

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

Über das Helligkeitsverhältnis monokular u. binokular ausgelöster Lichtempfindungen.

(Fortsetzung der Untersuchungen über Dunkeladaptation
des Sehorganes.)

Von
Dr. med. H. PIPER,
Assistenten am physiologischen Institut der Universität.

(Mit 2 Fig.)

Für die Vorstellung, welche wir uns über den Mechanismus der Vereinigung beider Sehfelder zu einem Bilde zu machen haben, ist die Frage von wesentlicher Bedeutung, ob sich die beiden monokularen Netzhauterregungen zur Auslösung einer einzigen stärkeren Helligkeitsempfindung summieren oder ob dies nicht erfolgt, d. h. also, ob wir mit zwei Augen die Dinge heller sehen als mit einem oder ebenso hell. Man sollte meinen, die Antwort wäre durch einen einfachen Versuch gegeben: man hätte nur zu beobachten, ob bei Schließung und Öffnung eines Auges eine abwechselnde Verdunklung und Erhellung des Gesichtsfeldes zu konstatieren ist.

In dieser Weise stellte FECHNER¹ Versuche an sich selbst und einer Anzahl anderer Personen an und kam zu dem Ergebnis, daß wohl die meisten, wenn sie den Himmel oder eine andere gleichmäßig weiße oder graue Fläche betrachteten und nun ein Auge schlossen oder verdeckten, einen ganz leichten Schatten über die Fläche sich legen sahen, daß dagegen einige

¹ FECHNER: Über einige Verhältnisse des binokularen Sehens. *Abhdl. d. Sächs. Gesellsch. d. Wissenschaften* 7, 1860, S. 423.

bei Verdeckung eines Auges absolut keine Verdunklung des Gesichtsfeldes wahrnehmen konnten; diese sahen vielmehr die Objekte mit einem Auge genau so hell, wie mit beiden. Sofern nicht bei der einen oder anderen Versuchsperson von vornherein ein deutlich nachweisbarer Unterschied der Lichtempfindlichkeit zwischen beiden Augen bestand, gaben alle, welche bei Verdeckung eines Auges Verdunklung sehen konnten, übereinstimmend an, daß diese äußerst gering sei, so gering, daß sie bei nicht besonders darauf gerichteter Aufmerksamkeit leicht übersehen würde. In ähnlicher Weise fand FECHNER einen ganz minimalen Helligkeitsunterschied zwischen einer binokular einfach gesehenen weißen oder grauen Fläche und jedem einzelnen monokularen Doppelbild derselben, welches durch willkürliche Kreuzung der Sehachsen erzeugt wurde.

Auch AUBERT¹ sah, daß bei Verdeckung eines Auges ein sehr zarter Schatten sich über das Gesichtsfeld ausbreitete, jedoch nur wenn er bei nicht zu hellem Tageslicht ein weißes Papier betrachtete, nicht wenn der helle Himmel beobachtet wurde.

HELMHOLTZ² sagt in seiner Physiologischen Optik: „Wenn man also zum Beispiel ein Auge schließt und mit dem anderen das bedruckte Blatt ansieht, so sieht man die Buchstaben und das weiße Papier im Sehfelde, ohne das Dunkel des anderen Sehfeldes zu bemerken. Dabei ist zu beachten, daß das Papier dabei nicht gerade entschieden dunkler aussieht, als wenn man es mit beiden Augen betrachtet. Das Schwarz des einen Feldes mischt sich also nicht mit dem Weiß des anderen, sondern hat eben weiter gar keinen Einfluß auf die Erscheinung des anderen Bildes.“ Etwas anders lauten die Bemerkungen, welche wenige Seiten³ weiter der Besprechung von FECHNERS paradoxen Versuchen vorausgeschickt werden. „Man blicke nach einer weißen Fläche, schliesse und öffne abwechselnd das rechte Auge, so wird man finden, daß im Moment des Schlusses die weiße Fläche, welche nur noch vom linken Auge gesehen wird, ein wenig dunkler erscheint, als während der Öffnung beider Augen. Der Ausschuß des Lichtes von dem einen Auge bringt also, wie

¹ AUBERT: Physiologie der Netzhaut, S. 282.

² HELMHOLTZ: Physiologische Optik, 2. Aufl., S. 916.

³ l. c. S. 941.

man erwarten mußte, eine Verdunklung des Bildes hervor, freilich eine verhältnismäßig außerordentlich schwache, für manche Augen kaum wahrnehmbare.“

Die Beobachtungen HERINGS¹ beziehen sich in erster Linie auf die Helligkeitsverhältnisse binokularer Farbenmischungen. „Bei der unokularen Mischung handelt es sich um eine Art Summierung oder Superposition der Reize, und die resultierende Empfindung ist stets bedeutend heller, als jede der beiden Empfindungen, welche nur durch eine Komponente des Lichtgemisches erzeugt werden. Mischt man aber die beiden Farben binokular, so ist die resultierende Mischfarbe nur ungefähr gleich hell, wie die Einzelfarbe.“ „Es ist, als ob beim Binokularsehen beide Netzhäute sich im gemeinsamen Sehfelde gleichsam nur mit einem Bruchteile der ihnen zugehörigen Empfindung geltend machen könnten und zwar so, daß diese Bruchteile sich immer zu 1 ergänzen. HERING nannte dies den Satz vom komplementären Anteil der beiden Netzhäute am Sehfelde.“ „Man sieht im allgemeinen die Dinge mit beiden Augen nicht heller, als mit einem. Ist nämlich das eine Auge geschlossen, so hat es fast gar keinen Anteil an dem gemeinsamen Mittelstücke des Sehfeldes. Sind beide Augen geöffnet, so partizipiert jedes Auge gleichsam nur mit der Hälfte seiner Empfindung am Sehfelde, so daß das Ergebnis dasselbe ist, als wenn das eine Auge ganz unbeteiligt ist.“

Auch SCHENCK² citiert, sich HERING anschließend, das „bekannte Gesetz, daß man im allgemeinen die Dinge mit beiden Augen nicht heller sieht als mit einem“ und findet, daß die Helligkeit einer Mischfarbe bei binokularer Mischung ungefähr gleich dem arithmetischen Mittel der Helligkeiten der Komponenten sei, betont jedoch, daß er die Frage nach der Helligkeit der binokularen Mischfarbe noch nicht als endgültig entschieden ansehen könne. In der Tat ist hier Einschränkung und Zurückhaltung des Urteils wohl geboten, denn bei den Helligkeitsverhältnissen binokularer Farbenmischungen spielen sicherlich dieselben Faktoren eine wesentliche Rolle, welche bei der binokularen Mischung zweier verschiedener farbloser Hellig-

¹ HERING: Der Raumsinn und die Bewegungen des Auges. In: HERMANN'S Handbuch, Bd. III, S. 596 u. 597.

² SCHENCK: Einiges über binokulare Farbenmischung. Marburg 1901.

keiten, also bei FECHNERS paradoxem Versuch, in Betracht kommen; und über die Ergebnisse dieser letzteren Versuche ist noch keineswegs eine allgemein befriedigende Erklärung angebahnt.

Bei meinen eigenen Untersuchungen über Dunkeladaptation des Sehapparates¹ ergab sich die bemerkenswerte Tatsache, daß bei vorgeschrittener Dunkeladaptation die Empfindlichkeit beider Augen zusammen, gemessen an der Intensität des Schwellenlichtreizes, einen erheblich höheren Wert aufwies, als die jedes einzelnen Auges und zwar betrug der binokulare Empfindlichkeitswert stets annähernd das Doppelte des monokularen. Bei Beobachtung mit beiden Augen im Zustande der Dunkeladaptation summierten sich also allem Anscheine nach die beiden jedes einzelne Auge treffenden Erregungen. Ich betonte damals, daß diese Erscheinung erst nach längerem Dunkel-aufenthalt (10—15 Min.) deutlich hervortritt, und daß die Schwellenmessungen am helladaptierten Auge zeigten, daß für diesen Zustand des Sehorganes der Satz von der additiven Binokularmischung der beiden Netzhauterregungen nicht gilt. Ich wies dann bei der Besprechung dieser Verhältnisse sogleich darauf hin, daß die Ergebnisse der Schwellenmessungen bei Dunkeladaptation im Widerspruch stehen mit dem sonst ziemlich allgemein angenommenen und von den verschiedenen, oben genannten Forschern citierten Gesetz, daß man mit beiden Augen die Objekte nicht heller sieht als mit einem, und hob hervor, daß die besprochenen Tatsachen mir sehr eindringlich darauf hinzuweisen schienen, daß mit dem Wechsel des Adaptationszustandes auch ein prinzipiell wichtiger und interessanter Wechsel im Modus der Sehfeldvereinigung verknüpft sei.

Meine damaligen Feststellungen erstreckten sich nur auf Schwellenmessungen und ich mußte den Nachweis schuldig bleiben, ob und wie weit der Satz von der additiven Mischung beider Monokularerregungen auch bei Lichtwerten Gültigkeit hat, welche von der Schwelle mehr oder weniger weit abliegen. Diese Lücke in meinen Versuchsreihen auszufüllen, bezwecken die im folgenden mitzuteilenden Untersuchungen.

¹ H. PIPER: Über Dunkeladaptation. *Zeitschr. f. Psychol.* 31.

Vorversuche, Methodik.

Beobachte ich mit gut helladaptierten Augen eine mehr oder weniger stark lichtreflektierende Fläche, etwa den hellen Tageshimmel, eine weiße oder grauweiße Wand oder ein weißes Blatt Papier und schliesse und öffne jetzt abwechselnd das rechte Auge, so sehe ich im Moment des Lidschlusses einen ganz zarten Schatten sich über die Fläche legen, der im Moment des Öffnens verschwindet und einer ebenso minimalen Erhellung Platz macht. Versuche ich jetzt in der gleichen Weise, ob sich bei Verdeckung und Wiederfreigabe des linken Auges ebenfalls Verdunklung und Wiederaufhellung des Sehfeldes bemerkbar macht, so zeigt sich bei mir keine Spur einer derartigen Erscheinung: ich sehe die Objekte mit dem rechten Auge allein genau so hell, als wie mit beiden Augen. Die mit meinen Augen angestellten Versuche beweisen also ausschliesslich, daß ich mit dem rechten Auge heller sehe, als mit dem linken; sie beweisen aber keineswegs, daß ich mit beiden Augen heller sehe als mit jedem einzelnen; wäre dieses der Fall, so müßten die Objekte natürlich stets beim Sehen mit einem Auge, sei es mit dem rechten oder mit dem linken, dunkler erscheinen als beim Binokularsehen, was für mich, wie gesagt, nicht zutrifft.

Ich weiß nicht, ob die oben citierten Beobachter, welche Verdunklung des Sehfeldes bei Ausschließung eines Auges vom Sehakte konstatierten, sich davon überzeugt haben, ob diese Erscheinung sich einstellt, gleichgültig, welches Auge geschlossen wird, oder ob sie etwa, wie bei mir, nur bei Verdeckung eines bestimmten Auges konstant auftritt, nicht bei Ausschaltung des anderen. Aber mag dem sein, wie es will, so viel geht aus den übereinstimmenden Angaben aller genannten Autoren und auch der von mir untersuchten Personen mit Sicherheit hervor, daß, wenn überhaupt bei Beobachtung heller Flächen die Verdeckung eines Auges eine Verdunklung bewirkt, diese ganz außerordentlich gering ist und deshalb, selbst wenn tatsächlich vorhanden, bei unzureichender Aufmerksamkeit dem Beobachter leicht entgeht.

Ganz anders fallen die Versuche aus, wenn man mit dunkeladaptierten Augen eine leuchtende Fläche von geeigneter Helligkeit beobachtet, d. h. von einer solchen, welche sicher unter der Schwelle des helladaptierten Sehorgans liegt.

und bei guter Dunkeladaptation grau oder grauweiß erscheint. Schließt oder verdeckt man unter diesen Bedingungen ein Auge, gleichgültig, welches von beiden, so sieht man sogleich, daß das Objekt sich auffällig verdunkelt, öffnet man das Auge wieder, so erfolgt ebenso prompt eine wesentliche Erhellung der Lichtfläche.

Schon diese leicht zu wiederholenden Versuche überzeugen jeden Beobachter leicht, daß die Erscheinungen bei Hell- und bei Dunkeladaptation auffallend differieren: im ersten Fall beim Übergang vom binokularen zum monokularen Sehen keine oder eine ganz minimale, im zweiten eine stets auffällige Helligkeitsabnahme, über deren Auftreten auch bei ungeübten Beobachtern nie der geringste Zweifel besteht.

Deuten also schon die Ergebnisse dieser qualitativen und ganz rohen Orientierungsversuche wiederum, wie die Resultate meiner oben angeführten Schwellenmessungen, darauf hin, daß bei Dunkeladaptation eine additive Superposition der beiden Monokularerregungen stattfindet, bei Helladaptation dagegen nicht, so erschien es jetzt wünschenswert, diesen theoretisch interessanten Differenzen durch quantitative Messungen weiter nachzugehen. Der gegebene Weg hierfür war der, Gleichungen zwischen einer monokular und einer binokular gesehenen Helligkeit einstellen zu lassen und dann die objektiven Lichtintensitäten der beiden Felder zahlenmäßig zu vergleichen.

Bei solchen Messungen bediente ich mich folgender Versuchsanordnung (Fig. 1): Ein nach einer Seite offener Kasten ist durch eine Querwand (Q) in einen vorderen (geschlossenen) und einen hinteren (offenen) Raum aufgeteilt; sowohl der vordere, wie der hintere Raum sind durch Längsscheidewände (W_1 , W_2) wiederum in eine rechte und eine 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 Graduierung in Millimetern abgelesen werden kann. Unmittelbar vor den Blenden und denselben anliegend sind rundgeschliffene Milchglasscheibchen (S) in die Blendenfassung eingelassen und befestigt. Beide Scheibchen sind aus derselben Glasplatte geschnitten und erweisen sich in Versuchen als genau gleich lichtdurchlässig.

Aus der rechten, wie aus der linken Hälfte der Querscheidewand (Q) sind Fenster (F) von der Form eines Quadrates von 8 cm

Glüh- oder Bogenlampe (L) aufgestellt, und ein Gehilfe besorgte hier die Einstellung der Blenden und die Ablesung der Blendendurchmesser. Im sonst dunklen Beobachtungsraum verglich die Versuchsperson die Helligkeiten 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 Kasteninneren hin leuchtenden Areals des Scheibchens, d. h. proportional dem Quadrat des Blendendurchmessers. Vorausgesetzt, daß auf beide Blendenscheibchen gleich viel Licht fällt, was bei gleicher Größe derselben und gleichem Abstand von ein und derselben Lichtquelle der Fall ist, vorausgesetzt ferner, daß beide Scheibchen (S) sowohl wie die beiden Milchglasplatten (F), welche vor die Fenster der Querwand des Kastens gesetzt sind, gleich viel Licht durchlassen, so verhalten sich die Lichtintensitäten, welche von je einem Felde zum Beobachter ausgestrahlt werden, zueinander wie die Quadrate der Blendendurchmesser.

Die Voraussetzungen dieser Rechnungsmethode mußten natürlich geprüft werden, ehe die eigentlichen Versuche begonnen werden konnten. Zu diesem Zweck wurde die Längsscheidewand (W_2) aus dem hinteren offenen Kastenabschnitt zunächst entfernt und es wurden nunmehr Gleichungen zwischen den Feldern, welche jetzt beide binokular gesehen wurden, durch Veränderung der Blendendurchmesser eingestellt. Bei diesen Versuchen zeigte sich erstens, daß die obigen Voraussetzungen zutreffend sind, daß also jedesmal, wenn die Felder dem Beobachter vollständig gleich erschienen, auch die beiden Blenden genau in gleicher Weite eingestellt waren; zweitens ergab sich, daß die Einstellungen mit großer Genauigkeit gemacht werden konnten, und daß minimale Differenzen der Blendenweiten genügten, um das eine Feld als zu hell, das andere als zu dunkel erscheinen zu lassen. Die Unterschiedsempfindlichkeit gegen Helligkeitsdifferenzen erwies sich demnach als recht beträchtlich und zwar ebensowohl bei Hell- wie bei Dunkeladaptation. Dieses Ergebnis ist für die Würdigung der jetzt zu erörternden Versuchsreihen von wesentlicher Bedeutung und wohl zu beachten.

Für die eigentlichen Versuche wurde nunmehr die Längsscheidewand (W_2) in den hinteren offenen Kastenraum wieder eingeschoben und die Versuchsperson brachte den Kopf derart vor die Kastenöffnung, daß das eine Auge, etwa das rechte, gerade der Kante der Längsscheidewand gegenüber stand (Figur 1, Stellung I; für diese Stellung sind die Umrisse der Augen in der Figur schematisch ausgezeichnet). In dementsprechender Lage wurde der Kopf durch Kinn- und Wangenstütze festgehalten.

Unter solchen Umständen sieht nun der Beobachter das linke Feld binokular, das rechte aber monokular, nämlich nur mit dem rechten Auge; für das linke Auge ist das rechte Feld durch die Längsscheidewand des Kastens (W_2) verdeckt. Der Beobachter hatte nun die Helligkeiten des binokular und des monokular gesehenen Feldes miteinander zu vergleichen und die Lichtintensität des einäugig gesehenen solange durch Verstellung der diesem zugehörigen Irisblende ändern zu lassen, bis beide Felder gleich hell erschienen. Ist dieses erreicht, so verhalten sich die Lichtintensitäten beider Felder zueinander wie die Quadrate der zugehörigen Blendendurchmesser; die Empfindlichkeit des einen Auges verhält sich aber zu der beider Augen zusammen umgekehrt proportional den Lichtintensitäten, welche von dem von einem und dem von beiden Augen beobachteten Feldern nach Gleichungseinstellung ausgestrahlt werden.

Ehe ich über die Ergebnisse der Versuche berichte, sind noch wenige weitere Worte über die Methodik der Beobachtung vor auszuschicken. Die Felder wurden aus 35 cm Abstand beobachtet; die lineare Winkelgröße jedes einzelnen betrug somit in der Diagonalen 18° , in der Seite 13° . Beim Helligkeitsvergleich wurde zuerst das eine, dann das andere direkt betrachtet; der Blick wanderte also zwischen beiden abwechselnd hin und her und es handelte sich demnach bei den Einstellungen um Sukzessivvergleiche, bei welchen immer nur die Helligkeitsempfindung für das Urteil Verwendung fand, die beim Beobachten jedes Feldes mit zentralen und parazentralen Netzhautabschnitten ausgelöst wurde. Natürlich konnte die Beobachtung des einen Feldes mit sehr geringer Pause der des ersten folgen, nämlich entsprechend der Geschwindigkeit der Augenbewegung, und dieser minimale Zeitverlust kam der Genauigkeit des Vergleiches sehr zu statten. — Gegen die gleichzeitige Beurteilung beider Felder unter Fest-

haltung einer bestimmten Blickrichtung sind so gewichtige Bedenken vorzubringen, daß von einem solchen Verfahren Abstand genommen werden mußte. Fixiert man nämlich einen zwischen beiden Feldern gelegenen Punkt, so liegen die Bilder auf symmetrischen Netzhautteilen; aber man darf kaum voraussetzen, daß diese als gleich empfindlich anzusehen sind. Auch ist ein solches Verfahren unzweckmäßig, weil die Empfindlichkeit für Helligkeitsunterschiede an den peripheren Netzhautteilen zweifellos geringer als auf den zentralen und parazentralen Partien entwickelt ist und somit der Vergleich unnötig erschwert und unsicher wird. Ganz unzulässig wäre es natürlich, einen Punkt des einen Feldes zu fixieren und zugleich die vom anderen Feld herrührende Helligkeitsempfindung zum Vergleich zu verwerten; alsdann würde das fixierte Feld auf zentralen und parazentralen Partien der Retina abgebildet, das zweite aber auf weit peripheren. Daß diese verschiedenen Netzhautteile aber nicht auch nur als annähernd gleich empfindlich betrachtet werden dürfen, ist eine längst bekannte Tatsache, deren Nichtberücksichtigung die Brauchbarkeit der Gleichungen illusorisch machen würde. Der schnelle Sukzessivvergleich mit wanderndem Blick brachte also den doppelten Vorteil, daß die Beobachtung jedes Feldes beim Binokularsehen mit denselben resp. korrespondierenden Netzhautteilen erfolgen konnte, welche beim Monokularsehen Verwendung finden, und daß diese, zentral und parazentral gelegen, das Optimum an Unterschiedsempfindlichkeit für den Helligkeitsvergleich aufwiesen.

Noch einem Einwand gegen die Versuchsmethodik sei hier von vornherein entgegengetreten. Man könnte sagen, bei Beobachtung des monokular gesehenen Feldes lägen die Bedingungen des bekannten „paradoxen Versuches“ vor, welche nach FECHNER etwa folgendermaßen liegen: Hält man bei Beobachtung eines weißen Feldes vor ein Auge ein graues Glas oder bringt man ein weißes dem einen und ein graues dem anderen Auge sichtbares Feld etwa durch Prismen binokular zur Deckung, so ist die resultierende Helligkeit geringer als die des von einem Auge gesehenen helleren Feldes. Es tritt also nichts weniger als Summation der beiden Monokularerregungen ein, sondern im Gegenteil eine Beeinträchtigung der vom einen Auge vermittelten größeren Helligkeitsempfindung durch die geringere des anderen. Nach Analogie dieses Versuches könnte man ver-

muten, die Helligkeit des monokular gesehenen Feldes in dem von mir benutzten Apparate erscheine deshalb unter Umständen geringer, als die des binokular gesehenen, weil die korrespondierenden Stellen des anderen Auges gleichzeitig auf das Dunkel der Scheidewand gerichtet sind. Indessen dieser Einwand ist nicht stichhaltig, wie ein einfacher Versuch zeigt: lägen die Bedingungen des paradoxen Versuches vor, so müßte bei Beobachtung des monokular sichtbaren Feldes Verschluss oder Verdeckung des anderen Auges eine scheinbare Aufhellung im Gefolge haben, was nicht der Fall ist. In der Tat läßt sich auch aus den von FECHNER selbst angegebenen speziellen Bedingungen, welche für das Zustandekommen seines paradoxen Versuches wesentlich sind, ableiten, daß derselbe bei der von mir getroffenen Versuchsanordnung nicht in Frage kommt. FECHNER zeigte nämlich, daß eine Verminderung der von einem Sehfeld ausgelösten Helligkeitsempfindung durch Reizung der korrespondierenden Stellen der anderen Netzhaut mit dunklerem Licht nur dann eintritt, wenn die Dunkelheit des anderen Sehfeldes eine gewisse untere Grenze nicht überschreitet. Ist diese passiert oder schließt man von den korrespondierenden Stellen des anderen Auges gar das Licht ganz aus, so tritt der paradoxe Erfolg nicht ein. Und diese letzteren Umstände treffen für die Beobachtungen an meinem Apparat in der Tat zu. Bei Beobachtung des monokular sichtbaren Feldes sehen die korrespondierenden Stellen des anderen Auges das tiefe Dunkel der mit schwarzem Wollpapier beklebten Scheidewand des Kastens, eine Dunkelheit, die sicherlich weit unter dem für das Zustandekommen der paradoxen Erscheinung maßgeblichen Helligkeitsminimum liegt.

Nach diesen Erörterungen dürften wohl alle Zweifel über die Vergleichbarkeit der monokular und binokular gesehenen Helligkeiten an meinem Apparat behoben sein.

Versuche.

Stelle ich zunächst beide Blenden auf gleiche Weite ein, gebe also damit beiden Feldern gleiche, ziemlich große Lichtintensität und beobachte mit helladaptierten Augen derart, daß das linke Feld binokular, das rechte aber nur vom rechten Auge gesehen werden kann (Fig. 1 Augenstellung I), so erscheinen mir beide gleich hell. Wird die eine Blende beliebig verstellt, so

daß beide Felder ungleich erscheinen und wird nunmehr die Blendenweite wieder aufgesucht, bei welcher Helligkeitsgleichung zwischen beiden Feldern erzielt ist, so ergibt die Ablesung der Blendendurchmesser, daß beide den gleichen Wert haben, und daß mithin beide Felder die gleiche Lichtintensität ausstrahlen. Ändere ich nunmehr die Stellung des Kopfes, so daß jetzt das rechte Feld binokular, das linke aber monokular gesehen wird (Fig. 1 Augenstellung II in der Figur durch die Verbindungslinie der Knotenpunkte beider Augen lr angedeutet), so erscheint mir bei objektiver Gleichheit der Lichtintensitäten beider Felder, das linke monokular beobachtete ganz wenig dunkler, als das rechte; indessen genügt eine ganz minimale, kaum zahlenmäÙig angebbare Erweiterung der linken Blende um Helligkeitsgleichheit beider Felder zu bewirken. Die Ursache für die Erscheinung, daß ein mit dem linken Auge allein beobachtetes Objekt mir etwas dunkler erscheint, als wenn ich es binokular (oder mit dem rechten Auge allein) betrachte, ist, wie schon oben bemerkt, darin gegeben, daß mein linkes Auge, gleiche Helladaptation vorausgesetzt, stets ein wenig dunkler sieht als mein rechtes. Diese Tatsache ist aber keineswegs in dem Sinne zu verwerten, daß zu folgen wäre, ich sähe mit dem linken Auge dunkler als mit beiden, weil die additive Beimischung der Erregung des rechten Auges ausbliebe. Sollte diese Folgerung als berechtigt anzuerkennen sein, so wäre zu verlangen, daß ich auch mit dem rechten Auge allein dunkler sehe, als mit beiden, was, wie ich zeigte, für mich nicht zutrifft. Ich schliesse demnach aus den bisher angeführten Versuchen, daß bei Helladaptation der Augen eine additive Superposition der beiden Monokularerregungen nicht stattfindet, und daß man unter diesen Umständen die Dinge mit zwei Augen nicht heller sieht als mit einem. Die von FECHNER, HELMHOLTZ, HERING u. a. in gleichem Sinne formulierte Regel erweist sich demnach auch in diesen Versuchen für die helladaptierten Augen als durchaus zutreffend.

Anders fallen dagegen die Versuche aus, wenn sie bei guter Dunkeladaptation (nach etwa 20 Minuten dauerndem Dunkel-aufenthalt) angestellt werden; natürlich muß die Lichtintensität der Felder jetzt erheblich herabgesetzt werden, so daß sie für das helladaptierte Auge gut unterschwellig sein würden. Der subjektive Helligkeitseindruck kann indessen so groß sein, wie der war, welcher bei den Versuchen mit helladaptiertem Auge

erzielt wurde. Bei meinen Versuchen wurde die Verminderung der Lichtintensität dadurch bewirkt, daß an Stelle der Bogenlampe, welche bei den Versuchen am helladaptierten Auge Verwendung fand, eine 25kerzige Glühlampe als Lichtquelle benutzt wurde (Fig. 1 *L*).

Sind jetzt wiederum beide Felder auf gleiche Lichtintensität gebracht, so erscheint stets das monokular beobachtete beträchtlich dunkler als das binokular gesehene; diese Erscheinung tritt ein, gleichgültig, ob das rechte oder das linke Auge das monokular beobachtende ist. Geht man mit dem Kopfe hin und her, so daß abwechselnd das rechte und das linke Auge der Kante der Längsscheidewand (W_2) des Kastens gerade gegenübersteht (Fig. 1 zwischen Augenstellung I und II), so sieht man, daß entsprechend jedem Wechsel der Kopfstellung bald das rechte, bald das linke Feld als das hellere erscheint, und zwar stets dasjenige, welches gerade binokular gesehen wird.

Es wurden jetzt wiederum Gleichungen zwischen der monokular und der binokular gesehenen Helligkeit eingestellt, indem die zum dunkleren (einäugig beobachteten) Felde zugehörige Blende nach Bedarf erweitert wurde. Die Empfindlichkeit des Einzelauges und die beider Augen zusammen verhielten sich dann zueinander wie die reziproken Werte der Lichtintensitäten des zugeordneten Feldes, d. h. wie die reziproken Werte der Blendendurchmesserquadrate. Solche Gleichungen wurden bei verschiedenen absoluten Lichtintensitäten eingestellt, bald war das rechte, bald das linke Auge das monokular beobachtende. Trotz aller dieser Variationen ergab sich ein ganz konstantes Resultat, das auch für andere Beobachter, Prof. NAGEL, Dr. GUTTMANN, Dr. SCHÄFER, Herrn BLECKWENN etc. Gültigkeit hatte; und dieses ist dahin zu formulieren, daß man bei Dunkeladaptation die Objekte mit zwei Augen durchschnittlich um das 1,6—1,7fache heller sieht als mit einem. Bei ganz geringen absoluten Lichtwerten übertrifft die binokulare Empfindlichkeit die monokulare annähernd um das Doppelte, was ja bereits meine früher veröffentlichten Schwellenmessungen ergeben haben. Hat man eine Gleichung eingestellt und entfernt dann die Längsscheidewand (W_2) aus dem hinteren Kastenraum, so daß beide Felder binokular gesehen werden können, so überzeugt man sich leicht, daß jetzt von Gültigkeit der Gleichung nicht mehr die Rede sein kann, und daß das vorher monokular

beobachtete Feld das andere ganz erheblich an Helligkeit übertrifft.

Man kann beim qualitativen Versuch auch eine Art der Beobachtung wählen, die in gewisser Beziehung die fraglichen Verhältnisse besonders gut zur Anschauung zu bringen geeignet ist. Man stelle beide Felder auf gleiche Lichtintensität ein, indem man beide Blenden auf gleiche Weite bringt und beobachte, gut dunkeladaptiert, zunächst so, daß etwa das linke Feld binokular, das rechte monokular gesehen wird. Jetzt verändere man die Kopflage und gehe langsam in die Stellung für linksmonokulare Beobachtung über (Fig. 1 aus Stellung I in II).

Man wird dann sehen, daß in demselben Maße, wie das rechte Feld dem linken Auge sichtbar wird, also hinter der Kante der Längsscheidewand (W_2) hervorkommt, sich ein mit senkrechter verwaschener Linie begrenzter Schatten vom Außen- zum Innenrande des Feldes zurückzieht und einer deutlichen Aufhellung Platz macht; in demselben Tempo aber, in welchem dieser Schatten vom rechten Felde zurückweicht, schiebt sich ein ebensolcher über das linke Feld, welches nach und nach nur monokular (linksäugig) gesehen werden kann, vom Innen- zum Außenrande, dasselbe um einen gewissen Betrag verdunkelnd, hinüber.

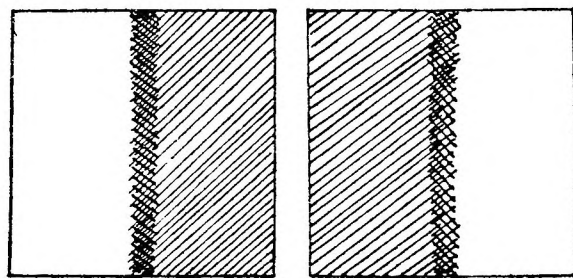
Macht man mit der Kopfbewegung in einer mittleren Lage Halt, so daß die Symmetrielinie des Gesichts gerade der Kante der Längsscheidewand des Kastens (Fig. 1 Stellung III) gegenüber steht, so erscheinen die beiden inneren Hälften der Felder beschattet, die beiden äußeren aber heller: die ersteren können nur monokular gesehen werden, nämlich die des linken Feldes nur vom linken, die des rechten nur vom rechten Auge; die beiden äußeren Feldhälften aber sind binokular sichtbar. Durch Kopfbewegungen kann man die Schatten natürlich beliebig nach rechts oder links wandern machen.

Die Grenze zwischen dem hellen und dem beschatteten Teil jedes Feldes ist durch einen besonders dunklen senkrechten Streifen markiert (Fig. 2 I). Daß dieser noch erheblich dunkler erscheint als die dunkle Feldhälfte, dürfte zum Teil als Wirkung des Kontrastes zur Helligkeit des angrenzenden äußeren Feldabschnittes zu erklären sein; indessen wichtiger für die Deutung dieser Erscheinung ist wohl der Umstand, daß sich an der Stelle des dunklen Streifens die vom einen Auge gesehene Helligkeit des Feldes mit

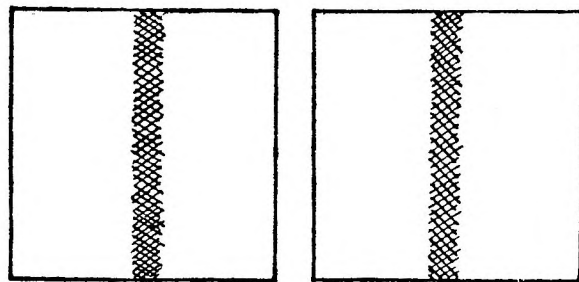
dem vom anderen gesehenen Grau, welches die in Zerstreuungskreisen auf der Netzhaut abgebildete Kante der Längsscheidewand (*W*) des Kastens erzeugt, nach den Regeln des paradoxen FECHNERSchen Versuches mischt. Hier liegt in der Tat die einzige Gelegenheit vor, bei der sich die paradoxe binokulare Helligkeitsmischung komplizierend bei der Benutzung meines Apparates geltend machen muß: bei allen vorher beschriebenen Versuchen dagegen liegt das graue, nicht schwarze Bild der Scheidewandkante außerhalb desjenigen der hellen Felder und ist unsichtbar, da es auf das Schwarz der seitlichen Kastenwände fällt.

Fig. 2.

I (Dunkeladaptation).



II (Helladaptation).



Der dunkle Streifen zwischen binokular und monokular gesehenen Feldhälften (bei Augenstellung III Fig. 1) muß nach dem Gesagten natürlich auch sichtbar sein, wenn beide Feldhälften gleich hell erscheinen, was ja bei Beobachtung unter den Bedingungen der Helladaptation der Fall ist. Tatsächlich konstatiert man ihn auch unter diesen Umständen leicht und kann ihn über das Feld bei Bewegungen des Kopfes von rechts nach links oder von links nach rechts wandern sehen; aber er erscheint nicht in so dunklem Kontrast zum Hell des Feldgrundes und vor allen Dingen: die monokular gesehene Feldpartie schließt sich nicht mit reduzierter Helligkeit an den Streifen an, sondern erscheint so leuchtend, wie die binokular beobachtete Feldhälfte (Fig. 2 II). Der Unterschied zwischen den

Erscheinungen bei Hell- und bei Dunkeladaptation ist aus der angefügten Figur wohl einigermaßen deutlich zu ersehen.

Schluss.

Wenn ich die Ergebnisse dieser Untersuchung jetzt abschließen kurz zusammenfasse, so möchte ich das Hauptgewicht auf die Resultate legen, welche sich bei Einstellung von Gleichungen zwischen monokular und binokular gesehenen Helligkeiten ergaben. Es zeigte sich, daß für helladaptierte Augen bei Gleichheit der monokular und binokular beobachteten Lichtintensitäten in der Regel auch Gleichheit der Helligkeitsempfindung eintrat, daß dagegen bei Dunkeladaptation die monokular beobachtete Lichtintensität die binokular gesehene erheblich an Wert übertreffen mußte, um dieser letzteren gleich zu erscheinen. Diese Beobachtungen bestätigen also den schon früher aus den Resultaten der Schwellenmessungen abgeleiteten Satz, daß man bei Helladaptation mit zwei Augen nicht oder nur ganz außerordentlich wenig heller sieht als mit einem, daß aber bei Dunkeladaptation die Helligkeitsempfindung zweier Augen die eines erheblich an Intensität übertrifft.

(Eingegangen am 1. Mai 1903.)
