleichfalls durch Licht erregten Nachbarschaft eignet sich in vorzüglicher Weise die ungleichzeitige Belichtung der in Betracht kommenden Netzhautstellen. Die Lichtstärke und Expositionsdauer der miteinander verglichenen Lichtfelder oder beide zusammen können gleich oder verschieden sein, je nach der Fragestellung. Es kommt vor allem darauf an, dass die beiden Vergleichsfelder nicht gleichzeitig gleich lang exponiert werden, sondern entweder zu verschiedenen Zeiten erscheinen oder zu verschiedenen Zeiten verschwinden oder beides zusammen. Derartige Untersuchungen bezeichne ich der Kürze halber als *chronophotische*.

Einer exakten chronophotischen Methode bediente sich zuerst S. Exner¹⁾ bei seinen Versuchen zur Ermittlung der Lichtempfindungskurve und der Maximalzeit eines gegebenen Lichtreizes.

Er ging dabei von der Annahme aus, dass zwei objektiv gleiche Lichtreize, welche kurz nacheinander auf unmittelbar benachbarte und symmetrische Netzhautpartien fallen, zwei gleiche Lichtempfindungen auslösen, welche graphisch durch zwei gleiche bis zum Maximum ansteigende und dann absinkende Kurven darzustellen seien. Da aber die zweite Lichtempfindung um ein kleines Zeitteilchen (bei Exner $\frac{1}{60}$ — $\frac{1}{50}$ Sek.) nach ihrer Nachbarempfindung einsetzte, so müssten sich die beiden Empfindungskurven zwischen

¹⁾ Über die zu einer Gesichtswahrnehmung nötige Zeit. Wiener Sitzungsberichte, Abt. II, Bd. 58 S. 601. 1868.

beiden Gipfeln schneiden. Gelingen es, diesen Schnittpunkt zu ermitteln, so sei daraus die Maximalzeit mit umso grösserer Genauigkeit zu bestimmen, je geringer die zeitliche Differenz im Beginne der beiden Lichtreize sei.

Diesem, wie es W. McDougall¹⁾ nennt, „ingeniösen und physikalisch bewundernswerten Verfahren“ lag die Anschauung zugrunde, dass man die Kurve der später auftretenden Lichtempfindung erhalte, indem man die Kurve der ersten Lichtempfindung parallel zu sich selbst längs der Abszissenachse um die zeitliche Differenz zwischen dem Beginne der beiden Lichtreize verschiebe.

Als indessen später A. Kunkel²⁾ nach dem erwähnten Prinzipie die Maximalzeiten farbiger Lichter ermitteln wollte, kam er zu keinem Resultate, da ihm zu seiner Verwunderung in allen Fällen das um eine kurze Zeit länger exponierte Photometerfeld heller erschien als das kürzer exponierte, der postulierte Kreuzungspunkt der beiden Kurven also überhaupt nicht zutage trat.

Einen gleichen Misserfolg hatte K. Petrén³⁾ mit dem Versuche, die Maximalzeit weissen Lichtes nach Exner's Methode zu ermitteln: die länger exponierte Hälfte seines Photometerfeldes erschien ihm niemals dunkler als die kürzer exponierte.

Meine eigenen Untersuchungen über diesen Gegenstand⁴⁾, welche nach der Exner'schen Methode, jedoch mit rein fovealen weissen Lichtreizen angestellt wurden, hatten das folgende Ergebnis: erschien das eine meiner beiden objektiv gleichen und einander unmittelbar benachbarten halbkreisförmigen Photometerfelder um 0,02—0,05 Sek. vor dem anderen, so war das länger exponierte Feld auch bei weit übermaximalen Expositionszeiten (bis zu $1\frac{1}{3}$ Sek.) relativ heller als das kürzer exponierte. Erst wenn die Differenz über 0,2 Sek. erhöht wurde, so erschien in der Mehrzahl der Fälle von den beiden übermaximal exponierten Halbkreisen der länger exponierte dunkler als der kürzer exponierte. Es musste also eine zeitliche Differenz von mindestens 0,2 Sek. zwischen dem Auftreten der beiden Licht-

1) W. McDougall, The variations of the intensity of visual sensation with the duration of the stimulus. The British Journ. of Psych. vol. 1 p. 154. 1904.

2) A. Kunkel, Über die Abhängigkeit der Farbenempfindung von der Zeit. Pflüger's Arch. Bd. 9 S. 201—202. 1874.

3) K. Petrén, Untersuchungen über den Lichtsinn. Skand. Arch. f. Physiol. Bd. 4 S. 441. 1893.

4) R. Stigler, Über die Unterschiedsschwelle im aufsteigenden Teile einer Lichtempfindung. Pflüger's Arch. Bd. 123 S. 205 ff. 1908.

reize vorhanden sein, damit ein Kreuzungspunkt der beiden Empfindungskurven zutage trat. Dieses eigentümliche Verhalten bildete den ersten Anstoss zu den folgenden Untersuchungen.

Versuchsanordnung.

Bei diesen Untersuchungen werden entweder zwei objektiv gleich lichtstarke und gleichartige, unmittelbar aneinander stossende oder durch einen Trennungsstreifen getrennte oder zwei solche Lichtfelder benötigt', deren Lichtstärkenverhältnis in beliebiger Weise abgestuft werden kann. Ich wüsste keinen Apparat, der es gestattete, das eine Mal zwei in einer scharfen Grenzlinie unmittelbar aneinander stossende Lichtfelder von objektiv sichergestellter absoluter Gleichheit der Lichtstärke, das andere Mal zwei solche von beliebig variablem Lichtstärkenverhältnisse herzustellen. Darum habe ich eben für diese beiden verschiedenen Zwecke zwei verschiedene Apparate verwendet: mein Chronophotometer I gestattet nur die zeitliche Variation zweier unbedingt gleich lichtstarker und unmittelbar in scharfer Grenzlinie aneinander stossender Lichtfelder, das Chronophotometer II gestattet die Variation sowohl der Expositions-dauer, als auch des Lichtstärkenverhältnisses zweier Vergleichsfelder, ohne jedoch die objektive Gleichstellung der Lichtstärken zu ermöglichen¹⁾. Das Chronophotometer I ist für solche physiologisch-optische Untersuchungen eingerichtet, bei denen die Fehler der subjektiven photometrischen Gleichstellung unbedingt auszuschalten sind. Die chronophotische Methode eignet sich auch zur praktischen Photometrie in solchen Fällen, bei denen es auf eine äusserst geringe Unterschiedsschwelle ankommt, da die Fehlerbreite in diesem Falle kleiner ist als bei der gewöhnlichen Photometriermethode²⁾.

Chronophotometer I zur Vergleichung zweier objektiv gleich lichtstarker Felder (Fig. 1 u. 2).

Den Hauptanteil desselben bildet ein in geeigneter Weise für die binokulare Beobachtung umgeformter Helmholtz'scher, von S. Exner beschriebener „Apparat zur Unterbrechung des Lichteindrucks“³⁾, von welchem Fernrohr und Spaltvorrichtung entfernt

1) Beide Apparate werden von der Firma Schmidt & Haensch in Berlin hergestellt.

2) R. Stigler, Über den physiologischen Proportionalitätsfaktor. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. Bd. 44 S. 155—164. 1909.

3) S. Exner, l. c.

und die dem Beobachter zugewendete Scheibe durch eine Kombination aus drei geschwärzten Metallscheiben (S_1) ersetzt wurde, welche von gleicher Beschaffenheit sind, wie die bei meinen früheren Untersuchungen „Über die Unterschiedsschwelle im aufsteigenden Teile einer Lichtempfindung“¹⁾ verwendeten Scheiben I, II, III. Diese werden in der a. a. O. angegebenen Weise eingestellt und zur zeitlichen Umgrenzung der Lichtreize verwendet. Die rückwärtige Scheibe (S_2) dreht sich zwölfmal langsamer; sie trägt, wie

Fig. 1. Chronophotometer I zur Vergleichung zweier objektiv gleich lichtstarker Felder.

bei dem von Exner beschriebenen Apparate, einen Ausschnitt, der nur alle zwölf Umdrehungen der vorderen Scheibe dem Licht den Durchtritt zum Photometerfelde gestattet. Als Lichtquelle dient ein Auerstrumpf (A) von relativ grosser Konstanz der Lichtemission innerhalb eines gewissen Zeitraumes. Die Auerlampe ist in einem Blechzylinder (B) eingeschlossen. Dieser trägt eine Blechröhre (R_1), deren runde vordere Öffnung einen Ansatz zur Aufnahme von Gläsern besitzt (G). Nachdem das Licht den Ausschnitt der Scheibe S_2 passiert

1) Pflüger's Arch. Bd. 123 S. 196. 1908.

hat, gelangt es in die Röhre R_2 , die an ihren beiden Enden von je einem Stativ getragen wird. Das vordere Stativ (Fig. 3) besteht aus einer rechtwinkelig gebogenen Eisenblechplatte (EE) mit einem runden Ausschnitte, an welchem eine kurze Hülse (TT) angesetzt ist. In dieser steckt drehbar ein zweiter Tubus (UU), welcher an eine Blechplatte (PP) gelötet ist, die einen runden Ausschnitt (V) hat, der kleiner als das Lumen des Tubus U ist, so dass sein Rand einen in das Lumen von U vorragenden Ring (WW) bildet. An die Vorderfläche der Platte PP wird die das Reizfeld liefernde Beinglasplatte Rf gekittet. Das Lumen des Tubus UU dient der

Fig. 2. Chronophotometer zur Vergleichung zweier objektiv gleich lichtstarker Felder.

Röhre R_2 als Stütze. Der Ring WW verhindert, dass die Röhre an das Beinglas anstösst. Das Photometerbeinglas soll homogen (schlierenfrei) und möglichst dünn sein. Seine vordere Fläche ist mit schwarzem Papier überklebt, aus welchem eine Ellipse ausgespart ist, welche die Grösse und Form des Reizfeldes bestimmt. Durch Drehung des Tubus U in der Hülse T kann die Lage dieser Ellipse geändert werden. Das schwarze Papier darf nicht an der hinteren Beinglasplatte angeklebt werden, weil sonst das Reizfeld von einem diffusen Lichthofe umgeben wäre. Es ist auch wichtig, dass das Beinglas selbst grösser als die Reizfläche ist, und zwar aus folgendem Grunde: irgendein Partikelchen A im inneren Teile der Beinglasplatte empfängt von der Lichtquelle durch direkte Bestrahlung die

Lichtmenge I . Davon gibt es an seine Umgebung durch Diffusion die Menge i ab, empfängt aber seinerseits von seiner Umgebung durch Diffusion eine gleiche Lichtmenge i . Seine Lichtstärke setzt sich daher zusammen aus: $I - i + i$, ist also gleich I . Ein gleichgrosses Partikelchen B an der Peripherie des Beinglases empfängt von der Lichtquelle ebenfalls die Lichtmenge I , es gibt durch Diffusion ebenfalls die Lichtmenge i ab, empfängt aber nur von einer Hälfte her diffundiertes Licht, also $i/2$, seine Lichtstärke ist daher gleich $I - i + i/2 = I - i/2$. B ist daher um $i/2$ dunkler als A , d. h. der Rand des Beinglases ist dunkler als die in der

Mitte gelegenen Teile desselben, und zwar um so dunkler, je stärker die Diffusion im Inneren des Beinglases ist, also je dicker das Beinglas ist. Der so bedingte dunkle Ring an der Peripherie wird dadurch vermieden, dass man zur Herstellung des Reizfeldes ein grösseres Beinglas verwendet, das man vorne mit einem undurchsichtigen Lochschirm überklebt.

Fig. 3.

Möglichst knapp am Beinglase drehen sich die Messingscheiben S_1 , welche mit Präzision zugeschnitten sein müssen, so dass der freie Rand der kleineren Scheibe einerseits und der innere Rand des Hakens (H in Fig. 1) der grösseren Scheibe andererseits genau in eine Kreislinie zusammenfallen, welche das Reizfeld in zwei gleich grosse Teile teilt. Der durch das Reizfeld gehende Teil

dieses Kreises kann annähernd als gerade Linie betrachtet werden. Da binokular beobachtet wird, so muss die Entfernung dieser Scheiben vom Reizfelde so klein als möglich sein, da sonst die rechte und linke Hälfte des Reizfeldes wegen der parallaktischen Verschiebung des auf sie projizierten Sektorenrandes verschieden ausfielen. Die genaue Koinzidenz der Mitte des Reizfeldes mit den Rändern der Scheibe wird dadurch ermöglicht, dass das Stativ, welches das Beinglas trägt, um sehr geringe Beträge verschieblich ist. Der Beobachter betrachtet das Reizfeld, indem er sich gegen einen den Gesichtsumrissen angepassten Kopfhälter (Fig. 1 K) stützt. An Stelle eines Beobachterkastens verwende ich einen photographischen Balg (L) mit mehreren Blenden zum Abfangen falschen Lichtes. Das aus dem Blechzylinder entweichende falsche Licht wird mit einem grossen schwarzen Karton

(*OO*) abgebildet. Die Scheiben werden mit Hilfe der Transmission (*T*) von einem mit ausserordentlicher Konstanz laufenden grossen telegraphischen Uhrwerk mit Zentrifugalregulator gedreht. Da sich die Gleichgewichtslage der Messingscheiben bei jeder Einstellung ändert, so muss das labile Gleichgewicht der Scheibenvorrichtung jedesmal durch Einstellung eines Laufgewichtes (*L*) hergestellt werden, welches an der Achse der Scheiben angeschraubt wird. Bei einiger Übung nimmt eine Einstellung mit Ausbalanzierung etwa 1 Minute in Anspruch. Die Geschwindigkeit der Scheibenumdrehung ist sowohl durch verschiedene Transmissionscheiben, als auch durch Einstellung des Zentrifugalregulators abstufbar. Die Umdrehungszahlen werden mit einer Stoppuhr gezählt.

Als Fixationsvorrichtung (*F*) hat sich folgender Apparat¹⁾ sehr gut bewährt: ein Mignon-Glühlämpchen ist am Ende eines messingenen Doppelröhrenmantels eingeschlossen, der durch genügend viele Löcher der Luft Durchtritt gestattet und so übermässige Erhitzung verhindert. Im Inneren dieses Mantels ist eine Lochblende (*Bl*), vor derselben ein rotes Glas (*Gl*), und am anderen Ende der Röhre in Verbindung mit einem verschiebbaren Tubus ein Konvexglas (*C*). Dieses entwirft ein rotes Bild des glühenden Drahtes, welches schief von vorne oben her auf die Scheibenkombination S_1 projiziert wird. Dreht man das Lämpchen so, dass der glühende Draht in einer vertikalen Ebene liegt, so erscheint auf der vorderen Seite der Scheibe S_1 ein feiner roter Strich, den man in die Grenze der beiden Vergleichsfelder verlegt. Sobald der Ausschnitt der Scheibe vorbeirotiert, fällt das Bildchen aber nicht auf das weisse Glas, sondern auf das schwarze Papier, welches den unteren Teil desselben bedeckt, so dass keine Spur von dem roten Lichte in das Auge gelangt. Von der schwarzgebeizten Vorderfläche der Scheibe wird wenig rotes Licht reflektiert. Damit aber das Lämpchen nicht stark zu glühen braucht, bestreiche ich einen Teil des Umkreises, der Grenze zwischen äusserem und innerem Scheibenring entsprechend, mit Engelrot, welches einen ganz glanzlosen braunroten Belag bildet, auf welchem der rote Fixationsstrich sehr deutlich sichtbar ist. Gelangte das Licht der roten Marke während der ganzen Umdrehung der Scheibe ins Auge des Beobachters, so würde es beim Aufleuchten des Lichtfeldes ein störendes Nachbild hinterlassen; aus diesem Grunde

1) Erhältlich bei Herrn Universitätsmechaniker L. Castagna in Wien.

bestreiche ich bloss einen Teil des den Beinglasschirm durchquerenden Kreisringes mit Engelrot, so dass das rote Bildchen schon eine kurze Zeit vor dem Auftauchen des Lichtfeldes verschwindet und in letzterem Momente kein Nachbild mehr zurücklässt, wobei gleichwohl die Blickrichtung gewahrt bleibt. Hauptsache ist die genaue Einstellung der roten Fixationsmarke in der Medianlinie der Blickebene. Zur Ermöglichung einer so genauen Einstellung ist die Fixationsvorrichtung auf einem schweren Stative (Fig. 1 *St*) befestigt, welches Verschiebungen der Marke in zwei aufeinander senkrechten Richtungen mit Hilfe von Mikrometerschrauben gestattet. Die Lichtstärke der Rotmarke ist durch einen Schieber-Rheostaten (Fig. 1 *Sch*) variierbar, der in den das Lämpchen speisenden Stromkreis eingeschaltet ist. Es soll natürlich immer auf eine möglichst geringe Lichtstärke eingestellt werden; für weniger geübte Beobachter muss die Lichtstärke der Fixationsmarke etwas vergrössert werden.

Der Hauptwert dieser Versuchsanordnung besteht in der objektiv sichergestellten Gleichheit der Lichtstärke beider Photometerfelder.

Das Chronophotometer II zur Variation der Expositionsdauer und des Lichtstärkenverhältnisses der beiden Vergleichsfelder ist in meiner Abhandlung „Über den physiologischen Proportionalitätsfaktor“ ¹⁾ beschrieben.

Versuchsbedingungen.

Die Versuche werden im Dunkelzimmer durchgeführt. Als Adaptationszustand, welcher für die Dauer der Versuche am leichtesten konstant zu erhalten ist, wähle ich eine mittlere Helladaptation. Während der Versuchspausen brennt im Dunkelzimmer eine elektrische Glühlampe mit Mattglasbirne, deren Licht nicht direkt zum Auge des Beobachters gelangen kann. Dieser adaptiert sich dem von den schwarzen Wänden des Versuchszimmers diffus reflektierten Lichte. Ich bin aus guten Gründen davon abgekommen, zur Herstellung eines bestimmten Helladaptationszustandes weisses Licht zu verwenden, wie die von mir früher benützte „Adaptationsbrille“ ²⁾ oder den Garten'schen Schirm³⁾, da diese Behelfe immer eine

1) Zeitschr. f. Sinnesphysiol. Bd. 44 S. 136—138. 1909.

2) Pflüger's Arch. Bd. 123 S. 187.

3) S. Garten, Über die Wahrnehmung von Intensitätsveränderungen bei möglichst gleichmässiger Belichtung des ganzen Gesichtsfeldes. Pflüger's Arch. Bd. 118 S. 233. 1907.

mehr oder weniger bedeutende Blendung des Auges herbeiführen, welche sich zum mindesten in den ersten Augenblicken, während man in den Dunkelkasten blickt, bemerkbar macht. Es entspricht ja auch keinem natürlichen Zustande, dass das ganze Gesichtsfeld von gleichstarkem weissen Lichte erfüllt sei. Mehr aber als alle theoretischen Erwägungen war mir die praktische Erfahrung maassgebend, welche mir bewies, dass sich bei gewohnheitsmässigem Herumblicken in dem schwach beleuchteten Raume auch gleich nach der Abdunklung gar keine störenden Nachbilder zeigen, während nach künstlicher Helladaptation durch einen matt leuchtenden Beinglassschirm in den ersten Momenten nach der Abdunklung doch immer ein Lichtwogen im Gesichtsfelde bemerkbar ist. Über die Unbrauchbarkeit der von anderen Autoren zur Herstellung der Helladaptation vielfach benutzten Lichtflächen habe ich mich bereits andernorts geäussert¹⁾.

Zu Beginn jeder Versuchsreihe fasst der Beobachter, in den Dunkelkasten blickend, die Fixationsmarke ins Auge. Das Photometerfeld erscheint in der Mehrzahl der Beobachtungsreihen mit Pausen von etwa 6 Sekunden gewöhnlich viermal hintereinander, so dass der Beobachter im ganzen ungefähr eine halbe Minute in den Dunkelkasten zu blicken hat. Die Veränderung des Adaptationszustandes während dieser kurzen Zeit kommt nicht wesentlich in Betracht.

Während ich im Gegensatze zu anderen Beobachtern (z. B. Büchner), welche schon am Vortage das Rauchen unterlassen mussten, durch dieses gar keine Beeinflussung meiner Beobachtungsfähigkeit bemerkte, macht sich bei mir der Einfluss der Tageszeit auf letztere in so hohem Grade geltend, dass überhaupt nur die Nachmittagsstunden, je später, umso besser, zum Experimentieren verwendet werden konnten. Meine an Vormittagen erhaltenen Resultate sind sehr schwankend. Die gleiche Beobachtung ist auch schon früher von Kunkel²⁾ gemacht worden. Analoges zeigt sich bei anderen Leistungen. So ist es eine wohl den meisten Sports-

1) Pflüger's Arch. Bd. 123 S. 188.

2) A. Kunkel, Über die Abhängigkeit der Farbenempfindung von der Zeit. Pflüger's Arch. Bd. 9 S. 209. 1874: „Merkwürdig ist, dass ich am sichersten immer nachmittags beobachtete. Ich konnte kaum jemals an Vormittagen zu gut gelungenen Versuchen kommen.“

leuten bekannte Sache, dass man zu Dauerkraftleistungen, z. B. im Rudern, Ringen und Stemmen, am Nachmittag befähigter ist als am Vormittag. Zum Vergleiche darf man natürlich nicht die Vor- und Nachmittagsleistung eines Menschen heranziehen, welcher eine schwere Dauerarbeit schon am Morgen begonnen und sich dadurch ermüdet hat. Diese Ausnahme von der Regel „Morgenstunde hat Gold im Munde“ ist, nebenbei bemerkt, nicht etwa auf Neurasthenie zurückzuführen. Nach meiner und anderer mir bekannten Sportsleute Erfahrung ist eben die Maximalleistungsfähigkeit *ceteris paribus* am Nachmittag oder Abend grösser als in der Frühe; auch das Ermüdungsgefühl stellt sich beim Trainieren am Morgen früher ein als am Abend.

Zu den Versuchsbedingungen gehört auch die Grösse des Photometerfeldes.

Es schien mir wichtig zu erfahren, ob es eine bestimmte Grösse des Netzhautbildes gäbe, welche für die geplanten Studien besonders geeignet wäre. Zur Untersuchung dieser Frage mussten dem Auge während variabler kurzen Zeiten Lichtfelder von variabler Grösse und Lichtstärke dargeboten werden. Dies geschah mit Hilfe eines besonderen Apparates, welcher in meiner Abhandlung „Über den physiologischen Proportionalitätsfaktor“ beschrieben und abgebildet ist ¹⁾.

Mit Hilfe dieses Apparates war die Frage zu beantworten: Wie gross muss das Reizfeld sein, damit es bei kurzdauernder Belichtung möglichst homogen erscheine? Welchen Einfluss hat darauf die Expositionszeit, die Intensität und die Farbe des Reizlichtes?

Meine Versuche gaben auf diese Fragen die Antwort, dass das fixierte Reizfeld bei kurzdauernder Exposition oder in den ersten Momenten einer längerdauernden Exposition überhaupt niemals ganz homogen erscheint, dass dieser Bedingung aber noch am besten entsprochen wird, wenn das Netzhautbild des Photometerfeldes nicht grösser als die Fovea (etwa $1\frac{1}{2}^\circ$ im Durchmesser) ist. Die Beobachtungen wurden mit hell adaptiertem Auge gemacht.

Die Erscheinungen, welche ich bei kurzdauernder oder in den ersten Momenten einer längerdauernden Exposition des Reizfeldes

1) l. c. S. 67—71.

beobachtete, waren genau dieselben, welche S. Exner¹⁾ unter ähnlichen Umständen wahrgenommen hat: Erscheint das Reizfeld unter einem grösseren Gesichtswinkel als etwa $1\frac{1}{2}^{\circ}$, so sieht man den dunklen Maxwell'schen Fleck, umgeben von dem hellen Löwe'schen Ring, welcher mir gleich Exner deutlich rhombisch erscheint²⁾, während ihn andere Beobachter oval oder rund zu sehen behaupten. Wenn ich die Lichtstärke durch Erweiterung des Spaltes (*Sp*) steigere, so sehe ich bei kurzdauernder Exposition dieselbe Erscheinung, welche S. Exner durch Zitterlicht hervorrief und mit folgenden Worten beschrieb³⁾: „Bei gesteigerter Intensität, etwa jener einer weissen Wand bei diffusem Tageslichte, wird der Helligkeitsunterschied zwischen Macula lutea und ihrer Umgebung sehr gering, während der Löwe'sche Ring als ziemlich helle (gewöhnlich rhombische) Zeichnung noch bestehen bleibt. Bei weiterer Intensitätszunahme verschwindet die Macula als dunkler Fleck vollständig und zeigt sich heller als ihre Umgebung. Ruft man bei dieser Intensität — indem man etwa den mit hellen weissen Wolken bedeckten Himmel benützt — das Zitterlicht ohne Gebrauch des blauen Glases hervor, so tritt ausser dem auch unter diesen Bedingungen noch sichtbaren Bilde der hellen Macula noch auffallend grell die Fovea centralis als glänzende Kreisscheibe hervor. — — — Bei Benützung gelber Gläser tritt diese Erscheinung der Fovea ebenfalls sehr deutlich auf.“

Diese zuletzt erwähnte Erscheinung war so auffallend, dass ich anfangs glaubte, das Nachbild der roten Marke habe damit etwas zu tun, und hauptsächlich aus diesem Grunde die zentrale rote Fixationsmarke durch vier periphere violette Leuchtmarken ersetzte. Aber auch jetzt erschien im Zentrum des weissen Feldes ein leuchtend heller Punkt. Die Grenzen der einzelnen dunklen und hellen Ringe sind nicht genau bestimmbar, da die Übergänge allmählich sind.

Bei maximaler Öffnung der Blende hatte das Photometerfeld einen Durchmesser von 15 cm, d. h. es erschien unter einem Ge-

1) Über die zu einer Gesichtswahrnehmung nötige Zeit. L. c. S. 29 des Separatabdr. und S. Exner, Über einige neue subjektive Gesichtserscheinungen. Pflüger's Arch. Bd. 1 S. 375—377.

2) Vgl. R. Stigler, Über die Unterschiedsschwelle im ansteigenden Teile einer Lichtempfindung S. 183. L. c.

3) S. Exner, Über einige neue subjektive Gesichtserscheinungen. L. c. S. 376.

sichtswinkel von 28° ; bei Verwendung dieses grossen Lichtfeldes schien mir die Peripherie jenseits des Löwe'schen Ringes ebenfalls konzentrische Ringe von verschiedener Helligkeit aufzuweisen, deren deutliche Unterscheidung aber wegen der peripheren Lage nicht möglich ist. Bei Verwendung farbiger Reizlichter zeigt sich die Differenzierung des Phänomens am deutlichsten mit blauem Lichte und am undeutlichsten mit rotem Lichte.

Das Phänomen scheint mir monokular und binokular gleich und im ganzen annähernd symmetrisch zu sein.

Da auch eine Reizfläche von geringerer Winkelgrösse als die Fovea bei kurzdauernder Exposition nicht absolut homogen erscheint, so ist eine Regel für die Grösse der zu kurzdauernden Lichtreizen verwendbaren Reizflächen nicht aufstellbar. Man muss sich eben bei Verwendung über die Fovea hinausreichender Reizflächen daran gewöhnen, nicht zwei homogene, sondern zwei in gleicher Weise differenzierte symmetrische Bilder miteinander zu vergleichen. Und dies macht in praxi um so weniger Schwierigkeiten, als man die Differenzierung nur dann deutlich bemerkt, wenn man die Aufmerksamkeit darauf konzentriert.

Bei kurzdauernder Exponierung farbiger Lichter tritt in auffallender Weise die Erscheinung zutage, dass sich mit der Expositionsdauer auch der Farbenton ändert¹⁾. Bei verschieden langer Exposition gelblichweisser Vergleichsfelder tritt manchmal eine so auffallende Farbdifferenz zutage, dass dadurch die Vergleichung ihrer Helligkeit sehr erschwert wird, und zwar erscheint in vielen Fällen der länger exponierte, subjektiv hellere Halbkreis rötlich, der kürzer exponierte, subjektiv dunklere mehr graugrün.

Zur Deutung der chronophotischen Untersuchungsergebnisse ist die Kenntnis des zeitlichen Verlaufes und der Maximalzeit der Lichtempfindungen, welche durch die verwendeten Reize erzeugt werden, nötig. Bezüglich der Versuche, den Verlauf der Lichtempfindungskurve und die Maximalzeit zu bestimmen, verweise ich auf meine Abhandlung: „Über den physiologischen Proportionalitätsfaktor“²⁾.

1) Die gleiche Erscheinung hat auch Kunkel (a. a. O. S. 213) beschrieben. Er sah z. B. Grün in der Nähe des Maximums der Helligkeitskurve gelb, dann gelblichweiss, nach dem Maximum erst grün.

2) l. c. S. 123 ff.

Ich bediente mich zu dem genannten Zwecke des a. a. O. beschriebenen Chronophotometers II, indem ich die relative Helligkeit eines der Expositionszeit nach variablen Feldes von konstanter Lichtstärke mit der eines Messfeldes von konstanter Expositionszeit, aber variabler und in jedem Falle grösserer Lichtstärke verglich. Um aber auch die Maximalzeit der Lichtreize, welche mir durch die Versuchsanordnung des Chronophotometers I geboten werden, am selben Apparate zu ermitteln, musste ich mich, da dieser Apparat eine Variation des Lichtstärkeverhältnisses der beiden Vergleichsfelder nicht gestattet, der Methode Kunkel's¹⁾ bedienen; dabei wird ein Reizfeld, dessen Expositionszeit variiert wird, verglichen mit einem Messfelde, welches ebenfalls von konstanter, aber grösserer Lichtstärke ist als das Reizfeld, und dessen relative Helligkeit gleichfalls durch Variation seiner Expositionszeit geändert wird. Selbstverständlich ist bei Gleichheit der relativen Helligkeit beider Felder die Expositionszeit des Messfeldes zufolge dessen grösserer Lichtstärke immer kleiner als die des Reizfeldes. Um zwei Felder von verschiedener Lichtstärke am Chronophotometer I anzubringen, kittete ich vor das zur Herstellung der Photometerfelder verwendete Beinglas einen Objektträger, dessen eine geradlinig begrenzte Hälfte so stark und gleichmässig als möglich matt geschliffen ist, so dass die eine Hälfte des Photometerfeldes dadurch um einen mässigen Bruchteil dunkler ist als die andere. Die Maximalzeit dieses dunkleren Lichtes konnte sodann nach Kunkel's Methode bestimmt werden. Die Maximalzeit des helleren ist dann (nach S. Exner's Ermittlungen) als etwas geringer zu betrachten.

Zu den Versuchsbedingungen gehört weiterhin die individuelle Veranlagung des Sehapparates des Beobachters. Gerade im Gebiete des Simultankontrastes, um den es sich im folgenden hauptsächlich handelt, herrscht ja, wie es scheint, grosse persönliche Verschiedenheit.

Schliesslich hebe ich noch ganz besonders hervor, dass alle folgenden Untersuchungen binokular ausgeführt wurden.

1) l. c. S. 117.

I. Teil.

1. Unterschied der relativen Helligkeit grosser und kleiner Flächen von derselben Lichtstärke.

Die beiden Hälften eines homogenen Lichtfeldes erscheinen normalerweise gleich hell; sie erscheinen aber nicht von gleicher, sondern von etwas geringerer Helligkeit als eine Hälfte oder ein noch geringerer Teil der gleichen Lichtfläche, für sich allein dargeboten. Von diesem, übrigens längst bekannten Verhalten kann man sich durch einen sehr einfachen Versuch überzeugen: wenn man nämlich von einem völlig dunklen Zimmer aus durch eine Spalte der Fensterläden des Nachts einen kleinen Teil des Firmamentes betrachtet, so erscheint derselbe von auffallend grosser relativer Helligkeit; öffnet man nun die Fensterläden, so dass man das ganze Firmament überblickt, so erscheint dieses viel dunkler. Je geringer der Grössenunterschied der beiden gleich lichtstarken Vergleichsfelder ist, umso geringer ist auch der Unterschied ihrer scheinbaren Helligkeit. Dieser ist daher auch beim Vergleiche eines Photometerfeldes und einer für sich allein exponierten Hälfte desselben sehr gering. Er wird aber sofort deutlich, wenn man einen grösseren Teil des Feldes mit einem kleinen Teil desselben vergleicht, indem man einen schwarzen Schirm mit zwei entsprechenden Ausschnitten vor das Photometerfeld setzt. Daraus ist zu schliessen, dass gleichzeitig erregte Nachbarpartien des Auges eine wechselseitige Hemmung ausüben.

E. Hering äussert sich zu dem besprochenen Phänomen in folgender Weise ¹⁾: „Jeder beliebige, innerhalb einer solchen Fläche liegende Einzelteil derselben, lässt sich als ein umschlossenes und die übrige Fläche als das umschliessende Feld ansehen und steht also unter dem, seine Helligkeit mindernden Einflusse der Lichtstärke dieses umschliessenden Feldes, welche hier gleich gross ist wie seine eigene. Infolgedessen wird er minder hell erscheinen, als er erscheinen würde, wenn seine Umgebung eine kleinere oder gar keine Lichtstärke besässe. Da dies von allen Einzelteilen der Fläche gilt, so wird die ganze Fläche minder hell erscheinen, als ohne die gegenseitige verdunkelnde Wechselwirkung ihrer Einzelteile der Fall sein würde.“

1) E. Hering, Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn S. 125. 1907.

E. Hering wendet sich dagegen, diese Erscheinung auf wechselseitige Hemmung der belichteten Elemente zu beziehen.

A. v. Tschermak¹⁾ bezeichnet die wechselseitige Hemmung der einzelnen Teile eines Lichtfeldes als „Binnenkontrast“.

Bei kurzdauernder Exposition eines Lichtfeldes zeigt sich noch ein anderes auffallendes Phänomen: es erscheint nämlich der Rand heller als die Mitte. Die Teile, welche in der Mitte liegen, hemmen sich gegenseitig, die am Rande gelegenen Teile aber unterliegen einem derartigen hemmenden Einflusse nur an ihrer zur Mitte gekehrten Seite, während er an der äusseren Seite fehlt.

In gleichem Sinne erklärt dies auch Tschermak mit folgenden Worten²⁾: „Die Erhellung der an Schwarz bzw. Dunklergrau grenzenden Randpartien ist meines Erachtens darauf zurückzuführen, dass die bezüglichen Elemente des Sehorganes durch Kontrastwirkung oder Schwarzinduktion seitens ihrer gleichfalls weisserregten Nachbarn, also durch Binnenkontrast, eine relativ geringere Beeinträchtigung ihrer Weisserregung erfahren, als die allseitig von ‚Konkurrenten‘ umgebenen Elemente. Die scheinbaren lokalen Unterschiede innerhalb heller oder farbiger Flächen beruhen demnach auf einer geringeren kontrastiven Depression der Ränder, sie sind sozusagen das Negativprodukt des Binnenkontrastes.“

Eine „indirekte Verstärkung von Weisserregung durch benachbarte Schwarzerregung“, eine „eigentliche Weissinduktion“, stellt hingegen Tschermak in Abrede. Demgegenüber werde ich in einem späteren Kapitel zeigen, dass dem schwarzen Hintergrunde doch wahrscheinlich auch ein aktiver Einfluss auf die Randhelligkeit zukommt.

Von dem Gesetze der wechselseitigen Hemmung gleichzeitig erregter Nachbarpartien scheint es aber eine Ausnahme zu geben: diese wird von solchen Reizfeldern gebildet, deren Helligkeit an der Grenze der Wahrnehmbarkeit steht.

Die Wahrnehmbarkeit solcher Felder hängt von ihrer Grösse, und zwar nach S. Exner³⁾ in dem Sinne ab, dass die zur Wahr-

1) A. v. Tschermak, Über Kontrast und Irradiation. *Ergebn. d. Physiol.* Jahrg. 2 Abt. 2 S. 745. 1903.

2) *Ibidem* S. 772.

3) S. Exner, Studien auf dem Grenzgebiete des lokalisierten Sehens. *Pflüger's Arch.* Bd. 73 S. 132—145. 1898. Es ist besonders zu bemerken,

nehmbarkeit erforderliche Grösse eines solchen Netzhautbildes annäherungsweise verkehrt proportional dem Quadrate, bzw. wenn die Netzhautbilder sehr klein sind, der ersten Potenz der Lichtstärke ist. Ein durch geringe Lichtstärke und Grösse eben unterschwelliges Quadrat kann über die Schwelle treten, wenn man noch ein zweites gleich grosses und gleich lichtstarkes Quadrat an einer Seite des ersten Quadrates ansetzt, so dass man jetzt ein Rechteck sieht. „Es wirkt also der unmerkliche Effekt des Netzhautbildes des ersten Quadrates steigernd auf den Effekt des zweiten und umgekehrt. Beide Netzhautwirkungen, für sich unmerklich, haben sich gegenseitig über die Schwelle gehoben. Der Erfolg ist ein solcher, als würde eine Einwirkung einer Netzhautstelle auf die benachbarte stattgefunden haben.“¹⁾

Es besteht also, wie die Beobachtungen lehren, ein Unterschied in der Wechselwirkung benachbarter erregter „Netzhaut“stellen bei an der Schwelle stehender und bei grösserer Helligkeit. Im ersten Falle tritt eine wechselweise Förderung — „Bahnung“ im Sinne Exner's — im zweiten Falle eine Hemmung ein.

Nach S. Exner's Hypothese²⁾ ist die Bahnung an die leitende Zwischensubstanz gebunden, welche zwischen den Endbäumchen der Zapfen- und Stäbchen-Neuronen und den Dendriden der bipolaren Zellen liegt. „Die Erregungen zweier und vieler benachbarter Zapfen werden sich für die Wahrnehmbarkeit unterstützen können, indem der durch die Reizung des ersten gesetzte Zustand der Zwischensubstanz durch die des zweiten verstärkt wird, wie das auch in der Achsenzylindersubstanz des peripheren Nervensystems der Fall ist (Summation der Reize). Die bipolare Zelle erhält dann stärkere Impulse und führt sie dem Sensorium zu. Ein an sich unsichtbares Feld wird durch den Ansatz eines ebensolchen zweiten sichtbar werden können . . .“³⁾

dass die Netzhautbilder der von Exner verwendeten Testobjekte eine Grösse von 0,05, 0,1 und 0,15 qmm hatten, sich somit über viele Zapfen erstreckten. Sie lagen also oberhalb jener Grenze, unterhalb deren der Gesichtswinkel keinen Einfluss auf die scheinbare Grösse hat. Die Erhöhung der relativen Helligkeit ist demnach in diesem Falle nicht durch Überdeckung der Aberrationsgebiete zu erklären.

1) Ibidem S. 120 und 121.

2) Ibidem S. 149 ff.

3) Ibidem S. 151.

Den gegenteiligen Vorgang der Hemmung verlegt S. Exner¹⁾ in die sogenannten „horizontalen Zellen“ der äusseren plexiformen Schicht. Exner stellt sich vor, „dass diese Zellen bei Belichtung der betreffenden Netzhautstelle in Erregung geraten und ihre Fortsätze nun auf die benachbarte leitende Zwischensubstanz, in der sie endigen, hemmend einwirken. Dabei möge es dahingestellt bleiben, ob diese Zellen vielleicht durch das Licht direkt reizbar sind oder ob einzelne ihrer anscheinend gleichartigen Fortsätze, wie Dendriden wirkend, durch die Zwischensubstanz erregt werden und dann unter Vermittlung des Zellkörpers die zahlreichen Endbäumchen in Aktion setzen“. Ferner nimmt Exner an, „dass diese Hemmungswirkungen bei sehr geringen Netzhautreizen verschwindend sind und bei Zunahme der Lichtintensität bis zu dem Optimum der Lokalisation erst langsam, dann rasch ansteigen“. Demnach würde die hemmende Wirkung (der horizontalen Zellen) erst bei höherer Lichtstärke des Reizes voll einsetzen, so dass bei sehr geringer Lichtstärke nur die Bahnung (durch die Zwischensubstanz) wirksam ist, die aber bei stärkerer Erregung durch die Hemmung übertroffen würde.

Es liegt die Vermutung nahe, dass vielleicht auch dem Dämmerungs- und Tagessehen, bzw. den dabei beteiligten Apparaten, ein wesentlicher Einfluss auf das Auftreten der Bahnung oder Hemmung zukomme, da die erstere besonders im Dämmerungssehen aufzutreten scheint. Die Hemmung aber kommt sowohl bei Hell- als auch bei Dunkeladaptation vor; ein kleines Feld erscheint bei Dunkeladaptation heller als ein grosses von der gleichen Lichtstärke.

II. Teil.

Der metaphotische Kontrast.

1. Grundversuche.

Grundlegende Aufklärungen über die Wechselbeziehungen der Lichtreaktion benachbarter Netzhautteile geben chronophotische Untersuchungen unmittelbar hintereinander belichteter Nachbarfelder.

Als Grundversuche mögen in dieser Hinsicht die folgenden gelten:

1. Grundversuch. Ich belichte die rechte Hälfte des elliptischen Lichtfeldes meines Chronophotometers I während 0,05 Sek.; im gleichen Momente, da diese Hälfte abgedunkelt wird, erscheint

1 Ibidem S. 152—153.

die andere (linke) Ellipsenhälfte und wird ebenfalls während 0,05 Sek. belichtet. Von vornherein müsste man erwarten, dass beide Hälften der Ellipse, da sie ja gleich lichtstark sind und gleich lang exponiert werden, vollkommen gleich aussehen würden. In Wirklichkeit aber ist ein geradezu verblüffender Unterschied vorhanden: das zuerst exponierte (rechte) Feld scheint überhaupt nur an der äussersten Peripherie aufzuleuchten, sein übriger, in der Nähe der geradlinigen Grenze gegen Feld II gelegener Anteil aber ganz dunkel zu bleiben. Selbst bei grösster Aufmerksamkeit ist es nicht möglich, auch nur einen Moment das ganze Feld I gleichmässig hell zu sehen; man sieht eben nur einen entweder linsenförmigen (Fig. 4) oder halbmondförmigen (Fig. 5) Anteil der Peripherie erhellt, der von der Mitte (Grenze gegen Feld II) her verschlungen wird, so dass am längsten eine Sichel an der Peripherie besteht, die für kurze Zeit auch mit dem Felde II zugleich sichtbar wird¹⁾; letzteres erscheint in allen seinen Teilen von gleicher Helligkeit, so wie man es normalerweise zu erwarten hat. Eine schwerer zu beobachtende Begleiterscheinung ist die, dass Feld II nicht so hell erscheint wie der helle (periphere) Teil von Feld I.

Fig. 4 bzw. Fig. 5 zeigen diese Erscheinung.

2. Grundversuch. Beide Felder werden während 0,15 Sek. unmittelbar hintereinander exponiert. Das Feld I erscheint homogen in maximaler Helligkeit; im gleichen Momente, da Feld II aufleuchtet, wird Feld I verdunkelt. Das Bild verschwindet wieder von der Mitte her, so dass am längsten ein peripherer heller Halbmond besteht. Feld II erscheint nun auffallend dunkler als Feld I. Es verschwindet natürlich ohne jene Zeichnung, die Feld I beim Verschwinden zeigt.

Diese beiden Versuche, deren auffallendes Ergebnis noch deutlicher wird, wenn man vergleichsweise eine Ellipsenhälfte während einer gleichen Zeit für sich allein exponiert, ohne dass darauf die zweite Hälfte folgt, erklärt sich in folgender Weise:

Im zweiten Versuche werden Feld I und II übermaximal hintereinander exponiert, von Feld I hat sich während 0,15 Sek. ein in

1) Erscheint der helle Randsaum sehr schmal, so ist der äussere Rand des medianen dunklen Streifens immer nach aussen zu konvex (Fig. 5); erscheint der helle Randsaum breiter, so ist der äussere Rand des dunklen Streifens in vielen Fällen nach aussen zu konkav, so dass der helle Anteil die Gestalt einer Bikonvexlinse annimmt (Fig. 4).

allen seinen Teilen gleichhelles Anschauungsbild entwickelt, die relative Helligkeit aller einzelnen Teile von Feld I hat ihr Maximum in dieser Zeit erreicht. Die durch Feld I gelieferte Erscheinung überdauert den objektiven Lichtreiz; die so entstehende Nachempfindung, das „Nachbild“ im Sinne Exner's, verschwindet aber plötzlich, sobald der Nachbarreiz auftritt, und zwar von der Grenzlinie der beiden Felder her. Zuerst verdunkelt sich jener Teil, welcher der nunmehr belichteten Nachbarschaft am nächsten liegt. So kommt es, dass am längsten ein Saum an der äussersten Peripherie (also zufolge der elliptischen Gestalt der Reizflächen ein Halbmond) erhellt bleibt.

Feld II erscheint, so wie wir es bei Belichtung eines homogenen Feldes gewohnt sind, in allen seinen Teilen gleichmässig und gleichzeitig hell und verschwindet, indem die Helligkeit aller seiner Teile gleichmässig und gleichzeitig abnimmt. Aber das ganze Feld II erscheint dunkler als Feld I, obwohl es gleich stark und gleich lang belichtet wird. Diese relative Dunkelheit von Feld II kann man sich nur durch Herabsetzung der Erregbarkeit des Feldes II durch vorgehende Belichtung der Nachbarschaft erklären.

In gleicher Weise ist Versuch 1 auszulegen, den ich wegen der grösseren Deutlichkeit des geschilderten Phänomens an die Spitze gestellt habe; er unterscheidet sich vom Versuch 2 durch die geringere Expositionszeit der beiden Felder. Infolge dieser erscheint die zuerst exponierte Ellipsenhälfte auch bei grösster Aufmerksamkeit nicht einen Augenblick in toto homogen hell, sondern es gibt einen medialen, mehr oder weniger breiten Anteil des Feldes I, welcher überhaupt nur von sehr geringer relativer Helligkeit erscheint. Exponiert man aber eine Hälfte der Ellipse für sich allein während der gleichen Zeit von 0,05 Sek., so leuchtet das Feld in toto homogen in sehr beträchtlicher Helligkeit auf. Es ist also durch das Erscheinen des Nachbarreizes II die Empfindung, welche durch Reiz I hervorgerufen wurde, unterdrückt worden, noch ehe sie jene Höhe erreichen konnte, welche ihr nach Lichtstärke und Expositionszeit zukommt.

Daraus geht vor allem mit Sicherheit hervor, dass, wie S. Exner¹⁾ schon vor langem behauptet hat, die Wahrnehmung sehr kurz exponierter Bilder „vorzüglich durch die relativ lange

1) S. Exner, Über die zu einer Gesichtswahrnehmung nötige Zeit. L. c. S. 12 und 17.

Wirkung des positiven Nachbildes“ zustande kommt. Indem nun dieses „Nachbild“ durch den Nachbarreiz vernichtet wird, zeigt sich nur eine sehr rudimentäre Wirkung des zuerst dargebotenen Lichtreizes. Die ausserordentlich geringe relative Helligkeit seines in der Nähe des Feldes II gelegenen Anteiles bei Versuch 1 gegenüber der relativen Helligkeit des gleichen Feldes, wenn es gleich lang für sich allein dargeboten wird, d. h. wenn sich das Exner'sche Nachbild voll entwickeln kann, ist nur dadurch zu erklären, dass die Empfindung, welche durch den 0,05 Sek. dauernden Lichtreiz erregt wurde, auch nach dem Aufhören des objektiven Reizes ansteigen würde, wenn das Exner'sche „Nachbild“ seinen normalen Ablauf nähme.

Zur Nomenklatur ist folgendes zu bemerken: der Teil der Primärempfindung, welcher den Reiz selbst überdauert, wurde von S. Exner mit der Bezeichnung „positives Nachbild“ belegt. Die Terminologie hat seit jener Zeit insofern eine Wendung erfahren, als man jetzt als „Nachbilder“ im engeren Sinne die nach der Primärempfindung auftretenden sekundären Lichtempfindungen bezeichnet, die von der Primärempfindung einerseits, voneinander anderseits meist durch dunkle Intervalle getrennt sind.

Wie mir scheint, herrscht aber in der physiologisch-optischen Terminologie noch kein festes Übereinkommen der einzelnen Autoren. Gerade in der Benennung der einzelnen Phasen der Lichtempfindung besteht eine recht missliche Verwirrung, die schon zu manchem Missverständnisse Anlass gegeben hat.

G. Martius¹⁾ bezeichnet das Exner'sche Nachbild, gegen diesen Ausdruck polemisierend, als „die über den Reiz hinausdauernde aktuelle Empfindung“. So viel steht fest, dass sich für den den Lichtreiz überdauernden Anteil der Primärempfindung überhaupt kein bestimmter Ausdruck in der optischen Literatur eingebürgert hat. Da die Primärempfindung, welche durch einen kurzdauernden Lichtreiz erregt wird, hauptsächlich durch den, den objektiven Reiz überdauernden Anteil der subjektiven Erregung zustande kommt, so ist vielleicht gegen die Exner'sche Bezeichnung „positives Nachbild“ für jenen Teil der Lichtempfindung einzuwenden, dass es sich hier nicht um ein Nachbild, sondern um das primäre Bild handelt. Jedenfalls wird die Bezeichnung „positives Nachbild“ gegenwärtig von den meisten Autoren in einem anderen Sinne gebraucht als zu jener

1) G. Martius, Über die Dauer der Lichtempfindungen. Beitr. z. Psychol. u. Philos. Bd. I S. 291. 1902.

Zeit, da S. Exner seine grundlegenden Untersuchungen über den Verlauf der Lichtempfindung anstellte.

Wie sich aus den mitgeteilten Grundversuchen bereits ergab und im folgenden noch eingehender gezeigt werden wird, erreicht die durch einen sehr kurz dauernden und nicht besonders starken Lichtreiz erzeugte Empfindung ihr Maximum erst nach einer Zeit, welche die Expositionszeit des Lichtreizes um ein vielfaches überreffen kann. So ist z. B. anzunehmen, dass das Anschauungsbild durch einen elektrischen Funken beleuchteter Gegenstände erst verhältnismässig lange nach dem Verschwinden des elektrischen Funkens zustande kommt. Man denke sich eine bei stockfinstrer Nacht durch den Blitz beleuchtete Landschaft! Das Bild derselben kommt sicherlich erst nach dem Verschwinden des Blitzes zur vollen Entwicklung. Gleichwohl würde die Ausdrucksweise befremden, man habe die Landschaft nicht im Bilde, sondern bloss im Nachbilde gesehen. Übrigens könnte man bei kurzdauernder Belichtung in der Regel nicht entscheiden, ob man ein Bild oder ein „positives Nachbild“ gesehen habe, und man spricht auch in einem solchen Falle ganz allgemein von einem „Bilde“, ohne sich um die zeitliche Differenz zwischen diesem und dem Reize zu kümmern. Ich glaube darum gut zu tun, wenn ich für die durch irgendeinen Lichtreiz erzeugte primäre Gesichtsempfindung den Ausdruck „Bild“ (richtiger „Anschauungsbild“ im Gegensatze zum Erinnerungsbilde) beibehalte. Jenen Teil des Bildes, welcher gleichzeitig mit dem objektiven Reize besteht, nenne ich **homophotisches**, denjenigen Teil desselben, welcher den objektiven Reiz überdauert, **metaphotisches Bild**.

Ich bezeichne also im folgenden das Exner'sche positive Nachbild als metaphotisches Bild. Von entsprechend kurz beleuchteten Gegenständen entsteht überhaupt nur ein metaphotisches Bild.

Das metaphotische Bild ist gegenüber dem homophotischen Bilde physiologisch dadurch besonders gekennzeichnet, dass es durch einen Nachbarreiz ausgelöscht werden kann.

Die bei meinen chronophotischen Grundversuchen zutage getretene Abdunkelung des metaphotischen Bildes durch einen optischen Nachbarreiz ist zweifellos eine Erscheinung des Umgebungskontrastes. Dieser wurde bisher nur als gegensätzliche Um-

stimmung eines Teiles des „Auges“ durch und während gleichzeitiger Lichtreizung der Nachbarschaft aufgefasst und untersucht, die beiden Bezeichnungen „Umgebungs-kontrast“ und „Simultankontrast“ daher geradezu als Synonima gebraucht. Auch Tschermak¹⁾ definiert jenen als „gegensätzlichen Einfluss gleichzeitiger optischer Eindrücke aufeinander“.

Aus den hier vorliegenden chronophotischen Untersuchungen ergibt sich indessen die Notwendigkeit, den Umgebungs-kontrast analog dem „Bilde“ in einen homophotischen und metaphotischen zu teilen, welch letzteren ich der Kürze halber als „Metakontrast“ bezeichnen will.

Unter homophotischem Kontraste oder Simultankontrast im engeren Sinne verstehe ich die gegensätzliche Beeinflussung durch gleichzeitige optische Reize erzeugter Gesichtsempfindungen, unter metaphotischem Kontraste oder „Metakontrast“ die gegensätzliche Beeinflussung eines metaphotischen Bildes durch einen die Nachbarschaft treffenden optischen Reiz. Ein Beispiel des ersteren bildet die Abhängigkeit der relativen Helligkeit eines homogenen Lichtfeldes von dessen Grösse, Beispiele des letzteren die geschilderten chronophotischen Grundversuche.

Bezüglich der Bezeichnung der beiden miteinander zu vergleichenden Photometerfelder läge es nahe, von induzierendem und induziertem oder von „kontrasterregendem“ und „kontrastleidendem“ Felde zu sprechen. Da aber die Induktion, die von beiden Reizen ausgeübt wird, eine wechselseitige ist, so ziehe ich es vor, das zuerst exponierte Feld kurz als „Feld I“, das später exponierte Feld als „Feld II“ zu bezeichnen. Endlich will ich der Kürze halber die in Fig. 4 und 5 gezeichneten optischen Bilder „Metakontrastbilder“ nennen. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass das metaphotische Bild des zuerst belichteten Feldes an der Grenze gegen das später belichtete Feld einen breiten dunklen Streifen, an der jenem abgewendeten Seite, also aussen an der Grenze gegen den dunklen Hintergrund, einen linsen- oder halbmondförmigen helleren Anteil aufweist.

Aus den beiden Grundversuchen ergeben sich die folgenden Schlüsse:

1) A. v. Tschermak, Über Kontrast und Irradiation. Asher-Spiro's Ergebn. d. Physiol. Jahrg. 2 Abt. 2 S. 726. 1903.

1. Der einen Lichtreiz überdauernde Anteil der Primärempfindung, das metaphotische Bild, kann durch einen die Nachbarschaft der zuerst gereizten Netzhautstelle treffenden Lichtreiz vernichtet werden, und zwar verdunkeln sich zuerst diejenigen Teile des metaphotischen Bildes des erstbelichteten Feldes, welche an der Grenze gegen das später belichtete Netzhautfeld liegen. Von der Berührungslinie aus schreitet die Verdunklung des metaphotischen Bildes des Feldes I gegen die Peripherie weiter, so dass von ihm zuletzt nur mehr ein peripherer Saum erhellt bleibt.

Daraus folgt, dass ein Lichtreiz, der irgendeine Stelle des somatischen Gesichtsfeldes trifft, auf die Nachbarschaft der gereizten Stelle eine Hemmung ausübt, welche unter bestimmten Umständen eine daselbst bestehende Erregung zu vernichten vermag.

2. Die von einer erregten Netzhautstelle ausgehende Hemmung äussert sich ferner dadurch, dass ein Lichtreiz, welcher die Nachbarschaft einer durch vorhergehende Belichtung erregten Netzhautstelle trifft, eine Empfindung von geringerer Helligkeit auslöst, als wenn er für sich allein auf die gleiche Stelle während einer gleichen Zeit einwirkt.

Erregung eines Teiles der Netzhaut setzt also die Erregbarkeit der Nachbarschaft herab, und zwar besteht diese Herabsetzung der Erregbarkeit auch noch nach dem Verschwinden des primären Reizes.

3. Die Hemmung breitet sich nicht momentan über die Nachbarschaft der gereizten Partie aus, sondern sie schreitet allmählich vorwärts. Dies zeigt sich daran, dass die Verdunklung des metaphotischen Bildes sichtlich von der Mitte gegen die Peripherie vorwärts schreitet und sich so der dunkle Streifen desselben allmählich verbreitert.

4. Die durch einen untermaximalen Reiz erregte Lichtempfindung steigt auch nach dem Verschwinden des objektiven Reizes noch weiter an.

Es fragt sich noch, unter welchen Umständen diese Sätze Gültigkeit haben. Welchen Einfluss haben die Grösse der Felder und der schwarze Hintergrund, welchen die Expositionsdauer und die Lichtstärke der beiden Vergleichsfelder auf die wechselseitigen Hemmungswirkungen? Welchen Einfluss hat darauf ein zeitlicher oder räumlicher Zwischenraum zwischen den beiden Reizen? Endlich ergeben sich noch wichtige Fragen über das Ansteigen der den objektiven Reiz überdauernden Lichtempfindung.

2. Die räumliche Ausbreitung des metaphotischen Kontrastes.

Versuche: Die linke Hälfte des Reizfeldes wird immer zuerst, und zwar während 0,032 Sek., unmittelbar darauf die rechte während 0,064 Sek. belichtet. Distanz der Augen vom Reizfelde in allen Versuchen = 32 cm.

1. Versuch: Reizfeld eine liegende Ellipse. Horizontale Achse = 13,5, vertikale Achse = 8,8 mm. Beobachtung: Es tritt mit ausserordentlicher Deutlichkeit die in Fig. 4 gekennzeichnete Erscheinung auf: von Feld I leuchtet nur ein recht schmaler, peripherer, anscheinend bikonvexer Anteil in schätzungsweise maximaler Helligkeit auf, der übrige Anteil von Feld I erscheint mir, je weiter gegen die Grenzlinie zu, um so dunkler, in der unmittelbaren Nähe der Grenzlinie auch bei aufmerksamster Beobachtung in jedem Zeitmoment fast schwarz. Dieser dunkle mediale Streifen hat lateral einen konkaven Rand und ist im ersten Moment in der Mitte etwa $\frac{2}{3}$ mal so breit als die halbe horizontale Achse der Ellipse, also ungefähr 4,5 mm breit. Die Abschätzung ist wegen der Plötzlichkeit der Erscheinung sehr schwer, und wenn ich nicht meine ganze Aufmerksamkeit auf die linke Hälfte konzentriere, so erscheint mir der schwarze Teil derselben noch breiter.

2. Versuch: Reizfeld ein Rechteck von 8,5 mm Höhe und 2,7 mm Breite. Von der linken Hälfte (Feld I) leuchtet an der Peripherie ein etwa $\frac{1}{3}$ mm breiter Streifen in schätzungsweise maximaler Helligkeit auf; es erscheint nur ein sehr schmaler, kaum 1 mm breiter Teil an der Grenzlinie schwarz; jedenfalls ist die schwarze Zone jetzt viel schmaler als beim ersten Versuche.

3. Versuch: Reizfeld eine liegende Ellipse von 19 mm horizontalem und 11 mm vertikalem Durchmesser. Von der zuerst exponierten linken Hälfte leuchtet nur eine schmale Sichel an der

Peripherie auf. Der schwarze Anteil an der Grenze beider Felder ist breiter als bei dem ersten Versuche, schätzungsweise $\frac{2}{3}$ der horizontalen Halbachse = $6\frac{1}{3}$ mm.

4. Versuch: Reizfeld ein liegendes Rechteck von 8,8 mm Höhe und 24 mm Breite. Die zuerst beleuchtete linke Hälfte dieses Rechteckes zeigt eine schätzungsweise maximal helle periphere Partie, welche mit allmählicher Abdunklung in die dunkle mediale Partie übergeht, welche kaum die halbe Breite des Feldes I einnimmt; nach dieser Schätzung wäre die Breite des dunklen Teiles etwas geringer als 6 mm.

Aus diesen Versuchen ergibt sich folgender Schluss:

Die metakontrastive Verdunklung, welche Feld I bei Belichtung des Nachbarfeldes II an der Grenzlinie aufweist, reicht, wie Versuch 4 lehrt, nur bis zu einer gewissen maximalen Entfernung von der Grenzlinie gegen Feld II, d. h. der Metakontrast, der von Feld II auf Feld I ausgeübt wird, schwächt sich in einer gewissen Entfernung von Feld II bis zur Unmerklichkeit ab. Die maximale Breite des schwarzen Streifens gibt also die maximale Ausdehnung des von Feld II ausgehenden merklichen Metakontrastes an. Diese nenne ich die „räumliche Kontrastbreite“. Ist die Breite des Feldes I grösser als die letztere Strecke, so bleibt von Feld I bei Belichtung des Feldes II ein um so grösserer peripherer Saum hell, je breiter Feld I ist. Ist Feld I aber schmaler als die Breite des von Feld II ausgehenden Metakontrastes, so sollte man meinen, es müsste der bei Beleuchtung des Feldes II auftretende schwarze Grenzstreifen das ganze Feld I verdunkeln. Wie die Versuche 1—3 lehren, ist dies aber nicht der Fall, sondern es bleibt immer ein peripherer Streifen des Feldes I hell, so dass der dunkle Streifen um so schmaler ausfällt, je geringer die Breite des Feldes I ist. Dies zeigt besonders deutlich Versuch 2, bei welchem der dunkle Grenzstreifen nur eine Breite von weniger als 1 mm hat.

Diese Beobachtungen weisen darauf hin, dass dem schwarzen Hintergrunde, welcher Feld I umgibt, doch auch ein aktiver Einfluss auf die Helligkeit des äusseren Randes des Feldes I zukommt, und zwar offenbar in dem Sinne, dass der von Feld II ausgehenden Hemmung eine von dem schwarzen Hintergrunde ausgehende erregungsfördernde Kontrastwirkung entgegensteht, eine „aktive Weissinduktion“.

Es scheint also, dass auch der hellere Rand von schwarzem Hintergrunde umgebener Lichtfelder nicht nur als „Negativprodukt

des Binnenkontrastes“ im Sinne Tschermak's¹⁾, sondern nebst-dem auch als „Positivprodukt“ der vom schwarzen Hintergrund ausgeübten Induktion aufzufassen ist.

Für die aktive Rolle des schwarzen Hintergrundes im Sinne einer positiven Weissinduktion spricht wohl auch die Minderung des Simultankontrastes zwischen zwei Nachbarfeldern durch eine schmale schwarze Grenzlinie. Über den Einfluss eines dunklen Trennungstreifens auf den metaphotischen Kontrast wird ein späterer Abschnitt dieser Arbeit handeln.

3. Bedingungen für das Zustandekommen des Metakontrastes.

Durch Anstellung verschiedenartiger chronophotischer Kombinationsversuche erhält man Aufklärung über den Ursprung und die Bedingungen des Metakontrastes.

Derartige Versuche sind auch geeignet, den Nachweis dafür zu erbringen, dass das metaphotische Bild kurz exponierter Felder tatsächlich ansteigt.

Ich habe diese Tatsache bisher bloss an den dunklen Grenzstreifen der Metakontrastbilder bei beträchtlichen Expositionszeiten dargetan; noch deutlicher und leichter ist sie bei sehr kurzer Reizdauer zu beobachten. Hierzu stellte ich folgende Versuche an:

Tabelle I.

Nr.	Expositionszeit in Sek.		Beobachter: Herr stud. med. Otto Schiffner und Autor
	von Feld I	von Feld II	
1	0,005 1 ²⁾	0,066 r	Das Feld I (links) erscheint sehr dunkel, kaum an der Peripherie ein schmaler Saum etwas heller.
2	0,005 1	—	Das gleiche Feld während der gleichen Zeit, aber für sich allein exponiert, ohne dass darauf Feld II folgt, ist auffallend heller als im Falle 1.
3	0,0017 l	0,117 r	Von Feld I nur ein schmaler peripherer Saum etwas erhellt, der übrige Anteil fast ganz schwarz.
4	0,0017 l	—	Feld I beträchtlich heller.
5	0,0004 l	0,033 r	Feld I erscheint ganz dunkel, nur an der äussersten Peripherie ist ein schmaler linsenförmiger Teil in merkbarer Helligkeit sichtbar.
6	0,0004 l	—	Die ganze linke Ellipsenhälfte erscheint sehr bedeutend heller und homogen.

1) l. c. S. 745.

2) l: bedeutet linke, r: rechte Ellipsenhälfte.

Diese wenigen, aus meinen Versuchsprotokollen beispielsweise ausgewählten Versuche sind wohl kaum anders zu erklären als dadurch, dass das metaphotische Bild von Feld I einen, offenbar bei dieser kurzen Dauer des Reizes beträchtlich langen, ansteigenden Teil aufweist, welcher in dem Momente, da Reiz I verschwindet, durch den gleichzeitig auftretenden Nachbarreiz vernichtet wird, so dass Feld I bedeutend dunkler erscheint; und zwar ist bei so kurzer Expositionsdauer nicht nur ein Streifen an der Grenze, sondern das ganze Feld viel dunkler, als wenn sein metaphotisches Bild nicht abgeschnitten wird.

Nähere Untersuchungen über den Anstieg des metaphotischen Bildes folgen unten.

Dass die Gesichtsempfindung gegenüber dem objektiven Reize zeitlich verschoben erscheint, ist leicht erklärlich: es bedarf doch einer bestimmten, von der Reizstärke und dem jeweiligen Zustande des Sehorganes abhängigen Zeit, ehe die Erregung von den Aufnahmegliedern des Sehapparates bis zum Zentralorgane fortschreitet. Diese Zeit ist nicht allzu gering anzuschlagen, da doch auf dem Wege bis zum Zentralorgane eine Reihe von Ganglien zu passieren ist, welche die Erregungsleitung verzögern¹⁾.

Wenn ein und derselbe Reiz mehrere Male hintereinander auf dieselbe Netzhautstelle fällt, so wird, wie bereits G. Martius²⁾ beobachtete, die Maximalzeit desselben bis zu einer gewissen Grenze immer geringer. Ebenso ist sie geringer, wenn derselbe Lichtreiz auf eine vorher belichtete Netzhautstelle fällt, als wenn er eine vorher nicht gereizte Stelle trifft. Es muss also durch die vorhergehende Beleuchtung der betreffenden Netzhautstelle bereits eine Umstimmung derselben eingetreten sein, welche die Erregungsleitung beschleunigt. Wie ich bereits an anderer Stelle dargetan habe³⁾, erblicke ich darin den Ausdruck einer durch Belichtung einer Netz-

1) Vgl. S. Exner in Zuntz' und Loewy's Lehrbuch der Physiologie S. 122 ff. 1909.

2) G. Martius, Über die Dauer der Lichtempfindung. Beitr. z. Psychol. u. Philos. Bd. 1 S. 346. 1902.

3) R. Stigler, Über den physiologischen Proportionalitätsfaktor usw. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. Bd. 44 S. 120 ff. 1909.

hautstelle im zugehörigen Gebiete des Sehorganes vollzogenen „Bahnung“, zufolge deren der nächste Reiz rascher zum Zentralorgane gelangt. Analoge Bahnungserscheinungen sind, wie bekannt, zuerst von S. Exner in der Nervenphysiologie festgestellt worden.

In gleicher Weise erklärt sich nach meiner Anschauung auch die Abnahme der Maximalzeit mit der Reizgrösse, da die in jedem Zeitelemente vollzogene Bahnung um so ausgiebiger sein wird, je grösser der pro Zeitelement zugeführte Reiz ist.

Der zeitliche Verlauf einer Gesichtsempfindung legt die folgende Vorstellung von der Umsetzung eines optischen Reizes in die Gesichtsempfindung nahe:

In den ersten Zeitelementen seiner Dauer wird der objektive Reiz vollends zur „Bahnung“ verwendet; denn ein Lichtreiz von seiner Stärke entsprechend kurzer, unterschwelliger Dauer erzeugt überhaupt keine Gesichtsempfindung.

Die physiologische Grundlage und der anatomische Sitz der Bahnung ist gegenwärtig nicht festzustellen.

Dauert der Lichtreiz eine überschwellige Zeit, so „fließt“ die Erregung von der Peripherie durch die in der Leitungsbahn eingeschalteten Ganglien zur psychophysischen Sehsphäre und erleidet auf diesem Wege in jeder Ganglienzelle eine Verzögerung, während welcher er wahrscheinlich „bahnend“ für den Ablauf des in den nächsten Zeitelementen eintreffenden Reizes wirkt. Aus diesen reizverzögernden Organen fließt die Erregung allmählich zum Zentralorgan, woselbst eine „Summation“ der in den einzelnen Zeiteilchen eingetroffenen Reizzuwüchse anzunehmen ist, wie aus dem allmählichen Anstiege der Intensität der Gesichtsempfindung hervorgeht.

Irgendwo auf der Bahn zwischen äusserster Peripherie und psychophysischer Sehsphäre ist auch der Sitz des Kontrastes zu suchen. Dass er nicht in der beiden Augen gemeinsamen psychophysischen Sehsphäre selbst liegt, wird, wie ich in einem späteren Abschnitte zeigen werde, dadurch bewiesen, dass der Metakонтраст nicht von einem Auge auf das andere wirkt. Wie bereits erwähnt, verlegt S. Exner den Umgebungskонтраст in die horizontalen Zellen der äusseren plexiformen Schicht. A. v. Tschermak¹⁾ nimmt an, dass der Kontrast „präterminal, und zwar vorwiegend, aber nicht

1) A. Tschermak, Über Kontrast und Irradiation. Asher-Spiro, Ergebn. d. Physiol. Jahrg. 2 Abt. 2 S. 778. 1903.

ausschliesslich in das Gebiet mit Sonderung der beiden Sehorganhälften zu lokalisieren“ sei. Vielleicht ist der Umgebungskontrast auch in irgendeiner oder in mehreren Ganglienschichten lokalisiert. Ohne darüber eine Hypothese aufstellen zu wollen, nenne ich im folgenden den Ort des Umgebungskontrastes mit Ausschluss des unter besonderen Umständen beobachteten „binokularen Kontrastes“ die „optische Kontrastregion“. Ich nehme somit an, dass es bei der Entstehung des Umgebungskontrastes auf das Verhältnis der Erregungszustände ankommt, welche in den zu den beiden belichteten Netzhautfeldern gehörigen Kontrastregionen jeweils herrschen. Die folgenden chronophotischen Versuche (s. Tab. II auf S. 394) scheinen mir diese Behauptung zu bekräftigen.

Bei den Versuchen 7, 8, 10, 11, 12, 13 und 16', wo beide Felder in unmittelbarer Aufeinanderfolge während im Verhältnisse zur Lichtstärke sehr kurzer Zeiten exponiert wurden, trat kein Metakontrast zutage. Trotz der gleichen kurzen Expositionszeit von Feld I geschieht dies aber, wenn Feld II länger exponiert wird, wie Versuch 9 lehrt. Im gleichen Sinne ist Versuch 19 und 20 einerseits, Versuch 21 und 22 anderseits zu deuten: der Metakontrast wird beide Male viel deutlicher, der dunkle Streifen an der Grenze viel breiter, wenn Feld II länger exponiert wird.

Wenn zwei Nachbarfelder von entsprechend geringer Lichtstärke und Expositionsdauer hintereinander ohne Dunkelpause belichtet werden, bemerkt man an beiden Feldern keinen Helligkeitsunterschied. Ein solcher tritt hingegen auf, wenn man das später erscheinende Feld länger exponiert, worauf Feld I eine deutliche Metakontrastverdunkelung aufweist.

Diese Beobachtung erklärt sich völlig zwanglos aus der früher mitgeteilten Hypothese über das Zustandekommen des Umgebungskontrastes: durch das Netzhautbild des Feldes I wird in der zugehörigen Kontrastregion eine sehr geringe Erregung hervorgerufen, welche sich zufolge der geringen Reizgrösse sehr langsam entwickelt. Während dies geschieht, fliesst auch die durch die Beleuchtung des Feldes II bewirkte Erregung zur zugehörigen Kontrastregion und erzeugt dort ebenfalls eine sehr langsam ansteigende, ebenso geringe Erregung. Zufolge des langsamen Ablaufes dieser Vorgänge werden die beiden Erregungszustände in den Nachbarkontrastregionen nebeneinander bestehen, ohne sich beträchtlich von-

Tabelle II.

(Feld II erscheint im gleichen Augenblick, da Feld I verschwindet.)

Nr.	Expositionszeit in Sek.		Beobachtung
	von Feld I	von Feld II	
7	0,0024 l	0,0024 r	Beide Halbellipsen scheinen gleichzeitig und ohne merklichen Helligkeitsunterschied, jedenfalls ohne jede Zeichnung, nebeneinander zu stehen.
8	0,0048 l	0,0048 r	Desgleichen.
9	0,0042 l	0,021 r	Jetzt erscheint bei Feld I ein deutliches Metakontrastbild; nur der äusserste Saum ist hell, alles andere von Feld I dunkel.
10	0,0054 r	0,0054 l	Keine Zeichnung (Metakontrastbild), das rechte Feld erscheint aber heller.
11	0,0054 l	0,0054 r	Desgleichen.
12	0,0078 r	0,0078 l	Desgleichen.
13	0,0078 l	0,0078 r	Desgleichen.
14	0,0078	0,0078	Die ganze Ellipse, auf einmal während der gleichen Zeit exponiert, erscheint homogen hell.
15	0,0096 l	0,0096 r	Feld I zeigt ein deutliches Metakontrastbild, dessen dunkler Grenzstreifen etwa $\frac{1}{3}$ des halben horizontalen Ellipsendurchmessers einnimmt, die rechte Hälfte ist heller.
16	0,0096 r	0,0096 l	Feld I, jetzt die rechte Hälfte, weist keine Zeichnung auf und erscheint heller als die linke Hälfte.
17	0,0144 r	0,0144 l	Feld I zeigt bereits einen schmalen dunklen Grenzstreifen, ist aber heller als Feld II.
18	0,0144 l	0,0144 r	Dunkler Streifen bei Feld I (links) viel breiter als im vorhergehenden Falle; rechtes Feld heller.
19	0,016 l	0,016 r	Beide Hälften scheinen noch immer gleichzeitig nebeneinander zu stehen, doch erscheint die rechte heller; ein hellerer Saum zeigt sich an der Peripherie von Feld I.
20	0,016 l	0,064 r	Feld I erscheint viel dunkler als im vorhergehenden Falle, das Metakontrastbild ist viel deutlicher.
21	0,0216 r	0,0216 l	Feld I erhellt sich bis auf eine schmale, dunkle Grenzzone; beim Verschwinden zeigt es das Metakontrastbild. Man merkt jetzt schon deutlich, dass die beiden Ellipsenhälften nicht gleichzeitig exponiert werden.
22	0,0216 r	0,042 l	Die Metakontrastfigur ist viel deutlicher, die dunkle Grenzzone ist viel breiter als im vorigen Falle.

einander zu unterscheiden; darum wird auch ihr wechselseitiger Einfluss ein gleicher sein, welcher aller Wahrscheinlichkeit nach in einer geringen Erregungshemmung besteht, welche aber in beiden Feldern

gleich stark auftritt, so dass die beiden Nachbarfelder keinen Helligkeitsunterschied aufweisen. Sowie aber Feld II länger exponiert wird, so steigt die Erregung der zugehörigen Kontrastregion II über das Mass der zugleich in der Kontrastregion I bestehenden hinaus; die hierdurch bedingte Differenz äussert sich durch kontrastive Verdunkelung des metaphotischen Bildes des Feldes I.

Auffallend sind die Ergebnisse von Versuch 10, 11, 12, 13. Beide Felder werden gleich lang und in abwechselnder Reihenfolge hintereinander exponiert, und dennoch erscheint immer das rechte heller, obwohl beide Hälften der Beinglasellipse objektiv gleich lichtstark sind und auch, wie Versuch 14 zeigt, bei gleichzeitiger Exposition tatsächlich keinen Helligkeitsunterschied erkennen lassen.

Ich habe bereits an einer anderen Stelle¹⁾ mitgeteilt, dass die rechte Hälfte der Fovea mancher Menschen lichtempfindlicher ist als die linke.

Fig. 4.

Fig. 5.

Fig. 6.

Die in Tabelle II mitgeteilten Beobachtungen rühren von mir selber her, und ich bin ein solcher „Rechtssichter“. Diese Tatsache mag zur Erklärung des Ergebnisses der Versuche 15, 16, 17, 18 angeführt werden, bei denen die linke Hälfte die Metakontrastfigur stets deutlicher aufwies als die rechte.

Was geschieht, wenn Feld I lang, Feld II aber nur sehr kurz exponiert wird?

Diese Frage beantworten die Versuche 23, 24, 27 und 30 (Tab. III). In allen diesen Versuchen tritt ein dem Metakontrastbilde sehr ähnliches Hemmungsbild nicht bei Feld I, sondern bei Feld II auf. Versuche 29 und 30 zeigen, dass ein nahezu gleiches Phänomen entsteht, wenn man das eine Feld während längerer und das andere während sehr kurzer Zeit exponiert, sei es dass man das letztere als erstes, sei es dass man es als zweites exponiert. Versuch 31 lehrt, dass die geringe Helligkeit der kurz exponierten Hälfte nicht etwa durch die kurze Expositionszeit an und für sich bedingt ist, weil ja das gleiche Feld, während der gleichen kurzen Zeit für sich allein exponiert, in weit

1) R. Stigler, Über den physiol. Proportionalitätsfaktor, l. c. S. 151 ff.

grösserer Helligkeit homogen aufleuchtet. Dasselbe geht auch aus den Vergleichsversuchen 24, 25, 26, 27 und 28 hervor¹⁾).

Tabelle III.

Nr.	Expositionszeit in Sek.		Beobachter: Herr stud. med. Schiffner und Autor
	von Feld I	von Feld II	
23	0,08 r	0,0017 l	Feld II ist bis auf einen schmalen, sichelförmigen Saum an der Peripherie ganz dunkel (Fig. 5).
24	0,116 r	0,0017 l	Ebenso.
25	0,0017 l	0,116 r	Umgekehrte Reihenfolge beider Felder: das linke Feld (I) erscheint jetzt noch dunkler als im vorhergehenden Falle.
26	0,0017 l	—	Für sich allein dargeboten, erscheint Feld I viel heller als in beiden vorhergehenden Fällen.
27	0,033 r	0,0004 l	Nur ein sichelförmiger Saum an der äussersten Peripherie von Feld II erscheint hell, alles andere dunkel.
28	—	0,0004 l	Für sich allein exponiert, erscheint Feld II viel heller und homogen.
29	0,0042 l	0,021 r	Das linke Feld I nur in einem peripheren Saume hell.
30	0,021 r	0,0042 l	Umgekehrte Reihenfolge: Wieder das linke Feld, diesmal Feld II, an der äussersten Peripherie erhellt, sonst dunkel; fast das gleiche Bild wie im vorhergehenden Falle.
31	—	0,0042 l	Für sich allein exponiert, leuchtet das Feld homogen und mit viel grösserer Helligkeit auf als in beiden vorhergehenden Fällen.

1) Die richtige Wahl der Expositionszeiten beider Felder hängt von deren Lichtstärke und Grösse ab. In einem in Tabelle III nicht enthaltenen Versuche zeigte sich die gegen die Peripherie zu allmählich abklingende Verdunkelung des Feldes II sehr deutlich, wenn dieses $2\frac{1}{2} \sigma$, Feld I etwa 45σ exponiert wurde. Die Erscheinung ist aber in jedem Falle zarter als beim Metakontrastbilde. Exponiert man Feld II, allmählich ansteigend, immer länger, so zeigt Feld II (z. B. bei einer Expositionsdauer von 6σ im gegebenen Falle) die stärkste Verdunkelung nicht unmittelbar an der Grenze gegen Feld I, sondern etwas peripheriewärts von dieser, wie es Fig. 6 darstellt.

Es hat dann den Anschein, als ob über Feld II eine Kontrastwelle ablief. Das in Fig. 6 gezeichnete Bild ist mir öfters aufgefallen. Dass es nicht mit den bei kurzer Expositionsdauer auftretenden Foveabildern (s. o.) identisch ist, geht daraus hervor, dass sich dieses Bild nicht zeigt, wenn man Feld II für sich allein während der gleichen Zeit exponiert.

Wird Feld II innerhalb gewisser Grenzen noch länger exponiert, so ist an demselben gar keine Differenzierung, sondern bloss eine Verdunkelung in toto

Mit den Ergebnissen dieser Versuche ist, so glaube ich behaupten zu dürfen, der Beweis für die Richtigkeit der früher mitgeteilten Schlüsse über das metaphotische Bild und den metaphotischen Kontrast erbracht: bei den in Tab. III mitgeteilten Versuchen wird das Feld I länger exponiert als Feld II; in der Kontrastregion I wird in dem Momente, da die Nachbarnetzhaut vom Reiz II getroffen wird, schon ein beträchtlicher Erregungszustand bestehen. Da Feld II nur kurz exponiert wird, so entsteht auch in der Kontrastregion II nur eine im Verhältnis zur Kontrastregion I sehr geringe Erregung. Dadurch wird ein Kontrast bewirkt, welcher sich durch Verdunkelung des Feldes II kundgibt, indem der Ablauf der Erregung der später belichteten Netzhautstelle gehemmt wird.

Wird also bei gleicher Lichtstärke beider nacheinander exponierter Felder Feld II im Verhältnisse zu Feld I zu kurz exponiert, so zeigt Feld II, wird Feld I im Verhältnisse zu Feld II zu kurz exponiert, so zeigt Feld I die Kontrastzeichnung. Zwischen diesen beiden Stadien muss sich eine Mittellage finden, d. h. bei einer bestimmten Expositionszeit von Feld I und einer anderen Expositionszeit von Feld II wird weder Feld I, noch Feld II eine Kontrastzeichnung zeigen.

Versuche 32—39 (Tab. IV) zeigen, dass sich ein derartiges Verhältnis der beiden Expositionszeiten tatsächlich bestimmen lässt: wird Feld I durch 0,027, Feld II durch 0,0108 Sek. exponiert, so erscheint die Kontrastfigur bei Feld II; wird Feld I durch 0,027, Feld II durch 0,023 Sek. exponiert, so zeigt Feld I die Kontrastfigur; wird Feld I während 0,027, Feld II während 0,02" exponiert, so zeigt weder Feld I, noch Feld II ein Kontrastbild. Wird Feld I 0,027 Sek. beleuchtet, so entsteht dadurch eine nach dem Verschwinden des Feldes I allmählich ansteigende und wieder absinkende Erregung der zugehörigen Kontrastregion I; sobald von dem Netzhautbilde II während dessen 0,2 Sek. dauernden Bestandes die Erregung zur zugehörigen Kontrastregion II gelangt, entsteht dortselbst ein Erregungszustand, welcher dem gleichzeitig in der Kontrast-

zu beobachten (im Vergleiche mit seiner Helligkeit, wenn es gleichlang für sich allein beleuchtet wird).

Gleich an dieser Stelle sei erwähnt, dass ganz ähnliche Verdunkelungserscheinungen an Feld II auch dann auftreten, wenn dieses nicht nach Feld I, sondern mit ihm gleichzeitig (während der gleichen kurzen Zeit) exponiert wird, nachdem Feld I vorher schon hinlänglich lang belichtet war.

region I herrschenden ungefähr gleich ist; daher beeinflussen sich beide Regionen gleich stark, so dass zwischen den Feldern I und II kein Unterschied wahrnehmbar ist. Wenn aber Feld II noch länger, nämlich 0,023 Sek., belichtet wird, so steigt der Erregungszustand der Kontrastregion II zufolge des Reizzuwachses während der letzten 3 σ der Expositionszeit über die Erregungsgrösse der Kontrastregion I an, und infolgedessen zeigt Feld I kontrastive Verdunkelung.

Tabelle IV.

Nr.	Expositionszeit in Sek.		Beobachter: Herr stud. med. Schiffner und Autor
	von Feld I	von Feld II	
32	0,027 l	0,027 r	Kontrastbild deutlich bei Feld I links.
33	0,027 r	0,027 l	Kontrastbild deutlich bei Feld I rechts.
34	0,0108 l	0,027 r	Kontrastbild bei Feld I links.
35	0,027 r	0,0108 l	Feld II (links) im ganzen dunkler als I, zeigt eine zarte Zeichnung eines dunklen Grenzstreifens.
36	0,027 r	0,0243 l	Kontrastbild bei Feld I rechts.
37	0,027 r	0,02 l	Schiffner sieht gar kein Kontrastbild, Stigler bemerkt bei grösster Aufmerksamkeit in Feld II einen äusserst zarten und schmalen Schatten an der Grenze.
38	0,027 r	0,023 l	Kontrastbild bereits deutlich bei Feld I.
39	0,027 r	0,0216 l	Kontrastfigur bei Feld I sehr zart angedeutet.

Zur Deutung der gewonnenen Versuchsergebnisse ist es wichtig zu wissen, ob eine sehr kurz dauernde Belichtung einer Netzhautstelle schon eine Herabsetzung der Erregbarkeit bzw. der Erregung der Nachbarschaft zu bewirken vermag oder, nach S. Exner's Hypothese, ob schon eine kurz dauernde Belichtung die Hemmungsorgane der Netzhaut, als welche sich genannter Autor die „horizontalen Zellen“ vorstellt, erregt.

Die in Tab. II mitgeteilten Versuche zeigten ja, dass Feld II bei ganz kurzer Expositionszeit auf Feld I keine Hemmung ausübte, sondern dass zu diesem Zwecke die Expositionszeit von Feld II verlängert werden musste. Wenn aber die Entstehung des Kontrastes von dem Verhältnisse der Erregungszustände der beteiligten Kontrastregionen abhängt, so scheint es möglich, auch durch sehr kurz dauernde Reize eine erregungshemmende Wirkung auf die Nachbar-

schaft auszuüben, falls in der zu dieser gehörigen Kontrastregion ein noch geringerer Erregungszustand herrscht als der durch den kurz dauernden Reiz in der zugehörigen Kontrastregion erzeugte.

Schon wenige Versuche genügen, um dies darzutun. (Tab. V.)

Tabelle V.

Nr.	Expositionszeit in Sek.			Beobachtung
	von Feld I	Panse	von Feld II	
40	0,0024 l	—	0,0024 r	} Beide Felder, unmittelbar hintereinander exponiert, üben aufeinander keinen merklichen Einfluss aus, kein Kontrastbild.
41	0,0024 r	—	0,0024 l	
42	0,0024 r	0,0444	0,0024 l	Feld I (rechts) ist bedeutend dunkler als Feld II, besonders an der Grenze.
43	0,0024 l	0,0444	0,0024 r	Das linke Feld I zeigt das Kontrastbild sehr deutlich; es erscheint überhaupt nur an der Peripherie hell — und auch da noch nicht so hell wie Feld II.
44	0,08 r	—	0,0135 l	Feld II erscheint viel dunkler als Feld I und überhaupt nur an der Peripherie merklich erhellt.
45	0,08 r	0,0945	0,0135 l	Feld I zeigt deutlich das Kontrastbild, Feld II erscheint viel heller.
46	0,054 l	—	0,054 r	Feld I zeigt das Kontrastbild.
47	0,054 l	0,01	0,054 r	Feld I zeigt das Kontrastbild viel deutlicher als im vorhergehenden Falle; der dunkle Grenzstreifen ist viel breiter.

Versuche 40 und 41 zeigen, dass zwei unmittelbar hintereinander während je 0,0024" exponierte Nachbarfelder der angegebenen Beschaffenheit keinen Unterschied aufweisen — es entsteht kein Kontrastbild. Schaltet man aber (Versuche 42 und 43) eine Pause zwischen dem Verschwinden des einen und dem Aufleuchten des anderen Feldes, so übt Feld II auf Feld I eine durch ein sehr deutliches Metakontrastbild bei Feld I gekennzeichnete Erregungshemmung aus.

Daraus geht zunächst mit Sicherheit hervor:

Auch sehr kurz dauernde Lichtreize vermögen eine Erregungshemmung auf die Nachbarschaft der von ihnen betroffenen Netzhautstellen auszuüben, wenn nur der Erregungszustand der Kontrastregion I zu der Zeit, da die von Feld II kommende Erregung in die Kontrastregion II gelangt, ein entsprechend geringer ist.

Wenn zwischen dem Verschwinden des Feldes I und dem Auftreten des Feldes II eine entsprechend lange Dunkelpause eingeschaltet wird, so trifft die von Feld II herrührende Erregung in der Kontrastregion II ein, während die Erregung der letzteren bereits im Abnehmen begriffen ist. Der Unterschied der Erregungszustände der beiden Kontrastregionen bedingt das Auftreten des Metakontrastbildes desjenigen Feldes, dessen Kontrastregion schwächer erregt ist.

Dasselbe lehren auch die Versuche 44—47:

Wird Feld I während 0,08, Feld II unmittelbar darauf während 0,0135 Sek. dargeboten, so zeigt Feld II die Hemmungsfigur, während das metaphotische Bild von Feld I keine Kontrastercheinungen aufweist, weil die Erregung der Kontrastregion I zufolge der längeren Exposition des Feldes I die gleichzeitige Erregung der Kontrastregion II, welche durch die bloss 0,0135 Sek. währende Exposition des Feldes II hervorgerufen wird, übertrifft. Schaltet man aber eine zeitliche Pause von 0,0945 Sek. zwischen dem Verschwinden des einen und dem Aufleuchten des anderen Feldes ein (Versuch 45), so zeigt Feld I ein sehr deutliches Metakontrastbild: die Erregung der Kontrastregion I ist zufolge der Einschaltung der Pause zur Zeit der Erregung der Kontrastregion II bereits so weit abgesunken, dass sie von dieser beträchtlich übertroffen wird.

Versuche 45 und 47 erklären sich in gleicher Weise. Die Erregung der Kontrastregion I sinkt bei Versuch 46 während des 0,054 Sek. dauernden Zuströmens des von Feld II kommenden Reizes so weit ab, dass sie von der Erregung der Kontrastregion II an Intensität übertroffen wird. Infolgedessen wird Feld I verdunkelt.

Bei Versuch 47 sinkt die Erregung der Kontrastregion I infolge der Einschaltung der Pause von 0,01 Sek. während des 0,054 Sek. dauernden Zuströmens des von Feld II zur Kontrastregion II wandernden Reizes noch mehr ab. Infolge der grossen Differenz der Erregungszustände der beiden benachbarten Kontrastregionen tritt eine stärkere Verdunkelung des Feldes I auf als bei Versuch 46. Dabei blitzt aber nicht etwa Feld I zuerst maximal hell auf, um dann durch Feld II verdunkelt zu werden, sondern Feld I erscheint trotz der Dunkelpause noch immer nicht so hell, wie es erschiene, wenn ihm kein Nachbarreiz folgte, woraus hervorgeht, dass sein metaphotisches Bild nach der eingeschalteten Pause noch nicht seine maximale Helligkeit erreicht hatte.

Zur Zeit der kontrastiven Verdunkelung des Feldes I befindet

sich somit die von Feld I ausgelöste zentrale Erregung (Empfindung) noch im Ansteigen und ist sicher von grösserer Intensität als die gleichzeitig in der zu Feld II gehörenden zentralen Region bestehende Erregung. Dennoch wurde die Erregung der zu Feld I gehörigen Zentralregion durch Kontrast unterdrückt.

Unter der Annahme, dass die Kontrastwirkung nicht im Zentrum, sondern in einer weiter peripher gelegenen Kontrastregion zustande komme, klärt sich dieser scheinbare Widerspruch auf; denn die Erregung der zu Feld I gehörigen Kontrastregion muss zufolge deren peripherer Lage schon im Absinken begriffen sein, während die Erregung der zugehörigen Zentralregion noch ansteigt.

Eine eigentümliche, hierher gehörige Tatsache ist auch die, dass der Metakontrast bis zu einer gewissen oberen Grenze bei länger dauernden Reizen augenfälliger ist als bei kurzdauernden. Exponiert man Feld I z. B. während einer Fünftelsekunde und belichtet unmittelbar darauf Feld II während einer Zehntelsekunde, so leuchtet zuerst das ganze Feld I für einen Moment auf, verschwindet aber dann mit einer stärker ausgeprägten Kontrastfigur, als wenn man Feld I *ceteris paribus* z. B. während einer Zwanzigstelsekunde exponiert. Namentlich betrifft dies den dunklen Grenzstreifen des Metakontrastbildes, welcher bei längerer Exposition breiter ist als bei kurzer.

Je intensiver die primäre Erregung, um so deutlicher ist offenbar auch der durch entsprechende Reizung der Nachbarschaft hervorgerufene Kontrast.

Dementsprechend ist bei sehr geringer Primärerregung des kontrastleidenden Feldes der an demselben durch Belichtung der Nachbarschaft hervorzurufende Metakontrast äusserst geringfügig. Auch S. Exner¹⁾ schliesst aus seinen Beobachtungen, dass „diese Hemmungswirkungen bei sehr geringen Netzhautreizen verschwindend sind und bei Zunahme der Lichtintensität bis zu dem Optimum der Lokalisation erst langsam, dann rasch ansteigen“.

Auf dem gleichen Grunde scheint es mir auch zu beruhen, dass es nicht gelingt, durch Umgebungskontrast einen durch einen äusserst kurz dauernden Reiz gesetzten Minimalerregungszustand schon während der Latenzzeit der Empfindung zu vernichten.

Um dies zu versuchen, habe ich dem Lichtfelde meines Chrono-

1) Studien auf dem Grenzgebiete des lokalisierten Sehens. L. c. S. 152.
Pflüger's Archiv für Physiologie. Bd. 134.

photometers durch Einschieben einer dicken Beinglasplatte in den Strahlengang des Reizlichtes eine sehr geringe Lichtstärke gegeben. Die eine Ellipsenhälfte wurde sodann während einer so geringen Zeit für sich allein exponiert, dass gerade noch eine foveale Lichtempfindung auftrat; dazu war die recht beträchtliche Expositionszeit von etwa 0,008" nötig. Feld I wurde also 0,008" exponiert, und gleich darauf erschien Feld II, welches während 0,1" exponiert wurde und infolge dieser langen Expositionszeit sehr geeignet war, eine kräftige Erregungshemmung in der Nachbarschaft zu bewirken. Feld I blieb aber trotzdem gerade so an der Schwelle der Sichtbarkeit, wie wenn es für sich allein exponiert wurde. Andererseits bewirkt die Beleuchtung des Feldes II nach sehr lange (übermaximal) während der Exposition des Feldes I einen so heftig und plötzlich auftretenden Metakontrast, dass von dem in Fig. 4 und 5 gezeichneten hellen peripheren Saume des Metakontrastbildes des Feldes I nichts oder fast nichts zu sehen ist, sondern sich das ganze Feld I mit einem Schlage zu verdunkeln scheint. Dies zeigt Tabelle VI.

Tabelle VI.

Nr.	Expositionszeit in Sek.		Beobachtung
	von Feld I	von Feld II	
48	0,224 r	0,064 l	Reiz II taucht im gleichen Momente auf, da Reiz I verschwindet. Feld I ist während seiner Expositionszeit homogen und maximal hell; beim Auftauchen des Feldes II verschwindet es sehr rasch, indem als Zeichen des Metakontrastbildes an der Peripherie ein dunkelgrauer Saum auftritt, welcher einen Moment zugleich mit dem bereits erschienenen Felde II sichtbar ist.
49	0,56 r	0,112 l	Feld I scheint zugleich mit dem Auftauchen des Feldes II spurlos zu verschwinden; dies geschieht so rasch, dass man anfangs glaubt, es sei hier keine Spur eines Metakontrastbildes. Wenn man aber die Erscheinung öfters und mit grösster Aufmerksamkeit betrachtet, so findet man, dass von dem mit einem Schlage verschwindenden Felde I doch an der äussersten Peripherie ein sehr zarter und schmaler Saum für eine ausserordentlich kurze Zeit aufleuchtet.
50	0,45 r	0,15 l	Geradeso wie im vorigen Falle.

Im Versuche 48 ist das Metakontrastbild, welches in dem 0,224" exponierten Felde beim Auftauchen des Nachbarreizes auftritt, als ein dunkelgrauer, schleierartiger, halbmondförmiger Saum am Rande

der dunklen Mitte noch deutlich wahrzunehmen. Doch ist das Metakontrastbild viel undeutlicher als bei kürzerer Exposition des Feldes I.

In den Versuchen 49 und 50 ist hingegen, wenn man nicht die ganze Aufmerksamkeit auf die Peripherie des Feldes I konzentriert, keine Spur eines Metakontrastbildes zu bemerken. Bei sehr aufmerksamer Beobachtung des Feldes I in dem Momente, da der Reiz I verschwindet, bemerkt man aber das Rudiment des Metakontrastbildes als einen äusserst schmalen helleren peripheren Saum, dessen Wahrnehmbarkeit hauptsächlich zufolge seiner kurzen Dauer eben an der Schwelle steht. Sehr auffallend ist die Plötzlichkeit, mit der Feld I in dem Momente verschwindet, da Feld II auftaucht.

Diese Versuche sind wahrscheinlich so zu deuten:

Die Breite und Deutlichkeit des Metakontrastes nimmt mit der Expositionszeit des Feldes I zu; der weisse Saum, welcher das schwarze Mittelstück des Metakontrastbildes umhüllt, ist als erregungsfördernde Reaktion („Weissinduktion“ im Sinne Hering's) des schwarzen Hintergrundes aufzufassen; und die geringe Deutlichkeit des weissen peripheren Saumes des Metakontrastbildes eines weit übermaximal exponierten Feldes dürfte vielleicht daher rühren, dass der schwarze Hintergrund durch lange Beleuchtung des Feldes I in das Stadium einer gleichsinnigen Induktion tritt und in diesem Stadium eine geringere „Weissinduktion“ ausübt, was sich darin äussert, dass der weisse Saum an der Peripherie des Metakontrastbildes unscheinbarer ist und dieses daher fast ausschliesslich aus dem maximal verbreiterten schwarzen Grenzstreifen besteht, der jetzt das ganze Feld I erfüllt, so dass von dem in Fig. 4 und 5 gezeichneten Metakontrastbilde überhaupt nichts mehr wahrzunehmen ist.

4. Einfluss der Lichtstärke auf den Metakontrast.

Wenn man mit kurz dauernden Reizen arbeitet, so muss, damit Metakontrast entstehe, die Expositionszeit um so grösser gewählt werden, je geringer die Lichtstärke ist.

Um den beiden Vergleichsfeldern verschiedene Lichtstärke zu geben, verwendete ich mein Chronophotometer II.

Meine Versuche ergaben folgende Schlüsse:

1. Je grösser die Lichtstärke des Feldes II ist, um so geringer braucht seine Expositionszeit zu sein, damit Feld I ein Metakontrastbild zeige. Je grösser die Lichtstärke des Feldes I im Verhältnisse zu Feld II ist, um so geringer braucht seine Expositionszeit zu sein, da-

mit es in dem lichtschwächeren und kürzer exponierten Felde II ein Kontrastbild induziere.

2. Je grösser die Lichtstärke beider Felder ist, um so deutlicher und bei um so kürzerer Expositionszeit tritt der Metakontrast auf.

Dieses Ergebnis bestätigt die oben geäusserte Anschauung über das Wesen der Metakontrasterscheinungen. Bei der Wechselwirkung beider Felder aufeinander kommt es eben in erster Linie auf das Verhältnis der Intensität der Erregung der Kontrastregion des Feldes I und jener des Feldes II an.

Dass der Metakontrast um so deutlicher wird, je grösser die Lichtstärke ist, steht in Analogie zur früher mitgeteilten Erfahrung, dass bei geringer Lichtstärke die Metakontrasterscheinungen um so ausgeprägter sind, je grösser die Expositionszeit beider Felder ist.

5. Aufhebung des Metakontrastes durch einen schwarzen Trennungstreifen zwischen den Feldern I und II.

Der „hemmungshemmende“ oder „weissinduzierende“ Einfluss des schwarzen Hintergrundes zeigt sich sehr deutlich dadurch, dass der Metakontrast ausbleibt, wenn die beiden nacheinander während hinlänglicher Expositionszeit exponierten Felder I und II voneinander durch einen schmalen dunklen Trennungstreifen getrennt sind. (Siehe Tab. VII auf S. 405.)

Aus der Reihe der hier mitgeteilten Versuche ergibt sich, dass bei den obwaltenden Beleuchtungsverhältnissen ein schwarzer Trennungstreifen zwischen den beiden Feldern, der im Netzhautbilde eine Breite von nur 0,09 mm hat, bereits hinreicht, um die erregungshemmende Kontrastwirkung des beleuchteten Feldes II auf Feld I aufzuheben, so dass Feld I unter keinen Umständen ein Metakontrastbild zeigt. Wenn der Streifen etwas schmaler ist, z. B. bei einer Breite seines Netzhautbildes von 0,075 mm, reicht der Metakontrast durch den Dunkelstreifen bis zum Felde I, und dieses zeigt ein Metakontrastbild.

Wie aus den früheren Versuchen bekannt ist, ist der Dunkelstreifen des Metakontrastbildes unter Umständen viel breiter als der Trennungstreifen, der in der angeführten Versuchsreihe die beiden Felder von einander trennte und deren wechselseitige Kontrastwirkung aufhob. Der hierzu hinreichend breite Trennungstreifen ist also schmaler als die „Hemmungsbreite“, unter welcher die maximale Breite des dunklen Grenzstreifens des Metakontrastbildes verstanden

Tabelle VII.

Nr.	Breite des Trennungsstreifens i. Millim.		Expositionszeit in Sek.			Beobachtung
	am Lichtfelde	am Netzhautbilde	von Feld I	Pause	von Feld II	
51	5,5	0,26	—	—	—	In keinem Falle ein Metakontrastbild.
52	3,0	0,14	0,048 l	—	0,048 r	Kein Metakontrastbild.
53	3,0	0,14	0,048 l	—	0,1 r	" "
54	3,0	0,14	0,0144 l	—	0,1 r	" "
55	3,0	0,14	0,0144 l	0,0336	0,048 r	" "
56	3,0	0,14	0,0144 l	—	—	Das gleiche Feld, für sich allein exponiert, sieht gerade so aus und ist ebenso hell wie in den vorhergehenden Fällen.
57	1,9	0,09	0,036	0,012	0,12	Kein Metakontrastbild.
58	1,2	0,056	0,048	—	0,048	Beobachter Schiffner: Kein Metakontrastbild. Beobachter Stigler: Bereits ein zarter Metakontrast bei Feld I.
59	1,2	0,056	0,048	—	0,127	Beide Beobachter sehen ein deutl. Metakontrastbild.
60	1,6	0,075	0,048	—	0,127	Feld I zeigt einen zarten, dunklen Grenzstreifen.
61	1,6	0,075	0,036	0,012	0,12	Sehr deutliches Metakontrastbild.

wurde. Da also die von Feld II ausgehende Kontrastwirkung räumlich über den Trennungsstreifen hinausreichen würde, so muss, wie mir scheint, zur Begründung der Aufhebung des Metakontrastes durch den schmalen Trennungsstreifen zwischen Feld I und Feld II ein aktiver, „Weiss induzierender“ Einfluss des letzteren angenommen werden.

6. Der Metakontrast, wenn beide Felder während eines Teiles ihrer Expositionszeiten gleichzeitig exponiert werden.

Bisher wurde der Metakontrast bei unmittelbarer oder mittelbarer Hintereinanderfolge beider Nachbarlichtreize untersucht.

Wie verhält sich der Metakontrast, wenn beide Felder während eines Teiles ihrer Expositionszeiten gleichzeitig nebeneinander exponiert werden?

Diese Frage erfordert mehrere Variationen der Versuchsanordnung, die vergleichsweise nebeneinander behandelt werden sollen.

Tabelle VIII.

Nr.	Expositionszeit in Sek.			Beobachtung
	von Feld I allein	von Feld I u. II gemeinsam	von Feld II allein	
62	—	0,064	0,064	Das rechte Feld(I) ist so dunkel, dass fast nichts davon zu sehen ist.
63	0,064	0,064	0,064	Feld I leuchtet zuerst sehr hell auf, verschwindet dann mit dem typischen Hemmungsbilde; Feld II erscheint homogen, aber viel dunkler als Feld I.
64	0,064	0,064	—	Feld II erscheint etwas dunkler als Feld I.

Aus diesen Versuchen geht hervor: Verschwindet von zwei Lichtreizen, die auf benachbarte Netzhautstellen fallen, einer, während der andere noch weiter besteht, so vernichtet unter entsprechenden Umständen der länger bestehende Reiz das durch den früher abgebrochenen Reiz hervorgerufene metaphotische Bild.

Der Erfolg ist im Prinzip der gleiche, ob der früher verschwindende Reiz schon vor dem ihn überdauernden die Netzhaut getroffen hat (Versuch 63) oder mit dem letzteren zugleich begonnen hat (Versuch 62). Verschwinden hingegen beide Reize zugleich, so nehmen ihre metaphotischen Bilder einen normalen Ablauf. In welcher Weise derselbe durch die vorhergehende Belichtung der Nachbarschaft beeinflusst wird, wird ein späteres Kapitel zeigen.

Tabelle IX.

Nr.	Expositionszeit in Sek.			Beobachtung
	von Feld I allein	von Feld I u. II gemeinsam	von Feld II allein	
65	0,032	0,032	0,032	Feld I verschwindet mit dem Metakontrastbilde, ist aber an der Peripherie heller als Feld II.
66	0,016	0,016	0,016	Feld I verschwindet mit dem Metakontrastbilde, ist aber in seinem peripheren Teile heller als Feld II.

Versuchsreihen 65 und 66 bestätigen die obige Regel.

Wie sich die beiden Felder bei sehr langer Expositionszeit verhalten, zeigen die beiden folgenden Versuche:

Tabelle X.

Nr.	Expositionszeit in Sek.			Beobachtung
	von Feld I allein	von Feld I u. II gemeinsam	von Feld II allein	
67	—	0,096	0,184	Feld I zeigt beim Verschwinden das Metakontrastbild.
68	—	0,1	0,168	Feld I zeigt beim Verschwinden deutlich das Metakontrastbild.
69	—	0,144	0,136	Das Metakontrastbild ist beim Verschwinden des Feldes I nur mehr bei grösster Aufmerksamkeit zu erkennen, da das Phänomen blitzartig auftritt.

Aus den Versuchen 67, 68, 69 geht hervor:

Wenn von zwei benachbarten gleichzeitig exponierten Lichtfeldern das eine vor dem anderen verschwindet, so zeigt es das Metakontrastbild mit einem um so breiteren Dunkelstreifen, je länger die gemeinsame Belichtung der beiden Felder gedauert hat. Bei entsprechend langer Expositionszeit tritt das Metakontrastbild blitzartig auf, so dass es sehr schwer beobachtbar ist.

Hier zeigt sich dieselbe Erscheinung wie bei Versuchen 49 und 50, und es gilt für das vorliegende Phänomen die gleiche Erklärung, wie ich sie für das Ergebnis der Versuche 49 und 50 gegeben habe. Es ist also im Prinzip gleichgültig, ob Feld II auch während der Beleuchtung des Feldes I beleuchtet ist: das Metakontrastbild tritt jedesmal auf, sobald ein Reiz den anderen mit einem entsprechenden Betrage an Intensität und Zeit überdauert.

7. Wirkt der Metakontrast von einem Auge auf das andere?

Einer dankenswerten Anregung des Herrn Prof. A. v. Tschermak folgend, habe ich die Frage untersucht, ob Metakontrast auch dann auftritt, wenn man im rechten Auge die linke, im linken die rechte

Hälfte der Fovea belichtet, und zwar in solcher Weise, dass bei binokularer oder an ein und demselben Auge stattfindender monokularer Reizwirkung ein sehr deutliches Metakontrastbild auftreten würde.

Zur Lösung dieser Frage habe ich mein Chronophotometer II verwendet: Im Beobachterkasten habe ich eine schwarze Scheidewand in der Medianebene der auf die Fixationsmarke gerichteten Blicklinien so aufgestellt, dass sie nicht ganz bis zu den Beinglasplatten reichte, sondern etwa $1\frac{1}{2}$ cm vor denselben endete. Zuzufolge der parallaktischen Verschiebung des auf die Beinglasplatte projizierten hinteren Randes der Scheidewand sieht der Beobachter die Fixationsmarke mit beiden Augen, jedoch mit dem linken Auge bloss die linke, mit dem rechten bloss die rechte Hälfte des Reizfeldes. Die beiden Felder wurden mit dieser Versuchsanordnung während längerer Expositionszeiten unmittelbar hintereinander oder mit Pausen beleuchtet, so dass bei gewöhnlicher binokularer Beobachtung jedesmal ein Metakontrastbild entstanden wäre. Eine Reihe solcher Versuche wurden von Herrn Schiffner und mir angestellt. Der Erfolg war jedesmal ein negativer, es zeigte sich auch nicht eine Spur eines Metakontrastes.

Ich glaube, dieses negative Ergebnis spricht dafür, dass die Organe der Hemmung in der Peripherie zu suchen sind. Nach anderweitigen Erfahrungen [vgl. die sensorische Hemmungswirkung, wenn das rechte Auge einen horizontalen, das linke einen vertikalen dunklen Balken auf hellem Grunde betrachtet und beide Bilder mit ihrer Mitte zur Deckung gebracht werden¹⁾] hätte man das Gegenteil erwarten können.

Während letztere von Helmholtz (Physiol. Optik) und S. Exner (l. c.) beschriebene sensorische Hemmungswirkung zentralen Ursprunges ist, liegt eben die Region des Metakontrastes in der Peripherie des Sehorganes oder in einem intermediären Anteil desselben.

1) S. Exner, Physiologische Erklärung der psychischen Erscheinungen S. 74. 1894.

III. Teil.

Chronophotische Untersuchungen über das Ansteigen der Helligkeit des metaphotischen Bildes.

1. Wie lange steigt die Helligkeit des metaphotischen Bildes eines untermaximal exponierten Lichtfeldes an?

Der aus chronophotischen Untersuchungen hervorgegangene Satz: „Eine durch einen entsprechend kurzdauernden Reiz hervorgerufene Lichtempfindung steigt auch nach dem Abbruche des objektiven Reizes an“ ist für die Auffassung zahlreicher physiologisch-optischer Vorgänge von so grosser Bedeutung, dass es von Interesse erscheint, wie lange eine untermaximale Lichtempfindung nach dem Aufhören des objektiven Reizes noch ansteigen könne.

Zur Durchführung dieser Untersuchung wurde die eine Hälfte des Photometerfeldes des Chronophotometers I während irgendeiner kurzen Zeit exponiert und ihr metaphotisches Bild nach variablen Pausen durch eine entsprechend intensive und andauernde Belichtung der Nachbarschaft vernichtet. Dabei war zu beobachten, ob das zuerst exponierte Feld in irgendeinem Zeitpunkte vor dem Auftreten des Metakontrastbildes homogen aufleuchtet, d. h. in allen seinen Teilen gleich hell ist; die Pause, welche dies gestattet, gibt die Zeit an, während welcher das metaphotische Bild des Feldes I ansteigt. Denn wenn dasselbe nach einer kürzeren Zeit abgeschnitten wird, so bleibt davon immer ein Streifen an der Grenze beider Felder dunkler als die Peripherie, in der die Erregung noch ansteigt, während sie an der Grenze gegen Feld II schon durch Metakontrast gehemmt wird.

Die Untersuchung ist durch die Plötzlichkeit der Erscheinung sehr erschwert, so dass man nicht mit Sicherheit denjenigen Moment angeben kann, in welchem das ganze Feld eben homogen aufleuchtet, und die Helligkeit desselben in allen Teilen ebenso gross ist wie die des peripheren Saumes des gleich darauffolgenden Metakontrastbildes. Darauf kommt es ja hauptsächlich an, dass die Helligkeit der Peripherie zur Zeit des Auftretens des Metakontrastbildes nicht mehr ansteige. Steigt letztere noch an, so hat man immer nur den Eindruck des Metakontrastbildes und niemals den einer homogenen Lichtfläche.

Tabelle XI.

Nr.	Expositionszeit in Sek.			Beobachtung
	von Feld I	Pause	von Feld II	
70	0,008	0,019	0,114	Feld I erscheint vor dem Auftreten des Metakontrastbildes in allen seinen Teilen dunkler als der periphere Saum des letzteren.
71	0,008	0,038	0,114	Ebenso.
72	0,008	0,046	0,076	Ebenso.
73	0,008	0,076	0,114	Feld I erscheint einen Moment vor dem Erscheinen des Metakontrastbildes in allen seinen Teilen homogen und maximal hell, verschwindet gleich darauf mit Metakontrastbild.
74	0,008	0,084	0,095	Feld I für einen Moment schon sehr deutlich homogen erhellt.
75	0,05	0,023	0,05	Ein peripherer Saum von Feld I nimmt zur Zeit des Metakontrastes noch an Helligkeit zu.
76	0,05	0,05	0,05	Feld I erscheint einen Moment vor dem Auftreten des Metakontrastbildes schon deutlich homogen erhellt.
77	0,076	0,025	0,091	Die Helligkeit der Peripherie des Feldes I steigt während des Metakontrastes noch an.
78	0,076	0,045	0,076	Feld I erscheint bereits sehr deutlich homogen erhellt; die Helligkeit seiner Peripherie nimmt im Metakontrastbilde nicht mehr zu.

Aus den beispielsweise herausgegriffenen Versuchen 70—78 ergeben sich folgende Schlüsse:

Wird Feld I während 0,008" exponiert und sein metaphotisches Bild durch einen entsprechend intensiven Nachbarreiz abgeschnitten, so zeigt sich Feld I erst dann in toto homogen erhellt, wenn zwischen dem Verschwinden des Feldes I und dem Aufleuchten des Feldes II eine Pause von 0,076" eingeschaltet ist. Wenn die Pause z. B. 0,064" beträgt, so erscheint von Feld I nur ein Metakontrastbild, d. h. eine in der Nähe der gradlinigen Grenze gegen Feld II gelegene Zone von Feld I ist in jedem Zeitmomente dunkler als Feld II und als die Peripherie von Feld I. Daraus geht hervor, dass das metaphotische Bild des 0,008" exponierten Feldes sicher länger als 0,046, wahrscheinlich näherungsweise 0,076" ansteigt.

Versuchsreihe 75 und 76:

Wird das gleiche Feld I während einer Zeit von 0,05" exponiert und sein metaphotisches Bild nach einer variablen Pause abgeschnitten, so braucht diese Pause, damit Feld I für einen Moment homogen hell erscheine, bloss 0,05" lang zu dauern, d. h. das metaphotische Bild des 0,05" exponierten Feldes steigt weniger lang als 0,05" an.

Versuchsreihe 77 und 78:

Wird Feld I 0,076" exponiert, so erscheint es bereits bei einer noch kürzeren Pause für einen Moment homogen hell, d. h. sein metaphotisches Bild erreicht in noch kürzerer Zeit nach Abbruch des objektiven Reizes als in den beiden vorhergehenden Fällen seine maximale Helligkeit.

Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass die Helligkeit des metaphotischen Bildes einer untermaximal exponierten Lichtfläche um so länger ansteigt, je kürzer diese exponiert wird, und dass nach sehr kurzen Lichtreizen die Dauer des Anstieges der Helligkeit des metaphotischen Bildes die Reizdauer um ein Vielfaches (im ersten Falle ungefähr um das Zehnfache) übertreffen kann.

2. Die homophotische Maximalzeit.

Die Erkenntnis, dass das metaphotische Bild untermaximal exponierter Lichtfelder ansteigt, erfordert eine Richtigstellung des Begriffes der Maximalzeit.

Unter Maximalzeit versteht man die kürzeste Zeit, während welcher der objektive Lichtreiz auf eine Netzhautstelle wirken muss, damit die Lichtempfindung das Maximum der Helligkeit erreiche. In gleichem Sinne definiert auch W. McDougall¹⁾ die „action-time“ als „die Zeit, während welcher ein Licht von gegebener Stärke auf die Netzhaut wirken muss, um die intensivste Empfindung hervorzurufen, welche es überhaupt hervorrufen kann“.

Bisher nahm man allgemein an, dass dies zugleich der zeitliche Zwischenraum zwischen dem Beginne des objektiven Reizes und demjenigen Zeitpunkte sei, in welchem die Empfindung ihr Maximum erreicht; in diesem Sinne erscheint die Maximalzeit an der Lichtempfindungskurve als die Abszisse des höchsten Punktes der Kurve.

1) J. C. Flügel and W. McDougall, Further observations on the variation of the intensity of visual sensation with the duration of the stimulus. The Journ. of Psychol. vol. 3 p. 179. 1909.

Es ist aber fraglich, ob die Maximalzeit nicht kürzer ist als die durch die Abszisse des Gipfels der Lichtempfindungskurve symbolisierte Zeit.

Um dies Problem zu lösen, muss man erst die Frage beantworten: Steigt auch das metaphotische Bild eines während der Maximalzeit exponierten Lichtfeldes noch an?

Wenn dies der Fall ist, dann erscheint der Gipfel der Lichtempfindungskurve erst nach der Maximalzeit. Dies erscheint gemäss den hier erörterten Anschauungen von vornherein wahrscheinlich; denn auch die letzten Reizzuwüchse, welche von der Peripherie her zum Zentralorgan gelangen, benötigen hierzu wohl eine gewisse Zeit. Die Zeit, welche ein von der Peripherie kommender Reizzuwachs braucht, um bis zum Zentrum vorzudringen, ist aber um so kürzer, je länger die gereizte Stelle des Sehorgans schon vorher in Erregung war. Dies ist aus dem oben mitgeteilten Versuchsergebnisse zu schliessen, dass das metaphotische Bild um so kürzere Zeit ansteigt, je länger der objektive Reiz angedauert hatte. Und diese Beobachtungstatsache erklärt sich unter der Annahme, dass während jedes Zeitmomentes der Belichtung eine „Bahnung“ bewerkstelligt wird, welche es dem im nächsten Zeiteilchen hinzukommenden peripheren Reizzuwachse ermöglicht, in kürzerer Zeit als sein unmittelbarer Vorgänger bis zum Zentralorgane zu gelangen.

Wenn also zufolge der Bahnung periphere Reizzuwüchse immer rascher zum Zentralorgan wandern, so ist es ja auch denkbar, dass nach einer Reizdauer von der Grösse der Maximalzeit aus der Peripherie kommende Reizzuwüchse praktisch gar keine Zeit mehr benötigen, um zum Zentralorgan zu gelangen.

In letzterem Falle wäre die Maximalzeit tatsächlich die Abszisse des Gipfels der Lichtempfindungskurve.

Nimmt man aber den ersten Fall als den wirklichen an, dass nämlich die Helligkeit des metaphotischen Bildes auch bei maximaler Reizdauer noch ansteige, so muss man zweierlei Maximalzeiten unterscheiden:

1. die homophotische Maximalzeit, d. i. die geringste Zeit, während welcher der Lichtreiz wirken muss, damit das homophotische Bild seine maximale Helligkeit erreiche;
2. die metaphotische Maximalzeit, d. i. die geringste Zeit, während welcher der Lichtreiz wirken muss, damit das metaphotische Bild seine maximale Helligkeit erreiche.

Zur Bestimmung der homophotischen Maximalzeit muss das metaphotische Bild des Versuchsfeldes durch Metakontrast vernichtet werden.

Zur Bestimmung der metaphotischen Maximalzeit muss das metaphotische Bild ungestört ablaufen.

Die Methode des Metakontrastes ermöglicht auch die annäherungsweise Ermittlung der homophotischen Maximalzeit, indem man Feld I, dessen metaphotisches Bild durch einen unmittelbar folgenden entsprechend intensiven Nachbarreiz abgeschnitten wird, so lange exponiert, dass es in allen seinen Teilen, besonders an der Grenze gegen Feld II, für einen Moment homogen in maximaler Helligkeit aufleuchtet. In diesem Momente wird, glaube ich, das Maximum der Empfindung erreicht sein; es hat sich auch an zahlreichen Versuchen, die ich mit meinen Mitbeobachtern ausgeführt habe, gezeigt, dass durch noch längere Exposition die relative Helligkeit nicht weiter gesteigert werden kann, wohl aber bald deutlich zu sinken beginnt.

Tabelle XII.

Nr.	Expositionszeit in Sek.		Beobachtung
	von Feld I ¹⁾	von Feld II ¹⁾	
79	0,032 l	0,048 r	Nur Metakontrastbild von Feld I wahrzunehmen. Der von Feld I aufleuchtende periphere Saum dunkler als Feld II.
80	0,048 r	0,046 l	Nur Metakontrastbild von Feld I, welches, auch im äussersten, hellsten Teil, dunkler ist als Feld II.
81	0,054 l	0,048 r	Nur Metakontrastbild von Feld I. An der Grenze stets ein dunkler Saum.
82	0,064 l	0,048 r	Feld I zeigt in jedem Zeitmoment dunklen Grenzsäum. Der periphere Anteil von Feld I ist aber heller als Feld II.
83	0,064 r	0,064 l	Feld I erscheint an der Grenze stets dunkler, aber peripher heller als Feld II.
84	0,096 r	0,064 l	Der dunkle Grenzsäum von Feld I ist bedeutend schmaler, aber in keinem Augenblicke ganz erhellt.
85	0,104 r	0,064 l	Ebenso.
86	0,112 r	0,064 l	Feld I leuchtet bereits in allen Teilen gleichzeitig in maximaler Helligkeit auf; bei manchen Beobachtungen erscheinen am oberen und untern Ende der Grenzlinie dunklere Zwickel als Rudimente des Hemmungsbildes.
87	0,128 r	0,064 l	Feld I erscheint einen Moment in allen Teilen gleichmässig hell und verschwindet dann mit Metakontrastbild.

1) Beide Felder erscheinen unmittelbar hintereinander.

Daraus folgt: Während andauernder Belichtung steigt die Empfindung unter den gegebenen Umständen während der ersten 0,112" an. Wenn man das metaphotische Bild von Feld I durch Belichtung der Nachbarschaft vernichtet, so genügt erst eine Expositionszeit von 0,112", um Feld I für einen Moment homogen erhellt zu sehen. Bei geringerer Expositionszeit nimmt die Helligkeit des peripheren Saumes des Feldes I beim Aufleuchten des Feldes II noch zu; man sieht Feld I keinen Augenblick homogen hell, sondern nimmt bloss sein Metakontrastbild wahr. Durch Verlängerung der Expositionszeit über 0,112" wird die Helligkeit von Feld I nicht weiter gesteigert.

Die Versuche 79—87 (Tab. XII) mögen als Beispiel dafür dienen, wie mit Hilfe der chronophotischen Methode die homophotische Maximalzeit bestimmt werden kann. Diese Ermittlung geht, um es noch einmal zu sagen, von dem folgenden Gedanken aus: Wird das metaphotische Bild von Feld I durch einen unmittelbar nach dem Verschwinden des Feldes I aufleuchtenden Nachbarreiz abgeschnitten, so wird Feld I an der Grenze gegen Feld II zu allererst abgedunkelt, während an der Peripherie noch keine Hemmung besteht und daher die Empfindung noch weiter ansteigen kann. Wenn man daher zu einer Zeit, da die relative Helligkeit des Feldes I noch nicht ihr Maximum erreicht hat, dessen metaphotisches Bild von einer Seite her abschneidet, so wird die relative Helligkeit an der Peripherie des Feldes I noch ansteigen, während sie an der Grenze gegen Feld II schon durch Hemmung absinkt. In diesem Falle sieht man von Feld I in keinem Augenblick ein homogenes, sondern überhaupt nur das Metakontrastbild.

Wenn man aber Feld I so lange beleuchtet, dass seine Helligkeit ihr Maximum erreicht, so wird es, wenigstens in einem bestimmten Momente, in allen seinen Teilen gleichzeitig von gleicher maximaler Helligkeit sein, welche homogene Erscheinung beim Auftreten des Feldes II dem Metakontrastbilde Platz macht. Diese Helligkeit muss auch die maximale sein; denn, wäre ein weiteres Ansteigen möglich, so müsste ja beim Erscheinen des Nachbarreizes die Helligkeit des Feldes I einerseits an der Grenze sinken, andererseits an der Peripherie steigen. Es ist aber, wie die Versuche lehren, nicht möglich, ein Ansteigen der Helligkeit des peripheren Saumes des Feldes I zu beobachten, wenn das Feld II in einem Zeitpunkte

erscheint, da schon einmal das ganze Feld I für einen Augenblick homogen aufgeleuchtet hat.

Zur Ermittlung der Maximalzeit eines übermaximal dauernden Reizes hätte man den Augenblick zu bestimmen, in welchem die Helligkeit eines während einer übermaximalen Zeit kontinuierlich exponierten Lichtfeldes am grössten ist. Die Ausführung dieser Aufgabe ist unmöglich, weil wir nicht imstande sind, die einzelnen Phasen des ansteigenden und abfallenden Teiles einer Lichtempfindung für sich wahrzunehmen, sondern nur einen Gesamteindruck aufzufassen vermögen¹⁾.

Die Bestimmung der metaphotischen Maximalzeit besteht in der Ermittlung derjenigen Expositionszeit eines Lichtfeldes, welche eben hinreicht, damit das Lichtfeld, dessen metaphotisches Bild seinen normalen Ablauf nimmt, von der grössten durch den betreffenden Reiz überhaupt erreichbaren Helligkeit erscheine.

Das war die Aufgabe aller bisherigen Bestimmungen der Maximalzeit.

Eine Übersicht der verschiedenen Prinzipien, nach welchen diese Bestimmungen vorgenommen wurden, findet sich in meiner Abhandlung „Über den physiologischen Proportionalitätsfaktor“²⁾.

Alle Simultanvergleiche nebeneinander dargebotener Lichtfelder zum Zweck der Ermittlung der Maximalzeit leiden unter der Wirkung des Umgebungskontrastes, und alle sukzessiven Vergleiche des Mess- und Reizfeldes scheitern bei der Mehrzahl der Beobachter an der Unmöglichkeit, aus dem Gedächtnisse halbwegs verlässliche Vergleichsurteile abzugeben. Wenigstens der Autor dieses und seine Mitbeobachter waren nicht imstande, durch sukzessiven Vergleich zweier mit einer Pause von ungefähr 1—2 Sek. hintereinander folgender Felder von geringem Unterschiede der Helligkeiten das Verhältnis der letzteren mit genügender Sicherheit anzugeben. Bei darauf gerichteter Übung scheint man es aber dennoch im sukzessiven Helligkeitsvergleiche zu einer grossen Sicherheit bringen zu können, wie namentlich die überraschenden Ergebnisse der in letzter Zeit veröffentlichten Untersuchungen J. F. Flügel's und W. McDougall's³⁾

1) Vgl. R. Stigler, Über die Unterschiedsschwelle im aufsteigenden Teile einer Lichtempfindung. Pflüger's Arch. Bd. 123 S. 169. 1908.

2) l. c.

3) l. c.

über die Maximalzeit, den zeitlichen Verlauf einer Gesichtsempfindung und ganz besonders über die zeitliche Unterschiedsschwelle für Helligkeiten beweisen. W. McDougall unterschied die Helligkeiten zweier mit einer Pause von $1\frac{1}{2}$ Sek. hintereinander dargebotener objektiv gleicher Reize, welche sich bloss um $\frac{1}{25}$ ihrer Expositionszeiten unterschieden; für Dr. Flügel betrug die zeitliche Unterschiedsschwelle bei sukzessivem Vergleiche unter denselben Bedingungen gar nur $\frac{1}{60}$ der gesamten Expositionszeit¹⁾.

Allerdings stellte sich heraus, dass nicht bloss der Helligkeitsunterschied, sondern auch der Unterschied der Expositionsdauer selbst als Faktoren dieser Unterschiedsschwelle zu betrachten sind. Angesichts einer so bedeutenden zeitlichen Unterschiedsempfindlichkeit der beiden Autoren scheinen deren Ermittlungen der Maximalzeit durch sukzessiven Vergleich, also unter Ausschaltung des Simultan-contrastes, sehr genau zu sein.

Im Prinzipie haben diese letzten Untersuchungen die bisher bekannten Grundsätze über den zeitlichen Verlauf einer Lichtempfindung bestätigt.

IV. Teil.

Chronophotische Untersuchung der Beziehungen zweier Lichtempfindungen, welche durch zwei Nachbarreize hervorgerufen werden, die zu verschiedener Zeit beginnen und zugleich enden.

Für die Deutung der zur Ermittlung des zeitlichen Verlaufes und der Maximalzeit der Helligkeitsempfindungen vorgenommenen Simultanvergleiche zweier Nachbarreize ist die Kenntnis der durch sie bewirkten Kontrasteffekte unumgänglich nötig. Den Ausgangspunkt dieser Untersuchungen bildete, wie eingangs erwähnt, meine Beobachtung, dass von zwei übermaximal exponierten objektiv gleichen Nachbarfeldern, welche zu verschiedener Zeit beleuchtet und zugleich verdunkelt werden, das früher exponierte bei einer gewissen Grösse der zeitlichen Differenz der Expositionszeiten stets heller erschien als das später exponierte, obwohl dieses, für sich allein exponiert, als dem Maximum näher stehend, heller erscheinen müsste.

Die im folgenden zu untersuchende Frage lautet: Welchen Einfluss hat die Grösse der zeitlichen Differenz im Beginne zweier ob-

1) l. c. S. 194.

ektiv gleicher Nachbarreize, welche nach variabler Expositionszeit gleichzeitig verschwinden, auf das Verhältnis der relativen Helligkeit der beiden Vergleichsfelder?

Aus früheren Untersuchungen¹⁾ ist folgendes bekannt: Schon eine sehr geringe Differenz im Beginne der beiden Nachbarreize reicht hin, um das früher aufleuchtende Feld heller erscheinen zu lassen. Die geringste Differenz, welche diesen Effekt herbeiführt, habe ich als „zeitliche Unterschiedsschwelle“ bezeichnet. Die zeitliche Unterschiedsschwelle ist für zwei bestimmte objektiv gleiche Lichtreize vor allem von der Expositionszeit abhängig. Sie steigt nach den bisherigen Versuchen mit der Expositionszeit bis zu einer gewissen Grösse der letzteren (Maximalzeit?) diskontinuierlich an und bleibt dann konstant, d. h. von zwei übermaximal exponierten objektiv gleichen Nachbarfeldern, welche gleichzeitig verschwinden, erscheint dasjenige, welches um die obere Grenze der zeitlichen Unterschiedsschwelle vor dem anderen aufleuchtet, immer heller als das später exponierte, wenn nicht die gesamte Expositionszeit eine verhältnismässig sehr lange, nicht scharf bestimmte Grösse erreicht, so dass beide Felder zum Schluss gleich hell erscheinen. Letztere Erscheinung tritt zufolge „lokaler Adaptation“ (Hering) ein.

Dass die länger dauernde von zwei übermaximalen Nachbarempfindungen objektiv gleichen Ursprungs die kürzerdauernde an Intensität übertrifft, widerspricht der sicher festgestellten Tatsache, dass jede Lichtempfindung nach ihrem Maximum absinkt. Als Ursache der erwähnten scheinbar paradoxen Erscheinung ist die durch die chronophotischen Grundversuche bewiesene kontrastive Herabsetzung der Erregbarkeit des Feldes II durch die vorhergehende Beleuchtung des Feldes I anzunehmen; im Einklang mit dieser Auffassung erscheint die obere Grenze der zeitlichen Unterschiedsschwelle als „zeitliche Kontrastschwelle“. Unter dieser ist die geringste Zeit zu verstehen, um welche das eine von zwei objektiv gleichen nach übermaximaler Expositionszeit gleichzeitig abgedunkelten Nachbarfeldern vor dem anderen exponiert werden muss, damit es trotz übermaximaler Expositionszeit beider heller als das später beleuchtete erscheine.

1) R. Stigler, Über die Unterschiedsschwelle im aufsteigenden Teile einer Lichtempfindung. Pflüger's Arch. Bd. 123 S. 163—223. 1908.

Pflüger's Archiv für Physiologie. Bd. 134.

Wird die zeitliche Differenz im Beginne beider Lichtreize über die zeitliche Kontrastschwelle hinaus verlängert, so wird der Helligkeitsunterschied beider Felder zugunsten des Feldes I noch deutlicher, bis endlich die zeitliche Differenz eine gewisse Grösse erreicht, bei welcher ein Umschlag dieses Verhaltens eintritt, indem Feld I dunkler erscheint als Feld II.

Eine folgerichtige Behandlung der eingangs gestellten Frage zerfällt somit in zwei Abschnitte:

1. Die Untersuchung der Wechselbeziehungen zweier gleicher und gleichzeitig verschwindender Nachbarreize, wenn die Differenz im Beginne beider kleiner ist als die zeitliche Kontrastschwelle,
2. wenn dieselbe grösser ist als die zeitliche Kontrastschwelle.

1. Die zeitliche Unterschiedsschwelle und Kontrastschwelle.

Die erste Untersuchung betrifft die zeitliche Unterschiedsschwelle.

Da bei meiner früheren Untersuchung der letzteren die beiden Vergleichsfelder von bloss subjektiv gleicher Lichtstärke und ausserdem durch eine schwarze Trennungslinie getrennt waren, woraus eine gewisse Unsicherheit in der Deutung der Beobachtungen hervorging, so schien mir die Wiederholung gleicher Versuche mit unmittelbar benachbarten Feldern von objektiv gleicher Lichtstärke wünschenswert. Dieselbe wurde mit Hilfe des Chronophotometers I vorgenommen.

Die Lichtstärke des Feldes, dessen beide Hälften miteinander verglichen wurden, betrug 0,057 VK. (deutsche Vereinskerzen). Jede Einstellung wurde dem Beobachter viermal hintereinander mit Zwischenpausen von je $4\frac{1}{2}$ Sekunden dargeboten. Da ich über keinen geeigneten Mitbeobachter verfügte, so musste ich mich darauf beschränken, selbst als Beobachter zu fungieren, während Herr cand. med. E. Weiser die Einstellung der Scheiben vornahm. Die Unvoreingenommenheit des Beobachters wurde durch fortgesetzte Beimengung von Vexierversuchen (Gleichstellung beider Expositionszeiten oder Wiederholung derselben Einstellung) gesichert. Die unmittelbare Nachbarschaft der beiden Vergleichsfelder, sowie der Wegfall des Fixierzeichens während der Exposition der Vergleichsfelder erwies sich als so bedeutende Versuchserleichterung, dass wir den Verlauf der zeitlichen Unterschiedsschwelle bis zu deren oberer Grenze

zum Vorteile der Vergleichbarkeit der einzelnen Resultate schon in 8 Tagen feststellen konnten, wobei von unseren Versuchsreihen 594, also insgesamt 2376 Beobachtungen, protokolliert wurden.

Die Untersuchung wurde mit einer Expositionszeit von 0,01 Sek. begonnen, welche zur deutlichen Wahrnehmung des Reizfeldes völlig genügte. Dann wurde immer die zeitliche Unterschiedsschwelle bei Verdoppelung der vorher untersuchten Expositionszeit bestimmt, also nacheinander bei 10, 20, 40, 80, 160 σ , dann erst wurden die Zwischenzeiten eingestellt und dabei die ursprünglich gefundenen

Tabelle XIII.

Reizdauer = 15 σ . Beobachter Stigler. 1° = 1 σ .

Differenz 1)		Vergleichsurteile		Mittel		Ergebnis	
links	rechts						
7. April 1908.							
$\frac{1}{2}$	—	=	l	=	=	=	$\frac{1}{2}$ $3\frac{1}{2} +, 1\frac{1}{2} ?, 2 f.$ 1 $4\frac{1}{2} +, \frac{1}{2} ?.$ Somit für: EZ = 0,015 Sek. US = 0,001 Sek.
1	—	l	l	l	l	l	
—	$\frac{1}{2} r$	?	r	r	r	r	
—	1 r	r	r	r	r	r	
—	1 r	?	r	?	r	$\frac{r}{2}$	
0	0	?	?	r	?	?	
8. April 1908.							
—	1 r	r	=	r	r	r	$\frac{r}{2}$ 1 1 1 1 1 1
0	0	l	l	l	=	l	
$\frac{1}{2}$	—	?	l	l	l	l	
—	$\frac{1}{2} r$	?	r	r	?	$\frac{r}{2}$	
$\frac{1}{2}$	—	l	l	l	l	l	
—	$\frac{1}{2} r$	r	l	l	l	l	
—	$\frac{1}{2} r$	l	?	l	l	l	
1	—	l	l	l	?	l	

Zeichenerklärung: Reizdauer = Expositionszeit des länger exponierten Vergleichsfeldes; die Zahlen bedeuten die Grösse der Sektoren in Graden, in diesem Falle also auch die Zeit in σ (Tausendstel Sek.), r = „rechts heller“, l = „links heller“, = heisst „gleich“, ? bedeutet „unbestimmt“.

Wenn unter vier Angaben zwei ? oder = und die beiden anderen gleichlautend sind, so zähle ich dies bei der Auswertung als halbe Einheit für die betreffende Seite und als halbe Einheit für „unbestimmt“. Z. B.: r, ?, r, = geben im Mittel „ $\frac{r}{2}$ “, „+“ bedeutet „richtig“, „f“ „falsch“. EZ = Expositionszeit, US = zeitliche Unterschiedsschwelle.

1) „Links“ bzw. „rechts“ bedeuten, dass „links“ bzw. „rechts“ um die angegebene Differenz länger exponiert wurde-

Unterschiedsschwellen immer wieder kontrolliert. Auf diese Weise trachtete ich, den Einfluss der Übung möglichst auszugleichen, so dass alle Punkte der Kurve der Unterschiedsschwelle, soweit es überhaupt möglich ist, unter gleichen Umständen ermittelt wurden. Zum Zwecke der gleichartigen Verwertung der Beobachtungsergebnisse stellte ich mir folgende willkürliche Regel auf: als zeitliche Unterschiedsschwelle wird diejenige Differenz der Expositionszeiten

Tabelle XIV.

Reizdauer = 120 σ . Beobachter Stigler. $1^0 = 1 \sigma$.

Differenz		Vergleichsurteile	Mittel	Ergebnis
links	rechts			

6. April 1908.

—	5	r	r	r	r	r	$\frac{3\frac{1}{2}}{2+, 2?, 3f.}$ $\frac{4}{10+, 4?, 1f.}$ Somit für: $EZ = 0,12 \text{ Sek.}$ $US = 0,004 \text{ „}$
—	4	r	r	r	r	r	
3	—	?	=	=	=	=	
4	—	l	=	l	l	l	
—	4	?	r	=	=	?	
—	5	l	l	l	?	l	
5	—	l	l	l	l	l	
4	—	r	?	r	r	r	
—	5	r	r	r	?	r	
—	4	r	r	?	r	r	
4	—	=	?	=	r	?	
4	—	?	=	=	r	?	
5	—	l	?	l	l	l	
4,5	—	l	=	r	?	?	
—	5	r	r	r	r	r	
—	4	r	?	l	l	?	
5	—	l	l	l	l	l	
4,5	—	l	l	l	l	l	
4	—	l	l	l	l	l	
—	4	r	r	r	?	r	
3,5	—	l	l	l	l	l	
—	3 $\frac{1}{2}$	r	r	r	r	r	
—	3	r	r	r	r	r	
3	—	r	?	r	r	r	
—	3	r	r	?	l	?	
—	3 $\frac{1}{2}$	l	l	l	l	l	

7. April 1908.

4	—	l	l	l	l	l
4	—	r	l	l	l	l
—	0	r	r	?	r	r
—	4	l	?	l	l	l
—	4	?	r	r	r	r
3,5	—	r	l	l	=	?
3,5	—	l	=	?	r	?
—	3 $\frac{1}{2}$	l	?	l	l	l
—	4	r	r	r	r	r
3,5	—	r	r	r	?	r

Tabelle XV.

Reizdauer = 200 σ . Beobachter Stigler. 1 Umdrehung in 0,488 Sek.,
 $1^\circ = 0,00135$ Sek., $150^\circ = 0,203$ Sek. Die Zahlen bedeuten Grade.

11. April 1908.

Differenz		Vergleichsurteile				Mittel	Ergebnis
links	rechts						
7	—	l	?	l	l	l	6
7	—	l	l	?	l	l	$2 +, 2?, 2f.$
0	0	r	r	r	r	r	$6\frac{1}{2}$
—	7	r	r	r	r	r	$4 +, 1?$
—	6	r	r	r	r	r	
6	—	?	l	=	l	$\frac{1}{2}$	Somit für:
6	—	r	l	?	r	?	$EZ = 0,2$ Sek.
—	6	=	l	l	l	l	$US = 0,008\,775$ Sek.
6	—	l	l	?	?	$\frac{1}{2}$	
6	—	r	?	r	r	r	
$6\frac{1}{2}$	—	l	l	r	r	?	
$6\frac{1}{2}$	—	l	l	l	l	l	
0	0	?	r	r	r	r	
—	$6\frac{1}{3}$	r	r	?	?	$\frac{r}{2}$	
—	$6\frac{1}{2}$	r	r	?	r	r	
0	0	l	l	?	l	l	
$6\frac{1}{2}$	—	l	=	l	l	l	
—	$6\frac{1}{2}$	r	r	r	r	r	

betrachtet, bei deren Einstellung unter den Angaben des Beobachters mindestens dreimal so viel richtige als falsche bzw. doppelt so viel richtige als unbestimmte sind. Bei der Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe von 1° pro 1 σ konnten nur Expositionszeiten bis zu 178 σ untersucht werden. Zur Herstellung längerer Expositionszeiten musste sich die Scheibe langsamer drehen. Dadurch wurde zwar der Fehler der allmählichen Aufdeckung des Reizfeldes durch den vorüberrotierenden Sektorenrand vergrößert, dies kommt aber um so weniger in Betracht, je länger die Expositionsdauer ist.

Die Bestimmung der zeitlichen Unterschiedsschwelle bot, sowie sich dies auch bei meinen früheren Untersuchungen gezeigt hatte, die grössten Schwierigkeiten bei mittleren Expositionszeiten; bei höheren Expositionszeiten (über 200 σ) traten die Urteilsschwankungen des Beobachters wieder spärlicher auf. Als Beispiel gebe ich aus unseren Protokollen die Untersuchungsreihen bei einer Expositionszeit von 15 σ (Tab. XIII), 120 σ (Tab. XIV), 200 σ (Tab. XV) und 260 σ (Tab. XVI) wieder, und zwar in Reihenfolge und Inhalt gleichlautend mit den protokollarischen Aufzeichnungen, um zu zeigen, in welcher

Weise der Beobachter durch fortgesetzte Einschaltung von Täuschungsversuchen nach Möglichkeit zu Unbefangenheit bei der Abgabe des Vergleichsurteiles veranlasst wurde. Von der Expositionszeit von 0,24 Sek. an bleibt die Unterschiedsschwelle konstant, nämlich $9,3 \sigma$. Das um diese Zeit früher exponierte Feld erscheint auch bei einer Expositionszeit von einer halben Minute heller als das später belichtete.

Tabelle XVI.

Reizdauer = 260 σ . Beobachter Stigler. 1 Umdrehung in 1,13 Sek., $1^\circ = 0,0031$ Sek., $84^\circ = 0,26$ Sek.

Differenz		Vergleichsurteile				Mittel	Ergebnis	
links	rechts							
11. April 1908.								
—	4	r	r	r	r	r	$\frac{2^{1/2}}{1/2 + 3^{1/2} ?}$	
4	—	l	l	l	l	l		
3	—	l	l	?	l	l		
3 ^{1/2}	—	l	l	l	l	l		
2,5	—	?	r	l	?	?		
—	4,25	r	?	r	?	$\frac{r}{2}$	Somit für: EZ = 0,26 Sek. US = 0,0093 Sek.	
—	4	r	?	r	r	r		
—	3 ^{1/2}	l	?	r	r	?		
4	—	l	l	l	l	l		
3,5	—	r	l	l	l	l		
—	3,5	l	r	?	r	?		
13. April 1908.								
3,5	—	l	l	l	l	l	$\frac{l}{2}$	
3,25	—	l	l	?	=	$\frac{r}{2}$		
—	3	r	r	r	r	r	$\frac{r}{2}$	
—	2,5	?	?	r	r	$\frac{r}{2}$		
3	—	l	l	l	l	l	?	
2,5	—	l	l	r	r	?		
3,25	—	l	r	l	r	?	?	
—	3	r	l	?	r	?		
—	3,5	r	r	r	r	r	?	
3	—	r	l	l	l	l		
2,5	—	r	r	l	?	?		
3	—	r	l	l	l	l		

Um noch grössere Expositionszeiten zu untersuchen, verlieh ich der Sektorenscheibe S_1 eine Umdrehungsgeschwindigkeit von 100° pro Sek., so dass die höchste bei dieser Umdrehungsgeschwindigkeit einstellbare Expositionszeit 1,8 Sek. betrug. Um jetzt die Pause zwischen den einzelnen Darbietungen nicht zu gross zu gestalten,

entfernte ich bei dieser langsamen Umdrehung der Scheibe S_1 die 12mal langsamer rotierende Scheibe S_2 , so dass der Lichtreiz bei jeder Umdrehung der Scheibe S_1 , also alle 3,6 Sek., wiederkehrte. Bei dieser geringen Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe S_1 waren zur allmählichen Aufdeckung des elliptischen Reizfeldes 0,07 Sek. erforderlich. Es schien mir daher nötig, zu untersuchen, ob eine so langsame Abdeckung der Lichtfläche irgendeinen Einfluss auf die zeitliche Unterschiedsschwelle habe. Ich prüfte dies bei Expositionszeiten, für welche die zeitliche Unterschiedsschwelle schon bestimmt war, nämlich von 300—500 σ , und fand, dass die allmähliche Abdeckung des Reizfeldes keinen Einfluss auf die Erscheinung habe, dass das um $9^{1/2} \sigma$ früher exponierte Feld stets heller erschien als das später beleuchtete. Letzteres Verhalten blieb bis zur höchsten untersuchten Expositionszeit von 1,8 Sek. konstant (Tab. XVII); jedoch zeigte sich von einer Expositionszeit von etwa 1,7 Sek. an die Erscheinung, dass bei Konzentration der Aufmerksamkeit auf den Moment des Verschwindens der Ellipse diese in beiden Hälften gleich hell erschien. Sehr deutlich ist dies bei den höchsten untersuchten

Tabelle XVII.

Beobachter Stigler. 1 Umdrehung in 3,6 Sek., 1° 0,01 Sek. Die Zahlen bedeuten Grade.

Gesamt-EZ	Differenz		Vergleichsurteile				Mittel
	links	rechts					
30	1	—	l	l	l	l	l
30	1	—	?	?	l	l	$\frac{l}{2}$
30	1	—	l	l	l	l	l
40	—	1	r	l	l	l	l
40	—	2	r	r	r	r	r
40	1	—	l	l	r	l	l
50	—	2	r	r	r	r	r
60	—	1	l	r	r	r	r
60	1	—	l	l	l	l	l
50	—	1	r	r	r	r	r
70	—	1	l	l	—	l	l
70	1	—	l	—	l	l	l
70	—	1	?	r	r	—	$\frac{r}{2}$
70	1	—	r	l	l	l	l
70	1	—	l	l	l	l	l
80	—	2	r	r	r	r	r
100	—	2	r	r	r	r	r
120	2	—	l	l	l	l	l
180	2	—	l=	l=	l=	l=	l=
180	—	3	r=	r=	r=	r=	r=

Expositionszeiten zu beobachten, z. B. von 1,5—1,8 Sek. Nie konnte ich bemerken, dass die später erschienene Ellipsenhälfte heller erschienen wäre als die früher beleuchtete.

Tabelle XVIII.

Expositionszeit in Tausendstel-Sek.	zeitliche Unter- schiedsschwelle in Tausendstel-Sek.
10	0,5
15	1
20	2
40	2,5
60	2
80	3 (4)
100	4,5
120	4
140	5,5
160	5
180	7
200	8,775
240	9,45
260	9,3
280	9,3
330	9,3
360	9,3
500	9,3
600	> 10
700	> 10

Ich gebe in Tab. XVIII die Reihe aller von mir ermittelten zeitlichen Unterschiedsschwellen und in Fig. 7 deren graphische Darstellung als Kurve wieder. Diese ist nahezu übereinstimmend mit der Kurve, welche nach meinen früheren Beobachtungsergebnissen konstruiert worden war¹⁾. Es zeigen sich auch hier drei ähnlich verlaufende Oszillationen im Anstiege der Kurve. Es ist dabei noch nicht sicher entschieden, an welchem Punkte der Kurve die Maximalzeit liegt.

1) R. Stigler, Über die Unterschiedsschwelle usw. L. c. S. 221.

Die obere Grenze der bei meinen früheren Untersuchungen gefundenen zeitlichen Unterschiedsschwellen betrug 0,033 Sek., während sie sich bei der hier vorliegenden Untersuchung bloss auf 0,01 Sek. beläuft. Auch ein Vergleich der zu gleichen Expositionszeiten gehörigen zeitlichen Unterschiedsschwellen ergibt für die letztere Untersuchungsreihe geringere Werte als für die erstere. Da die Lichtstärke des Reizfeldes meiner ersten Untersuchungsreihe geringer war als die der letzten, so lag der Schluss nahe, dass die Grösse der zeitlichen Unterschiedsschwelle, bzw. auch der zeitlichen Kontrastschwelle, von der Lichtstärke abhängt. Ich bestimmte deshalb die zeitliche Kontrastschwelle für zwei sicher übermaximal (nämlich während 0,55 Sek.) exponierte Lichtfelder von grösserer Lichtstärke. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Tab. XIX enthalten. Die zeitliche Kontrastschwelle beträgt nur 0,00465 Sek., wodurch erwiesen erscheint, dass die absolute Grösse der zeitlichen Unterschiedsschwelle, bzw. der zeitlichen Kontrastschwelle, mit zunehmender Lichtstärke abnimmt.

Tabelle XIX.

Grössere Lichtintensität (Beinglas aus dem Lampenschirm entfernt). Reizdauer: 0,55 Sek. $1^{\circ} = 0,0031$ Sek. Beobachter Stigler.

13. April 1908.

Differenz		Vergleichsurteil				Mittel	Ergebnis
links	rechts						
—	4	r	r	r	r	r	$US = 1\frac{1}{2}^{\circ} = 0,00465$ Sek.
4	—	l	l	l	l	l	
3	—	l	l	l	l	l	
3	—	l	l	l	l	l	
—	$1\frac{1}{2}$	r	r	r	?	r	
$1\frac{1}{2}$	—	l	?	l	l	l	
$1\frac{1}{2}$	—	l	l	l	l	l	
—	1	r	r	r	r	r	
—	$\frac{1}{2}$	l	l	=	=	$\frac{l}{2}$	
—	$\frac{1}{2}$	l	l	r	r	?	
1	—	l	l	r	r	?	
1	—	r	r	r	r	r	
1	—	l	?	r	r	?	
$1\frac{1}{2}$	—	r	r	r	l	r	
—	$1\frac{1}{2}$	r	r	r	r	r	
—	$1\frac{1}{2}$	r	r	r	r	r	
$1\frac{1}{2}$	—	l	l	?	l	l	
$1\frac{1}{2}$	—	l	l	?	l	l	

Gelegentlich dieser Untersuchung zeigte sich auch, dass die zeitliche Differenz im Beginne beider Reize, welche

eben hinreicht, um zu erkennen, dass beide Felder nicht gleichzeitig, sondern eines nach dem anderen beleuchtet werden, von der Lichtstärke abhängt, und zwar ebenfalls mit zunehmender Lichtstärke abnimmt. Denn bei der zuletzt verwendeten grossen Lichtstärke bemerkte man bereits bei einer Differenz von 0,012 Sek. einen Augenblick eine Hackenfigur als Zeichen der ungleichzeitigen Beleuchtung beider Ellipsenhälften, während bei der geringeren Lichtstärke der früheren Untersuchungen eine zeitliche Differenz von 0,015 Sek. hierzu erforderlich war. Diese Erscheinung erklärt sich aus dem von S. Exner beobachteten Verhalten, dass die zur deutlichen Wahrnehmung eines Gegenstandes nötige Zeit abnimmt, wenn dessen Lichtstärke zunimmt¹⁾.

2. Die zeitliche Kontrastbreite.

Welche Beziehungen bestehen zwischen den beiden Nachbarempfindungen, wenn Feld II um eine die zeitliche Kontrastschwelle übertreffende Zeit nach Feld I exponiert wird und beide Felder gleichzeitig verschwinden?

Solange die Expositionszeit des längerexponierten Feldes untermaximal ist, erscheint das später exponierte Feld II in jedem Falle dunkler, sobald die zeitliche Differenz gleich oder grösser als die zeitliche Unterschiedsschwelle ist. Obige Frage hat daher nur für eine übermaximale Expositionszeit eine Bedeutung.

Nach dem Maximum sinkt einerseits die Intensität der Empfindung I, entsprechend der Lichtstärke des Reizes mehr oder weniger steil, ab, anderseits wird aber auch die Erregbarkeit des Feldes II durch die vorhergehende Beleuchtung des Feldes I bis zu einem gewissen Grade um so mehr herabgesetzt, je länger Feld I vor Feld II beleuchtet worden war. Die Herabsetzung der Erregbarkeit des Feldes II durch Belichtung des Feldes I hat aber auch ihre Grenze.

Das Absinken der Lichtempfindungskurve nach dem Maximum bei andauernder Beleuchtung hängt wahrscheinlich mit der im ersten Teile besprochenen wechselseitigen Hemmung der einzelnen Elemente

1) S. Exner, Über die zu einer Gesichtswahrnehmung nötige Zeit. L. c. S. 24.

einer belichteten Netzhautfläche zusammen, welche mit der Beleuchtungsdauer und Lichtstärke zunimmt. Darum fällt die Lichtempfindungskurve um so steiler ab, je grösser die Lichtstärke des Reizlichtes ist.

Ob bei einer gewissen Differenz im Beginne beider Reize Feld I oder Feld II nach der gleichzeitigen objektiven Verdunkelung heller erscheint, wird davon abhängen, ob die (durch Binnenkontrast bedingte) Verminderung der relativen Helligkeit des Feldes I die durch Belichtung des Feldes I bedingte Herabsetzung der Erregbarkeit des Feldes II übertrifft, in welchem Falle sich beide Kurven kreuzen werden, oder ob die auf vorheriger Beleuchtung der Nachbarschaft beruhende Hemmung des Feldes II die durch Binnenkontrast bewirkte Hemmung des Feldes I übertrifft, in welchem Falle keine Kreuzung der beiden Kurven eintreten wird. Die chronophotische Untersuchung dieses Verhaltens besteht in der Vergleichung der beiden Lichtfelder: 1. bei Variation der zeitlichen Differenz im Beginne beider Reize bei gleichbleibender Gesamtexpositionszeit; 2. bei Variation der Gesamtexpositionszeit bei gleichbleibender Differenz im Beginne. Derartige Untersuchungen habe ich als Beobachter angestellt, wobei Herr cand. med. E. Weiser als Experimentator fungierte.

Tabelle XX (zu Fig. 8 Kurve A).

Lichtstärke = 4,5 *VK*. Differenz = 0,03 Sek. Beobachter Stigler.

30. November 1908.

Expositionszeit des Feldes I in Sek.	Feld I links (d. h. das linke Feld erscheint um 0,03 Sek. vor dem rechten)					Feld I rechts (d. h. das rechte Feld erscheint um 0,03 Sek. vor dem linken)					
	Welches Feld erscheint heller?										
	Einzelbeobachtung		Mittel	Kreuzungs- punkt	Einzelbeobachtung		Mittel	Kreuzungs- punkt			
0,06	1	1	1	1	1	keiner					
0,12						r	r	r	r	r	keiner
0,18	1	1	1	1	1	r	r	r	r	r	
0,24						r	r	r	r	r	
0,30	1	1	1	1	1	r	r	r	r	r	
0,36						r	r	r	r	r	
0,42	1	1	1	1	1	r	r	r	r	r	
0,48						r	r	r	r	r	
0,54	=	1	1	1	1						

Tabelle XXI. (Fig. 8 Kurve B.)
Lichtstärke wie für Tabelle XX. Differenz = 0,06 Sek. Beobachter Stigler.
27. November 1908.

Exposi- tionszeit d. Feldes I in Sek.	Feld I links		Feld I rechts			
	Einzelbeobachtungen		Welches Feld erscheint heller?			
	Mittel	Kreuzungspunkt	Einzelbeobachtungen		Mittel	Kreuzungspunkt
0,075	1	1	1	1	r	keiner
0,09	1	1	1	1	r	keiner
0,12	r	1	1	1	r	keiner
0,18	?	1	1	1	r	keiner
0,24	r	1	1	1	r	keiner
0,36	1	1	1	1	r	keiner

Tabelle XXII. (Fig. 8 Kurve C.)
Differenz = 0,075 Sek.

Exposi- tionszeit d. Feldes I in Sek.	Feld I links		Feld I rechts			
	Einzelbeobachtungen		Welches Feld erscheint heller?			
	Mittel	Kreuzungspunkt	Einzelbeobachtungen		Mittel	Kreuzungspunkt
0,12	1	1	1	1	r	keiner
0,12	r	?	1	1	r	keiner
0,18	1	1	1	1	r	keiner
0,24	?	1	1	1	r	keiner
0,24	?	?	1	1	r	keiner
0,3	1	r	1	1	r	keiner
0,42	?	1	1	1	r	keiner
0,54	=	1	1	1	r	keiner

Die beiden Kurven
fließen nach einer
Expositionszeit von
> 0,12 Sek. zu-
sammen

Tabelle XXIII. (Fig. 8 Kurve D.)
Differenz = 0,09 Sek.

Expositionszeit d. Feldes I in Sek.	Feld I links		Feld I rechts					
	Welches Feld erscheint heller?							
	Einzelbeobachtungen		Mittel	Kreuzungspunkt	Einzelbeobachtungen		Mittel	Kreuzungspunkt
0,105	l	l	l	bei 0,135 Sek.	r	r	r	bei 0,135 Sek.
0,12	r	l	l		r	r	r	
0,135	r	r	r		r	r	r	
0,15	r	r	r		l	?	?	
0,15	l	r	r		l	l	l	
0,18	r	r	r		l	l	l	
0,24	r	r	r		l	l	l	
0,3	r	r	l		l	l	l	
0,36	r	r	r		l	l	l	
0,42	r	r	r		l	l	?	
0,54	r	r	r		l	l	l	

Tabelle XXIV. (Fig. 8 Kurve E.)
Differenz = 0,12 Sek.

0,135	l	l	l	l	r	r	vor 0,15 Sek.
0,15	l	l	l	l	r	r	
0,15	r	?	?	?	l	l	
0,18	l	l	l	l	l	l	
0,24	r	r	r	r	l	l	
0,3	r	r	r	r	l	l	
0,42	r	?	?	?	?	?	
0,54	?	?	?	?	?	?	

Tabelle XXV. (Fig. 8 Kurve *F*.)

Differenz = 0,15 Sek.

Expositionszeit des Feldes I in Sek.	Feld I rechts					
	Welches Feld erscheint heller?					
	Einzelbeobachtungen				Mittel	Kreuzungspunkt
0,165	r	r	r	?	r	Zwischen 0,165 und 0,18 Sek.
0,18	l	l	l	l	l	
0,18	l	l	l	?	l	
0,24	l	l	l	l	l	
0,3	l	l	l	?	l	
0,36	l	l	l	?	l	
0,45	l	l	l	l	l	
0,54	l	l	=	l	l	

Tabelle XXVI. (Fig. 8 Kurve *G*.)

Differenz = 0,3 Sek.

0,318	r	r	r	r	r	bei 0,33 Sek.
0,33	=	?	?	?	?	
0,36	l	l	l	l	l	
0,42	l	l	l	l	l	
0,48	?	l	l	l	l	
0,54	l	r	r	l	?	

Tabelle XXVII. (Fig. 9.)

Lichtstärke = 0,06 VK. Beobachter Stigler. 15. Dezember 1908.

Expositionszeit des Feldes I (rechts) in Sek.	Differenz, um welche das rechte Feld (I) vor d. linken (II) erscheint	Welches Feld erscheint heller?					
		Einzelbeobachtungen				Mittel	Kreuzungspunkt
0,24	0,12	r	r	r	r	r	keiner
0,36	0,18	r	?	r	r	r	
0,54	0,06	r	r	r	r	r	
0,54	0,12	l	r	?	?	?	
0,54	0,18	r	r	r	?	r	
0,54	0,24	r	r	r	?	r	
0,6	0,2	r	=	r	r	r	
0,6	0,3	?	r	=	r	$\frac{r}{2}$	
0,6	0,4	r	r	?	r	r	
0,9	0,35	r	r	r	?	r	
0,9	0,5	=	l	=	=	=	
0,9	0,65	?	l	l	r	?	
0,9	0,7	r	r	r	?	r	

Tabelle XXVIII. (Fig. 9.)

Lichtstärke = 0,025 VK. Beobachter Stigler. 15. Dezember 1908.

0,21	0,12	r	r	r	r	r	keiner
0,3	0,12	r	?	r	r	r	
0,3	0,18	r	r	r	r	r	
0,51	0,12	r	r	r	?	r	
0,51	0,18	r	?	r	r	r	
0,51	0,24	=	l	?	?	?	
0,51	0,3	?	r	r	r	r	

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Kurven der Fig. 8 und 9 zum Ausdruck gebracht; die Tabellen 20—28 zeigen, wie ich die Koordinaten der einzelnen Punkte letzterer Kurven ermittelt habe. Es kam dabei wiederum darauf an, die Versuchsreihen in möglichst kurzer Zeit zu vollenden, damit sich nicht während der Versuchszeit die persönliche Einstellung und Übung des Beobachters ändere. Die Versuche der Tabellen 20 bis 28 wurden denn auch in einem Zeitraume weniger Tage vollendet. Mit Rücksicht auf die früher erwähnte und anderen Orts¹⁾ bewiesene Tatsache, dass ich bezüglich meiner Fovea „Rechts-sichter“ bin, schien es mir nötig, alle Versuche in zwei Reihen durchzuführen, einmal indem die rechte, das andere mal indem die linke Hälfte des Reizfeldes zuerst beleuchtet wurde. Beide Arten wurden indessen ohne Wissen des Beobachters abwechselnd angewendet. Die Differenzen, die sich für Feld I rechts und Feld I links ergaben, sind zu gering, als dass sie eine besondere Erörterung rechtfertigten.

Fig. 8. Herabsetzung der Erregbarkeit des Feldes II (Kurven A—G) durch vorherige Beleuchtung des Feldes I (Kurve I), bei grösserer Lichtstärke (4,5 VK.) beider Felder. Abszisse: Expositionszeit in Hundertstel-Sekunden; Ordinate: relative Helligkeit.

Aus den Tabellen 20—28 bzw. den aus ihnen konstruierten Kurven ergeben sich folgende Schlüsse:

Bei geringer Lichtstärke der beiden Vergleichsfelder (0,025 und 0,057 VK.) schneiden sich die Lichtempfindungskurven I und II gar

1) R. Stigler, Über den physiologischen Proportionalitätsfaktor. L. c.

nie, man mag die Differenz der Expositionszeiten so gross wie immer wählen. Bei entsprechend langer Gesamtexpositionszeit erscheinen die beiden Felder am Ende der letzteren gleich hell (lokale Adaptation Hering's).

Dass sich die beiden Kurven bei geringer Lichtstärke nicht schneiden, erklärt sich wohl dadurch, dass die (durch Binnenkontrast erfolgende) Verminderung der relativen Helligkeit des Feldes I bei geringer Lichtstärke schwächer ist als die durch die Nachbarlichtreizung hervorgerufene Herabsetzung der relativen Helligkeit des Feldes II. Es ist ja seit S. Exner's Untersuchungen bekannt, dass das Absinken der Lichtempfindung um so langsamer erfolgt, je geringer die Lichtstärke des Reizlichtes ist.

Fig. 9. Herabsetzung der Erregbarkeit des Feldes II (Kurve II und III) durch vorherige Beleuchtung des Feldes I (Kurve I) bei geringer Lichtstärke (0,025 und 0,06 VK.) beider Felder.

Bei grösserer Lichtstärke (4,5 VK.) schneiden sich die den beiden Nachbarreizen entsprechenden Kurven der relativen Helligkeiten, sobald die zeitliche Differenz zwischen dem Aufleuchten beider Felder eine gewisse Grösse erreicht hat. Letztere bezeichne ich in Analogie zur früher definierten „räumlichen Kontrastbreite“ als „zeitliche Kontrastbreite“. Sie beträgt im vorliegenden Beispiele (Lichtstärke = 4,5 VK.) 0,075 Sek.

Unter **zeitlicher Kontrastbreite** verstehe ich den geringsten zeitlichen Zwischenraum zwischen dem Aufleuchten des Feldes I und seines gleich lichtstarken und mit ihm nach übermaximaler Expositionszeit gleichzeitig verschwindenden Nachbarfeldes II, bei welcher Feld II am Ende der gesamten Expositionszeit eben heller erscheint als Feld I.

Die Abhängigkeit der zeitlichen Kontrastbreite von der Lichtstärke wurde unter Abschwächung der Lichtstärke der beiden

Vergleichsfelder ermittelt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Tabelle 29 enthalten und dort an die Seite der zu verschiedenen Lichtstärken gehörigen zeitlichen Kontrastschwellen gestellt.

Tabelle XXIX.

Lichtstärke	Zeitliche Kontrastschwelle	Zeitliche Kontrastbreite
I	0,005 Sek.	0,075 Sek.
II (I > II > III)	0,01 „	0,3 „
III	0,033 „	0,44 „

Diese Tabelle lehrt, dass die zeitliche Kontrastbreite zur Lichtstärke in gleichem Verhältnisse steht wie die zeitliche Kontrastschwelle, dass sie nämlich um so kleiner ist, je grösser die Lichtstärke des Reizfeldes ist.

Dies erklärt sich ungezwungen aus der mit der Lichtstärke zunehmenden Steilheit des Abfalles des nachmaximalen Teiles der Lichtempfindungskurve.

Zusammenfassung.

1. Als chronophotische Untersuchungen werden jene bezeichnet, welche die Erforschung des Einflusses der Expositionszeiten zweier Lichtfelder auf deren Helligkeitsverhältnis bezwecken.

Derjenige Teil der primären Lichtempfindung, des Bildes katexochen, welcher zugleich mit dem objektiven Lichtreize besteht, wird als homophotisches, derjenige Anteil des Bildes, welcher den objektiven Reiz überdauert, als metaphotisches Bild bezeichnet.

2. Die Intensität einer durch einen untermaximalen Reiz erzeugten Lichtempfindung steigt auch nach dem Verschwinden des Reizes an, mit andern Worten: Die Helligkeit des metaphotischen Bildes eines untermaximal beleuchteten Gegenstandes steigt anfangs an. Dieser Anstieg dauert um so länger, je geringer die Lichtstärke und je kürzer die Dauer des objektiven Reizes ist. Die Dauer des ansteigenden Teiles des metaphotischen Bildes eines untermaximal beleuchteten Gegenstandes kann die Reizdauer um ein Vielfaches übertreffen.

3. Ein metaphotisches Bild kann durch Belichtung der Nachbarschaft vernichtet werden. Diese Art des Umgebungskontrastes

wird als metaphotischer Kontrast oder Metakontrast bezeichnet.

4. Belichtung einer Netzhautstelle hemmt nicht nur einen in der Nachbarschaft bereits bestehenden Erregungszustand, sondern setzt auch die Erregbarkeit der noch nicht belichteten Nachbarschaft herab, so dass ein auf diese fallender Lichtreiz eine schwächere Helligkeitsempfindung auslöst, als es ohne vorübergehende Belichtung der Nachbarschaft der Fall wäre.

5. Zwei gleichzeitige homophotische oder metaphotische Nachbarbilder verdunkeln sich gegenseitig. Welches von beiden durch Kontrast stärker verdunkelt wird, hängt von dem Verhältnisse der jeweiligen Erregungszustände in demjenigen Teile des Sehorgans ab, in welchem der Kontrast zustande kommt. Dieser wird als „Kontrastregion“ bezeichnet. Die stärkere Erregung einer Kontrastregion unterdrückt die schwächere Erregung der benachbarten Kontrastregion. Die zentrale Erregung kann noch ansteigen, während die Erregung der Kontrastregion im Absinken begriffen oder schon erloschen ist. Für das Zustandekommen des Metakontrastes kommt es nicht auf das Verhältnis der Erregungszustände der zu den beiden beleuchteten Nachbarfeldern der Netzhaut gehörigen zentralen Teile des Sehorganes, sondern lediglich der zugehörigen Kontrastregionen an.

6. Der Metakontrast ist nicht von einem Auge auf das andere übertragbar. Die Kontrastregion liegt somit im monokularen Anteil des Sehorgans.

7. Die Aufhellung des Randes eines von einem schwarzen Grunde umgebenen hellen Feldes beruht nicht bloss auf einer Verminderung des Binnenkontrastes, sondern auch auf einer aktiven Weissinduktion seitens des schwarzen Hintergrundes.

8. Die grösste lineare Ausdehnung der deutlich wahrnehmbaren durch Metakontrast bewirkten Verdunkelung eines hinlänglich grossen, metaphotischen Bildes wird als räumliche Kontrastbreite bezeichnet. Die lineare Ausdehnung der metakontrastiven Verdunkelung eines von einem dunklen Hintergrunde umgebenen und entsprechend schmalen metaphotischen Bildes kann durch aktive Weissinduktion seitens des schwarzen Hintergrundes vermindert werden, so dass sie in diesem Falle geringer ist als die räumliche Kontrastbreite.

9. Der Metakontrast wächst bis zu einem gewissen Grade mit der Reizgrösse, er ist um so stärker, je grösser Lichtstärke und

Expositionszeit sowohl des kontrastleidenden, als auch des kontrasterregenden Feldes sind. Dementsprechend ist bei an der Schwelle stehender Lichtstärke oder Expositionszeit überhaupt kein Metakontrast wahrnehmbar.

10. Der Metakontrast wird durch einen schwarzen Trennungstreifen zwischen dem kontrastleidenden und kontrasterregenden Felde aufgehoben, welcher viel schmaler ist als die räumliche Kontrastbreite. Dies ist auf aktive Weissinduktion seitens des schwarzen Trennungstreifens zurückzuführen.

11. Die metakontrastive Verdunkelung des metaphotischen Bildes ermöglicht die annähernde Bestimmung sowohl der Anstiegsdauer eines metaphotischen Bildes, als auch der Maximalzeit eines homophotischen Bildes.

12. Die geringste zeitliche Differenz im Beginne zweier objektiv gleicher, gleichzeitig verschwindender unter maximaler Nachbarlichtreize, welche einen Unterschied der durch diese erzeugten Helligkeitsempfindungen bedingt, heisst zeitliche Unterschiedsschwelle. Auch von zwei objektiv gleichen, übermaximal exponierten und gleichzeitig abgedunkelten Lichtfeldern erscheint den meisten Beobachtern dasjenige heller, welches eine gewisse Zeit vor dem anderen beleuchtet wurde. Die geringste zeitliche Differenz, welche dieses Verhalten bedingt, heisst die zeitliche Kontrastschwelle. Wenn die zeitliche Differenz im Beginne beider Reize über die zeitliche Kontrastschwelle hinaus bis zu einer gewissen Grösse verlängert wird, so erscheint das früher exponierte der beiden Vergleichsfelder bei hinreichender Lichtstärke und übermaximaler Expositionszeit dunkler als das später exponierte. Die geringste zeitliche Differenz, bei welcher dieses Verhältnis auftritt, heisst die zeitliche Kontrastbreite.

13. Sowohl die zeitliche Unterschiedsschwelle, als auch die zeitliche Kontrastschwelle, als auch die zeitliche Kontrastbreite sind um so geringer, je grösser die Lichtstärke der Vergleichsfelder ist.

Den Herren stud. med. Otto Schiffner, Egon Weiser und Alfred Zanko sei für ihre aufopferungsvolle Mithilfe bei obigen Untersuchungen mein besonderer Dank ausgesprochen.