

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

## Über den Einfluß der Dunkeladaptation auf die spezifische Farbenschwelle.

Von

Dr. med. LOESER, Berlin.

Im Zusammenhange mit verschiedenen anderen, zum Teil schon veröffentlichten Untersuchungen über die Funktionsweise des dunkeladaptierten Auges, die im Laufe der letzten zwei Jahre in der physikalischen Abteilung des Berliner physiologischen Instituts ausgeführt wurden, erschien es wünschenswert, auch die Abhängigkeit der sog. Farbenschwelle vom Adaptationszustand systematisch zu untersuchen. Es ist eine bekannte Tatsache, daß für das in gewissem Maße dunkeladaptierte Sehorgan homogene Lichter im allgemeinen „farblos über die Schwelle treten“, wie man zu sagen pflegt, m. a. W., daß es gewisse niedrige Helligkeitsstufen gibt, bei denen ein homogenes Licht wohl einen Reiz für die Netzhaut bildet, ohne daß jedoch eine spezifische Farbenempfindung zustande käme. Erst wenn die Intensität des Reizlichtes gesteigert wird, tritt zu der unbestimmten farblosen Lichtempfindung die eigentliche Farbenempfindung hinzu, zunächst nur andeutungsweise und unsicher erkennbar, bei größerer Helligkeit immer deutlicher.

Durch die Untersuchungen von PIPER<sup>1</sup>, der die im Dunkel-aufenthalt eintretende Steigerung der absoluten Empfindlichkeit für farbloses Licht messend feststellte, sowie durch die analogen

<sup>1</sup> Über Dunkeladaptation. *Diese Zeitschrift* 31, 1903.

Versuche von NAGEL und SCHAEFER<sup>1</sup> über die Empfindlichkeitssteigerung des Netzhautzentrums für farbige Lichter waren Erfahrungen gewonnen worden, auf Grund deren es aussichtsreich erschien, die Verschiebungen genauer festzustellen, welche die Schwelle des Farbsehens im Verlaufe der Dunkeladaption erleidet.

NAGEL und SCHAEFER hatten gezeigt, daß, wie nach manchen älteren Erfahrungen zu erwarten war, der farbenempfindliche Apparat in der Netzhaut und speziell auch die Fovea centralis bei Lichtabschluß eine wesentliche Empfindlichkeitszunahme erkennen läßt. Dieser Prozeß spielt sich in den ersten 2 bis 6 Minuten des Dunkelaufenthalts ab und es scheint, daß damit die adaptive Empfindlichkeitssteigerung der Netzhaut im Netzhautzentrum ihr Ende erreicht hat.

Andererseits setzt nach dem Ablauf von etwa 8—10 Minuten Dunkelaufenthalt (vorherige gute Helladaptation vorausgesetzt) die ungleich beträchtlichere Empfindlichkeitssteigerung der Netzhautperipherie ein, die PIPER studierte, indem er dem Auge relativ große leuchtende Flächen darbot, die jetzt unter den Bedingungen des „Dämmerungssehens“ gesehen wurden und somit stets farblos erschienen.

Die Aufgabe nun, die ich mir stellte, war die, unter ähnlichen Bedingungen wie bei den PIPERSchen Versuchen, d. h. bei Betrachtung eines verhältnismäßig großen leuchtenden Objekts mit wanderndem Blick zu beobachten, dabei aber nicht wie PIPER die Helligkeit des beobachteten Objekts auf die generelle Schwelle<sup>2</sup> einzustellen, sondern auf die spezifische Farbenschwelle. Diese Aufgabe deckt sich, wie man sieht, für die ersten Minuten des Dunkelaufenthalts (nach vorausgehender guter Helladaptation) völlig mit derjenigen, die sich NAGEL und SCHAEFER gestellt

<sup>1</sup> Über das Verhalten der Netzhautzapfen bei Dunkeladaptation des Auges. *Diese Zeitschrift* 34, 1904.

<sup>2</sup> Bei der Verwendung der Ausdrücke „generelle Schwelle“ und „Duplizitätstheorie“ stelle ich mich auf den Boden der Darstellung des von v. KRUIS bearbeiteten Abschnitts „Gesichtsempfindungen“ in NAGELS Handbuch der Physiologie des Menschen, Bd. III, S. 19 bzw. 185. Der Ausdruck „generelle Schwelle“ im Gegensatz zur „spezifischen Schwelle“ entspricht der bisher gebrauchten Bezeichnung „absolute Schwelle“. Letzterer Ausdruck wird aber auch im Gegensatz zur „Unterschiedsschwelle“ gebraucht, darum empfiehlt sich der neue Name.



hatten; es war für diesen Zeitraum auch kein anderes Resultat zu erwarten, als das von den genannten Autoren gefundene, daß nämlich während der ersten Minuten des Dunkelaufenthalts generelle und spezifische Schwelle zusammenfällt und daß diese Schwelle von der Anfangshöhe aus zunächst (1—2 Minuten lang) schnell um einen ansehnlichen Betrag fällt, in den folgenden Minuten dann schon viel langsamer und weniger. NAGELS und SCHAEFERS Versuche brachen zu dem Zeitpunkt ab, wo sich das Dämmerungssehen einmischte, oder wo, vom Standpunkte der Duplizitätstheorie<sup>1</sup> gesprochen, außer den Zapfen auch die Stäbchen sich an der Lichtperzeption wirksam zu beteiligen beginnen und infolgedessen alle Farben weißlich zu werden beginnen.

Es war nun von besonderem Interesse, festzustellen, wie sich die spezifische Farbenschwelle in diesem Stadium des Dämmerungssehens verhält, und ob sie sich speziell mit fortschreitender Dunkeladaptation noch verschiebt. Über diese Frage geben weder die verschiedenen älteren Beobachtungen<sup>2</sup> über die Farbenempfindlichkeit des Auges, noch auch die unlängst erschienene Dissertation von A. MAYER<sup>3</sup> befriedigenden Aufschluß. Die letztere Arbeit enthält dagegen eine Verbesserung in der Versuchsmethodik, die ich mir bei den im folgenden beschriebenen Versuchen zunutze machen zu sollen glaubte.

### **Eigene Versuche.**

Unsere Versuchsanordnung mußte vor allem zwei Punkte berücksichtigen; erstens die Möglichkeit, ein bestimmtes farbiges Licht mit einem farblosen vergleichen; zweitens das farbiges Licht mit dem zu vergleichenden farblosen in einer dem Beobachter unbekanntem Art vertauschen zu können.

Die Vergleichsmöglichkeit war deshalb von Wichtigkeit, weil es nach vielfachen Erfahrungen für die Bestimmung schwächster Farben eine bedeutende Erleichterung gewährt, wenn man eine möglichst neutrale Fläche, am liebsten, von derselben Helligkeit

<sup>1</sup> Siehe Anmerkung 2 auf S. 2.

<sup>2</sup> Vgl. betreffs der früheren Untersuchungen die Zusammenfassung bei A. TSCHERMAK, in den „Ergebnissen der Physiologie“ I, 2. 695 ff. 1902.

<sup>3</sup> Über die Abhängigkeit der Farbenswellen von der Adaptation. Inaug.-Diss. Freiburg 1903.

zur Vergleichung zur Hand hat.<sup>1</sup> Auch meine eigenen Versuche, in denen ich in einer Reihe von Schwellenbestimmungen einen Teil ohne Vergleichslicht ausführte, haben unzweideutig gezeigt, daß in diesem Falle die Schwellenwerte merklich höher gefunden werden. Zur Illustration des Gesagten sei das Protokoll eines solchen Versuches angeführt:

Zeit	Blendenweite bis zur Erkennung von „Rot“	Bemerkungen
1 <sup>42</sup>	20 mm	Schwellenbestimmungen ohne Vergleichung mit einer farblosen Fläche
1 <sup>45 1/2</sup>	11 "	
1 <sup>51</sup>	9 "	
1 <sup>56 1/2</sup>	8,5 "	
2 <sup>06 1/2</sup>	10,5 "	
2 <sup>14 1/2</sup>	9,0 "	
2 <sup>23</sup>	9,5 "	
2 <sup>31</sup>	10,5 "	
2 <sup>35</sup>	8,5 "	mit Vergleichung
2 <sup>41</sup>	10,75 "	ohne "

Hieraus geht hervor, daß die nach 53 Minuten dauernder Dunkeladaptation mittels Vergleichung mit einer farblosen Fläche bestimmte Schwelle erheblich niedriger ist, als die kurz vorher und nachher gefundene, wobei nur die farbige Fläche beleuchtet wurde.

Von noch größerer Wichtigkeit schien die zweite Forderung, die wir bei unseren Versuchen erfüllen zu müssen glaubten, daß nämlich für das Erkennen der Farben ein „unwissentliches Verfahren“ geübt werde, dessen Bedeutung bereits von MAYER<sup>2</sup> gewürdigt worden ist. Ich stimme ihm vollkommen bei, wenn er in der Erwartung, „daß eine bestimmte Farbe bei zunehmender Beleuchtung an einer bestimmten, bis dahin farblosen Stelle auftauchen wird“, eine Gefahr sieht, die objektive Beobachtung durch subjektive Einmischungen zu verfälschen. Es wurde deshalb eine diesen beiden Forderungen in gleicher Weise entsprechende unten näher beschriebene Einrichtung

<sup>1</sup> BULL, Studien über Lichtsinn und Farbensinn. v. Gr. *Arch. f. Ophth.* 27, I 54.

<sup>2</sup> Über die Abhängigkeit der Farbenswellen von der Adaptation. Inaug.-Diss. Freiburg. 1903.



getroffen, die vor jeder einzelnen Schwellenbestimmung eine für den Beobachter unbekannte Einstellung des Farbfeldes ermöglichte. Er konnte nicht wissen, ob diese auf der rechten oder linken der zu beobachtenden Milchglasscheiben auftauchen würde, und mußte jedesmal nicht nur die Farbe, sondern auch den Ort ihres Auftretens bestimmen.

Nach zahlreichen Vorversuchen hat sich eine Versuchsanordnung als brauchbar erwiesen, ähnlich derjenigen, wie sie PIPER<sup>1</sup> bei seinen Untersuchungen über das Helligkeitsverhältnis monokular und binokular ausgelöster Lichtempfindungen benutzt hat; an seine Beschreibung lehne ich mich im folgenden an mit wenigen Änderungen (s. Fig. 1).

Ein nach einer Seite offener schwarzer Kasten ist durch eine Querwand (*Qu*) in einen vorderen (geschlossenen) und einen hinteren (offenen) Raum aufgeteilt; der vordere ist durch eine Längsscheidewand (*W*) wiederum in eine rechte und linke Abteilung zerlegt. In die vordere Wand des Kastens sind, je einer vorderen Abteilung zugehörig, zwei genau gleiche Irisblenden (*J*) eingesetzt, deren Durchmesserweite an einer Skala in Millimetern abgelesen werden kann. Unmittelbar vor den Blenden und denselben anliegend sind rundgeschliffene Milchglasscheiben (*S*) in die Blendenfassung eingelassen und befestigt. Beide Scheibchen sind aus derselben Glasplatte geschnitten und erwiesen sich in besonderen Versuchen als genau gleich lichtdurchlässig. Da sich nach einigen orientierenden Versuchen herausstellte, daß der reiche Gehalt der Lichtquelle an gelbrötlichen Strahlen die Untersuchung erschwerte, wurde hinter den Irisblenden noch je ein bläulich gefärbtes Glas eingefügt (*G*).

Aus der rechten, wie aus der linken Hälfte der Querscheidewand (*Q*) sind Fenster (*F*) von der Form eines Quadrates von 8 cm Seite ausgeschnitten; die mittleren Ränder der beiden

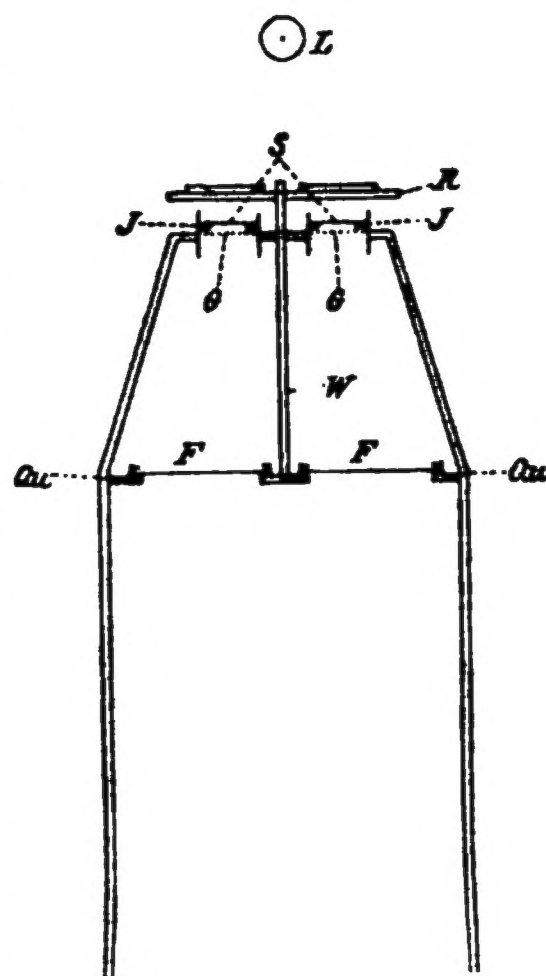


Fig. 1.

<sup>1</sup> Diese Zeitschrift 32, 167.

Fenster sind durch einen  $1\frac{1}{2}$  cm breiten senkrechten Streifen der Querwand voneinander getrennt. Beide Fenster sind durch je eine Milchglasscheibe verschlossen, welche der vorderen Fläche der Querscheidewand anliegt; die beiden Scheiben sind wiederum aus demselben Stück geschnitten und von gleicher Transparenz.

Unmittelbar vor den Irisblenden war in der sie trennenden Scheidewand ein um seinen Schwerpunkt drehbarer Holzrahmen (*R*) angebracht, der in zwei kreisrunden, den Irisblenden korrespondierenden Ausschnitten das jeweils zu untersuchende farbige Glas und ein farbloses von nahezu gleicher Helligkeit trug. Man war so ohne Gehilfen leicht in der Lage, im vollkommen verdunkelten Raume durch mehrmaliges Umdrehen des Rahmens die Einstellung der Farbe so zu machen, daß ihr Ort dem Beobachter unbekannt blieb. In einem Abstände von 30 cm von dem Rahmen waren als Lichtquelle (*L*) zwei an einem eisernen Stativ befestigte 50kerzige Glühlampen aufgestellt.

Die Versuchsperson, deren Kopf an der offenen Seite des Kastens auf seine untere Wand aufgestützt und mit einem schwarzen Tuche lichtdicht gegen die Umgebung abgeschlossen war, beobachtete die Helligkeit und Färbung der beiden quadratischen Milchglasfelder (*F*), welche, wie oben gesagt, an der Querscheidewand des Kastens angebracht sind. Als Beleuchtungsquelle für jedes dieser Felder ist nun natürlich das dem gleichen Kastenabteil angehörige runde Milchglasscheibchen (*S*) zu betrachten, welches unmittelbar vor der Irisblende in deren Fassung eingesetzt ist. Die Intensität der Beleuchtung verändert sich proportional dem Flächeninhalt des nach dem Kastennern hin leuchtenden Areals des Scheibchens, d. h. proportional dem Quadrat des Blendendurchmessers.

Der Abstand des beobachtenden Auges von den beleuchteten Milchglasfenstern (*F*) betrug 35 cm; die lineare Winkelgröße jedes einzelnen betrug somit in der Diagonalen  $18^\circ$ , in der Seite  $13^\circ$  und das Netzhautbild war groß genug, daß nicht etwa nur die Macula, sondern auch parazentrale und periphere Partien der Retina davon bedeckt wurden. Zudem wurden während der Beobachtung leichte Blickbewegungen ausgeführt. Die lokale Verschiedenheit der Empfindlichkeit und des Farbentons kam also als Fehlerquelle nicht in Betracht. Beobachtet wurde bei den definitiven Versuchen monokular, mit dem anderen Auge



bei einer roten Glühlampe abgelesen, während das beobachtende durch eine lichtdicht abschließende schwarze Klappe verdeckt blieb.

Eine einzelne Schwellenbestimmung gestaltete sich dann in der Weise, daß zunächst bei beiderseits geschlossener Blende und nach Verdeckung des Kopfes mit dem schwarzen Tuche die Lichtquelle eingeschaltet wurde, was etwa 2—3 Sekunden in Anspruch nahm. Dann wurden die Blenden, die vom Platze des Beobachters selbst bequem erreichbar waren, so weit geöffnet, bis die eine Seite mit Sicherheit als die farbige erkannt werden konnte, ohne daß es möglich war, durch weitere Öffnung der anderen Blende, d. i. also durch Vermehrung der Helligkeit, den Farbenunterschied wieder auszugleichen. Es hat sich nämlich gezeigt, daß auch schon bei den schwächsten Lichtintensitäten geringe Differenzen in der farbigen Nuance der beiden beobachteten Milchglässcheiben auftraten, die aber nur durch ungleiche Helligkeit bedingt waren und durch Veränderung der Blendenweite wieder ausgeglichen bzw. zum Umschlag gebracht werden konnten. Ich will ein Beispiel anführen. Bei der Untersuchung z. B. von Blau erschien die farblose Seite entschieden leicht bläulich gefärbt, solange sie an Helligkeit die objektiv blaue übertraf; erst bei größerer Blendenweite der farbigen Seite trat der Farbunterschied wieder zurück; bzw. erschien diese jetzt als die farbige. So würde oft ein mehrmaliges Hinüber und Hinüberspringen des farbigen Eindrucks beobachtet, ehe ein konstantes Haftenbleiben der Farbe auf einer Seite eintrat. Natürlich könnte erst dieser Moment als die Farbenschwelle bezeichnet werden.

Aus dem Gesagten ergibt sich ohne weiteres, daß die Bestimmung der Farbenschwellen in der oben angegebenen Weise eine gewisse Einübung zur Vorbildung macht. Für mich wenigstens muß ich sagen; daß die in den ersten Wochen — schon nach der Feststellung der definitiven Versuchsanordnung — gewonnenen Resultate sehr schwankend und fehlerhaft waren, indem ich gar nicht so selten die farblose Seite als die farbige bezeichnet; also nicht etwa die Farbenschwelle, sondern nur einen Helligkeitsunterschied fixiert hatte. Mit zunehmender Übung und Erfahrung habe ich diesen Fehler später vollkommen vermieden und die entscheidenden Versuche wurden erst gemacht, nachdem mehrere Hundert fehlerloser Schwellenbestimmungen

vorausgegangen waren. Auch eine gewisse Zunahme der Empfindlichkeit scheint mit wachsender Übung einzutreten, wie auch z. B. DOBROWOLSKY beweisend dargetan hat, der solches nur für sein rechtes, fast ausschließlich zu seinen Untersuchungen über Licht- und Farbenempfindungen benutztes Auge nachweisen konnte, während diese Empfindlichkeitssteigerung im linken nur sehr selten benutzten Auge ausblieb.

Wegen dieser zur Erzielung brauchbarer Resultate notwendigen Übung mußte ich von vornherein darauf verzichten, auch andere Personen zu untersuchen. Nur einmal hatte Herr Dr. PIPER, der Assistent des Instituts, der in ähnlichen Untersuchungen geübt ist, die Liebenswürdigkeit, einige Schwellenbestimmungen vorzunehmen, die — gleichsam wie eine Stichprobe — eine vollkommene Bestätigung meiner eigenen Resultate ergaben. Das entsprechende Protokoll werde ich an geeigneter Stelle mit angeben. Es liegt in der Natur der Sache, daß das Bestreben, den farbigen Unterschied zunächst immer wieder durch Helligkeitsänderung auszugleichen, zu einer gewissen Erhöhung der eigentlichen Schwellenwerte geführt hat. Aber bei der außerordentlichen Unzuverlässigkeit und Unbeständigkeit, die alle unsere Licht- und noch mehr unsere Farbenempfindungen bei sehr herabgesetzter Helligkeit auszeichnen, schien mir das eher als ein Vorteil, denn als Nachteil. Denn da dieser Faktor wohl als einigermaßen konstant betrachtet werden darf, wurde die Brauchbarkeit der Resultate in keiner Weise beeinträchtigt, wohl aber die Sicherheit des Urteils bei den einzelnen Schwellenbestimmungen wesentlich erhöht.

Die Helladaptation wurde in der Weise herbeigeführt, daß ein von einer Bogenlampe aus einer Entfernung von ca.  $\frac{3}{4}$  m bestrahlter weißer Karton 3 Minuten lang betrachtet wurde. Nur in sehr seltenen Fällen traten störende Nachbilder oder Lichtnebel auf. Dagegen stellte sich heraus, daß es aus technischen, in unserer Versuchsanordnung gelegenen Gründen meist nicht möglich war, die Farbenschwelle für das in der eben angegebenen Weise helladaptierte Auge unmittelbar zu finden. Auch bei maximaler Blende und dem geringsten möglichen Abstände der Lichtquelle (10 cm) wurde zunächst gar nichts gesehen, sondern es verstrichen 10, 20, 30, 40 bis 60", ehe die Farbe in die Erscheinung trat. Auch nach Verdoppelung der als Lichtquelle dienenden Glühlampen, wodurch ich eine für



den Helladaptationszustand des Auges genügende Lichtintensität zu schaffen hoffte, gelang es nicht, sofort nach Beendigung der Helladaptation die Farbenschwelle zu bestimmen. Es konnte aber darauf um so leichter verzichtet werden, als der Einfluss der Dunkeladaptation auf die Farbenschwelle gerade für die ersten Minuten bereits durch NAGELS und SCHAEFERS Untersuchungen der allerletzten Zeit sichergestellt war, und es für uns mehr darauf ankam, den Adaptationsverlauf über einen längeren Zeitraum zu verfolgen. Allerdings mußten wir wegen des Fehlens des Anfangswertes der Reizschwelle auf eine genaue quantitative Vergleichung verzichten. Die von uns festgestellte Tatsache, daß das — nicht einmal sehr hochgradig — helladaptierte Auge noch gar keine Farbe wahrnehmen konnte, bei einer Lichtintensität, deren halbe Menge schon nach Bruchteilen einer Minute die Farbe erkennen ließ, zeigt jedenfalls deutlich, daß schon in den allerersten Sekunden der Dunkeladaptation eine starke Zunahme der Farbenempfindlichkeit eintritt. Das steht mit den von NAGEL und SCHAEFER gefundenen Resultaten in voller Übereinstimmung.

Was die Qualität des farbigen Eindrucks betrifft, so möchte ich für alle drei von mir untersuchten Farben — Rot, Grün, Blau — zunächst zusammenfassend bemerken, daß bei den ersten Schwellenbestimmungen, die nach meinen früheren Ausführungen etwa der ersten Minute der beginnenden Dunkeladaptation entsprachen, stets die Farbe sofort und zwar gesättigt über die Schwelle trat. Ein „farblores Intervall“ konnte ich in diesem unmittelbar der Helladaptation folgenden Zustand des Auges in keinem Falle und für keine Farbe konstatieren. Das farblose Intervall trat vielmehr erst nach mehreren Minuten dauernder Dunkeladaptation auf, zuletzt bei Rot, das bis zu 5—6 Minuten direkt farbig über die Schwelle trat. Im allgemeinen kann weiter für alle Farben gesagt werden, daß mit fortschreitender Dunkeladaptation der farbige Eindruck immer weißlicher wird. Bei Blau und Grün gewinnt diese Weißlichkeit schließlich so sehr das Übergewicht, daß man überhaupt kaum noch von einer farbigen Empfindung, sondern vielmehr — so paradox es klingen mag — nur von einer anders gefärbten Farblosigkeit reden kann.

Als Lichtquelle dienten zwei 50kerzige Glühlampen, die dauernd in einer Entfernung von 30 cm aufgestellt blieben. Das

zur Untersuchung benutzte rote Glas, das am Spektralapparat geprüft wurde, liefs nur Rot, vielleicht eine kleine Spur Orange durch. Unsere Versuchsanordnung mußte hier etwas modifiziert werden, da sich herausstellte, das mit dem fortschreitenden Dämmerungssehen, d. i. also nach ca. 5–6 Minuten von der ersten Schwellenbestimmung an aus dem erheblichen Helligkeitsunterschied zwischen der farblosen und roten Fläche sofort die farbige Seite bestimmt werden konnte, schon ehe ein farbiger Eindruck auftrat. Hatte das bei den Anfangsschwellen keinerlei Nachteil, solange Rot farbig über die Schwelle trat und so das Urteil unbeeinflussbar blieb, so hielt ich es nach meinen früheren Ausführungen für die weiteren Schwellenbestimmungen für nötig, diesen Faktor zu eliminieren. Es wurde in einfacher und vollkommener Weise dadurch erreicht, das hinter das farblose Glas noch ein Stück weisses Kartonpapier eingefügt und so auch eine für das Dämmerungssehen nahezu gleichmässige Helligkeit der zu vergleichenden leuchtenden Flächen erreicht wurde.

## Versuche mit Rot

### I. Versuch am 12. III. 1904.

Zeit	Blendenweite	Bemerkungen
9 <sup>55</sup>	20	ca. 20 Sek. lang wird gar nichts gesehen dann Rot tief gesättigt über die Schwelle
10 <sup>02 1/2</sup>	8	Rot farbig über die Schwelle
10 <sup>06 1/2</sup>	4,5	zuerst farblos; Rot viel weniger gesättigt
10 <sup>17 1/2</sup>	5,5	" " } Rot noch weniger gesättigt, mit erheblicher weisslicher Beimengung, aber stets deutlich im rötlichen Farbenton erkennbar.
10 <sup>24</sup>	6,0	" " }
10 <sup>36 1/2</sup>	7,0	" " }
10 <sup>47 1/2</sup>	6,75	" " }
10 <sup>55</sup>	6,5	" "

### II. Versuch am 12. III. 1904.

1 <sup>57</sup>	20	ca. 10 Sek. lang wird gar nichts gesehen kurzdauerndes farbloses Intervall?
2 <sup>03</sup>	7,5	
2 <sup>07</sup>	6,0	
2 <sup>12</sup>	6,5	
2 <sup>16 1/2</sup>	6,5	
2 <sup>20</sup>	6,75	
2 <sup>25</sup>	6,5	
2 <sup>42</sup>	6,5	



III. Versuch am 14. III. 1904.

Zeit	Blendenweite	Bemerkungen
10 <sup>00</sup>	20	ca. 30 Sek. lang wird gar nichts gesehen Rot direkt farbig farbloses Intervall.
10 <sup>10 1/2</sup>	9	
10 <sup>15</sup>	6,5	
10 <sup>18</sup>	5,5	
10 <sup>22 1/2</sup>	6,5	
10 <sup>28</sup>	6,0	
10 <sup>36 1/2</sup>	7,0	
10 <sup>44</sup>	8,5	
10 <sup>50</sup>	6,5	

Einige einzelne Schwellenbestimmungen.

Daten	Blendenweite	Bemerkungen
14. III. 2 <sup>40</sup>	6,25	nach 44 Min. dauernder Dunkeladaptation
15. III. 10 <sup>55</sup>	6,0	" 50 " " "

Was aus diesen Versuchen zunächst mit absoluter Sicherheit hervorgeht, ist ein starkes Sinken des Schwellenwertes, der nach ca. 10—11 Minuten der Dunkeladaptation sein Minimum erreicht, um dann allmählich wieder etwas anzusteigen und nach ca. 20 Min. annähernd konstant zu bleiben. Freilich ist dieses Ansteigen nicht sehr erheblich, zahlenmäßig nachweisbar eigentlich nur im Versuch I, während im Versuch II und III auch dem Abfall des Schwellenwertes eine ziemlich gleichmäßige Konstanz besteht. Es ist allerdings zu bedenken, daß das auch im 1. Versuche nur wenige Minuten dauernde Stadium der größten Farbenempfindlichkeit in diesen Fällen zwischen zwei Schwellenbestimmungen gefallen und so dem experimentellen Nachweis entgangen sein mag.

Über das quantitative Verhältnis der einzelnen Schwellenwerte kann leider bei dem Fehlen einer Anfangsbestimmung nichts Sicheres ausgesagt werden. Wir können an der Hand unserer Versuche nur feststellen, daß die Farbenempfindlichkeit im Vergleich zu der ersten, schon einem Stadium erheblich gesteigerter adaptiven Farbenempfindlichkeit entsprechenden Schwelle nach ca. 10—11 Min. noch um das 20fache weiter an-

steigt, dann wieder etwas abnimmt und schliesslich den 10fachen Wert beibehält. Der Gesamtanstieg der Empfindlichkeit vom Stadium der Helladaptation an ist danach erheblich viel grösser und muss unter Zugrundelegung der von NAGEL und SCHAEFER gefundenen Werte, die eine Steigerung auf den 32fachen Wert noch kaum als den Maximalbetrag dessen bezeichnen, was in der ersten Minute erreicht werden kann, auf mindestens das 5—600fache berechnet werden.

Bezüglich des bei weit fortgeschrittener Dunkeladaptation gefundenen Endwertes ergeben unsere Versuche eine fast überraschende Übereinstimmung, wie besonders auch die im Anschluss an andere Versuche nach 40—50 Min. dauernder Dunkeladaptation vorgenommenen Einzelbestimmungen zeigen. Es scheint also, dass der Wert der Farbenschwelle bei starker Dunkeladaptation einen einigermaßen konstanten absoluten Wert für eine bestimmte Person hat, wie das für die Lichtempfindlichkeit des dunkeladaptierten Auges im allgemeinen bereits von PIPER<sup>1</sup> festgestellt wurde.

### Versuche mit Grün.

Lichtquelle und ihre Distanz von dem farbigen Glase wie bei Rot. Dieses liess, wie die Prüfung am Spektralapparat ergab, ausser Grün noch einen äusserst schmalen Streifen Blaugrün durch.

### Versuche mit Grün.

#### I. Versuch am 14. III. 1904.

Grün tritt farbig über die Schwelle, nicht so tief gesättigt, wie Rot.

Zeit	Blendenweite	Bemerkungen
11 <sup>07</sup>	20	ca. 10 Sek. wird gar nichts gesehen
11 <sup>12 1/2</sup>	6,75	} farbloses Intervall; die weissliche Beimischung nimmt bedeutend zu man kann kaum noch von einer wirklichen „farbigen Empfindung“ sprechen.
11 <sup>19 1/2</sup>	4,5	
11 <sup>27 1/2</sup>	8,0	
11 <sup>35</sup>	7,0	
11 <sup>43 1/2</sup>	7,5	
11 <sup>47</sup>	8,0	
11 <sup>50</sup>	7,25	

<sup>1</sup> l. c. S. 184.



II. Versuch am 14. III. 1904.

Zeit	Blendenweite	Bemerkungen
1 <sup>55</sup>	20,0	ca. 40 Sek. lang wird gar nichts gesehen.
2 <sup>01</sup>	7,0	
2 <sup>04</sup>	7,0	
2 <sup>09</sup>	4,75	
2 <sup>15</sup>	5,5	
2 <sup>22</sup>	7,75	
2 <sup>30</sup>	7,0	
2 <sup>36</sup>	7,5	

III. Versuch am 15. III. 1904.

10 <sup>05 1/2</sup>	20	ca. 30 Sek. lang wird gar nichts gesehen.
10 <sup>10</sup>	6,0	
10 <sup>14</sup>	5,0	
10 <sup>21</sup>	7,0	
10 <sup>29</sup>	7,25	
10 <sup>39</sup>	8,0	
10 <sup>50</sup>	7,5	

Einige einzelne Schwellenbestimmungen.

2 <sup>42</sup>	8,0	am 11. III. nach 1 Std. Dunkeladaptation
	7,75	? " 48 Min. "
	7,25	? " 49 " "

Auch hier ist ein schnelles Sinken der Farbenschwelle zweifellos und zwar wird die größte Empfindlichkeit nach 9—13 Min. erreicht. Ebenso deutlich tritt uns mit dem Fortschreiten der Dunkeladaptation der Wiederanstieg der Farbenschwelle entgegen.

Für die Beurteilung der quantitativen Verhältnisse gilt dasselbe, was schon bei Rot auseinandergesetzt wurde. Da im Vergleich zu unserem Anfangswert die Empfindlichkeit noch um das 16—20fache ansteigt, muß die Gesamtzunahme der Farbenschwelle als sehr viel größer angenommen werden.

Bezüglich des Endwertes nach langer Dunkeladaptation zeigen unsere Zahlen auch hier eine gute Übereinstimmung (Blendenweiten von 7,25—8,0), danach ergibt sich, daß die spezifische Farbenschwelle noch um durchschnittlich das 7fache geringer ist als im ersten der Helladaptation benachbarten Studium.

Versuche mit Blau.

Das zur Untersuchung benutzte farbige Glas liefs außer Blau und etwas Violett noch einen ganz schmalen Streifen des äußersten

Rot durch. Da das blaue Glas etwas dunkel war, wurde die Lichtquelle möglichst — d. i. bis zu 10 cm — genähert, und probeweise die Zahl der Glühlampen verdoppelt. Aber auch diese Lichtintensität genügte im Helladaptationszustande nicht zu einer unmittelbaren Schwellenbestimmung, während sie nach Beginn des Dämmerungssehens zu groß war, um durch die Blenden genügend herabgesetzt werden zu können.

### Versuche mit Blau.

#### I. Versuch am 8. III. 1904.

Zeit	Blendenweite	Bemerkungen.
2 <sup>03</sup>	20	4 Glühlampen in 10 cm als Lichtquelle; trotzdem wird ca. 10 Sek. nichts gesehen. Dann tritt Blau farbig über die Schwelle, ziemlich gesättigt.
2 <sup>09</sup>	5,5	2 Glühlampen; farbloses Intervall; Farbe schon erheblich abgeblasst.
2 <sup>16 1/2</sup>	6,25	
2 <sup>25</sup>	8,0	
2 <sup>34</sup>	11,0	
2 <sup>40</sup>	10,0	

#### II. Versuch am 9. III. 1904.

10 <sup>18</sup>	20	2 Glühlampen; ca. 70 Sek. nichts gesehen.
10 <sup>24</sup>	5,5	
10 <sup>27</sup>	7,5	
10 <sup>40 1/2</sup>	9,5	
10 <sup>48</sup>	9,5	
10 <sup>53</sup>	10,5	

#### III. Versuch am 10. III. 1904.

10 <sup>19</sup>	20	2 Glühlampen; ca. 40 Sek. nichts gesehen.
10 <sup>29</sup>	5,5	
10 <sup>34 1/2</sup>	5,75	
10 <sup>43</sup>	7,25	
10 <sup>51</sup>	7,5	
11 <sup>00</sup>	8,0	
11 <sup>05</sup>	9,0	
11 <sup>07</sup>	8,5	

#### Versuch des Herrn W. PIPER am 15. I. 1904.

11 <sup>03</sup> .	20	ca. 1 Min. lang nichts gesehen; dann tritt Blau gesättigt über die Schwelle.
11 <sup>08</sup>	9,5	Farbe abgeblasst.
11 <sup>14</sup> .	5,0	Farbe schon sehr weißlich.
11 <sup>25</sup>	13,5	



Der qualitative Charakter der adaptiven Empfindlichkeitsänderung ist für Blau derselbe wie für Grün: zunächst eine beträchtliche Zunahme, die nach etwa 6–10 Min. ihr Maximum, und zwar das 13fache des „Anfangs“wertes erreicht. Dann folgt wieder ein Rückgang, so daß bei gut fortgeschrittener Dunkeladaptation nur noch die etwa 4fache Empfindlichkeit vorhanden ist, wie am Anfang.

Was sich aus meinen Versuchen zunächst für den allgemeinen Typus der adaptiven Farbenempfindlichkeitsänderung ergibt, ist also folgendes:

Schon in den ersten Sekunden, sicher in Bruchteilen einer Minute vom Moment guter Helladaptation ab tritt eine erheb-

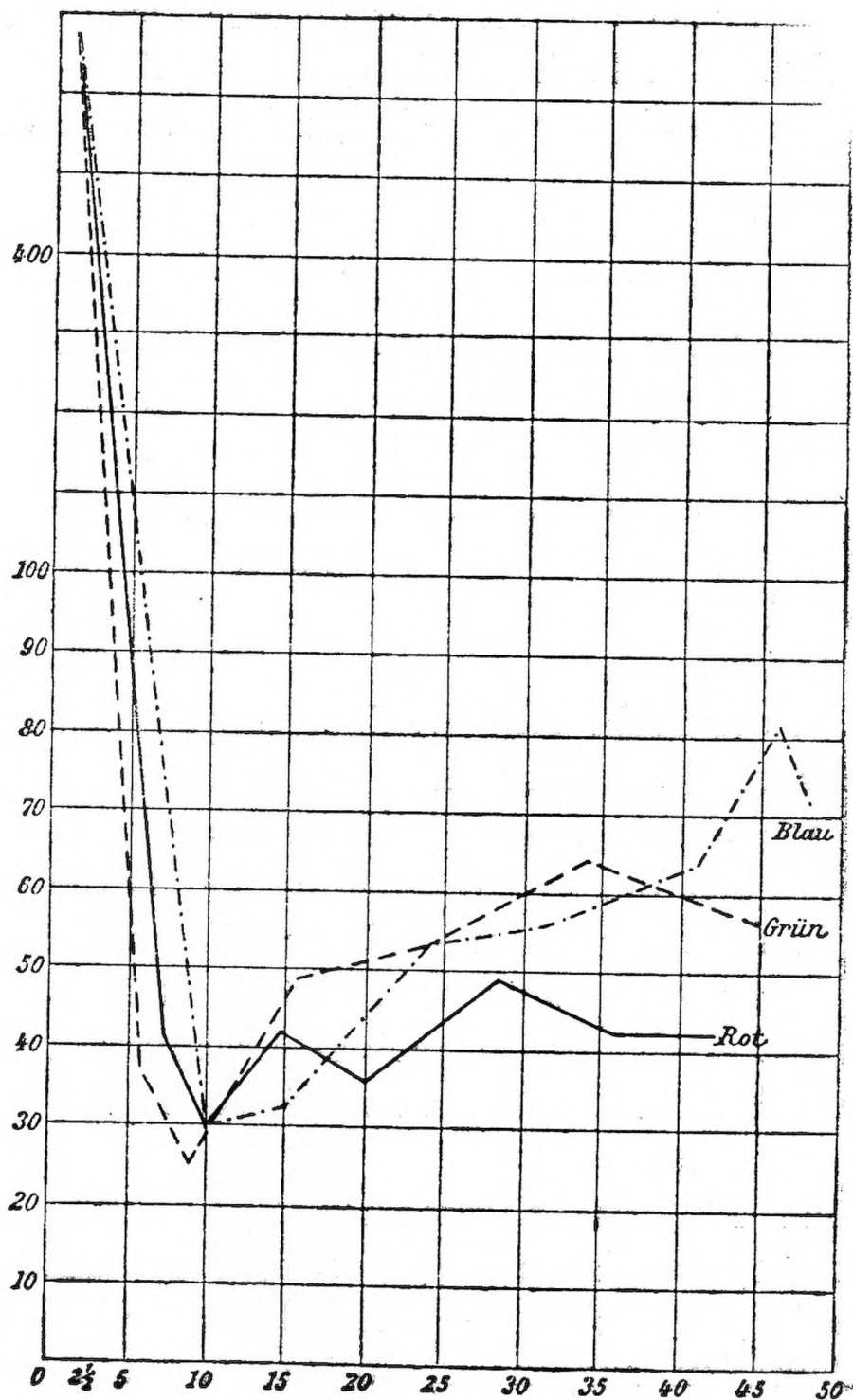


Fig. 2.

liche Zunahme der Farbenempfindlichkeit ein, die nach etwa 8—12 Min. ihr Maximum erreicht und dann allmählich wieder abnimmt. Nach etwa 40—45 Min. wird ein definitiver Zustand erreicht, indem die Farbenempfindlichkeit keine größeren Veränderungen mehr erleidet.

Dieses allgemeine Gesetz gilt für alle drei von mir untersuchten Farben, Rot, Grün und Blau; nur in quantitativer Beziehung bestehen gewisse Differenzen. Es nimmt nämlich die Farbenempfindlichkeit, nachdem sie ihr Optimum erreicht hat, mit der weiter fortschreitenden Dunkeladaptation am wenigsten wieder ab für Rot, etwas mehr für Grün, am meisten für Blau, doch ist der Unterschied zwischen Grün und Blau nicht so evident wie zwischen diesen beiden und Rot.

Eine kurvenmäßige Darstellung unserer Versuche, wobei die Adaptationszeiten als Abszisse, die Quadrate der Blendendurchmesser als Ordinaten eingetragen sind, zeigt das am deutlichsten. (Siehe Fig. 2.)

Die durch die mitgeteilten Untersuchungen festgestellte Tatsache des Wiederansteigens der spezifischen Farbenschwelle nach einem gewissen Zeitraum guter Dunkeladaptation steht im Gegensatz zu den bisherigen Erfahrungen. Wenigstens haben BUTZ und MAYER, die, wie mir scheint, als die einzigen eine fortlaufende Reihe von Schwellenbestimmungen gemacht haben, ein kontinuierliches Sinken ihrer Werte beobachtet.

Eine zuverlässige Erklärung für diese Differenz in den Untersuchungsergebnissen dürfte schwer zu geben sein. Möglicherweise ist sie in der mehr oder weniger sorgfältigen Beobachtung einer ungestörten Fortdauer der Dunkeladaptation begründet, worauf ich meine besondere Aufmerksamkeit gerichtet habe. Die Gleichmäßigkeit der mit jeder einzelnen Farbe gewonnenen Resultate nicht minder wie die typische Differenz der Ergebnisse bei Verwendung von blauem und grünem Reizlicht einerseits, von rotem andererseits lassen meines Erachtens die Fälschung des Gesamtergebnisses durch Versuchsfehler als nicht wahrscheinlich erscheinen.

PIPER<sup>1</sup> hat für den allgemeinen Typus des Adaptationsverlaufes die physiologische Regel feststellen können, „dafs die Empfindlichkeit der Retina bei Dunkelaufenthalt, vom Zustand guter Helladaptation ausgehend, in den ersten 10—12 Min.

<sup>1</sup> l. c. S. 182.



langsam, dann aber schnell zunimmt, und nach längerer oder kürzerer Zeit ein Maximum erreicht, auf dem sie stehen bleibt.“

Vergleichen wir damit das Verhalten der adaptiven Farbenempfindlichkeitsänderung, wie ich es oben formuliert habe, so fällt es auf, daß die niedrigste Farbenschwelle zeitlich fast genau mit derjenigen Phase der Dunkeladaptation zusammenfällt, wo die absolute Reizschwelle schnell zu sinken beginnt. Oder mit anderen Worten: Das Wiederansteigen der spezifischen Farbenschwelle, d. i. das Sinken der Farbenempfindlichkeit, fällt zeitlich fast genau zusammen mit der erheblichen Empfindlichkeitssteigerung für farblose Lichteindrücke im allgemeinen. Es wird deshalb angenommen werden dürfen, daß ein Abhängigkeitsverhältnis zwischen diesen beiden Vorgängen besteht. Die Annahme gewinnt an Wahrscheinlichkeit, wenn wir die quantitativen Unterschiede in dem Wiederansteigen der spezifischen Farbenschwelle für rotes Licht auf der einen Seite, grünes und blaues auf der anderen berücksichtigen. Für Rot, dessen Dämmerungswert gering ist, ist auch die sekundäre Erhöhung der Farbenschwelle minimal oder fehlt fast ganz; für die kürzerwelligen Lichter mit hohem Dämmerungswert ist sie dagegen evident.

Der Widerspruch, daß Grün, welches doch den höchsten Dämmerungswert besitzt, eine geringere Zunahme der Schwellenwerte aufweist, als Blau, ist wohl nur ein scheinbarer, und so zu deuten, daß durch den an und für sich bläulichen Ton des Dämmerungssehens die Schwelle für das objektive Blau erhöht wird.

Es ist nicht zu verkennen, daß die hier mitgeteilten Ergebnisse mit der theoretischen Auffassung sehr wohl in Einklang zu bringen sind, nach welcher der farbenperzipierende Apparat in der Netzhaut und der das farblose Dämmerungssehen vermittelnde Apparat hinsichtlich der Adaptationsverhältnisse wesentliche Unterschiede aufweisen. Sowohl die zeitlichen Verhältnisse wie der Umfang der Adaptation sind für die beiden Apparate verschieden. In welcher Weise sie unter geeigneten Umständen ineinander greifen würden, war a priori nicht vorauszusagen. Für meine Augen hat sich das Verhältnis als ein relativ einfaches herausgestellt. Bezüglich der Verallgemeinerung wird

natürlich eine gewisse Vorsicht geboten sein, da andere Ergebnisse sehr wohl gefunden werden könnten, sobald Geschwindigkeit und Umfang der Adaptation beider perzipierender Apparate in der Netzhaut andere sind, als bei mir. Hierauf könnte möglicherweise die Differenz zwischen meinen Ergebnissen und denjenigen von BUTZ und MAYER wenigstens teilweise zurückzuführen sein.

Herrn Prof. NAGEL sage ich für die Anregung zu dieser Arbeit und sein förderndes Interesse meinen ergebensten Dank. Auch Herrn Dr. PIPER bin ich für manchen wertvollen Ratschlag zu Dank verpflichtet.

*(Eingegangen am 20. April 1904.)*

---