

Weitere Untersuchungen über den Lichtsinn.

Von

Dr. GUILLERY,
Stabsarzt in Köln a. Rh.

In meiner Abhandlung: „Vergleichende Untersuchungen über Raum-, Licht- und Farbensinn in Zentrum und Peripherie der Netzhaut“¹ waren einige den Lichtsinn betreffende Fragen, welche nicht in unmittelbarem Zusammenhange mit dem Thema standen, nur flüchtig berührt worden. Zum Vergleiche des Lichtsinnes von Zentrum und Peripherie dienten zwei Objekte von bestimmter Helligkeitsdifferenz, und wurde festgestellt, in welchem Mafse dieselben an Gröfse zunehmen mußten, wenn der Eindruck derselbe bleiben sollte. Für die zentrale Fixation war von einem Objekte ausgegangen, dessen Netzhautbild höchstens die Fläche eines Zapfens deckte, die betreffende Helligkeitsdifferenz aber einigermaßen willkürlich gewählt, und für dieselbe hauptsächlich Zweckmäfsigkeitsgründe entscheidend, indem ich mir eine solche aussuchte, deren Erkennung keine allzu großen Schwierigkeiten machte. Damals schon hatte ich mich davon überzeugt und dies auch ausgesprochen, dafs in Wirklichkeit die Helligkeitsdifferenz, welche noch unterschieden werden kann, bei einem solchen Netzhautbilde eine geringere ist. Eine solche beliebig gewählte Helligkeit war natürlich für den Zweck einer Vergleichung am Platze, da sie an allen untersuchten Punkten dieselbe blieb und nur die Objektgröfse sich änderte; es würde sogar unzweckmäfsig gewesen sein, den zulässig geringsten Helligkeitskontrast zu nehmen, da hierdurch die Versuche nur unsicherer geworden wären. Über das absolute Mafs

¹ *Diese Zeitschr.* Bd. XII. S. 243.

der Unterschiedsempfindlichkeit bei so kleinem Netzhautbilde geben also diese Untersuchungen keinen Aufschluss. Will man dieses feststellen, so ist kein Grund, bei der ohnedies unsicheren Gröfse eines Zapfens stehen zu bleiben, sondern ist es wohl richtiger, von dem kleinsten Netzhautbilde auszugehen, welches überhaupt noch eine räumliche Wahrnehmung ermöglicht, und dieses ist, wie wir wissen, kleiner als die Oberfläche eines Zapfens. Eine nähere Untersuchung dieser Art scheint bisher nur unvollkommen ausgeführt zu sein, und war eine solche daher teils deshalb berechtigt, teils durfte sie ein besonderes Interesse darum beanspruchen, weil die Frage, wie der Lichtsinn sich bei kleinstem Netzhautbilde verhält, neuerdings vielfach erörtert worden ist aus Anlaß meines Vorschlages, kleine Punktproben zur Prüfung der Sehschärfe zu verwenden.¹ Es schien mir daher eine Ergänzung der „vergleichenden Untersuchungen“ durch solche über den absoluten Schwellenwert des Lichtsinnes bei kleinster räumlicher Wahrnehmung angezeigt, wobei ich mich dieses Mal auf das Zentrum beschränkt habe.

Ferner hatte ich (l. c.) die in letzter Zeit wieder in den Vordergrund getretene Frage, welche Rolle den Stäbchen bei der Helligkeitsempfindung zufällt, nur gestreift, weil bei der ganzen Anlage meiner Versuche diese nicht wesentlich in Betracht kamen, sondern nur der „trichromatische Apparat“ im Sinne von KRIES'. Eine Anwendung derselben Untersuchungsmethode unter Verhältnissen, welche vorwiegend die Stäbchenfunktion zur Geltung kommen lassen, mußte zu ganz anderen Ergebnissen führen — vorausgesetzt, daß die Theorie richtig ist —, da die Verteilung der Stäbchen über die Netzhautoberfläche sich von derjenigen der Zapfen ja wesentlich unterscheidet. Es war also Aussicht vorhanden, auf diesem Wege weitere Anhaltspunkte für die Richtigkeit oder Unrichtigkeit der Stäbchentheorie, wenn ich so sagen darf, zu gewinnen.

Die Untersuchung dieser beiden Gegenstände ist der Zweck dieser Arbeit.

A. Lichtsinn bei kleinstem Netzhautbilde.

In den gebräuchlichen Lehrbüchern der physiologischen Optik finden wir die Angabe, daß der Lichtsinn, d. h. die

¹ J. F. Bergmann, Wiesbaden. 1893.

Fähigkeit, Helligkeitsunterschiede wahrzunehmen, aufser anderen Bedingungen abhängig ist von dem Sehwinkel. Untersuchungen über den Grad und die näheren Verhältnisse dieser Abhängigkeit sind auch stellenweise vorhanden, aus denen sich ergibt, dafs bei abnehmender Objektgröfse die Helligkeitsdifferenz zunehmen mufs, um noch erkannt zu werden. Diese Untersuchungen sind aber immer an einer beliebigen unteren Grenze der Bildgröfse abgebrochen, und habe ich keine finden können, die bis zu den kleinsten wahrnehmbaren Netzhautbildern sich erstreckten. Nach einer Bemerkung von v. HELMHOLTZ¹ könnte eine solche auch überflüssig erscheinen. Er sagt: „..... Ebenso können auch dunkle Objekte auf hellem Grunde wahrgenommen werden, obgleich ihre Bilder kleiner sind, als ein empfindendes Nervenelement, vorausgesetzt nur, dafs die Lichtmenge, welche auf das Element fällt, durch das dahin treffende dunkle Bild um einen wahrnehmbaren Teil verringert wird. Kann das Auge z. B. bei der angewandten Beleuchtungsstärke Unterschiede der Lichtintensität von $\frac{1}{50}$ erkennen, so würde ein dunkles Bildchen, dessen Flächeninhalt $\frac{1}{50}$ von dem eines empfindenden Elementes ist, wahrgenommen werden können.“ Es wird demnach hier der Lichtsinn des einzelnen Nervenelementes demjenigen des Auges überhaupt, d. h. doch wohl der gesamten Netzhaut, gleich gesetzt. Dies widerstreitet der sonst allgemein üblichen und auch von HELMHOLTZ selbst ausgesprochenen Ansicht (S. 415), dafs die Gröfse der erregten Netzhautfläche auch für diese Empfindung von wesentlichem Einflusse ist. Abgesehen von diesen (und anderen) Bedenken gegen jene Ausführungen giebt es aber „dunkle Bildchen“ von sehr verschiedener Dunkelheit. Es ist offenbar eine andere Aufgabe für ein empfindendes Nervenelement, wenn es ein tief schwarzes Bildchen auf hellem Weiß unterscheiden soll, oder ein solches, dessen Helligkeitsunterschied von dem Hintergrunde ein wesentlich geringerer ist. Die Feststellung des geringsten Unterschiedes, bei dem diese Wahrnehmung noch möglich ist, würde uns die Feinheit des Lichtsinnes einer so kleinen Netzhautfläche angeben. Eine experimentelle Prüfung jener Äufserung von HELMHOLTZ ist meines Wissens nicht erfolgt.

¹ *Phys. Optik.* 2. Aufl. S. 255.

AUBERT¹ fängt seine diesbezüglichen Untersuchungen erst bei einem Sehwinkel von 6' 22'' an, also mit einem Netzhautbilde, welches wesentlich größer ist als die Oberfläche eines Zapfens. Warum er dies als untere Grenze wählt, ist nicht näher angegeben. Die gefundene Unterschiedsempfindlichkeit beträgt bei jener Objektgröße $\frac{1}{11}$. Indessen blieb bei der Art, wie AUBERT seine Versuche anstellte, die Reizung gar nicht auf ein so kleines Netzhautbild beschränkt, wie er annimmt, sondern dasselbe hatte nur in einem Durchmesser einen Sehwinkel von der angegebenen Größe. Er experimentierte nämlich mit rotierenden Scheiben, die einen schmalen Streifen trugen, dessen Helligkeit sich von derjenigen der übrigen Scheibe um den genannten Bruchteil unterschied. Der Radiusteil dieses Streifens war der Berechnung des Sehwinkels zu Grunde gelegt. Wie ich schon an anderem Orte² bemerkt habe, war hierbei die Mitwirkung benachbarter Stellen nicht ausgeschlossen. Wenn auch die Breite des Kranzes unter jenem Winkel erschien, so bot sich dem Auge doch gleichzeitig die ganze übrige Scheibe dar, und fand daher eine ausschließliche Erregung des Zentrums gar nicht statt.

In naher Beziehung zu unserem Gegenstande stehen auch die Versuche von AUBERT³ über den Einfluss des Kontrastes auf die Größe des physiologischen Punktes. Dieselben hatten den Zweck, den Gegensatz zwischen Objekt und Hintergrund soweit abzuschwächen, daß die Zerstreungskreise aufgehoben wurden und nur das „Kernbild“ zur Wahrnehmung kam. Bei dieser Milderung des Kontrastes mußte der Sehwinkel, wenn das Objekt deutlich bleiben sollte, vergrößert werden. Doch zeigen die Ergebnisse, daß unter bestimmten Versuchsbedingungen der Helligkeitsunterschied zwischen Objekt und Hintergrund sehr schwanken kann, ohne daß die Größe des ersteren verändert zu werden braucht. Wäre die Abnahme des Kontrastes hierbei allmählich erfolgt, so würde sich die untere zulässige Grenze bei einer bestimmten Objektgröße und also auch der Lichtsinn einer entsprechend kleinen Netzhautstelle haben ermitteln lassen. AUBERT kam es aber hierauf weniger

¹ *Phys. d. Netzhaut.* S. 86.

² *Arch. f. Augenheilkde.* XXXI. S. 205.

³ *Phys. d. Netzhaut.* S. 198 ff.

an, sondern er veränderte die Helligkeit des Hintergrundes sprungweise, indem er dazu eine rotierende Scheibe benutzte mit dunklem bzw. (bei hellem Objekte) weißem Sektor von der Größe 15° , 30° , 45° , 90° , 180° , 270° und die dabei notwendig werdende Vergrößerung des Seh winkels ermittelte. Die umgekehrte Fragestellung, wie weit bei bestimmten Objektgrößen eine Abschwächung des Kontrastes zulässig ist, wird nicht beantwortet; wir sehen nur, daß letzterer innerhalb weiter Grenzen variabel ist, ohne Beeinträchtigung der Winkelgröße. So findet sich in einer Versuchsreihe z. B. bei einer Helligkeit des Hintergrundes von 15, 29 und 43 (die Helligkeit des Objektes = 1 gesetzt) jedes Mal ein Winkel von $35''$. Die Frage ist also erlaubt, ob nicht bei weiterer allmählicher Abtönung des Hintergrundes der Winkel auch noch derselbe hätte bleiben können. Der nächste Versuch spricht dafür, denn dieser ist erst bei einer Helligkeit = 8 gemacht, und brauchte der Winkel dabei nur auf $37''$ zu wachsen. Die Versuche beweisen also nur, daß der Helligkeitskontrast zwischen Objekt und Hintergrund ohne Beeinträchtigung der Wahrnehmung in weiten Grenzen schwanken kann. Wir werden somit vermuten dürfen, daß auch bei kleinstem Netzhautbilde ein gewisses Grau auf Weiß ebenso gut noch erkannt wird, wie Schwarz auf Weiß. Mehr läßt sich aus diesen Versuchen für unsere Frage nicht ableiten, da ja AUBERT die Schwelle des Seh winkels bei bestimmten Abstufungen des Helligkeitskontrastes suchte, während es sich uns um die Schwelle des letzteren bei bestimmtem (kleinsten) Seh winkel handelt.¹

Fernerhin beschäftigt sich meine oben erwähnte Abhandlung² wiederum von einem anderen Gesichtspunkte mit der Frage über den Zusammenhang zwischen Unterschiedsempfind-

¹ Diese Versuche von AUBERT, welche GROENOUW mit einigen Modifikationen nachgeprüft und bestätigt hat, widerlegen übrigens meines Erachtens zur Genüge die Behauptung, daß einzelne Punkte zur Prüfung der Sehschärfe nicht geeignet seien, weil ihre Wahrnehmung zu sehr abhängig vom Lichtsinne. Dieselben beweisen das gerade Gegenteil. Wenn das Erkennen einzelner Punkte durch Verminderung des Kontrastes zwischen ihnen und Hintergrund innerhalb weiter Grenzen nicht beeinträchtigt wird, so kann doch alles, was die Wahrnehmbarkeit eines Kontrastes in krankhafter Weise vermindert, keine andere Folge haben.

² *Arch. f. Augenheilkde.* XXXI. S. 205.

lichkeit und Gröfse des Netzhautbildes. Ich suchte dabei nach einer gesetzmässigen Beziehung, ähnlich wie sie DONDERS u. A. für den Farbensinn gefunden hatten. Es wurde mit einer hier nicht näher zu erörternden Versuchsanordnung die Helligkeit von Rand und Zentrum einer rotierenden Scheibe gleichmässig abgestuft und die Gröfse des Netzhautbildes gesucht, welche für die Wahrnehmung des Unterschiedes erforderlich war. Letzterer trat also bei der betreffenden Bildgröfse eben über die Schwelle. Das Netzhautbild wurde absichtlich nicht zu klein gewählt, da etwa vorhandene regelmässige Beziehungen sich bei gröberen Gegenständen viel sicherer erkennen lassen mußten. Das grösste, welches dabei in Frage kam, hatte einen Durchmesser von 0,1 mm, das kleinste einen solchen von 0,02, also immerhin etwa das 25fache der Oberfläche eines Netzhautzapfens.

Bei allen solchen Untersuchungen über den Lichtsinn kommt es sehr wesentlich auf die absolute Helligkeit der benutzten Objekte an. Nimmt man einen kleinen weissen Sektor auf schwarzer Scheibe zur Prüfung der Unterschiedsempfindlichkeit, so ist das Ergebnis ein anderes als bei schwarzem Sektor auf Weifs, und wieder anders, wenn man graue Töne von mittlerer Helligkeit vergleicht. Schon FECHNER hat gefunden, dafs das psychophysische Gesetz, soweit es die Fähigkeit des Auges, Helligkeitsunterschiede zu erkennen, betrifft, nicht mehr gültig ist bei sehr grosser und sehr kleiner Helligkeit. Dies macht sich besonders geltend, wenn dem Auge nicht gestattet ist, über eine gröfsere Fläche hinzugleiten, sondern der Sehwinkel beschränkt wird. AUBERT fand bereits ohne diese Beschränkung, dafs, wenn er statt der weissen Scheibe eine schwarze nahm, welche 57 mal dunkler war, die Unterschiedsempfindlichkeit = 9.3 wurde für denselben Sehwinkel, bei dem sie mit dunklem Kranze auf weifser Scheibe $\frac{1}{11}$ betrug. Bei 7° , dem grössten Winkel, welchen er anwandte, war sie im ersten Falle $\frac{1}{7}$, im zweiten $\frac{1}{72}$. Demnach nahm sie in dem ersten Falle bei Verkleinerung des Winkels von 7° auf $6' 25''$ (s. o.) um circa das 65fache ab, im anderen um etwa das 6,5fache. Diesen Verhältnissen mußte Rechnung getragen werden, und da nicht alle erdenklichen mittleren Töne untersucht werden konnten, verfuhr ich ebenso wie AUBERT, indem ich einmal mit schwarzem Sektor auf Weifs, das andere Mal umgekehrt experimentierte.

Versuchsanordnung. Zunächst waren möglichst kleine Objekte von leicht zu verändernder Helligkeit herzustellen. Dieselben mußten sich unter so kleinem Sehwinkel darbieten, daß ihre Wahrnehmbarkeit die Grenzen des Möglichen erreichte, und nun war festzustellen, wie groß der Helligkeitsunterschied zwischen ihnen und ihrer Umgebung sein mußte, damit sie eben noch deutlich wurden. Der kleinste Sehwinkel, unter dem schwarze Gegenstände auf Weiß oder umgekehrt noch erkannt werden, ist ja vielfach bestimmt, dabei sind aber immer die äußersten Helligkeitskontraste gewählt, und nicht untersucht, wie weit dieselben sich abstufen lassen. Einen vorläufigen Versuch über diese Frage habe ich gelegentlich meiner erwähnten Arbeit (*diese Zeitschr.*) angeführt und dabei gefunden, daß ich einen Punkt von einem Grau, welches $185\text{ S} + 175\text{ W}$ entsprach, eben so gut auf weißem Hintergrunde erkennen konnte, wie einen tief schwarzen. Wie groß das Helligkeitsverhältnis zwischen jenem und seinem Hintergrunde war, kann ich nicht näher angeben, weil es unterlassen war, die Helligkeit des Schwarz mit derjenigen des Weiß zu vergleichen. Es handelte sich hier auch nicht um absolute Messungen, sondern ich wollte damit nur aussprechen, daß ein solcher Punkt ganz denselben Eindruck machte, wie ein tief schwarzer, und daß ich nicht im stande gewesen wäre, anzugeben, welcher von beiden der deutlichere oder schwärzere war. Ich konnte aber damals schon feststellen, daß bei weiterer Verminderung des Kontrastes der Punkt immer noch eine ganze Weile sichtbar blieb, wenn er auch matter erschien und sich weniger deutlich von seinem Hintergrunde abhob. Zur Feststellung der Grenze, bei welcher er verschwand und bei deren Überschreitung er eben über die Schwelle trat, wurde nun folgendermaßen verfahren.

Die Mischung von Schwarz und Weiß wurde auf einem rotierenden Kreisel hergestellt. Der entstandene graue Ton sollte sich zunächst aus einer weißen Umgebung abheben, und wurde dazu ein weißer Schirm mit runder Öffnung vor den Kreisel gestellt. Der Schirm durfte sich in seiner Helligkeit von derjenigen des Weiß der Scheibe nicht unterscheiden. Die letztere stand ungefähr $1\frac{1}{2}$ m von einem großen Fenster entfernt, so daß das volle Licht auf sie fiel. Der Beobachter saß mit dem Rücken gegen das Fenster. Der Schirm stand so weit von der

Scheibe, daß er dieselbe in keiner Weise beschattete, mußte also wegen der größeren Nähe am Fenster etwas heller erscheinen. Diese Differenz zwischen Scheibe und Schirm wurde durch leichte Drehungen des letzteren ausgeglichen, welche so lange fortgesetzt wurden, bis ein Unterschied absolut nicht mehr zu erkennen war. Der Schirm zeigte sich somit als eine vollkommen gleichmäßige Fläche, so daß selbst die Öffnung, durch welche man auf die Scheibe blickte, sich von dieser nicht mehr unterschied. Erst durch eine Änderung der Helligkeit der Scheibe konnte dieselbe wieder bemerklich werden.

Nun war das Objekt zu verkleinern bis an die Grenze der Sichtbarkeit, und zwar zunächst bei möglichst großem Helligkeitskontraste. Zu diesem Zwecke wurde hinter dem Schirme eine schwarze Scheibe aufgesteckt, so daß das Loch nunmehr als schwarzer Punkt auf weißem Hintergrunde erschien. Die erforderliche Verkleinerung desselben liefs sich bewerkstelligen durch entsprechende Entfernung der Objekte vom Auge, doch würden sie damit zu weit von der Lichtquelle abgerückt worden sein. Ich bediente mich daher des VOLKMANN'SCHEN Makroskopes, von dessen guter Verwendbarkeit für solche Zwecke ich mich früher schon überzeugt hatte. Das Auge blickte also durch eine innen geschwärzte, etwa 25 cm lange Metallröhre, an deren anderem Ende sich eine Linse von bekannter Fokaldistanz befand. Aus dieser, wie aus der Entfernung des Schirmes von der Linse und dem Durchmesser des Loches in dem Schirme, liefs sich leicht die Größe des zwischen Auge und Linse erscheinenden reellen Bildes berechnen und aus dem Abstände desselben vom Auge die Größe des Netzhautbildes. Die in Betracht kommenden Werte waren so gewählt, daß der Abstand des Schirmes von der Linse bei dem kleinsten noch erkennbaren Netzhautbilde gerade 1 m betrug. Das dem Auge zugewandte Ende der Röhre stack in einem schwarzen Blech mit Seitenklappen, welches so groß war, daß die Bilder anderer in dem Raume befindlicher Gegenstände nicht in das Auge fallen konnten. Demselben bot sich also nur das in der Röhre erscheinende Bild des weißen Schirmes dar, und außerdem nur schwarze Flächen. Das kleinste Netzhautbild, welches ich so wahrnehmen konnte (ohne Korrektion eines geringen Astigmatismus), hatte einen Durchmesser von 0,0035 mm. Es wurde nun die Größe desjenigen Sektors gesucht, bei dem

der durch das Loch sichtbare Teil der hinter dem Schirme rotierenden Scheibe eben als feiner grauer Punkt sichtbar wurde. Dabei mußte darauf geachtet werden, ob nicht während des Versuches selbst durch Schwankungen der Beleuchtung etwa an sich schon eine Differenz zwischen dem Weißs des Schirmes und demjenigen der Scheibe entstand. Bei einem Hellerwerden des ersteren mußte das Loch ja um so leichter erkannt werden und damit der Sektor zu klein ausfallen. Um dies zu kontrollieren, war neben dem ersten ein zweites, ebenso großes Loch ausgeschlagen, dessen Projektion auf den äußeren, unveränderten Rand der Scheibe fiel, während das andere den inneren Teil derselben sichtbar machte, an welchem der Sektor eingestellt war. So konnte jedesmal konstatiert werden, ob nur dieses letztere kenntlich wurde, im übrigen aber der Schirm vollkommen gleichmäßig blieb.

Als Mittel der einzelnen Versuche, welche aber untereinander nur unerhebliche Schwankungen zeigten, fand ich 50° für die Größe des schwarzen Sektors. Der Helligkeitsunterschied zwischen Schirm und Loch, d. h. dem Zentrum der Scheibe, ließ sich berechnen, wenn der Unterschied zwischen der Helligkeit des angewandten Schwarz und Weißs bekannt war. Ich bediente mich dazu der Methode von AUBERT,¹ welche darin besteht, daß die Helligkeit der beiden Scheiben bestimmt wird nach dem Abstände, den sie von ein und derselben Lichtquelle haben müssen, um vollkommen gleich hell zu erscheinen. In einem verdunkelten Raume sitzt der Beobachter neben dieser einzig vorhandenen Lichtquelle, und in einer gewissen Entfernung von ihm befindet sich die weiße Scheibe. Die schwarze steht näher an dem Lichte und wird nun so lange verschoben, bis sie ebenso hell erscheint, wie die weiße. Das Verhältnis des Quadrates der Entfernung giebt das Verhältnis ihrer Lichtstärke. Auf diese Weise fand ich, daß das Weißs 53 mal heller war als das Schwarz. Somit ist das Verhältnis zwischen der Helligkeit des inneren und äußeren Teiles der Scheibe leicht zu berechnen. Bezeichnen wir die erstere mit h , die zweite mit h_1 so ergibt sich $\frac{h}{h_1} = \frac{310 + \frac{50}{3}}{360} = 1,15$.

Der Helligkeitsunterschied zwischen dem eben wahrnehm-

¹ *Phys. d. Netzhaut.* S. 72.

baren dunklen Objekte und seinem Hintergrunde, oder dem gleich hellen Teile der Scheibe war somit 0,15. Vergleichen wir damit die Helligkeitsdifferenz, welche die gesamte Netzhaut zu unterscheiden vermag und welche bekanntlich auf $\frac{1}{170}$ — $\frac{1}{200}$ angegeben wird, so zeigt sich also der Lichtsinn des einzelnen Zapfens wesentlich geringer, was nach den bisherigen Ansichten über den Einfluß der Objektgröße auf den Lichtsinn, sowie nach allem, was wir über die gegenseitige Unterstützung einzelner Netzhautteile wissen, auch nicht anders zu erwarten war. Trotzdem ergibt sich aber, daß der Lichtsinn eines einzelnen Elementes immer noch so fein ist, daß ganz erhebliche Störungen vorliegen müßten, ehe die Wahrnehmung eines tief schwarzen Gegenstandes auf Weiß wesentlich beeinträchtigt würde. Wir fanden oben, daß ein einzelnes Element im stande ist, ein Objekt zu unterscheiden, dessen Helligkeit sich zu derjenigen des Hintergrundes verhält wie 1 : 1,15. Die Helligkeitsdifferenz zwischen einem mit Druckerschwärze hergestellten Punkte und dem weissen Papiere, auf dem er sich befindet, wird wohl ähnlich sein, wie diejenige zwischen dem von mir angewendeten Schwarz und Weiß, und können wir derselben wohl mindestens die Zahlen 1 : 53 zu Grunde legen. Der Vergleich dieser Werte ergibt, ein wie großer Spielraum etwaigen Lichtsinnstörungen gelassen ist, bis dieselben das Erkennen schwarzer Punkte auf weissem Hintergrunde beeinträchtigen. Damit ist also wiederum ein experimenteller Beweis dafür erbracht, daß die Behauptung einzelner Autoren, schwarze Punkte auf weissem Hintergrunde seien als Sehprüfungsobjekte ungeeignet, weil ihre Wahrnehmung zu sehr abhängig sei vom Lichtsinne, irrtümlich ist.

Es bleiben jetzt noch die Ergebnisse zu erörtern, die sich bei im übrigen unveränderten Versuchsbedingungen herausstellen, wenn statt des weissen Schirmes ein schwarzer gewählt wird und statt der weissen eine schwarze Scheibe mit hellerem Sektor. Auch hier wurde durch entsprechende Drehungen des Schirmes jeder Unterschied zwischen diesem und dem Schwarz der Scheibe ausgeglichen, damit nicht der eine Teil gegen den anderen etwa grau erschiene. Der weisse Sektor, welcher die Öffnung eben zur Wahrnehmung brachte, war 15° . Daraus ergibt sich als GröÙe der Helligkeitsdifferenz:

$$\frac{h}{h_1} = \frac{360}{345 + 15 \times 53} = \frac{1}{3,17}$$

Somit bestätigt sich die Beobachtung von AUBERT, daß die Unterschiedsempfindlichkeit bei Verkleinerung des Seh winkels ganz bedeutend sinkt, wenn die Gesamthelligkeit vermindert wird. Aus diesen Zahlen ist zu schliessen, daß die Wahrnehmung von Weiß auf Schwarz viel eher durch Lichtsinnstörungen beeinträchtigt wird, als die von Schwarz auf Weiß, was auch nicht einmal dadurch kompensiert werden könnte, daß die ersteren Objekte größer erscheinen. Letzteres trifft nämlich nur zu bei sehr lebhaftem Helligkeitskontraste, da die Irradiation, um mit HELMHOLTZ¹ zu reden, ja darin besteht, daß stark beleuchtete Flächen größer erscheinen, als sie wirklich sind, während die benachbarten dunklen um ebenso viel kleiner erscheinen. Einer Netzhaut, deren Lichtsinn herabgesetzt ist, werden aber die Gegensätze zwischen lebhaft und schwach beleuchteten Flächen weniger hervortreten, als der normalen. Die lichtschwachen Zerstreungskreise, welche bei normalem Auge die scheinbare Vergrößerung hervorrufen, werden unter diesen Umständen nicht mehr wahrgenommen. Wie dies auf die Empfindung wirkt, können wir uns daher veranschaulichen, wenn wir untersuchen, wie das normale Auge sich bei Verminderung des Gegensatzes von Objekt und Hintergrund verhält. Hierüber geben uns Aufschluß die bereits erwähnten Versuche von AUBERT, aus welchen erhellt, daß die Wahrnehmbarkeit eines weißen Objektes auf dunklem Hintergrunde, gegenüber dem dunklen auf hellem, in diesem Falle sehr benachteiligt ist. Bei Verminderung des Unterschiedes zwischen Objekt und Hintergrund mußte die Größe des ersteren in sehr verschiedenem Maße zunehmen, wenn es wahrnehmbar bleiben sollte. Diese Zunahme erfolgte nämlich viel rascher bei Hell auf Dunkel, als im umgekehrten Falle. Zu Beginn des Versuches war das Objekt 57 mal dunkler bzw. heller als der Hintergrund. Im ersteren Falle war es dabei unter einem Winkel von 27", im zweiten von 16,5" sichtbar (Mittel aus je zwei Bestimmungen an zwei verschiedenen Tagen). Wurde

¹ *Physiol. Opt.* 2. Aufl. S. 394.

der Gegensatz so weit vermindert, daß er bei hellerem Hintergrunde nur noch 3,3 war (statt 57), bei dunklem 3,8, so mußte im ersten Falle der Winkel von 27" auf 42", im zweiten von 16,5" auf 41,5" wachsen, also jedenfalls in weit stärkerem Verhältnisse. Ähnliches ergab sich, wenn der Helligkeitskontrast durch Dämpfung der Beleuchtung vermindert wurde.

Während also bei sehr lebhaftem Gegensatz die Wahrnehmung von Hell auf Dunkel viel leichter ist als umgekehrt, ändert sich dieses Verhältnis sehr bald bei Abschwächung des Gegensatzes. Die Zerstreuungskreise verschwinden, durch welche das weiße Objekt im Vorteile war, und die Unterschiedsempfindlichkeit ist kleiner wegen des geringeren Maßes der absoluten Helligkeit. Ich glaube, daß meine Versuche, wenn auch in anderer Weise, diese Erfahrung bestätigen. Denn ebenso wie bei AUBERT der Sehwinkel für Hell auf Dunkel wachsen mußte, wenn das Objekt bei abnehmendem Kontraste sichtbar bleiben sollte, so mußte bei mir die Helligkeitsdifferenz größer sein bei konstanter Objektgröße. Es folgt aber daraus, daß die Wahrnehmung von Hell auf Dunkel mehr beeinträchtigt wird von Lichtsinnstörungen, als die von Dunkel auf Hell.

B. Die Stäbchenfunktion.

Bei meinen vergleichenden Untersuchungen über den Lichtsinn in Zentrum und Peripherie ist die besondere Beteiligung, welche den Stäbchen an der Helligkeitsempfindung schon seit lange zugeschrieben und in letzter Zeit wieder lebhafter verteidigt ist, nicht berücksichtigt worden. Will man indessen aus der physiologischen Leistung des Auges Rückschlüsse auf die anatomische Verteilung der empfindenden Substanzen machen, so kann diese Frage nicht umgangen werden, und habe ich eine nähere Erörterung damals nur unterlassen, weil die Erregung der Stäbchen vorwiegend unter ganz anderen Umständen zu stande kommt, als diejenige der Sehsubstanzen, welche ich in gedachter Arbeit zum Gegenstande des Studiums gemacht hatte. Nach der betreffenden Theorie würde ich dabei nur den Zapfenapparat untersucht haben. Eine Prüfung der Stäbchen nach denselben Grundsätzen müßte wegen ihrer, der Verteilung der Zapfen gewissermaßen entgegengesetzten Anordnung zu ganz anderen Ergebnissen führen, und war daher

zu erwarten, daß auf diese Weise sich neue Anhaltspunkte in Bezug auf die gedachte Theorie finden würden.

Der erste Begründer derselben dürfte MAX SCHULTZE gewesen sein, welcher den Satz aufstellte, daß den Stäbchen die Empfindung der Helligkeit, den Zapfen diejenige der Farben und geometrischen Formen zukommt. In neuerer Zeit ist diese Anschauung von KÖNIG und v. KRIES und in Frankreich fast gleichzeitig von PARINAUD¹ wieder aufgenommen und erweitert worden. Bei Absorption verschiedener Farben durch den Sehpurpur fand der Erstgenannte,² daß das Absorptionsmaximum im Blau liegt, und daß die Absorptionsverteilung im Spektrum einigermaßen zusammenfällt mit der spektralen Helligkeitsverteilung bei angeborener totaler Farbenblindheit sowie bei geringer Lichtintensität. Er schließt daraus, daß die farblose Helligkeitsempfindung, welche alle Farben im lichtschwachen Spektrum hervorrufen, verursacht sei durch eine schwache Zersetzung des Sehpurpurs. Wenn dieses richtig ist, so müssen sich bestimmte Unterschiede zwischen dem Sehen mit der Fovea und der übrigen Netzhaut ergeben. Abgesehen von anderen, fand denn auch KÖNIG, daß jene Helligkeitsempfindung innerhalb der Fovea fehlt, und daß jedes monochromatische Licht, mit Ausnahme eines bestimmten Gelb, daselbst sofort mit seinem farbigen Charakter über die Schwelle tritt.

Der Unterschied zwischen den Wahrnehmungen der Fovea und der Peripherie ist auch einer der wesentlichsten Gesichtspunkte in der Theorie, welche von KRIES³ über die Bedeutung der Stäbchen und des Sehpurpurs aufstellt. Er unterscheidet zwischen dem farbentüchtigen, trichromatischen Zapfenapparate und den total farbenblinden Stäbchen, welche nur Helligkeitsempfindung liefern. Dieselben zeichnen sich durch ihre hohe Adaptationsfähigkeit aus, welche wahrscheinlich abhängt von dem Gehalte an Sehpurpur. Bei hellem Lichte beruht das Sehen vorwiegend auf der Funktion der Zapfen, bei geringem und bei Dunkeladaptation auf derjenigen der Stäbchen, und

¹ *Ann. d' Oculist.* CXII. 4^{me} livraison.

² *Sitzgsber. d. Akad. d. Wiss. zu Berlin.* Sitzg. d. physik. math. Klasse vom 21. Juni 1894.

³ *Ber. d. Naturforscherges. zu Freiburg.* IX. Heft 2; ferner *diese Zeitschr.* IX. 81. und *Arch. f. Ophthalm.* XLII. 3.

daher bezeichnet er die ersteren als den Hell-, die letzteren als den Dunkelapparat des Auges. Dieser ist besonders empfindlich für kurzwelliges Licht, und daher ist das Hellerwerden des letzteren bei abnehmender Beleuchtung im Gegensatze zum warmen Ende des Spektrums (PUPKINJESches Phänomen) an die Funktion der Stäbchen gebunden. Auf Grund einer analogen Anschauung und der alten Erfahrung, daß der Hemeralop gerade für blaues Licht unterempfindlich ist, hatte PARINAUD schon 1883 die Nachtblindheit als die Folge einer mangelhaften Bildung von Sehpurpur erklärt.

Es kann somit, nach VON KRIES, die Empfindung des Weissen oder eine farblose Helligkeit zunächst hervorgerufen werden durch eine Erregung des „trichromatischen“ Apparates mittelst ganz bestimmter Lichtmischungen, und ferner durch jedes beliebige geringe Licht, welches überhaupt die Stäbchen erregt. Wo die letzteren fehlen, also im Zentrum, kann nur die erstere Art von Helligkeitsempfindung zu stande kommen. Damit ist der Thatsache Rechnung getragen, daß das Zentrum doch auch Helligkeitsempfindung hat, und der entsprechenden Funktion der Stäbchen eine ganz bestimmte Grenze angewiesen.

Eine nähere Erörterung der Gründe für und wider diese Ansicht würde auferhalb des Rahmens dieser Arbeit liegen. Soviel ist aber ersichtlich, daß eine Untersuchung der Helligkeitsempfindung unter Umständen, welche die Erregung des Zapfenapparates herbeiführen, zu ganz anderen Ergebnissen gelangen muß, als wenn dieselbe Methode angewendet wird bei herabgesetzter Beleuchtung und Dunkeladaptation. Die Methode, nach welcher ich (l. c.) den trichromatischen Apparat untersuchte, bestand darin, daß ich die Größe derjenigen Fläche feststellte, welche erforderlich war, um dieselbe Helligkeitsdifferenz wahrzunehmen im Zentrum und an verschiedenen Stellen der Peripherie. Aus der konstanten Zunahme dieser Größe nach der Peripherie glaubte ich auf die Abnahme derjenigen anatomischen Einrichtungen schließen zu müssen, an welche die betreffende Wahrnehmung gebunden ist. Dies stimmt mit der anatomischen Verteilung der Zapfen. Prüft man aber ebenso die Helligkeitsempfindung unter Berücksichtigung derjenigen Momente, welche das Zustandekommen der Stäbchenfunktion begünstigen, so wird man zu Ergebnissen

kommen müssen, die sich von den vorher erwähnten sehr deutlich unterscheiden.

Bekanntlich sind die Resultate der bisherigen vergleichenden Untersuchungen über den Lichtsinn des Zentrums und der Peripherie durchaus widersprechend. Es giebt wohl ebensoviele zuverlässige Beobachter, welche sich dafür aussprechen, daß der Lichtsinn nach der Peripherie abnimmt, wie Vertreter der gegenteiligen Ansicht. Es liegen auch bereits verschiedene Erklärungsversuche für diese Thatsache vor (s. u.), doch dürfte es vielleicht nicht überflüssig sein, die Litteratur über diese Frage einmal daraufhin zu untersuchen, ob nicht die verschiedenen Ergebnisse durch die Versuchsanordnung herbeigeführt sind, indem das eine Mal die Erregungen des „Hell-“, das andere Mal die des „Dunkelapparates“ in den Vordergrund treten. Und in der That scheint unter diesem Gesichtspunkte eine Vereinbarung der Widersprüche möglich. Man kann die vorliegenden Untersuchungen vollkommen in zwei Kategorien trennen, einmal solche, die bei Tageslicht mit rotierenden Scheiben, verschieden hellen Schatten u. s. w. angestellt sind, und andererseits solche, welche bei Dunkeladaptation durch Erregung mittelst leuchtender Flächen von bestimmter Größe und Helligkeit vorgenommen wurden. Die Untersuchungen der ersteren Art führen immer zu dem Resultate, welches auch ich fand, daß die Unterschiedsempfindlichkeit im Zentrum am größten ist und nach der Peripherie stetig abnimmt. Die anderen haben durchgehends das entgegengesetzte Resultat. Diese Thatsache ist interessant genug, um einen kurzen Überblick über die einschlägige Litteratur zu rechtfertigen, wobei ich, soweit mir die Originalarbeiten nicht zur Verfügung stehen, den Übersichten von TREITEL¹ und SCHADOW² folgen will.

Abgesehen von den älteren Versuchen von MILE (1837), welcher eine Abnahme des Lichtsinnes nach der Peripherie zu finden glaubte, weil ihm seitlich gesehene Gegenstände dunkler erschienen als zentral betrachtete von gleicher Helligkeit, war wohl AUBERT der erste, welcher genauere Untersuchungen machte. In seiner *Physiologischen Optik* (S. 495) ist er der Ansicht, daß der Lichtsinn in der ganzen Ausbreitung der Netz-

¹ *Arch. f. Ophthalm.* XXXV.

² *Pflügers Arch.* XIX.

haut keine irgend erheblichen Verschiedenheiten darbietet, wemngleich er etwas weiter unten sich ebenso äußert wie MILE. Die dem entgegenstehende Praxis der Astronomen, lichtschwache Sterne exzentrisch zu betrachten, weil sie dann deutlicher sind, erklärt er dadurch, daß die seitlichen Teile in einer besseren Dunkeladaptation sich befinden, weil die zentralen das helle Gesichtsfeld des Teleoskops auffangen. Für das Nähere ist auf die *Physiologie der Netzhaut* verwiesen, und hier finden sich folgende Versuche (S. 92). 1. Im Dunkelzimmer wird ein Platindraht in schwaches Glühen gebracht, so daß er bei zentraler Fixation eben wahrnehmbar ist. Bis 30° in der Peripherie war eine Abnahme der Helligkeit nicht zu bemerken. 2. Ein weißes Quadrat von 1 Zoll Seite wird in 1 m Abstand auf schwarzem Grunde betrachtet. Es erscheint direkt heller als indirekt (bis 25° untersucht). 3. Im Dunkelzimmer wird ein ebenso großer Ausschnitt in schwarzer Pappe von einer Photogenflamme mit Milchglasglocke erhellt. Das Ergebnis war dasselbe wie bei 2. Diese Versuche bestätigen die oben ausgesprochene Vermutung nur zum Teil, sind aber auch nicht so angestellt, daß die beiden verschiedenen Apparate für sich getrennt zur Geltung kommen konnten. Wenn der Platindraht so stark glühte, daß er zentral wahrgenommen werden konnte, so ist klar, daß auch der Zapfenapparat erregt wurde, sonst hätte er zentral verschwinden müssen, worauf wir unten näher eingehen werden. Jedenfalls war aber die abgeschwächte Beleuchtung geeignet, auch den Stäbchenapparat zur Geltung zu bringen, und daher ist die Angabe, daß bis 30° eine Abnahme nicht zu bemerken war, immerhin beachtenswert. Mit den Versuchen 2 und 3 ist wenig zu beweisen, weil bei der Größe des Objektes eine isolierte Erregung des Zentrums überhaupt nicht stattfand. Jedenfalls sprechen sie eher für die Theorie, weil auch bei 3 ausdrücklich ein möglichst intensives Licht erzielt werden sollte und daher in diesen beiden Fällen (bei 2 war Tageslicht) die Erregungen des Zapfenapparates wohl in den Vordergrund traten.

RUPP¹ experimentierte bei Tageslicht mit MASSONSchen Scheiben und fand, daß von verschiedenen gleich hellen Ringen die am weitesten von der Blicklinie entfernten am dunkelsten

¹ *Inaug.-Dissert.* Königsberg. 1869.

erschieden. Ebenso mußte ein Schatten auf einem weißen Papiere immer dunkler werden, um sichtbar zu bleiben, wenn die Blicklinie sich von ihm entfernte. Er stellt sich demnach auf die Seite von MILE und nimmt eine Abnahme der Unterschiedsempfindlichkeit in der Peripherie an.

Besonders interessant sind die Versuche von EXNER.¹ Er fand bei herabgesetzter Beleuchtung eine Bevorzugung der Peripherie, wie nach unseren obigen Ausführungen zu erwarten war. So konnte er lichtschwache Sterne im indirekten Sehen beobachten, die aber sofort verschwanden, wenn er sie fixierte u. s. w. Von dem Eindrücke dieser Versuche ist er nun so beherrscht, daß er das entgegengesetzte Ergebnis, welches er selbst bei Tageslicht fand, nicht gelten lassen will. Und doch beweist letzteres ganz klar, daß der Lichtsinn nach der Peripherie abnimmt. Er beobachtete eine rotierende Scheibe mit hellem Zentrum und dunklem Rande bei direkter und indirekter Blickrichtung, und fand, daß der Sektor dabei immer mehr vergrößert werden mußte, wenn der Unterschied zwischen Rand und Zentrum deutlich bleiben sollte. Die Zahlen, welche er selbst angiebt, beweisen sogar eine ganz erhebliche Abnahme des Lichtsinnes in der Peripherie. Bei Wanderung der Blicklinie von 0° nach 5° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° mußte der schwarze Sektor wachsen von $5,5^\circ$ auf $5,5^\circ$, 6° , 30° , 65° , 94° , 175° , 220° , 300° . EXNER findet sich offenbar in Verlegenheit, dieses Ergebnis mit seinen Beobachtungen bei Dunkeladaptation, welche gewiß ebenso richtig waren, zu vereinbaren, und sucht jenes daher abzuschwächen mit Gründen, welche gegenüber der Beweiskraft seiner Zahlen wohl nicht stichhaltig sind. Bei der Auffassung, welche die Stäbchentheorie ergibt, wäre die Schwierigkeit ohne weiteres beseitigt.

Die Versuche von DOBROWOLSKY und GAINÉ² sind analog denen von EXNER bei Tageslicht angestellt, und wurde dementsprechend ebenfalls eine Abnahme des Lichtsinnes in der Peripherie gefunden. Sie hatten sogar den Eindruck, daß diese Abnahme mit einer gewissen Regelmäßigkeit vor sich ging, indem der Lichtsinn sich von 15° zu 15° ungefähr um

¹ *Pflügers Arch.* XII.

² *Pflügers Arch.* XII.

das Doppelte verminderte. CHODIN, welcher bei diesen Versuchen mithalf, hat dieselben später wiederholt und modifiziert¹ und wiederum bestätigt, daß die Unterschiedsempfindlichkeit im Zentrum viel größer ist als in der Peripherie.

Nun folgen mehrere Autoren, welche das gerade Gegenteil fanden, — aber auch im Dunkelzimmer experimentierten. Zunächst CHARPENTIER.² Er fand den Lichtsinn in der ganzen Ausbreitung der Netzhaut, mit Ausnahme der alleräußersten Zonen, vollkommen gleich, nur 2⁰–3⁰ seitwärts sogar etwas größer als im Zentrum. Er betrachtete nach einer Adaptation von 20 Minuten eine 3 cm² große matte Glasplatte, deren Beleuchtung durch ein Diaphragma von leicht zu verändernder Öffnung reguliert werden konnte. Die Größe des Objektes wie seine Beleuchtungsstärke blieben nun für Zentrum und Peripherie überall unverändert.³ Aus wie großer Entfernung dieses Objekt betrachtet wurde, ist, wenigstens im Referate, nicht angegeben, und sind infolgedessen die Versuche nicht ganz klar, da man nicht weiß, ob wirklich nur das Zentrum erregt wurde. Jedenfalls sagt CHARPENTIER nicht, daß die Helligkeit im Zentrum abnahm, und daher muß man wohl annehmen, daß dieselbe so groß war, daß auch der Zapfenapparat gereizt wurde. Alsdann bleibt aber unverständlich, warum auch für das Zentrum eine solche Objektgröße erforderlich war, wie man sie sonst bei Betrachtung heller Gegenstände auf dunklem Hintergrunde nicht findet.

SCHADOW⁴ bestimmte diejenige Lichtmenge, welche ausreichte, um eine Empfindung eben wahrzunehmen. Das Objekt war 3 mm² groß und konnte an einem FÖRSTERSchen Perimeter verschoben werden. Die eben wahrnehmbare Lichtmenge wurde photometrisch durch Drehung von NICOLS bestimmt. Die Beobachtung fand im Dunkeln nach Adaptation von 20 Minuten

¹ *Arch. f. Ophthalm.* XXIII. 3.

² *Arch. de Physiol.* IV.

³ Dieses ist die Darstellung, welche TREITEL von den Versuchen giebt. Nach SCHADOW war die Sache anders, indem die Lichtintensität unverändert blieb und die Größe des Objektes variiert werden konnte welches fast überall eine Fläche von 1 mm² ergab. Da mir das Original nicht zur Verfügung stand, konnte ich nicht feststellen, auf welcher Seite der Irrtum ist. Das wesentlichste ist aber das oben mitgeteilte Ergebnis.

⁴ *Pflügers Arch.* XIX.

statt, und diente als Fixierpunkt ein Phosphorstückchen. Dabei zeigte sich, daß die Lichtempfindung stärker war, wenn man über dasselbe hinweg sah, als wenn man es direkt fixierte. Die wesentlichen Schlüsse sind: a. Bei 60° ist die Empfindlichkeit geringer als zentral im Verhältnisse von 1:2.28. b. Bei 30° dagegen größer im Verhältnisse 1,38:1, aber nur, wenn die Fovea nicht selbst gereizt ist; sonst ist sie ebenfalls geringer.

BUTZ¹ hat diese Versuche wiederholt und gefunden, daß die Netzhaut bei jener „indirekten Fixation“ bei 60° fast ebenso empfindlich ist wie im Zentrum, bei 30° aber um das 1,96fache empfindlicher.

Ebenso fand HILBERT,² daß im Dunkelzimmer ein in BALMAINScher Leuchtfarbe hergestelltes Quadrat von 10 mm Seite an einer bestimmten Stelle der Peripherie am hellsten erschien.

Schließlich sind zu erwähnen die Versuche von BULL³ und TREITEL,⁴ von denen Ersterer zeitlich den beiden letzterwähnten Autoren vorhergeht. Er benutzte graue Pigmente von verschiedener Helligkeit, mit denen er bei Tageslicht eine fortschreitende Abnahme des Lichtsinnes nach der Peripherie fand. Beide besprechen den Einfluß der herabgesetzten Beleuchtung und suchen denselben zu erklären. BULL ist der Ansicht, daß das gelbe Pigment der Macula die Ursache ist, da dieses Licht absorbiert, was sich bei schwacher Intensität besonders bemerklich machen müsse. TREITEL bediente sich einer MASSONSchen Scheibe, von der ein 10 mm^2 großer Teil sichtbar war. Das Übrige blieb durch einen Blechschirm verdeckt, und konnte die Scheibe durch eine besondere Vorrichtung im Halbkreise verschoben werden. Auch er fand eine deutliche Abnahme der Unterschiedsempfindlichkeit in der Peripherie, welche sich dadurch zu erkennen gab, daß der weiße Sektor der Scheibe immer größer werden mußte, damit der 10 mm^2 große Ausschnitt in dem schwarzen Blechschirme wahrgenommen werden konnte. Bei einer gewissen Herabsetzung der Beleuchtung dagegen zeigte sich, daß die Unterschiedsempfindlichkeit bei 30° — 40° seitwärts etwa halb so

¹ *Inaug.-Dissert.* Dorpat. 1883.

² *Fortschr. d. Med.* II. 1884.

³ *Arch. f. Ophthalm.* XXVII. 1.

⁴ *Ibid.* XXXV. 1.

grofs war als zentral, während sie bei Tageslicht nur ungefähr den zehnten Teil betrug. Diese Veränderung erfolgte hauptsächlich auf Kosten des zentralen Lichtsinnes. TREITEL glaubte die Ursache hierfür darin gefunden zu haben, dafs die Adaptation der Fovea centralis erheblich langsamer ist, als die der Peripherie.

Dieser Überblick zeigt also thatsächlich einen Gegensatz, je nachdem die Untersuchungen im Hellen oder bei Dunkeladaptation angestellt wurden, während die unter gleichen Verhältnissen vorgenommenen im wesentlichen übereinstimmten. Dafs der Gegensatz nicht mit derjenigen Deutlichkeit hervortritt, welche die Stäbchentheorie erfordert, kann nicht verwundern, da die Anordnungen im Dunkelmzimmer nicht solche waren, dafs die Erregung der Zapfen genügend in den Hintergrund trat, um die Stäbchenfunktion zur vollen Geltung kommen zu lassen. Dies zu erreichen, war nun der Zweck meiner eigenen Versuche.

Entsprechend der Thatsache der Verschiebung des Helligkeitsmaximums nach dem brechbareren Ende des Spektrums bei herabgesetzter Beleuchtung sowie der geringen Beeinflussung des Sehpurpurs durch rotes Licht, war ich von vorneherein auf kurzwellige Strahlen angewiesen. Es wurde also eine blaue Scheibe genommen und dieselbe von einer konstanten Lichtquelle in konstanter Entfernung beleuchtet, so dafs bei jedem Versuche dieselben Verhältnisse leicht herzustellen waren. Vor dieser Scheibe befand sich ein schwarzer Schirm mit einer runden Öffnung von 2 mm Durchmesser. Auf diese Öffnung war der Tubus des VOLKMANN'Schen Makroskopes gerichtet. Die Lichtquelle war von einem schwarzen Schornsteine umgeben, welcher nur nach der Seite der Scheibe einen Ausschnitt hatte, so dafs das übrige Zimmer dunkel war; auch war durch passend angebrachte Blenden dafür gesorgt, dafs nur die besagte Öffnung sich dem Auge darbot. Die Versuche wurden jedesmal begonnen nach einer Adaptation von 20 Minuten. Unter dem Makroskope war ein Gradbogen angebracht mit einem Fixierpunkte für die Untersuchung der Peripherie. Letzterer bestand aus einem auf einem Stäbchen befestigten, etwa 2 mm grofsen und mit Calciumsulfid armierten Knopfe, welches bekanntlich die Eigenschaft hat, im Dunkeln zu leuchten, wenn es einige Zeit lang hellem Lichte ausgesetzt war. Dieser Fixierpunkt befand sich sowohl in der Höhe wie in der Ent-

fernung des im Makroskope erscheinenden reellen Bildchens der Schirmöffnung.

Die Beleuchtung mußte soweit gedämpft werden, daß der „trichromatische“ Apparat nicht mehr merklich erregt wurde, damit die supponierte Stäbchenfunktion rein zum Ausdruck kam. Dieser Punkt ist nach der Theorie dann erreicht, wenn der leuchtende Gegenstand (eine entsprechende Größe desselben vorausgesetzt) in der Fovea vollständig verschwindet. Dieses Verschwinden an sich würde schon beweisen, daß die Helligkeitsempfindung im Zentrum unter diesen Umständen fehlt, also die Peripherie überlegen ist. In der That gelingt es mir nun immer ohne besondere Schwierigkeit, das richtige Maß der Beleuchtung zu finden. Man sieht, wenn man sich der betreffenden Grenze nähert, das Objekt zunächst dunkler werden bei zentraler Fixation, und wird die Lichtquelle vorsichtig noch weiter herabgemindert, so verschwindet dasselbe schließlichs ganz. Diese Thatsache des Verschwindens schwacher Lichte in der Fovea ist für mich von einer solchen, ich möchte sagen massiven Deutlichkeit, daß es mir mit einiger Geduld immer gelingt, die Größe des betreffenden Bezirkes festzustellen. Zu dem Zwecke wird die Linse aus dem Makroskope entfernt und durch die Röhre, welche in diesem Falle nur den Zweck hat, jedes andere Licht abzuhalten, nach der Öffnung im Schirme geblickt, die man für diesen Versuch zweckmäßig größer nimmt. Durch Annäherung des Schirmes läßt sich nun diejenige Größe des Netzhautbildes finden, bei welcher die Öffnung nicht mehr ganz verschwindet, sondern an der einen oder anderen Stelle eine schmale, leuchtende, verwaschene Sichel erscheint, die natürlich bei Schwankungen des Blickes ihre Lage verändert. Ja, wenn der Versuch besonders schön gelingt, sehe ich eine dunkle Stelle, umgeben von einem gleichmäßigen, ganz schwachen Lichtscheine. Dieses ist offenbar der Punkt, an dem die Größe des Netzhautbildes die unempfindliche Stelle zu überschreiten beginnt. Als Mittel aus meinen Beobachtungen ergab sich für den Durchmesser dieser Stelle 0,6. VON KRIES fand mit anderen Methoden und bei verschiedenen Personen 0,45—0,7. Die anatomischen Messungen von KOSTER¹ ergeben für die Stelle, „wo nur die Funktion der Zapfen eine Rolle

¹ *Arch. f. Ophthalm.* XLI. 4.

spielt“, 0,5 mm, für diejenige, „wo die Funktion der Zapfen überwiegend ist“ (d. h. bereits einzelne Stäbchen vorhanden sind), 0,8 mm. Freilich haben KÖNIG und VON KRIES sehr Recht, wenn sie die große Schwierigkeit der Fixation hervorheben, falls man den Versuch ohne besonderes Fixierzeichen anstellt. Das Auge hat immer das unwillkürliche Bestreben, die Blicklinie so einzustellen, daß das Objekt sichtbar wird, und es kostet eine gewisse Anstrengung, dies zu unterdrücken. Ich habe mehrfach, namentlich, als ich anfang, diese Versuche zu machen, das gleichzeitige Auftreten von Akkommodationsanstrengungen bemerkt, welche sich teils durch das bekannte, die stärkeren Kontraktionen des Ciliarmuskels begleitende unangenehme Gefühl im Auge, teils durch plötzliche Veränderung der scheinbaren Objektgröße zu erkennen gaben. Ich erkläre mir dieselben nach Analogie der unzeckmäßigen Mitbewegungen, welche auch sonst einzutreten pflegen, wenn wir von unseren Muskeln eine Leistung verlangen, welche sie nicht gewohnt sind, und die ihnen infolgedessen besonders schwierig ist.

Mit diesem Verschwinden kleiner heller Flächen ist offenbar der Beweis erbracht, daß dem Zentrum eine Empfindung mangelt, die in seiner nächsten Nachbarschaft vorhanden ist. Ich versuchte nun festzustellen, wie diese Empfindung sich gestaltet, wenn man Stellen untersucht, die immer weiter nach der Peripherie liegen. Dabei wurde dieselbe Methode angewendet, wie für die obenerwähnten Lichtsinnuntersuchungen. Die Makroskoplinsen wurde wieder eingesetzt und die Öffnung im Schirme 2 mm groß genommen. Das kleinste Netzhautbild, welches außerhalb des Zentrums, da, wo die Empfindung anfang, deutlich zu werden, noch wahrgenommen werden konnte, hatte einen Durchmesser von 0,01 mm. Versob ich nun den Fixierpunkt in der Richtung nach außen, so blieb der Eindruck bis 30° gänzlich unverändert, nach innen bis 35° , d. h. man konnte den kleinen hellen Fleck ganz deutlich von seiner Umgebung unterscheiden. Von da ab wurde aber der Eindruck entschieden undeutlicher, und an den äußersten Grenzen nahm man nur noch einen diffusen Lichtschein wahr, der die Gegend, wo der leuchtende Punkt sich befand, gleichmäßig erhellte, ohne daß man aber die Stelle, von der er ausging, näher hätte bezeichnen können. Völlige Dunkelheit trat überhaupt nicht ein. Das kleinste Bild, welches bis zu den äußersten Grenzen noch ebenso

deutlich erkannt werden konnte, wie das von 0,01 mm Durchmesser in dem eben angegebenen Bezirke, hatte einen Durchmesser von 0,02 mm, und zwar sowohl auf dem äusseren wie dem inneren Meridian. Den vertikalen habe ich nicht untersucht.

Die Versuche waren selbstverständlich so angestellt, daß nicht etwa eine Zunahme der Adaptation während derselben sie beeinflussen konnte. Die Vergleichen der verschiedenen Stellen erfolgten unmittelbar hintereinander, und wurde die Reihenfolge oft umgekehrt.

Wenn wir uns aus diesen Ergebnissen, ähnlich wie aus den Versuchen bei Tageslicht, ein Bild entwerfen über die Verteilung derjenigen Elemente, welche die Helligkeitsempfindung¹ unter den geschilderten Verhältnissen bedingen, so müssen wir sagen, daß dieselben im Zentrum ganz fehlen, von da bis 30° bzw. 35° sich unvermindert erhalten, jenseits dieser Grenze aber so abnehmen, daß in der äußersten Peripherie eine viermal so große Fläche gereizt werden muß, damit derselbe Eindruck entsteht. Ob diese Abnahme sich auf die anatomischen Formelemente oder auf besondere Sehstoffe bezieht, bleibt dahingestellt.

Dies ist also ein wesentlich anderes Bild, als es uns sowohl die früheren wie meine eigenen Untersuchungen bei Tageslicht zeigen. In der erwähnten Arbeit hatte ich angegeben, daß eine Fläche, wenn sie eine bestimmte Helligkeitsempfindung auslösen soll, stetig wachsen muß, je exzentrischer die Blickrichtung fällt, und zwar von 0°—10° schon um das 36fache, von hier bis zu 20° um das 2^{1/2}fache u. s. w. Der Unterschied von 10°—50° beträgt etwa das 20fache. Wir müssen also auch auf eine entsprechende Abnahme der die betreffende Empfindung auslösenden Elemente in der Peripherie schließen.

¹ Die Größe der so gefundenen Flächen gestattet natürlich kein Urteil über den Lichtsinn bei Dunkeladaptation, d. h. über die Feinheit, mit welcher Helligkeitsunterschiede oder minimale Intensitäten wahrgenommen werden können, da beides hier ziemlich bedeutend war, und nur die Objektgröße möglichst beschränkt. Ich möchte dies gleich hervorheben, um der Bemerkung zu begegnen, daß ich also doch mit einzelnen Punkten den Lichtsinn untersuche. Was ich suchte, war die kleinste empfindliche Fläche, also der physiologische Punkt im Sinne AUBERTS.

Bei diesen Versuchen war die Methode insofern anders, als jedesmal je zwei Flächen von bestimmtem Helligkeitsunterschiede in Bezug auf ihre Größe an den verschiedenen Stellen verglichen wurden, während bei den jetzigen nur das für die Wahrnehmung einer einzelnen hellen Fläche erforderliche Netzhautbild zu ermitteln war. Obschon meines Erachtens aus beiden derselbe Schluss abzuleiten ist in Bezug auf die räumliche Verteilung der die Empfindung von Hell und Dunkel bedingenden Elemente, habe ich doch auch die Versuche bei Tageslicht so nachgeprüft, daß sie denen bei Dunkeladaptation möglichst entsprachen. Es wird ja allerdings schwierig sein, den Helligkeitskontrast zwischen Objekt und Hintergrund dabei genau eben so groß zu nehmen. Darauf kommt es aber auch nicht an, sondern man kann jeden beliebigen hellen Punkt auf dunklem Hintergrunde wählen, und es handelt sich nur darum, festzustellen, ob und in welchem Grade derselbe bei Wanderung seines Netzhautbildes vom Zentrum zur Peripherie wachsen muß, um wahrgenommen zu werden. Ich nahm dazu eine beliebige weiße Scheibe, stellte davor den schwarzen Schirm mit einer Öffnung von 2 mm und betrachtete diese durch das VOLKMANNsche Makroskop. Da ein Vergleich mit dem Zentrum ausgeschlossen war, fing ich bei 5° an und konnte hier in jeder Richtung ein Netzhautbild von 0,003 mm Durchmesser erkennen. Auf dem inneren Meridian ergab sich:

bei 25°	eine Bildgröße von	0,024
„ 40°	„ „	„ 0,044
„ 60°	„ „	„ 0,06.

Auf dem äußeren Meridian:

bei 20°	eine Bildgröße von	0,025
„ 35°	„ „	„ 0,03
„ 50°	„ „	„ 0,054.

Die Zahlen sind also durchgehends kleiner, als wenn wir die Größe des physiologischen Punktes untersuchen mit schwarzem Objekte auf weißem Hintergrunde, wie ja nicht anders zu erwarten war. Der Gegensatz zu den bei Dunkeladaptation gefundenen Werten bedarf keiner Erläuterung. Von 5° — 25° sehen wir in dem einen Falle noch keine Veränderung, in dem anderen ist der Durchmesser schon um das Achtfache gewachsen.

Hinsichtlich einer Erklärung dieses Befundes läßt uns die

Anatomie ebenso, wie wir es bezüglich der Untersuchungen bei Tageslicht feststellten, im Stiche. Auch von anderen Autoren (SCHADOW, BUTZ, AUBERT) ist der Parallelkreis 30° als Grenze angegeben für 2 Zonen verschiedener Empfindlichkeit. Die zentral davon gelegene zeigte bei ihnen eine der Empfindlichkeit der Fovea gleiche oder gröfsere, die periphere eine geringere. Weder die Verteilung der Stäbchen noch des Sehpurpurs in denselben giebt uns darüber eine Aufklärung, und wenn wir den Stäbchenapparat als das Substrat dieser Empfindung ansehen wollen, so müssen wir annehmen, dafs seine Empfindlichkeit an der betreffenden Grenze sich ändert, ohne dafs wir dies an seiner anatomischen Einrichtung zu erkennen vermöchten.

Wir kommen somit zu dem Ergebnisse, dafs die Verteilung derjenigen Elemente auf der Oberfläche der Netzhaut, an welche die Helligkeitsempfindung bei Tageslicht geknüpft ist, eine wesentlich andere ist, als derjenigen, welche diese Empfindung bei Dunkeladaptation auslösen. Es ist mir keine Theorie bekannt, welche diesen Thatsachen (auf sonstige Gründe für und wider will ich nicht eingehen) besser Rechnung trüge, als die Annahme zweier verschiedenen Einrichtungen, als welche nach dem gegenwärtigen Stande unserer Kenntnisse die Stäbchen einer-, die Zapfen andererseits anzusehen sind.
