

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

Über das Verhalten der Netzhautzapfen bei Dunkeladaptation des Auges.

Von

W. A. NAGEL und K. L. SCHAEFER
in Berlin.

(Mit 1 Figur im Text.)

Die Steigerung der Lichtempfindlichkeit, welche die menschliche Netzhaut bei längerem Lichtabschluß erfährt, betrifft, wie bekannt, vorzugsweise die peripheren und parazentralen Netzhautregionen, das Netzhautzentrum dagegen, wenn überhaupt, in weit geringerem Maße. Die Netzhautperipherie paßt sich durch „Dunkeladaptation“ den schwachen Reizen des Dämmerungssehens an, die Fovea macht diese Adaptation nicht mit, sie ist, kurz gesagt, hemeralopisch.

Über das Maß der adaptiven Empfindlichkeitssteigerung der Netzhaut sind wir durch mehrfache Untersuchungen unterrichtet, die mit fortschreitender Vervollkommnung der Versuchstechnik jenes Maß immer größer erscheinen ließen. Die neueste Untersuchung über diese Frage, von H. PIPER¹ ausgeführt, ergab eine Empfindlichkeitssteigerung größerer Netzhautflächen im Betrage von 1 : 2000 bis 1 : 9000, wenn die Empfindlichkeit der helladaptierten und der gut dunkeladaptierten Netzhaut in Vergleich gestellt wurde.

Es kann wohl als eine fast allgemein anerkannte Lehre bezeichnet werden, daß der wesentliche Unterschied in dem Ver-

¹ Diese Zeitschrift 31.

halten des Netzhautzentrums und der Peripherie bei Dunkeladaptation auf dem Fehlen der Stäbchen im Zentrum beruht. Die Stäbchen sind die für das Sehen bei schwachen Helligkeiten spezifisch befähigten Apparate im Auge, die Zapfen bedürfen stärkerer Lichter zu ihrer Erregung.

So wenig die außerordentliche Überlegenheit der Stäbchen in dieser Hinsicht bezweifelt werden kann, so wenig wahrscheinlich mußte es andererseits erscheinen, daß die Lichtreizschwelle für die Zapfen unter allen Umständen immer die gleiche sein sollte, gleichviel ob sie durch längeren Lichtabschluß „ausgeruht“ oder zuvor durch andauernde Reizung in Tätigkeit erhalten worden waren. Deckt sich die bei Helladaptation eintretende Empfindlichkeitsabnahme der Stäbchen begrifflich auch nicht völlig mit einem Ermüdungsvorgang, so steht sie einem solchen doch in gewissem Sinne nahe. Gewinnen nun die Zapfen durch „Ausruhen“ überhaupt nicht an Empfindlichkeit? Erhöht sich ihre Reizschwelle durch längere Tätigkeit nicht?

Auf diese Frage liegt unseres Erachtens zurzeit eine befriedigende Antwort noch nicht vor. Bei den erheblichen Schwierigkeiten, welche einer solchen Untersuchung im Wege stehen, kann dies nicht überraschen. Es ist leicht, den Stäbchenapparat des Auges isoliert zu reizen, indem man Reizlichter von einer Intensität wählt, die für den Zapfenapparat noch unterschwellig ist. Isolierte Reizung der Stäbchen mit starken Lichtern ist dagegen beim normalen Auge undurchführbar. Umgekehrt beim Zapfenapparat: wollen wir die Zapfen isoliert reizen, so sind wir auf den kleinen stäbchenfreien Bezirk der Fovea centralis angewiesen. Eine solche isolierte Reizung mit starken Lichtern gelingt leicht. Ein hellleuchtender Punkt auf dunklem Grund übt einen Fixationszwang aus, der Blick richtet sich fast wider unseren Willen auf den Lichtpunkt, so daß dieser auf der Fovea centralis abgebildet wird.

Wie aber gestaltet sich die Sache, wenn wir mit Lichtern reizen, die in der Nähe der fovealen Schwelle, mit anderen Worten, in der Nähe der Zapfenschwelle liegen? Besteht auch dann noch jener Fixationszwang? — Die Antwort lautet „nein“ für die Mehrzahl aller möglichen Fälle. Solche Versuche müssen im Dunkeln angestellt werden, es tritt also die Dunkeladaptation und damit die rasche adaptive Empfindlichkeitssteigerung der peripheren und parazentralen Netzhautteile ein, die hierdurch

dem Netzhautzentrum an Empfindlichkeit schnell überlegen werden und das Auge geradezu zwingen, nicht foveal zu fixieren. Es wird, wenn man sich nicht ganz besondere Mühe gibt und grofse Übung hat, mit aufserfovealen (parazentralen) Netzhautstellen fixiert, und wenn man nun Schwellenbestimmungen macht, bestimmt man nicht die fovealen Zapfenschwellen, sondern nur die Schwellen der parazentralen Stäbchen.¹

Diese Schwierigkeit zu umgehen, bieten sich mehrere Wege, die es ermöglichen, wenigstens zu einigen im gröberen orientierenden Beobachtungen über die Dunkeladaptation der Zapfen zu gelangen.

1. Die nächstliegende Methode wäre die, durch Anbringung eines Fixierzeichens von minimaler Gröfse und foveal sicher überschwelliger Helligkeit die Festhaltung der zentralen Fixation zu sichern.

2. Eine zweite Möglichkeit wäre die, die Tatsache zu benutzen, dafs die adaptive Empfindlichkeitssteigerung des Stäbchenapparates für ein rein rotes Licht eine minimale ist, um so geringer, je längerwellig das Licht ist. Demzufolge ist an roten Lichtern eine foveale Schwellenbestimmung ohne Gefahr der Blickabirrung möglich, auch ohne Verwendung eines hellen Fixierpunktes.

3. Da nach einer guten Helladaptation die Dunkeladaptation des Stäbchenapparates erst nach etwa 5 Min. Dunkelaufenthalt in merkbarer Weise einsetzt, mufs es möglich sein, in den ersten Minuten nach der Helladaptation foveale Schwellen zu bestimmen, ohne dafs man durch Ablenkung des Fixierzwanges auf parazentrale Netzhautteile gestört wird.

¹ Aus diesem Grunde ist es uns immer recht bedenklich erschienen, wenn von einzelnen Autoren Flecken von „Leuchtfarbe“ als „Fixierzeichen“ im dunkeln Raum verwendet worden sind. Das von diesen Substanzen ausgestrahlte Licht hat stets erheblichen Dämmerungswert, und ist, soweit uns bekannt, nur für kurze Zeit auf solche Helligkeiten zu bringen, dafs es foveal erheblich überschwellig ist. Sowie das Auge einigermaßen dunkeladaptiert ist, veranlafst der viel stärkere Eindruck, den diese Flecken auf die parazentralen Netzhautteile macht, das Auge in der Fixation abzuirren; sie wirken also geradezu als Mittel, die Fixation zu verhindern oder zu erschweren, wenn nicht mit ganz besonderer Vorsicht zu Werke gegangen wird. Manche irrige Resultate dürften wenigstens zum Teil auf der Anwendung derartiger unzweckmäfsiger Fixierzeichen beruhen. Das sicherste Mittel, foveale Fixation zu sichern, ist immer ein feiner roter Lichtpunkt.

Gegen die erste Methode ist für ähnliche Fälle der freilich niemals experimentell begründete Einwand erhoben worden, daß ein leuchtender Fixierpunkt die Beobachtung auf dem unmittelbar angrenzenden Felde störe.

Eine Schattenseite der zweiten Methode ist es, daß sie die Beobachtung auf rein rotes Licht beschränkt und die immerhin interessierende Ausdehnung der Versuche auf andere Lichter nicht gestattet.

Die dritte Methode ist in ihrer Anwendung in unerwünschter Weise dadurch beschränkt, daß sie nur während der ersten Minuten nach dem Eintritt ins Dunkelzimmer Beobachtungen gestattet.

So ergab es sich von selbst, daß wir, um einige Aufklärung über das in Rede stehende Problem zu erhalten, alle drei Methoden zu gegenseitiger Ergänzung anwenden mußten. Besondere Verfahrensweisen, die wir gelegentlich anzuwenden veranlaßt waren, werden im folgenden noch ihre Erwähnung finden.

Den Ausgangspunkt unserer Überlegungen bildete eine Beobachtung, die wir gelegentlich der von Herrn Dr. PIPER vorgenommenen Versuche über den zeitlichen Verlauf der Dunkeladaptation gemacht hatten. Das von P. verwendete Reizlicht hatte eine ins Rötlichgelbe spielende Färbung, da es von einer von hinten elektrisch beleuchteten Scheibe weißen Kartons herührte, der bekanntlich in der Durchsicht meist etwas gefärbt erscheint. Bei den ersten Schwellenbestimmungen nach dem Eintritt in den Dunkelraum kam die erleuchtete Fläche stets in deutlich rötlichgelber Färbung über die Schwelle, und erst nach einigen Minuten wurden die eben überschwelligen Lichter farblos, wie es dem Dämmerungssehen entspricht.

Herr PIPER machte nun einige besondere Versuche, bei denen er das Reizlicht durch Einfügung einer Rubinglasscheibe gesättigt rot machte. Nunmehr war die erwähnte Erscheinung noch viel ausgeprägter: das Licht kam zuerst tief dunkelrot über die Schwelle und im Laufe der ersten Beobachtungsminuten sank der Schwellenwert merklich, ohne daß das Aussehen des Leuchtobjekts sich änderte. Erst später, nach etwa 5 Min., setzte dann das eigentliche Dämmerungssehen ein, das Rot wurde weißlicher. Auch wenn durch Kombination geeigneter flüssiger Strahlenfilter ein Rot hergestellt wurde, das recht rein war, und von jeder Orangebeimischung befreit war, kam die Schwellen-

verschiebung für das rote Licht deutlich zum Ausdruck. Da ein solches langwelliges Rot erst nach sehr ausgiebiger Dunkeladaptation einen weißlichen Schimmer bekommt, sein Dämmerungswert, bzw. sein Reizwert für die Stäbchen also außerordentlich gering ist, liegt in diesem vorläufigen PIPERSchen Versuche eigentlich schon der Beweis einer adaptiven Schwellenverschiebung des Zapfenapparates.

Wir haben nun systematische Versuche über diesen Punkt angestellt, indem wir eine in der Hauptsache der PIPERSchen einigermaßen ähnliche Versuchsanordnung verwendeten.

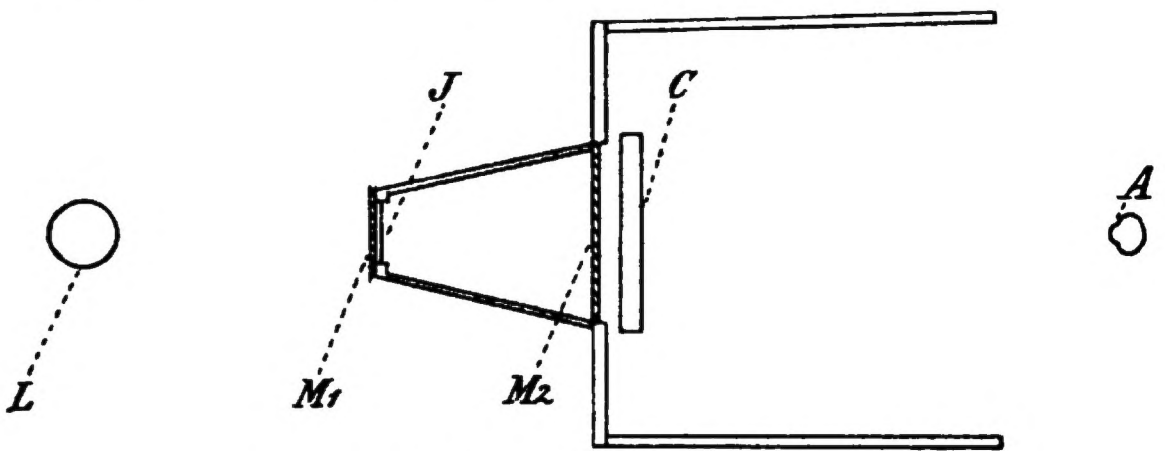


Fig. 1. Schema der Versuchsanordnung.

L Lichtquelle, *M*₁ *M*₂ Milchglasplatten, *J* Irisblende, *C* Cuvette für Farbfüssigkeiten, *A* Auge des Beobachters.

Eine Lampe *L* erleuchtete eine Milchglasscheibe *M*₁, die nun ihrerseits als Beleuchtungsquelle für die zweite Milchglasscheibe *M*₂ diente. Durch verschiedene Weite der Irisblende *I* wurde die Gröfse der beleuchtenden Fläche und damit die Helligkeit der erleuchteten Scheibe *M*₂ verändert, proportional dem Quadrat des Blendendurchmessers.

In einzelnen Versuchsreihen richteten wir es so ein, daß die Irisblende vom Beobachter selbst durch einen Schnurlauf eingestellt werden konnte, während ein Gehilfe die Einstellungen ablas und notierte.

Die Helladaptation vor Beginn des einzelnen Versuches erzielten wir bei diesen Versuchen meistens durch künstliche Beleuchtung, da das Wetter zu trübe war, um Adaptation im Freien zu ermöglichen. Wir legten Wert darauf, die Helladaptation nicht allzuweit zu treiben, also keine Blendung zu bewirken. Das Maß der zu verwendenden Helligkeit ergab sich uns durch die Beobachtung, daß nach der Einwirkung sehr

intensiven Lichtes (auch auf grofse Teile des Gesichtsfeldes) sich mehrere Minuten anhaltende und für die Beobachtung von Schwellenwerten höchst störende subjektive Lichterscheinungen, eine Art positiver Nachbilder, in Gestalt „wandernder Lichtnebel“ bemerklich machten. Unter dieser Grenze blieben wir, wenn wir die Helladaptation bewirkten, indem wir mehrere Minuten einen grofsen Bogen weissen Kartons anblickten, der aus etwa $\frac{1}{2}$ — $\frac{3}{4}$ m Entfernung von einer 50kerzigen Glühlampe bestrahlt war. Störende Nachbilder fehlten hiernach und die Beobachtung war somit bequem und sicher.

A. Versuche mit rotem Licht.

1. Versuche mit grossem Felde.

Bei dieser Versuchsreihe wurden die Schwellenbestimmungen an einem quadratischen Felde gemacht, das je nach der Stellung des Kopfes bei der Beobachtung unter einem Gesichtswinkel von 20—30° erschien. Der Beobachter stellte alsbald nach Verdunkelung des Zimmers (durch Ausdrehen der Glühlampe) am Apparate die Irisblende auf den für ihn in diesem Augenblick gültigen Schwellenwert ein, und wiederholte diese Einstellung nach kurzen Pausen. Ein Gehilfe notierte die Zeiten und die an der Irisblende abzulesenden Blendenweiten, deren reziproke Werte, ins Quadrat erhoben, die Verhältniszahlen für die steigende Empfindlichkeit angeben. Dafs vom Moment der Verdunkelung bis zur ersten Schwelleneinstellung stets eine nicht unerhebliche Zeit verfliesst, rührt davon her, dafs der Beobachter nach dem Hineinblicken in den Dunkelkasten sich erst über die Lage des zu beobachtenden Feldes unterrichten mufste, und dafs auch die erste Einstellung nie so prompt ausgeführt werden konnte, wie die späteren. Es mufste stets erst etwas zwischen zu hohen und zu niedrigen Werten balanciert werden.

Wir lassen einige Versuchsprotokolle folgen, die den ungefähren Gang der Adaptation erkennen lassen.

Rotes Licht.

Versuch 1. 20 Sek. nach Verdunkelung

Schwelle bei Blendenweite 17 mm

10 Sek. später bei 10 mm

10 Sek. später bei 3 mm

Versuch 2.	20 Sek. nach Verdunkelung	17 mm
	10 Sek. später	9 mm
	16 Sek. später	6 mm

Versuch 3.	10 Sek. nach Verdunkelung	16 mm
	16 Sek. später	10 mm
	19 Sek. später	4 mm

Die Werte sind, wie man sieht, recht schwankend. Für jeden, der ähnliche Bestimmungen unternommen hat, wird dies nicht merkwürdig erscheinen. Unsere Bestimmungen dieser Reihe können auch nach unserer Überzeugung nicht mehr als die ungefähren Grenzen der Schwellenverschiebung, ja eigentlich nur deren Größenordnung zuverlässig kennzeichnen. Jedenfalls ist die Empfindlichkeitssteigerung des Auges für rein rotes Licht in der ersten Minute des Dunkelaufenthalts nicht unbedeutend. Eine Steigerung auf den 32fachen Wert, wie in Versuch 1, dürfte noch kaum den Maximalbetrag dessen, was in der ersten Minute erreicht werden kann, bezeichnen.

Wesentlich langsamer schon geht die Adaptation in den nächsten Minuten vor sich. Die Messungen sind hier, weil sie mit mehr Muße ausgeführt werden können, genauer. Vom Ende der ersten halben bis zum Ende der sechsten Minute (nach vorausgegangener guter Helladaptation) finden wir eine Empfindlichkeitssteigerung etwa im Betrage 1 : 16.

Ein Teil unserer hierhergehörigen Versuche ist an hellen Tagen mit Helladaptation im Freien oder in einem hellen Turmzimmer ausgeführt. Bis zum Eintritt ins Dunkelzimmer und zum Beginn der Beobachtung verfloß in der Regel etwa 1 Min. Über durchlaufende Beobachtungsreihen, in denen sowohl der Adaptationsverlauf innerhalb der ersten Minuten wie in den darauffolgenden Minuten erkennbar ist, verfügen wir leider nicht, da hierfür die Versuchsanordnung nicht ausreichte. Wir vermögen daher auch keine bestimmtere Aussage zu machen, als daß in den ersten Minuten des Dunkelaufenthaltes, vor dem Einsetzen des eigentlichen Dämmerungssehens, die Empfindlichkeit für rein rotes Licht etwa den 200fachen Betrag ihres Anfangswertes erreichen kann.

Auf entsprechende Versuche mit Lichtern anderer Farben kommen wir weiter unten zurück und berichten zunächst über die

2. Versuche mit kleinem (fovealem) Felde.

Obgleich wir uns der außerordentlichen Schwierigkeiten von fovealen Schwellenbestimmungen wohl bewußt waren, hielten wir es doch nicht für überflüssig, uns unter gründlicher Erprobung der verschiedenen in Betracht kommenden Methoden davon zu überzeugen, wieviel in diesem Punkte zu erreichen sei.

Zunächst verfahren wir (ähnlich wie früher TREITEL) so, daß wir ein rotes Feld von 1° Durchmesser erheblich überschwellig einstellten und dann vom Beobachter ganz schnell durch den zur Irisblende gehenden Schnurlauf auf den Schwellenwert, d. h. den eben noch überschwelligen Wert bringen ließen, was nach einiger Übung wohl gelingt. Wir gingen dabei von dem Gedanken aus, daß es zwar sehr schwer ist, einen in der Schwellenregion liegenden fovealen Lichtfleck mit dem Blick aufzufinden¹, ungleich leichter dagegen, einen Fleck, der soeben hell aufleuchtete, auch nach starker Verdunkelung noch auf einige Sekunden fixiert zu halten.

Wiederholten wir diesen Versuch während des Aufenthaltes im dunklen Zimmer einige Male, so stellte sich, wie bei den Versuchen am großen Feld, ein deutliches Sinken der fovealen Rotschwelle heraus, doch in merklich geringerem Umfang als in jenem Falle. Durchschnittlich fanden wir eine Empfindlichkeitssteigerung etwa um das Vierfache.

Um auch mit anderen als roten Lichtern foveale Schwellenbestimmungen machen zu können, mußten wir suchen, die foveale Fixation zu sichern. In Vorversuchen wurde geprüft,

¹ Diese Schwierigkeit ist bekanntlich so groß, daß es gänzlich aussichtslos ist, foveale Schwellenwerte für andere als rote Lichter durch freie Beobachtung eines auf dunklem Grunde sichtbaren leuchtenden Fleckes (dessen Helligkeit verändert werden kann) zu bestimmen. Selbst geübte Beobachter versagen hier.

Bei rein rotem Licht läßt sich mit Sicherheit erkennen, daß die foveale Schwelle für dieses Licht in den früheren Adaptationsstadien niedriger liegt, als die parazentrale und periphere Schwelle. Ein ganz schwaches rotes Licht (Fleck von etwa 1° Durchmesser), das foveal aber noch sichtbar ist (tiefrot), verliert man leicht aus dem Gesicht und findet es dann schwer wieder, bis man beim Umhertasten mit dem Blick zufällig darauf kommt, und es dann plötzlich mit überraschender Deutlichkeit und Schärfe erkennbar ist, bis eine kleine Blickschwenkung es wieder verschwinden läßt u. s. f.

ob die Anbringung zweier kleiner Lichtpunkte rechts und links von dem Reizlicht dessen Fixation erleichtere. Das Ergebnis war indessen negativ, es ist die Fixation der Mitte zwischen zwei im Dunkeln sichtbaren Punkten etwas so Unsicheres, daß wir nicht darauf rechnen konnten, auf diese Weise das Abirren der Fixation bei Verwendung von Reizlichtern von erheblichem Dämmerungswert (Grün, Blau) zu verhindern; wir verließen daher dies Verfahren wieder und brachten statt der zwei seitlichen Fixierzeichen ein einzelnes in der Mitte des Beobachtungsfeldes an.

Solche Fixierzeichen, aus einem feinen, am besten in rotem Lichte leuchtenden Punkte gebildet, sind von verschiedenen Beobachtern, speziell v. KRIES und seinen Schülern, mit bestem Erfolge angewandt worden, um die foveale Fixation zu sichern, ohne daß dabei eine Beeinträchtigung des fovealen Sehens bemerkt worden wäre. Einige Autoren aber, der HERINGSchen Schule angehörig, betrachten Versuche über foveales Sehen unter Verwendung eines hellen Fixierzeichens als nicht einwandfrei. Von einer tatsächlichen Grundlage dieses Bedenkens, beziehungsweise von Versuchen zu seiner Begründung ist uns freilich nichts bekannt geworden. Es darf wohl der Vermutung Raum gegeben werden, daß jene Autoren sich unter einem „hellen“ Fixierzeichen etwas anderes denken, als was wir anzuwenden pflegen. Ein sehr kleiner Lichtpunkt (ein feiner Nadelstich in einem Kartonblatt, aus 2—3 m Entfernung betrachtet), von rotem Licht erleuchtet, kann nahe der Grenze der fovealen Sichtbarkeit liegen, und doch noch die foveale Fixation mit Sicherheit auf sich lenken. Daß ein solcher Fixierpunkt die Nachbilderscheinungen nicht nachweisbar beeinflusst, hat v. KRIES schon gezeigt. Da dessen ungeachtet die Anschuldigungen gegen den „hellen Fixierpunkt“ immer wiederkehren, unternahmen wir besondere Versuche, in denen wir prüften, ob ein Objekt von 1° Durchmesser verschieden stark erleuchtet werden muß, um über die foveale Schwelle zu kommen, wenn es mit und wenn es ohne Fixierpunkt betrachtet wird.

In einem Ausschnitt der Tür zwischen zwei Dunkelzimmern war eine Kartonplatte eingepaßt, die auf der dem Beobachter zugekehrten Seite schwarz war, und in ihrer Mitte ein kreisrundes weißes Scheibchen trug, das, vom Beobachtungsplatz aus gesehen, unter dem Gesichtswinkel von 1° erschien. Es wurde

mit rotem Lichte beleuchtet, das von einer Laterne mit dunkelroter Rubinglasscheibe herrührte, die zwischen Beobachter und Tür so aufgestellt war, daß sie den Blick auf das Objekt nicht hinderte. Die Laterne trug auf der der Tür zugewandten Seite eine Irisblende, innerhalb deren weißes durchscheinendes Papier (Schreibpapier) und die Rubinglasscheibe angebracht war. So entstand eine rot leuchtende Papierscheibe, deren wirksame Flächen-größe durch Einstellung der Irisblende verändert werden konnte. Die Laterne, in der eine Glühlampe angebracht war, war im übrigen lichtdicht. Durch den Mittelpunkt des durch diese Vorrichtung rot zu erleuchtenden Scheibchens in der Türöffnung war ein feines Loch von etwa $\frac{1}{10}$ mm Durchmesser gestochen, das von der Rückseite her mit rotem Papier überklebt war. Wurde nun im anderen Zimmer in entsprechender Entfernung ($1\frac{1}{2}$ m) eine Glühlampe zum Leuchten gebracht, so sah man vom Beobachtungszimmer aus den Mittelpunkt des Scheibchens als ganz feinen roten Punkt aufleuchten.

Mit dieser Versuchsanordnung wurden nun, mit Herrn Dr. PIPER als Versuchsperson, folgende Beobachtungen angestellt.

Nachdem die ersten Minuten der Dunkeladaptation abgewartet waren, machten wir Schwellenbestimmungen an dem kleinen roten Objekt, abwechselnd je 5 mit und 5 ohne zentralem Fixierpunkt. Der Beobachter stellte die Irisblende so ein, daß nach seinem Urteil die rote Scheibe eben noch überschwellig erschien. Das Ergebnis war, daß die Einstellungen mit und ohne Fixierzeichen im Mittel fast denselben Wert zeigten. Die Einstellungen ohne Fixierzeichen ergaben nur in einer einzigen Versuchsreihe einen niedrigeren Wert für die Blendenweiten als die mit Fixierzeichen ausgeführten. Die Differenz war aber sehr gering und lag innerhalb der Schwankungsbreite der einzelnen Einstellungen. Bei den übrigen Reihen war das Ergebnis sogar das umgekehrte, die Schwellen lagen für die Beobachtungen ohne Fixierzeichen bei etwas höheren Helligkeiten. Subjektiv empfindet man das Vorhandensein des Fixierpunktes als eine wesentliche Erleichterung der Beobachtung.

Wir geben im folgenden die Protokolle eines derartigen Versuches.

Einstellungen der Blendenweite (in mm).		
ohne	mit	ohne
Fixierzeichen		
15,5	11,5	15,0
16,5	12,0	16,0
15,0	14,0	14,0
17,0	13,5	15,5
13,0	14,0	16,0

Mittel der Einstellungen mit Fixierzeichen 13,0

„ „ „ ohne „ 15,35.

In einer anderen Versuchsreihe

mit Fixierzeichen 22,9

ohne „ 23,5.

In einer dritten Reihe

mit Fixierzeichen 28,1

ohne „ 26,0.

Die Verschiedenheit der absoluten Werte beruht darauf, daß der Abstand der Laternen vom Objekt in den einzelnen Reihen nicht derselbe war.

Eine Anzahl Versuche wurde auch mit einer in solchen Beobachtungen ungeübten Person vorgenommen, die angab, beim Fehlen des Fixierzeichens den roten Fleck besser sehen zu können, tatsächlich aber in diesem Falle grössere Blendenweiten einstellte. Herr Dr. PIPER bemerkte übrigens, daß bei Gegenwart des roten Fixierpünktchens das umgebende Feld fast farblos aussah. Insoweit ist also ein, wenn man will, „störender“ Einfluß des Fixierzeichens da, nicht aber bezüglich der absoluten Empfindlichkeit.

Bei unseren fovealen Schwellenbestimmungen zur Messung der Zapfenadaptation verwendeten wir ein Fixierzeichen, das durch Spiegelung in die Mitte des Beobachtungsfeldes gebracht wurde. Eine Mignonglühlampe brannte in einer Kartonhülse, in die ein Loch gestochen war, das mit rotem durchscheinendem Papier überklebt war. Dieses rote Lichtpünktchen spiegelte sich entweder in einem vor dem Reizlicht angebrachten Deckgläschen, oder in der Vorderfläche der Glascuvette, die die Farbflüssigkeit enthielt.

Mit dieser Versuchsanordnung nun erhielten wir die weitaus präzisesten und konstantesten Resultate. Aus Gründen, die in der Gesamtanordnung unserer Versuche (speziell der Herstellung der Helladaptation) lagen, mußten wir darauf verzichten, mit dieser Methode den Anstieg der Empfindlichkeit in der ersten Adaptationsminute exakt zu messen. Wir begannen also die Messungen im allgemeinen etwa 1 Min. nach der Helladaptation, die durch Gang im Freien bewirkt wurde.

Von diesem Zeitpunkt an stieg die Empfindlichkeit für rein rotes Licht (gewonnen durch die Strahlfilterkombination: Rubin-glas-Methylgrünlösung) regelmäÙsig auf den vierfachen Betrag.

Orientierungsversuche nach der gleichen Methode, die auf gleiche Genauigkeit keinen Anspruch machen können, lassen uns vermuten, daß der Gesamtanstieg der Empfindlichkeit vom Beginn der Dunkeladaptation um mindestens noch 5mal größer ist, der Endwert also mindestens 20mal höher als der Anfangswert ist. Da aber, wie gesagt, die Messung in der ersten Minute nur sehr ungenau ausgeführt werden kann, möchten wir dieser letzteren Zahl keine größere Bedeutung beilegen.

B. Versuche mit grünen und blauen Lichtern.

Mannigfache Erfahrungen lassen es als äußerst wahrscheinlich, um nicht zu sagen sicher, erscheinen, daß die relativen Helligkeitswerte der homogenen Lichter für den Zapfenapparat unabhängig vom Adaptationszustande sind, daß also Helligkeitsgleichungen physikalisch verschiedener Lichter auf fovealem Felde durch Veränderung der absoluten Helligkeit ebensowenig wie durch Alteration des Adaptationszustandes in ihrer Gültigkeit beeinträchtigt werden. Die in dem bekannten „PURKINJESchen Phänomen“ zum Ausdruck kommende Helligkeitsverschiebung im Spektrum bei proportionaler Helligkeitsverminderung und Dunkeladaptation fehlt im stäbchenfreien Bezirk der Netzhaut völlig.

Diese aus Beobachtungen an Lichtergleichungen hergeleitete Erfahrung steht mit unseren Schwellenmessungen im Einklang. Freilich können die letzteren, wie es in der Natur der Sache liegt, niemals so präzise Resultate geben, wie die Gleichungen, und es darf als eine hinreichende Genauigkeit betrachtet werden, wenn sich ergibt, daß die fovealen Schwellenwerte für die ver-

schiedenen Farben bei der Dunkeladaptation sich um annähernd gleiche Beträge verschieben, jedenfalls keine konstanten Unterschiede in dieser Richtung zu bemerken sind. So war denn auch unser Ergebnis; anfangs freilich, als wir versuchten, mit freier Fixation ohne Fixierzeichen zu arbeiten, ergaben sich manchmal nicht unbeträchtliche Differenzen zwischen Rot, Grün, und Blau. Die Resultate liefen sich aber in den verschiedenen Versuchsreihen zuweilen direkt zuwider und es wurde bei häufigerer Wiederholung klar, daß es sich um Fehler, bedingt durch das Abirren der Fixation bei grünem und blauem Reizlicht, handelte. Als wir dann im weiteren Verlaufe der Untersuchungen auf die Beobachtungen mit feinem rotem Fixierpünktchen als die zuverlässigsten kamen, ergab sich erstens ein weit konstanterer Verlauf der Adaptation in den verschiedenen Beobachtungen und es fehlten jegliche spezifische Unterschiede im Anstieg der Empfindlichkeit für die einzelnen Farben.

Als Lichtfilter dienten uns teils die von dem einen von uns (N.) früher beschriebenen Flüssigkeiten, teils mit Anilinfarben gefärbte zwischen Glasplatten gebettete Gelatineschichten, die wir der Freundlichkeit des Herrn Geheimrat FRITSCH verdanken. Sie waren zum Zweck der Dreifarbenphotographie hergestellt und schnitten aus dem Spektrum sehr präzise das ganze Grün, bzw. das Blau und Violett heraus. Die Helligkeit wählten wir für jeden Versuch (durch Regulierung des Abstandes zwischen Lampe und Irisblende) so, daß die Anfangsschwelle für foveales Sehen nach guter Helladaptation bei der Blendenweite 20 mm lag. Mit großer Regelmäßigkeit sank dann die zur Sichtbarmachung des Fleckes nötige Blendenweite anfangs schnell, dann langsamer in 6—8 Min. auf 10—11 mm, mit anderen Worten die Empfindlichkeit hatte sich vom Ende der ersten Minute bis zur 6.—8. Minute etwa vervierfacht sowohl für grün, wie für blau und rot.

Auf großem Felde lassen sich die Versuche mit Blau und Grün begreiflicherweise nur unvollkommen durchführen, weil sich hier, viel mehr als beim Rot, bald das Weiß des Dämmungssehens beimischt. Nach recht starker Helladaptation sieht man aber immerhin ein deutliches Ansteigen der Empfindlichkeit während der ersten Minuten auch für diese Farben.

Bemerkt sei hier, daß wir, dem Zweck unserer Versuche ent-

sprechend, stets auf die absolute Schwelle der farbigen Lichter eingestellt haben, diese aber während der ersten Minuten der Dunkeladaptation mit der spezifischen Farbenschwelle zusammenfallend fanden; mit anderen Worten wir konnten uns innerhalb dieses Zeitraumes von einem „farblosen Intervall“ nicht mit Sicherheit überzeugen. Ganz anders liegt ja die Sache, wenn man von der mittleren Helladaptation ausgeht, die früheren Bearbeitern dieser Fragen wohl allgemein als Ausgangspunkt gedient hat. Dann ist das farblose Intervall für Blau und Grün deutlich ausgesprochen, da hier die Mitbeteiligung des Dämmerungsapparates (Stäbchen) alsbald nach dem Eintritt in volles Dunkel einsetzt.

Untersuchungen, die den unseren nach Ziel und Resultat ähnlich sind, liegen schon mehrfach vor (CHARPENTIER, PARINAUD, TREITEL, FICK u. a.); im allgemeinen ist jedoch die deutliche Trennung des rein fovealen Sehens vom parazentralen und peripheren Sehen nicht durchgeführt, ebensowenig die prinzipielle Scheidung der Funktion des Stäbchen- und Zapfenapparates der Netzhaut. Unter diesen Umständen verzichten wir auf eine Aufzählung und kritische Würdigung einschlägiger älterer Arbeiten. Hervorheben möchten wir nur, daß AUBERTS Bestimmungen über adaptive Empfindlichkeitssteigerung der Netzhaut sich offenbar eher als Messung der Adaptation der fovealen Zapfen, denn als Messung der Stäbchenadaptation auffassen lassen. AUBERT fand, wie bekannt, eine Empfindlichkeitssteigerung der Netzhaut um das 35fache, während wir mit PIPER eine reichlich 100 mal größere Zunahme als Norm für den größten Teil der Netzhaut annehmen. AUBERTS Versuchsmethode, Beobachtung eines kurzen rotglühenden Platindrahtes mit zentralen Netzhautpartien, verwirklicht denn auch in der Tat eher die Bedingungen für foveales „Zapfensehen“, als für das reine „Stäbchensehen“ der Peripherie. So erklärt sich die geringe Zunahme der Lichtempfindlichkeit der Netzhaut, die keineswegs mit den Befunden PIPERS, ganz wohl aber mit den unsrigen, das foveale Sehen behandelnden, in Einklang zu bringen ist.

(Eingegangen am 15. November 1903.)
