

(Aus der physikalischen Abteilung des physiologischen Instituts zu Berlin.)

Über die Abhängigkeit der Pupillarreaktion von Ort und Ausdehnung der gereizten Netzhautfläche.

Von

Dr. G. ABELSDORFF und Dr. H. FEILCHENFELD.

(Mit 2 Figuren im Text.)

Den Ausgangspunkt der Untersuchungen, über die wir im folgenden berichten, bildete eine Anregung Prof. NAGELS, die bekannte Abnahme der Pupillarreflexempfindlichkeit der Netzhaut vom Zentrum nach der Peripherie einer messenden Untersuchung in der Weise zu unterwerfen, daß als Reizlicht ein in seiner Intensität variables homogenes Rot benutzt wird, um so vom Adaptationszustande annähernd unabhängige Reizwerte zu erhalten. Unsere diesbezüglichen Kenntnisse weisen hier eine Lücke auf, die auch durch H. WOLFFS¹ Unterscheidung dreier konzentrischer Netzhautzonen, von denen „im Grade verschiedene Pupillenkontraktionen“ auslösbar sind, nur im groben Umrisse ausgefüllt wird.

Unsere Versuche scheiterten daran, daß es uns auch mit Hilfe von flüssigen Strahlenfiltern nicht gelang, ein einigermaßen homogenes Rot von derjenigen Helligkeit darzustellen, welche genügte, um sowohl bei exzentrischer, als auch nach Abschwächung bei zentraler Netzhautreizung einen Lichtreflex der Pupille auszulösen. Es ergab sich nämlich, daß schon in geringer Exzentrizität eine unerwartet große Intensität des roten

¹ Über Pupillenreaktionsprüfung mit Berücksichtigung der Refraktion des untersuchten Auges, sowie über eine zentrale und periphere Pupillenreaktion, nebst Angabe eines neuen Instruments. *Berl. klin. Wochenschr.* (28). 1900.

Reizlichtes erforderlich war, deren weitere Steigerung technische Schwierigkeiten bereitete.

Wir nahmen daher von einer Fortsetzung der Versuche um so eher Abstand, als sich uns im Verlaufe derselben eine Frage aufgedrängt hatte, deren Lösung zugleich eine Bestimmung des Anteils versprach, den die Netzhautperipherie an der Auslösung der Pupillarreaktion nimmt. In welcher Weise besteht eine Abhängigkeit der pupillomotorischen Werte leuchtender Objekte von ihrer Flächen- resp. Winkelgröße?

In der Literatur finden wir keine ausreichende Antwort. Während HELMHOLTZ¹ bei der Besprechung der Pupillarreaktion die Frage unerwähnt läßt, sagt AUBERT²: die Pupille verengt sich um so mehr, 1. je intensiver der Lichtreiz, 2. je größer die getroffene Netzhautfläche ist, 3. je näher der Lichtreiz der Fovea centralis liegt. Für die Richtigkeit des zweiten Satzes konnte er sich nur auf eine ältere Beobachtung von LAMBERT (Photometria 1760) stützen, die folgendermaßen angestellt worden war: L. blickte durch eine Öffnung in einem finsternen Zimmer nach dem hellen Himmel. Durch Entfernung von der Öffnung verkleinerte er allmählich ihren Gesichtswinkel. Er blickte dann jedesmal schnell nach einem Spiegel und maß mittels eines Zirkels den Durchmesser der Pupille. Bei einem Gesichtswinkel von 52' betrug derselbe 6,8 mm, bei 8° 36' 2,4 mm. Es erübrigt sich, auf die zahlreichen Fehlerquellen dieser, wie AUBERT selbst hinzufügt, „nicht tadellosen“ Untersuchung näher einzugehen. Auch LEESERS³ vorzügliche Literaturzusammenstellung erwähnt nichts weiter.

In der Literatur der letzten Jahre findet sich dagegen eine diesbezügliche Bemerkung von VERVOORT.⁴ In einer Abhandlung, welche die Pupillarreaktion als Mitbewegung der Konvergenz, nicht der Akkommodation erklärt, erörtert er die Frage, ob die scharfe Abbildung eines beleuchteten Dreiecks auf der

¹ Physiolog. Optik. 2. Aufl., S. 441.

² Physiolog. Optik. *Graefes-Saemisch Handb. d. ges. Augenheilk.* 2, S. 453. 1876.

³ Pupillarbewegung in physiologischer und pathologischer Beziehung. Wiesbaden 1881.

⁴ Die Reaktion der Pupille bei der Akkommodation und der Konvergenz und bei der Beleuchtung verschieden großer Flächen der Retina mit einer konstanten Lichtmenge. *v. Graefes Arch. f. Ophthalm.* 49 (2), S. 348. 1900.

Netzhaut einen anderen Pupillendurchmesser herbeiführe, als die Abbildung in Zerstreuungskreisen, „oder anders ausgedrückt: verursacht dieselbe Quantität Licht eine andere Pupillengröße, je nachdem sie über einen größeren oder einen kleineren Teil der Netzhaut verteilt wird?“ Zur Entscheidung dieser Frage wurden zwei, einen rechtwinkligen Ausschnitt tragende schwarze Pappscheiben so übereinander geschoben, daß sie einen Quadrat-ausschnitt von wechselnder Größe bildeten. Dieser mit Seidenpapier bedeckte Ausschnitt wurde von einer in veränderlicher Entfernung befindlichen Lampe von hinten beleuchtet. Die Pupillenweite wurde nun nach den Angaben V.s ausschließlich durch die einfallende Lichtquantität bestimmt; es zeigte sich nämlich, „daß die Pupille unverändert blieb“, wenn in 33 cm Entfernung ein Viereck fixiert wurde, das zuerst mit einer Seitenlänge von 2,5 cm von einer 25 cm entfernten Lichtquelle beleuchtet und nachher auf 5 cm Seitenlänge vergrößert aus einer Entfernung von 50 cm beleuchtet wurde; d. h. die in das Auge fallende Lichtmenge blieb in beiden Fällen dieselbe, indem die viermal geringere Intensität über eine viermal größere Ebene verteilt wurde. Eine viermalige Vergrößerung des Vierecks ohne Änderung der Lichtintensität verengte die Pupille von 4,5 mm auf 3 mm.

Diese Beobachtungen, von welchen besonders die letzte mit der von LAMBERT gemachten übereinstimmt, werden von VERVOORT selbst als nicht definitiv entscheidend und „nur innerhalb nicht zu weiter Grenzen als richtig“ bezeichnet. Wenn diesen Beobachtungen allgemeine Gültigkeit zukäme, so würde man zu dem, allerdings von den genannten Autoren nicht gezogenen Schlusse gedrängt, daß die Pupillarreflexempfindlichkeit (von HEDDÆUS mit *RE* bezeichnet) der zentralen und peripherischen Netzhautteile gleichwertig sei, während doch bekanntlich die *RE* mit der Entfernung vom Netzhautzentrum in dem Maße abnimmt, daß HEDDÆUS¹ die durch direkte Beleuchtung peripherischer Netzhautteile erzeugte Pupillarreaktion ausschließlich durch Miterleuchtung der Macula lutea erklären zu können glaubte. Wir wollen die Berechtigung dieser Erklärung zunächst unerörtert lassen und verweisen bezüglich derselben auf den

¹ Klinische Studien über die Beziehungen zwischen Pupillarreaktion und Sehvermögen. Inaug.-Dissert. Halle 1880.

Schluss unserer Arbeit. Zur Entscheidung der vorliegenden Frage über die Abhängigkeit der pupillomotorischen Werte leuchtender Flächen von ihrer Winkelgröße erscheint die Messung der Weite der Pupille weniger geeignet als die Prüfung ihrer Lichtreaktion, weil bei ausreichender Adaptation des Sehorgans der Pupillendurchmesser, wie O. SCHIRMER¹ festgestellt hat, bei verschiedenen Helligkeiten innerhalb weiter Grenzen (zwischen 100 und 1100 mk) der gleiche bleibt, während die erste Einstellung auf die veränderte Helligkeit in Form der Pupillarreaktion zum Ausdruck kommt. Da wir nun ferner bei unseren Untersuchungen den Einfluss der Hell- und Dunkeladaptation auf die *RE* vergleichen wollten, so wäre vollends eine Methode unbrauchbar gewesen, welche wie die Messung der Pupillenweite das Auge der leuchtenden Fläche längere Zeit exponiert und so mit der Benutzung verschiedener Lichtintensitäten auch eine Variabilität des Adaptationszustandes des Sehorgans verknüpft.

Unsere Beobachtungsmethodik gestaltete sich hiernach folgendermaßen: Nachdem wir durch eine längere Voruntersuchung festgestellt hatten, daß die objektive Beobachtungsmethode der subjektiven (entoptischen) an Feinheit etwa gleichsteht, wenn man sich in beiden das gleiche Maß von Übung verschafft hat, benutzten wir aus technischen Gründen, die sich besonders bei Untersuchung des dunkel adaptierten Auges geltend machten, die Methode der objektiven Beobachtung. Dieselbe wurde mit Hilfe der ZEHENDER-WESTIENSCHEN binokularen Lupe ausgeführt; zur Beleuchtung des beobachteten Auges diente eine ältere, auch von SACHS² zum Studium der Pupillarreaktion mit Vorteil benutzte Vorrichtung: Eine elektrische Glühlampe wurde von einem schwarzen Metallzylinder umschlossen, der dem Glühfaden gegenüber eine Öffnung besaß, in welche ein zylindrischer Glasstab horizontal hineingesteckt wurde. Alle nicht durch den Glasstab austretenden Lichtstrahlen waren in dieser Weise abgeblendet, während die in den Glasstab eintretenden Lichtstrahlen nach totaler Reflexion an den Wänden an der kreisförmigen Grundfläche des im übrigen noch mit schwarzem Papier um-

¹ Untersuchungen zur Physiologie der Pupillenweite. *v. Graefes Arch. f. Ophthalm.* 40 (5), S. 8. 1894.

² SACHS: Eine Methode der objektiven Prüfung des Farbensinns. *v. Graefes Arch. f. Ophthalm.* 39, S. 108.

klebten Stabes austraten. Durch diese kleine leuchtende Fläche konnte die Iris gut seitlich beleuchtet werden, ohne die Netzhaut in sehr erheblicher oder wenigstens störender Weise zu bestrahlen.

Nachdem wir uns an mehreren Individuen von der prinzipiellen Übereinstimmung der Resultate überzeugt hatten, fungierte für die genaueren Beobachtungsreihen F. ausschließlich als Beobachter, A. als Beobachteter, da die bis zum Pupillarrande hellblaue Iris des letzteren ein besonders günstiges Beobachtungsobjekt bildete. Diese Arbeitsteilung brachte den weiteren Vorteil mit sich, daß die zunehmende Übung des einen in ruhiger Fixation, des anderen in der Beobachtung von Feinheiten die Genauigkeit der Resultate erhöhte.

I. Untersuchung am helladaptierten Auge.

a) Monokulare Belichtung.

Die Beobachtungen wurden in einem Raume vorgenommen, der durch eine schwarze lichtdichte Wand von dem die Lichtquellen zur Beleuchtung der Reizfläche enthaltenden Raume getrennt war. Als Reizobjekt von veränderlicher Größe diente eine von einer kreisförmigen Irisblende umgebene, in die trennende Wand eingelassene Milchglasplatte; der Durchmesser der Irisblende konnte von 15 cm bis auf 0,5 cm verkleinert werden. Die Helladaptation machte eine konstante Ausgangsbeleuchtung der Milchglasplatte wünschenswert. Da dieselbe sich von vorn wegen des vom Kopfe des Beobachteten geworfenen Schattens nicht in gleichmäßiger Weise ermöglichen ließ, geschah dieses vom „Lichtraume“ aus durch eine 1,75 m entfernte elektrische Mattglasglühlampe (16 N.-K.). Außerdem blickte der Beobachtete, um den Zustand der Helladaptation aufrecht zu erhalten, zwischen den einzelnen Beobachtungen auf eine gleichmäßig weiße, von einer elektrischen Bogenlampe bestrahlte Fläche, die während der kurzen Zeit von 2–3 Beobachtungen verdunkelt wurde. Als Lichtreiz diente der Zuwachs an Beleuchtung, welche eine elektrische Glühlampe (5 N.-K.) lieferte, die in dem „Lichtraume“ auf die Irisblende zentriert auf einer 3,5 m langen Bahn verschoben werden konnte.

Das rechte Auge des Beobachteten, dessen Kopf durch eine Kinnstütze fixiert war, stand in einer Entfernung von 16 cm dem Mittelpunkte der Scheibe gegenüber. Diese Entfernung

wurde gewählt, um bei ausgiebiger Blendenvariation auch über große Netzhautbilder verfügen zu können. Die Fixationsmarke wurde jedoch nicht auf der Scheibe selbst angebracht, weil bei der dann notwendigen hohen Konvergenzspannung (entsprechend einer Akkommodation von 6,0 Dioptrien) die Pupille nicht nur sehr eng geworden, sondern auch, wie sich zeigte, ständigen, sehr störenden Schwankungen ihrer Größe unterworfen gewesen wäre. Es wurde daher über der Augenstütze des Kinnhalters ein zu Mikroskopierzwecken gebräuchliches sog. Deckglas befestigt, welches das Bild eines roten, 2,5 m entfernten Gasflämmchens in den Mittelpunkt der Scheibe hineinspiegelte. Während das rechte Auge in dieser Weise dem Lichtreize ausgesetzt war, wurde an dem linken Auge, dem durch eine schräg gestellte schwarze Pappscheibe die Lichteindrücke des rechten entzogen waren, die konsensuelle Pupillarreaktion mittels des oben erwähnten seitlichen Beleuchtungsapparates beobachtet. Das Reizlicht, d. h. die in der Entfernung variable Glühlampe konnte von A. durch eine Schaltvorrichtung zum Erglühen oder Erlöschen gebracht werden. Die Augen des Beobachters F. konnten, mit der Lupe bewaffnet und dem linken Auge A.s zugewandt, von dem, was auf der Milchglasscheibe vorging, nichts wahrnehmen. F. hatte, nachdem die Einstellung der Lampenentfernung und Blendenweite von A. ausgeführt war, sein Urteil über die Pupillarreaktion abzugeben, wenn er den Schlag der Glühlampeneinschaltung hörte. Die Objektivität des Urteils wurde dadurch noch erhöht, daß zuweilen zwischen einigen Beobachtungen die Glühlampe ausgeschaltet war, so daß auf den Schlag der Einschaltung keine Erhellung erfolgte. Bei 50 derartigen Vexierbeobachtungen wurde der Eintritt einer Pupillenverengung 45 mal negiert, 5 mal jedoch, d. h. in 10 %, wurden positive Urteile abgegeben. Diese an sich ziemlich niedrige Zahl fehlerhafter Beobachtungen ist wohl doch noch als Maßstab unserer gesamten Beobachtungen zu ungünstig ausgefallen infolge einer zufällig ziemlich fehlerhaften Beobachtungsreihe eines Tages (— 7, + 3). Ein Blick auf andere Beobachtungsreihen zeigt, daß bei genügender Abschwächung des Lichtreizes die *RE* überall auf 0 % oder nahezu 0 % herabging.

Ebenso wurden bei allen Kombinationen von Lampenentfernung und Blendenweite je 50 Beobachtungen, 10 davon in der Regel in kurzen Zwischenpausen an einem Tage ausgeführt,

so daß man die Zahl der erzielten Reaktionen nur zu verdoppeln braucht, um den Prozentsatz der positiven Fälle zu erhalten. Man sollte nun erwarten, daß bei hinreichend exakter Methode die Grenzen des Positiven und Negativen direkt aneinander stoßen, d. h. daß der Prozentsatz entweder gleich 100 oder gleich 0 ist. Um solche Resultate zu erzielen, sind aber die Motive zu mannigfaltig, die einerseits selbst bei sicherster Fixation außer dem Lichtreize Reaktionen erzeugen können — nennt doch SCHIFF die Pupille das feinste Ästhesiometer —, andererseits die Lichtreaktion gelegentlich der Beobachtung entziehen können. Nicht immer sind die Bedingungen, unter welchen die Reaktionen erfolgen, die nämlichen; so waren die im Beginne oder unmittelbar nach den natürlich möglichst häufig vorgenommenen Pausen beobachteten erfahrungsmäßig am günstigsten gestellt, wie auch H. WOLFF¹ bereits hervorhebt, daß die Prüfung der Pupillarreaktion nach zu langer und häufiger Beobachtung nicht gelingt, sie „kann nicht oft hintereinander, wohl aber nach kurzen Ruhepausen wiederholt werden“.

Gewiß gibt es Lichter mit durchaus positivem Reizwerte, aber je mehr der Reizwert sich abschwächt, um so mehr können herabdrückende und konkurrierende Momente zur Geltung kommen; d. h. je ausgiebiger die Lichtreaktion der Pupille ist, um so weniger kann sie sich der Beobachtung entziehen. Gesetzt, daß 50 Beobachtungen mit demselben Lichtreize gemacht werden und die Pupillarreaktion jedesmal konstatiert wird, daß nach Änderung des Lichtreizes wiederum 50 Beobachtungen gemacht und die Pupillarreaktion nur 25 mal konstatiert wird, so ist der Schluß gestattet, daß im ersten Falle eine stärkere Pupillarreaktion ausgelöst wurde als im zweiten. Wir gewannen so den zwar anfangs nicht vorausgesehenen, aber im Laufe der Untersuchung sich einstellenden Vorteil, der an der gesetzmäßigen Ab- resp. Zunahme der Prozentzahlen zutage trat, daß wir nicht nur die Grenzwerte kennen lernten, die eben noch Reaktion auslösten, sondern darüber hinaus einen zahlenmäßigen Ausdruck und Maßstab des zunehmenden Grades der Pupillenverengung gewannen. So gelang es uns das Prinzip der zahlenmäßigen Bestimmung, das wahrscheinlich die Voruntersucher veranlafste, die Pupillenweite als Maßstab der *RE* heranzuziehen, auch auf

¹ a. a. O.

die Pupillarreaktion anzuwenden. Auch in denjenigen Fällen, wo die Beobachtungen jedesmal, d. h. in 100 %, positive Pupillarreaktion nachwies, war die Reaktionsamplitude noch keine große; wir verzichteten jedoch auf eine Steigerung derselben durch Erhöhung des Lichtreizes, da wir ja 100 % erreicht hatten und so über das Gebiet der Zahlen hinaus in das des subjektiven Ermessens gelangt wären.

Die absoluten Helligkeiten waren, mit dem WEBERSchen Photometer gemessen, folgende: die konstante Beleuchtung der Milchglasscheibe betrug 2 M.-K.; wenn das Reizlicht in der von uns benutzten geringsten Entfernung von 72 cm hinzukam, so stieg die Helligkeit auf 4,7 M.-K. Demnach wurde die konstante Helligkeit in der größten verfügbaren Entfernung von 3,5 m gesteigert um 2,7. $\frac{72^2}{350^2} = 0,114$ M.-K.; d. h. der geringste Hellig-

keitszuwachs oder der geringste Lichtreiz wurde durch $\frac{1}{20}$ der konstanten Beleuchtung erzeugt. Eine Übersicht der erzielten Resultate gibt Tabelle I, indem die Entfernungen der Lampe in

Tabelle I.

(E = Lampenentfernung, b = Blendendurchmesser.)

E = 3,5	14	10	0												
3	44	36	10	12	6	(0)									
2,5	48	34	40	26	16	(0)	0	(0)	(0)						
2	80	80	56	36	26	(25)	30	(0)	18	(0)	0				
1,5	100	100	96	94	76	(90)	70	(75)	42	(60)	6	(5)	(0)	(0)	
1				100	100	(100)	98	(100)	94	(85)	50	(40)	(20)	(0)	(0)
0,82							100		100	(100)	88	(95)	(70)	(5)	(0)
0,72											100		(95)	(75)	(10)
b =	15	10	5	4	3		2		1		0,5	0,4	0,2	0,1	

der ersten linken Vertikalreihe im Metermafs, die Blendendurchmesser in der untersten Horizontalreihe im Zentimetermafs angegeben sind. Die Untersuchungen bei gleicher Lichtintensität stehen also horizontal neben-, bei gleicher Flächengröße vertikal untereinander. Die eingetragenen Zahlen bedeuten die Prozentsätze der positiven Reaktionen. Betrachten wir die vertikalen Reihen, so zeigt sich mit einer Ausnahme eine Abnahme der Zahlen von unten nach oben, es findet sich also sonst kein

Widerspruch in dem Sinne, daß eine höhere Lichtintensität einen geringeren Prozentsatz aufwiese; dabei bedeutet der Unterschied von 36 bei E_8 , b_{10} und 34 bei $E_{2,5}$, b_{10} , nur eine Differenz von einer positiven Reaktion. Diese Zahl 34 und die ihr rechts folgende 40 erscheinen auch bei Vergleich der Horizontalreihen als die widersprechendsten und beruhen offenbar auf weniger exakter Beobachtung. Im übrigen zeigen die Horizontalreihen nur zwei kleine Unregelmäßigkeiten; bei E_8 folgt 12 auf 10, bei E_2 folgt 30 auf 26, während sonst die Zahlen von links nach rechts, der Verkleinerung des Blendendurchmessers entsprechend, abnehmen.

Der Einfluß der Flächengröße ist also zweifellos. Daraus ergibt sich aber gegen unsere eigene Methode ein Einwand: Unsere Resultate könnten dadurch beeinflusst sein, daß auf das fixierte Objekt ja nicht akkommodiert wurde. Die 16 cm entfernte Fläche wurde bei einer Akkommodation von 0,4 D. beobachtet. Von vornherein ist zwar diesem Einwande kein großes Gewicht beizumessen, da hierdurch das für die Entscheidung der vorliegenden Frage in Betracht kommende Zahlenverhältnis wohl keine wesentliche Änderung erfährt, zumal da der pupillenverengende Lichtreiz der Differenz zwischen der konstanten und der hinzukommenden Helligkeit entspricht und beide Lichtmengen in demselben Maße durch die Zerstreuungskreise auf eine größere Netzhautfläche verteilt werden. Das Zutreffende dieser Überlegung ergibt sich aus den in Tabelle I eingeklammerten Zahlen; dieselben wurden bei Akkommodation auf die Milchglasplatte in der Weise gewonnen, daß der Mittelpunkt derselben als Fixationsmarke diente und die fünffache Entfernung = 80 cm gewählt wurde, so daß die Netzhautbilder der Blendendurchmesser 15; 10; 5; 2,5 denjenigen der früheren 3; 2; 1; 0,5 entsprachen. In derselben Weise sind auch die für die Blendendurchmesser 0,4; 0,2; 0,1 angegebenen Zahlen gewonnen worden, die Netzhautbilder von 2; 1; 0,5 wurden durch fünffache Entfernung des Auges von der Reizfläche um das Fünffache verkleinert.

Es zeigt sich, daß die eingeklammerten Zahlen den bei nicht eingestellter Akkommodation erhaltenen entsprechen; nur fehlen die mittleren Übergangsstufen. Bei dieser Anordnung (genau eingestellter Akkommodation) machten sich eben die übrigen auf die Pupillarreaktion wirksamen konkurrierenden

Momente, von denen die Rede war, weniger bemerkbar. Wir konnten uns darum hier auch mit 20 Beobachtungen begnügen und gewannen den Prozentsatz durch Multiplikation mit 5.

Eine Vergrößerung der Fläche über den verfügbaren Blendendurchmesser erzielten wir durch Benutzung einer kreisförmigen Milchglasplatte von 50 cm Durchmesser. Die hiermit gemachten Beobachtungen waren nicht so zahlreich wie die früheren, eine gröbere Schätzung ergab etwas höhere Werte als bei b_{18} .

Dem kleinsten Kreisdurchmesser von 0,1 entspricht ein Gesichtswinkel von $21' 28''$, dem größten ein 313 mal so großer Gesichtswinkel von $114^\circ 45'$. Die Hälfte des größten Gesichtswinkels erreichte mit einem Betrage von 57° unten, innen und oben die äußersten Gesichtsfeldgrenzen von A., es war demnach die größte anwendbare Fläche. Andererseits blieb bei einem Gesichtswinkel von $21' 28''$, ebenso bei $b_{0,2}$ und $b_{0,4}$, Gesichtswinkeln von $43'$ und $1^\circ 26'$ entsprechend, die Netzhautreizung innerhalb der fovealen Grenzen.

Für die Blendendurchmesser über 0,4 cm wäre die Berechnung der Gesichtswinkel im einzelnen eine illusorische, da auf die Kreise mit größerem Durchmesser als 0,4 cm nicht genau akkommodiert wurde. Die kleinste als Reizobjekt benutzte leuchtende Kreisfläche verhält sich demnach zur größten wie 1:313 nach der Winkelgröße ihrer Durchmesser, wie 1:250 000 jedoch nach dem Inhalt ihrer Flächen.¹

Bei einer so umfangreichen Variation hatte nicht nur der der Steigerung der Lichtintensität nachstehende Einfluß des Flächenwachstums Gelegenheit, deutlich zur Geltung zu kommen, es mußte auch das Maß und Gesetz desselben veranschaulicht werden, wie es in dem vielleicht verschiedenen Reizwert sich offenbart, den beispielsweise ein Flächenwachstum von 1 auf 5 und ein solches von 100 auf 105 zur Folge hat. Dieses anschauliche Bild gewährt uns die graphische Darstellung (Fig. 1).

Die verschiedenen Blendendurchmesser sind so in ein rechtwinkliges Koordinatensystem eingetragen, daß die Prozentzahlen der nachweisbaren Pupillenverengungen die Ordinaten, die Licht-

¹ Wenn man nicht den Inhalt der leuchtenden Flächen selbst, sondern den der gereizten Netzhautflächen vergleicht, so fällt die quantitative Differenz wegen der sphärischen Gestalt der Netzhaut, d. h. wegen der Abbildung ebener Flächen auf einem Kugelabschnitte geringer aus.

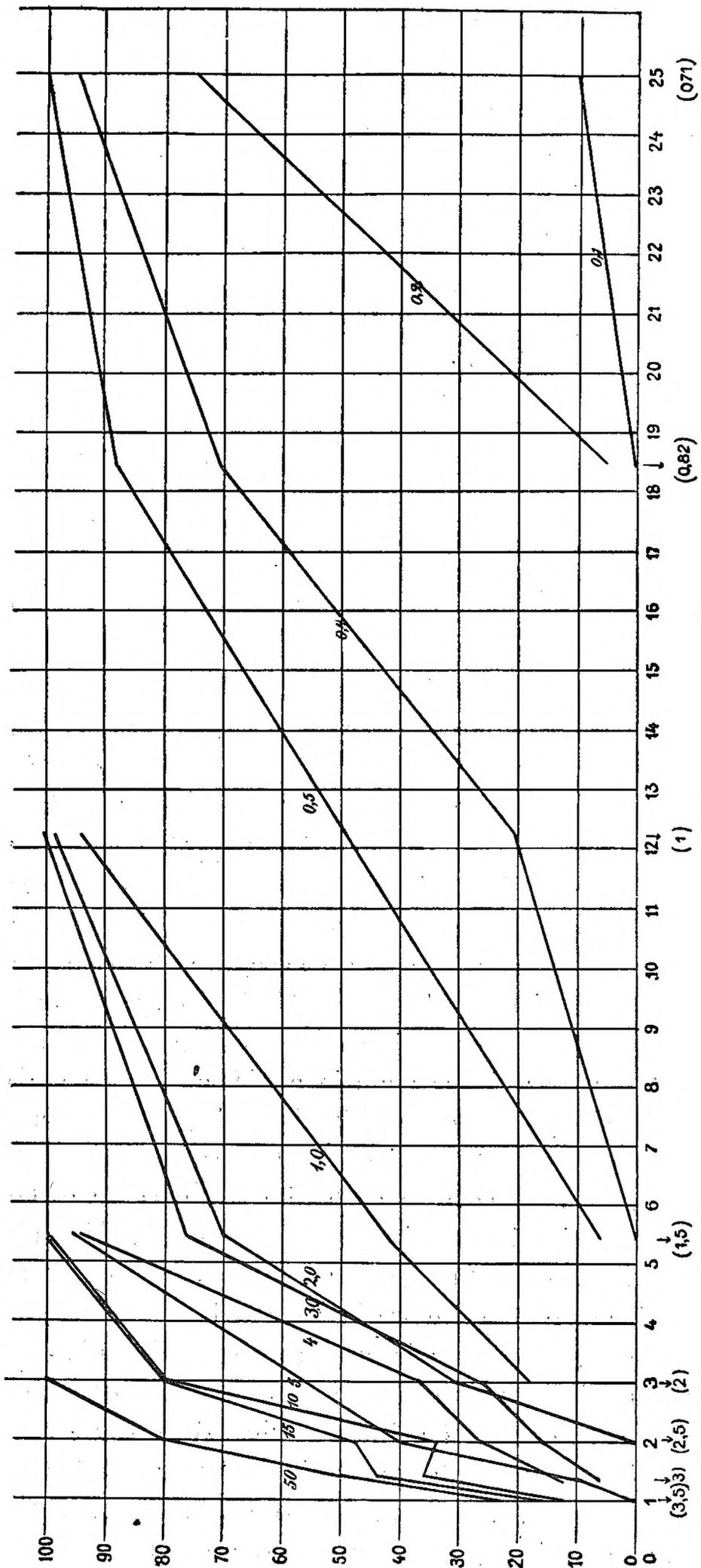


Fig. 1.

intensitäten die Abszissen bilden. Die geringste bei 3,5 m vorhandene Lichtintensität ist gleich 1 gesetzt, die übrigen sind nach dem Gesetz, daß die Erleuchtung im umgekehrten Verhältnis zu dem Quadrat der Entfernung der Lichtquelle steht, berechnet. Die Entfernungen selbst sind darunter noch in Klammer vermerkt.

Man sieht, daß die mehr nach links gelegenen Kurven mit den größeren Blendendurchmessern mit zunehmender Größe aneinander rücken, so daß zwischen dem Verlaufe der bei b_5 bis $b_{15/50}$, ja selbst der bei $b_{2, 3, 4}$ aufgenommenen Kurven kaum noch wesentliche Unterschiede bestehen. Nach rechts werden die Abstände der Kurven voneinander immer größer, obwohl die entsprechenden Differenzen der gereizten Flächenausdehnungen enorm viel kleiner werden. Man vergleiche beispielsweise die Kurven 4 und 2, 1 und 0,5, 0,4 und 0,2, die den Durchmessern entsprechenden Reizflächen haben gemeinsam das Verhältnis 4:1, und doch wie gering ist der Unterschied zwischen Kurve 4 und 2 gegenüber dem zwischen 1 und 0,5 resp. 0,4 und 0,2 bestehenden! Wenn auch mit dem Kreise vom Durchmesser 1 gewiß noch keine ausschließlich foveale Reizung erzielt wurde, so läßt doch der Gesamtverlauf aller Kurven mit Sicherheit erkennen, daß jede Zunahme in der Größe der leuchtenden Fläche in einer Zunahme der pupillenverengenden Wirkung dann am stärksten zum Ausdruck kommt, wenn ausschließlich zentrale oder dem Zentrum benachbarte Teile der Netzhaut getroffen werden. Wenn jedoch durch die Ausdehnung der leuchtenden Fläche eine Miterregung der mehr peripherisch gelegenen Teile der Netzhaut stattfindet, so macht sich die Größenzunahme des Reizobjekts zwar auch noch in einer gesteigerten pupillomotorischen Wirkung geltend, dieselbe steht aber hinter dem an den zentralen Netzhautzonen nachweisbaren Maße weit zurück.

Wenn man, worauf wir aus äußeren Gründen verzichten, die benutzten Lichtintensitäten in ein rechtwinkliges Koordinatensystem einträgt, dessen Ordinaten wiederum die Prozentzahlen, dessen Abszissen aber die als Reiz benutzten Flächeneinheiten (1 bis 250 000) sind, so verlaufen die Kurven im Beginn, besonders von $b_{0,1}$ bis $b_{0,4}$ nahezu senkrecht, werden immer flacher

und nehmen schliesslich zwischen b_{10} und b_{50} einen nahezu wagerechten Verlauf an; d. h. wiederum, innerhalb der zentralen Gebiete der Netzhaut ist das Flächenwachstum bedeutungsvoll für die RE und büsst mit zunehmender Entfernung von denselben mehr und mehr an Bedeutung ein. Wir heben noch ein Beispiel hervor (cf. Fig. 1): wenn b von 0,1 auf 0,5, also die leuchtende Fläche um das 25fache wächst, steigt die RE bei Lichtstärke 25 von 10 auf 100. Wenn dagegen b von 5 auf 50, also die leuchtende Fläche um das 100fache wächst, steigt die RE bei Lichtstärke 1,4 von 10 auf 50, bei Lichtstärke 3 von 56 auf 100. Trotz des größeren Flächenwachstums im zweiten Falle macht sich in der RE ein viel geringerer Effekt geltend, so daß ihr Wachstum nicht einmal der geometrischen Progression der wachsenden Flächen entspricht. Vergleichen wir gar das arithmetische Wachstum von Fall 1 und 2, so haben wir bei 1 die Differenz von 24, bei 2 von 1475 leuchtenden Einheiten, die also noch nicht dieselbe pupillomotorische Wirkung wie die ersten 24 haben.

Die Annahme VERVOORTS, daß gleichen in das Auge einfallenden Lichtmengen, d. h. einem aus Lichtintensität und Objektgröfse konstanten Produkte dieselbe Wirkung auf die Pupille zukommt, bestätigt sich also nicht, sondern läßt sich auf Grund unseres Beobachtungsmaterials rechnerisch widerlegen.

Die Lichtquantität Q ist gleich $\frac{\pi r^2 \cdot 1}{E^2}$ (E = Lampenentfernung, $r = \frac{1}{2} b$).

Demnach traf bei allen Versuchen, bei welchen der Quotient $\frac{b}{E}$ derselbe war, dieselbe Lichtmenge die Netzhaut.

Als Einheit diene die schwächste hier zur Vergleichung ausgewählte Q mit $\frac{b}{E} = \frac{1 \text{ cm}}{250 \text{ cm}}$. Die Einheit ist also $= \frac{\pi \cdot 0,5^2}{250^2}$
 $= \frac{\pi \cdot 1}{250\,000}$.

$Q = 1$	$b = 1 \text{ cm}$	$E = 2,5 \text{ m}$	$RE = 0$
	0,4	1	20
$Q = 1,56$	2	4	0
	1	2	18
	0,5	1	50
	0,4	0,8	70

$Q = 2,8$	$b = 2$	$E = 3$	$RE = 0$
	1	1,5	42
	0,5	0,75	ca. 100
$Q = 6,25$	3	3	6
	2	2	30
	1	1	94
$Q = 25$	5	2,5	40
	4	2	36
	3	1,5	76
	2	1	98
$Q = 100$	15	3,75	< 14
	10	2,5	34
	5	1,25	100
$Q = 225$	15	2,5	48
	10	1,83	ca. 90
$Q = 400$	15	1,87	fast 100

Besonders bei den mittleren Quantitäten, bei welchen eine grössere Blendenabstufung möglich war, sieht man, daß die Reflexempfindlichkeit in demselben Masse steigt, wie der Faktor b in dem Produkte Q zurücktritt. Die einzige Ausnahme findet sich an der bereits erwähnten Stelle: die Zahl 40 bei b_5 , $E_{2.5}$.

Es zeigt sich also, daß die RE der Netzhaut trotz Einwirkung verschiedener Lichtquantitäten dieselbe sein kann und bei jeder Quantität die RE von 0 auf 100% dadurch zu steigern ist, daß man von Reizobjekten mit großer Ausdehnung und relativ schwacher Beleuchtung zu solchen mit geringer Ausdehnung und hinreichend verstärkter Beleuchtung übergeht.

b) Binokulare Belichtung.

Die Frage, ob der Belichtung einer Netzhaut eine schwächere pupillenverengende Wirkung als derjenigen beider zukomme, ist von DUBRUNFAUT¹ dahin beantwortet worden, daß sich bei monokularer und binokularer Belichtung die Pupillenweiten wie $\sqrt{2}$ zu $\sqrt{1}$ verhalten. AUBERT² und FECHNER³ sehen

¹ *Comptes rend.* 41, S. 1008.

² *Physiolog. Optik* a. a. O. S. 454.

³ *Verhandl. d. Königl. Sächs. Gesellsch. d. Wissensch.* 7, S. 425. 1861.

diese Behauptung als unerwiesen an. FECHNER bemerkt hierzu: „Es muß ein Zweifel erlaubt sein, ob das von D. angegebene Verhältnis nicht vielmehr auf Theorie als auf Messung beruht“. „Nur durch eine sehr feine und schwierige Messung ließe sich das von ihm angegebene Verhältnis der Pupillenweite konstatieren.“ Eine einwandsfreiere Methode der Messung hat dagegen SILBERKUHLE¹ angewandt. Er konnte feststellen, daß die Pupillenweite eines Auges bei verdecktem zweiten Auge im allgemeinen um $\frac{1}{4}$ — $\frac{3}{4}$ mm größer ist als bei unverdecktem zweiten Auge.

Tabelle II.

$E = 3$	M.	0	0	0				
	B.	10	0	0				
2,5	M.	0	0	0				
	B.	30	30	20				
2	M.	25	0	0				
	B.	100	70	20		5		
1,5	M.	90	75	60	5	0	0	
	B.	100	95	70		40	10	
1	M.	100	100	85	40	20	0	0
	B.			100		60	50	0
0,82	M.			100	95	70	5	0
	B.					100	70	15
0,70	M.					95	75	10
	B.						75	25
$b =$		15	10	5	2,5	2	1	0,5

In der ersten linken Vertikalreihe sind die Entfernungen der Lampe im Metermaß, in der untersten Horizontalreihe die Blendendurchmesser im Zentimetermaß angegeben. Für jede Entfernung sind in der oberen mit M. bezeichneten Reihe die bei monokularer, in der unteren mit B. bezeichneten Reihe die bei binokularer Belichtung erhaltenen Pupillarreaktionen prozentuarisch eingetragen.

Unsere auf Grund der Beobachtung der Pupillarreaktion erzielten Ergebnisse stehen hiermit im Einklang. Nachdem wir die früher geschilderten Versuche mit Akkommodation des Auges

¹ Untersuchungen über die physiologische Pupillenweite. v. Graefes Arch. f. Ophthalm. 42 (3), S. 179. 1896.

auf die 80 cm entfernte Reizfläche beendet hatten, wiederholten wir dieselben Versuche bei binokularer Belichtung, indem wir das beobachtete Auge nicht mehr abblendeten.

Die Resultate sind in Tabelle II wiedergegeben und in Fig. 2 graphisch nach demselben Prinzipie wie in Fig. 1 dargestellt.

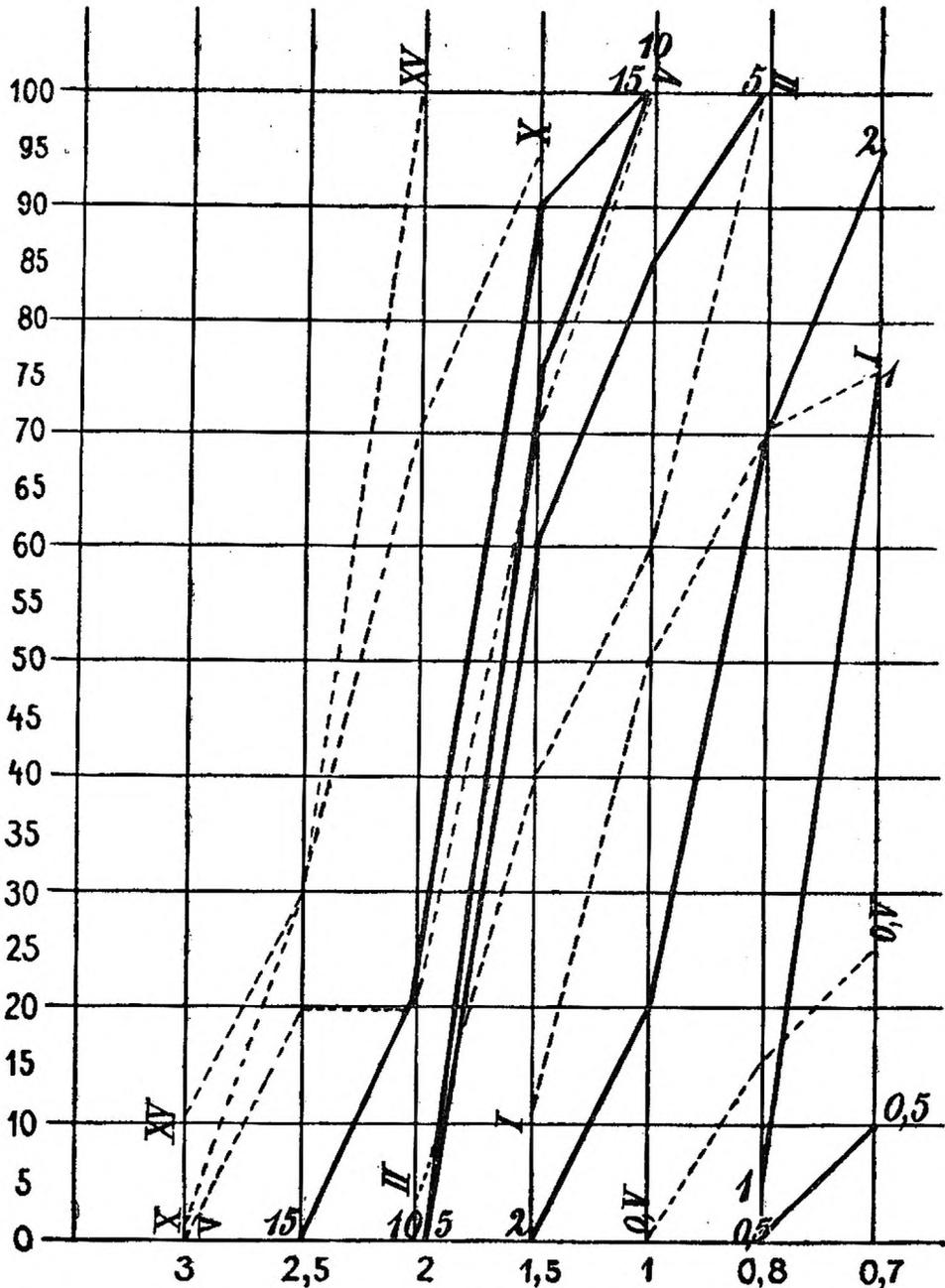


Fig. 2.

Die die binokularen Werte verbindenden Kurven sind gestrichelt und mit liegenden Ziffern bezeichnet, sie liegen regelmäßig weiter nach links als die monokularen. Ein Zusammentreffen findet nur in einem Punkte statt ($b_1 E_{0,7}$).

Wie bei der innigen Innervationsverknüpfung beider Pupillen zu erwarten ist, ruft ein einseitiger Lichtreiz eine schwächere Pupillenverengung hervor als ein beiderseitiger, ohne daß wir imstande wären, der hierbei

stattfindenden Addition der Reize einen exakten mathematischen Ausdruck zu verleihen.

II. Untersuchung am dunkeladaptierten Auge.

Um den Einfluss der Dunkeladaptation auf die *RE* der Netzhaut festzustellen, wäre der einfachste Weg der gewesen, dieselbe nach der bei Helladaptation angewandten Methode zu prüfen und die Resultate zu vergleichen. Eine exakte zahlenmäßige Darstellung erwies sich aber bei den für Dunkeladaptation unerlässlichen schwachen Lichtern wegen der Inkonstanz der Resultate als undurchführbar. Es wurde darum folgender Weg eingeschlagen: Wir suchten für eine auch die Netzhautperipherie reizende Kreisfläche diejenige Lichtintensität, welche noch prompte Pupillarreaktion auslöste, und ermittelten dann, ein wie großer Teil des Zentrums der Kreisfläche abgeblendet werden konnte, ohne die Pupillarreaktion aufzuheben. Nachdem diese Versuche bei entsprechend höherer Lichtintensität für das helladaptierte Auge wiederholt waren, konnte aus dem Vergleiche ersehen werden, ob mit wechselndem Adaptationszustande den verschiedenen Netzhautregionen auch ein wechselnder Anteil an der Auslösung der Pupillarreaktion zukomme.

Die Untersuchungsmethode des dunkeladaptierten Auges gestaltete sich folgendermaßen:

Um mit einer annähernd konstanten Empfindlichkeit der Netzhaut rechnen zu können, wurde das rechte Auge von A. durch einen lichtdichten Verband einer einstündigen Dunkeladaptation unterworfen; nach den Untersuchungen PIPERS¹ ist das Maximum der Empfindlichkeit dann zwar noch nicht erreicht, aber für unsere Zwecke ist die Konstanz derselben ausreichend. Da derselbe Autor „eine Beeinflussung der Adaptation des Dunkelauges von seiten des Hellauges nie finden“ konnte, war eine Beobachtung der konsensuellen Reaktion des linken Auges wie bei der Helladaptation möglich. Natürlich wurde die hierzu nötige Beleuchtung auf ein gerade ausreichendes Maß reduziert und durch Vorhänge, sowie einen das rechte Auge vom linken trennenden lichtdichten Schirm Sorge getragen, dass in dem schwarz angestrichenen Beobachtungsraum das rechte Auge ausschließlich von dem Reizlicht getroffen werden konnte. Als ein

¹ Über Dunkeladaptation. *Diese Zeitschr.* 31, S. 169. 1903.

solches diente eine in einem Kasten eingeschlossene fünfkerzige Glühlampe, vor welcher ein Episkotister von etwa $\frac{1}{2}^\circ$ Winkelöffnung (Verdunkelung 1:720) kreiste. Zwei hinter der bei den früheren Versuchen bereits erwähnten Irisblende angebrachte Milchglasplatten führten eine weitere Herabsetzung der Lichtintensität herbei, so daß die als Reiz benutzte Kreisfläche für das helladaptierte Auge unterschwellig war und erst nach 4 Minuten während der Dunkeladaptation eben überschwellig wurde. Eine weitere Verdunkelung erwies sich wegen der zu geringen pupillomotorischen Wirkung bei der einmal unvermeidlichen Beleuchtung des anderen Auges als untunlich.¹

Von einer Ausgangsbeleuchtung der Reizfläche wurde jetzt natürlich abgesehen; die durch Einschaltung der verdunkelten Glühlampe eintretende Beleuchtung der Milchglasscheibe diente als Lichtreiz. Als Fixationszeichen wurde wiederum ein rotes von einem Deckglase auf die Mitte der Scheibe gespiegeltes Lichtpünktchen benutzt, das aber jetzt scheinbar in derselben Ebene wie die 50 cm vom Auge entfernte Reizfläche lag. Eine genaue Akkommodation auf die letztere war erforderlich, weil sonst das Übereinandergreifen der Zerstreuungskreise eine Abblendung zentraler Teile der Fläche illusorisch gemacht hätte.

Wir suchten nun für eine Kreisfläche vom Durchmesser 10 cm (Gesichtswinkel $11^\circ 20'$) durch Änderungen in der Entfernung der Lichtquelle diejenige Helligkeit, welche noch prompte Pupillarreaktionen auslöste — geringe Reaktionen waren zuweilen schon bei b^6 bemerkbar —; dann blendeten wir durch Aufkleben schwarzen Papiers zentrale Kreisflächen von verschiedenen Durchmessern ab und bestimmten, wie groß die zentrale Abblendung bei je einer Kreisfläche von 50 cm (Gesichtswinkel $56\frac{1}{2}^\circ$) und einer solchen von 10 cm Durchmesser sein mußte, um die Pupillarreaktion zum Erlöschen zu bringen.

Dieselbe Untersuchungsreihe wurde am helladaptierten Auge, wobei die Beleuchtung durch Entfernung des Episkotisters und

¹ Als gelegentliche, unsere Versuchsanordnung mitbestimmende Beobachtung möge erwähnt werden, daß das rechte Auge bei Dunkeladaptation des linken jetzt viel empfindlicher gegen die seitliche Beleuchtung war, sich leicht geblendet fühlte und daher schwerer in ruhiger Stellung verharnte. Andererseits beeinträchtigten die Lichteindrücke des linken Auges die Helligkeitswahrnehmung des rechten.

der Milchglasplatten natürlich entsprechend verstärkt werden mußte, ausgeführt.

Wir geben zum Vergleiche die Resultate wieder, die an verschiedenen Versuchstagen bestätigt und sämtlich unter Innehaltung der früher genannten Kautelen gewonnen wurden, indem der Beobachter keine Kenntnis von der Gröfse der Reizflächen hatte: wir bezeichnen mit b und entsprechendem Index den Durchmesser der leuchtenden Kreisfläche in Zentimetern, mit $+$ die prompte Auslösung der Pupillarreaktion, mit $-$ das Fehlen derselben, mit \pm eine zuweilen angedeutete, zuweilen fehlende Reaktion.

Helladaptation	Dunkeladaptation
$b_{10} +$	$b_{10} +$
$b_7 \pm$	$b_7 \pm$
$b_3 -$	$b_3 -$
$b_{10} - b_{0,5}^1 +$	$b_{10} - b_8 +$
$b_{10} - b_1 -$	$b_{10} - b_8 -$
$b_{50} - b_{20} +$	$b_{50} - b_{40} +$
$b_{50} - b_{30} -$	$b_{50} - b_{45} \pm$

Wenn also bei entsprechender Änderung der Lichtintensität im hell- und dunkeladaptierten Zustande die für gleiche Reflexempfindlichkeit erforderliche Ausdehnung der gereizten Netzhautbezirke bei Mitreizung der zentralen Teile die gleiche ist, so wird die Gleichheit aufgehoben, sobald durch Abblendung der zentralen Teile nur die peripherischen gereizt werden. Die Zahlen zeigen ohne weiteres, daß die pupillomotorischen Werte der Peripherie des dunkeladaptierten Auges denjenigen des helladaptierten überlegen sind.

Dreierlei läßt sich aus diesen Beobachtungen schliessen:

1. Das bereits bei Änderung der Gröfse der leuchtenden Fläche hervortretende Gesetz, daß mit der Ausdehnung des Netzhautreizes eine Steigerung der RE in additivem Sinne verknüpft ist, findet seine Bestätigung und seinen eindeutigsten Ausdruck: $b_{10} - b_1$ löste keinen Pupillarreflex mehr aus, b_1 allein aber ebensowenig, sondern erst $b_{>7}$.

2. Die RE nimmt nach der Peripherie im dunkeladaptierten Auge in geringerem Mafse ab als im helladaptierten.

¹ Die Gröfse des Reizobjekts entspricht der zwischen gröfserer und kleinerer (abgeblendeter) Kreisfläche bestehenden Differenz.

3. Der bei Reizung der Netzhautperipherie eintretende Pupillarreflex wird nicht ausschliesslich durch Miterleuchtung der Macula lutea, sondern auch von jener selbst ausgelöst. Sonst wäre die mit der Änderung des Adaptationszustandes festgestellte pupillomotorische Umwertung der peripherischen Netzhautteile unerklärlich: Lichter, welche bei Verteilung über einen gleich grossen zentralen Netzhautbezirk in beiden Adaptationszuständen gleiche RE hervorrufen, erfordern eine mit dem Adaptationszustande wechselnde Ausdehnung auf der Netzhaut, wenn bei peripherischer Reizung ebenfalls ein für beide Stimmungszustände des Sehorgans gleicher Grad der Reflexempfindlichkeit erzeugt werden soll. Wie kann hierbei die Miterleuchtung der Macula lutea das ausschlaggebende Moment sein!

Trotz des sichtlichen Widerspruchs wollen wir denselben noch an einem weiteren Beispiele erläutern:

Wir sahen, dass in beiden Adaptationszuständen Reizung mit b_{10} zur Erzeugung einer prompten Pupillarreaktion notwendig war. Nun ist $b_{10} - b_1$ bei Helladaptation —, $b_{10} - b_6$ bei Dunkeladaptation +.

Angenommen nun, dass der Peripherie nur durch Miterleuchtung der Macula lutea resp. Fovea eine Wirkung auf den Pupillarreflex zukäme, so würde nach diesem Beispiele in dem einen Falle ein leuchtendes Objekt von 74,25 qcm Oberfläche ($b_{10} - b_1$) nicht mehr imstande sein, den dicht benachbarten zentralen Bezirk (Gesichtswinkel von $b_1 = 1^\circ 8'$) mitzureizen, in dem anderen Falle würde eine Beleuchtung von viel geringerer Ausdehnung ($b_{10} - b_6 = 48$ qcm) und in viel stärkerer Entfernung vom Zentrum (Gesichtswinkel von $b_6 = 6^\circ 48'$) das letztere doch noch zu reizen imstande sein!

Wenn bei klinischen Beobachtungen der Einwand, dass keine streng isolierte Reizung der Netzhautperipherie möglich sei, wenigstens im physikalisch-optischen Sinne nicht zu widerlegen war, so zeigt eine vergleichende Analyse unserer Experimente die völlige Unhaltbarkeit der Hypothese von der Reflexunempfindlichkeit der Netzhautperipherie.

Die in unseren Experimenten zum Ausdruck kommende Änderung der Reflexempfindlichkeitswerte verschiedener Netzhautteile mit wechselndem Adaptationszustande zeigt eine weitgehende Analogie mit den bekannten Änderungen der Licht-

empfindlichkeit. Wenn man bedenkt, daß auch die Verteilung der Helligkeitswerte im Spektrum mit den pupillomotorischen Werten je nach dem Adaptationszustande übereinstimmt¹, so drängt sich durch diese analogen Ergebnisse von neuem die Erklärung auf, daß „derselbe Reiz von denselben perzipierenden Elementen aufgenommen, aber zu den zwei verschiedenen Zentren für die Irisbewegung und die optische Wahrnehmung geleitet wird“, daß also die Stäbchen und Zapfen der Netzhaut auch die peripherischen Endorgane im Reflexbogen der Pupillarreaktion darstellen.

Quantitative Differenzen zwischen Licht- und Reflexempfindlichkeit der Netzhaut sind zweifellos vorhanden: es ist z. B. selbstverständlich, daß eine Fläche von 11° auch dann noch Lichtempfindung auslöst, wenn nach Abblendung eines zentralen Bezirkes von 1° die Pupillarreaktion erloschen ist. Umgekehrt verengen sich bei Öffnung eines geschlossenen Auges beide Pupillen, ohne daß, wenigstens im Zustande der Helladaptation, ein binokular betrachteter Gegenstand heller als ein monokular betrachteter erscheint.²

Ohne diese Verschiedenheiten auf anatomische Einzelheiten zurückführen zu wollen, genügt es, auf die Verschiedenheit der Leitungsbahnen hinzuweisen, die nach neueren Untersuchungen bereits im Sehnerven als „Seh- und Pupillarfasern“ differenziert sind.

Zum Schluß sei uns gestattet, Herrn Prof. NAGEL unseren Dank auszudrücken, sowohl für die Bereitwilligkeit, mit welcher er uns die Räume und Hilfsmittel des Instituts zur Verfügung stellte, als auch die wertvollen Ratschläge, mit welchen er unsere Arbeit unterstützte.

¹ G. ABELSDORFF: Die Änderungen der Pupillenweite durch verschiedenfarbige Belichtung. *Diese Zeitschr.* 23, S. 81. 1900.

² Vgl. PIPER: Über das Helligkeitsverhältnis monokular und binokular ausgelöster Lichtempfindungen. *Diese Zeitschr.* 32, S. 161. 1903.

(Eingegangen am 20. Oktober 1903.)