

# Ueber Nachbilder nach momentaner Helligkeit.

Von

Dr. H. G. HAMAKER (Utrecht).

Im Allgemeinen hat man, um Nachbilder erleuchteter Flächen auch bei sehr kurzer Dauer der Helligkeit wahrnehmbar zu machen, einen zweifachen Weg eingeschlagen. Zunächst betrachtete man nach dem Vorgange von BRÜCKE<sup>1</sup> ein ruhendes, hell erleuchtetes Object kurze Zeit hindurch, und weiterhin hat man, PURKINJE's<sup>2</sup> Beispiel nachahmend, ein bewegliches Object durch das Gesichtsfeld geführt, ohne demselben mit dem Blicke zu folgen. Im ersteren Falle erscheinen das ursprüngliche Bild und die Nachbilder nacheinander an derselben Stelle, im letzteren Falle macht man diese Wahrnehmungen zugleich nebeneinander. Dem ersteren Modus (ruhendes leuchtendes Object) folgten auſſer BRÜCKE: HELMHOLTZ<sup>3</sup>, AUBERT<sup>4</sup>, EXNER<sup>5</sup>, YOUNG<sup>6</sup> (von dem die Bezeichnung „recurrent vision“ stammt), DAVIS<sup>7</sup>, CHARPENTIER<sup>8</sup>, HESS<sup>9</sup>, SNELLEN<sup>10</sup>, BOSSCHA<sup>11</sup>. Das zweite Princip

<sup>1</sup> E. BRÜCKE, Versuche über subjective Farben. *POGGEND. Annalen der Physik u. Chemie* 84, 418. 1851.

<sup>2</sup> J. PURKINJE, Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. 2. Bändchen, S. 110.

<sup>3</sup> H. v. HELMHOLTZ, *Physiolog. Optik*. 1. Aufl., S. 358 ff.

<sup>4</sup> H. AUBERT, *Handb. der ges. Augenheilkunde*, herausgeg. v. GRAEFE u. SAEMISCH.

<sup>5</sup> S. EXNER, Ueber den Erregungsvorgang im Sehnervenapparate. *Sitzungsber. d. K. Akad. der Wissensch.* 65 (3), 59. Wien 1892.

<sup>6</sup> C. A. YOUNG, Note on recurrent vision. *Philos. Magazine* 48, 343. 1872.

<sup>7</sup> A. S. DAVIS, On recurrent vision. *Ebenda* 44, 526. 1872.

<sup>8</sup> A. CHARPENTIER, Oscillations rétinienne. *C. R.* 113, 147. 1891.

<sup>9</sup> C. HESS, Unters. über die nach kurzd. Reizung d. Sehorgans auftr. Nachbilder. *PFLÜGER's Arch.* 49, 190.

<sup>10</sup> H. SNELLEN, Notes on vision and retinal perception. *Bowman lecture* 1896.

<sup>11</sup> H. P. BOSSCHA, Primaire, secondaire en tertiaire netvliesbeelden na momentane lichtsindrukken. *Acad. proefschr.* Utrecht 1893. (v. GRAEFE's *Arch. f. Ophthalm.* 40, Abth. 1.)

(bewegliches Object) wurde, abgesehen von PURKINJE durch BIDWELL<sup>1</sup>, v. KRIES<sup>2</sup>, HESS<sup>3</sup> in Anwendung gebracht.

Ich habe bereits<sup>4</sup> eine ausführliche Darstellung dieser Mittheilungen gegeben und glaube demnach darauf verweisen zu dürfen. In meiner Bezeichnungsweise folge ich BRÜCKE und nenne „positiv“ alle Nachbilder, die heller sind als die Umgebung, „negativ“ diejenigen, welche deutlich dunkler sind. Ferner wurde in Uebereinstimmung mit BOSSCHA die ursprüngliche „einheitliche“ Wahrnehmung als primäres Bild, die darauf folgenden Nachbilder, gleichgültig ob sie positiv oder negativ sind, mit Ausserachtlassung der dazwischen liegenden dunkleren Phasen, als secundär, tertiär, quaternär bezeichnet.

## § 1. Beobachtungen, angestellt mit ruhendem Lichtbild.

Die ersten Versuche, die ich anstellte, geschahen nach der von HESS angegebenen und auch von BOSSCHA angewandten Methode.

Bei dieser Art des Experimentirens, d. h. mit einem ruhenden Object, spielen sich die verschiedenen Stadien des Processes auf derselben Stelle der Retina ab und müssen daher alle nacheinander wahrgenommen werden, was vor Allem für die beiden ersten schwierig ist wegen ihrer erstaunlich kurzen Dauer und der Schnelligkeit, mit der das secundäre Bild auf das primäre folgt.

Wir benutzten anfänglich farbige Objecte, die mit farblosem oder wenigstens nur sehr schwach gefärbtem Licht für einen sehr kleinen Bruchtheil einer Secunde sichtbar gemacht wurden. Diese Objecte stellen rechteckige Stückchen matten (nicht glänzenden) farbigen Bandes dar, von etwa 2 : 3 cm Gröfse.

Um zu erforschen, bei welcher Art momentaner Belichtung die Erscheinung am besten wahrgenommen sei, verglichen so-

<sup>1</sup> S. BIDWELL, On the recurrent images following visual impressions. *Proc. of the Royal Soc. of London* 56, 132.

<sup>2</sup> J. v. KRIES, *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane* 9, 81; 12, 181; 19, 175. v. GRAEFE'S *Arch.* 42, Abth. 3, 95.

<sup>3</sup> C. HESS, Studien über Nachbilder. v. GRAEFE'S *Arch.* 40, Abth. 2, 259; 44, 445.

<sup>4</sup> H. G. HAMAKER, Over nabeelden. *Akad. Proefschr.* Utrecht 1899.

wohl HESS wie BOSSCHA zwei Hilfsmittel miteinander, nämlich den elektrischen Funken und den Momentverschluss, wie ihn die Photographen gebrauchen, und der eine Helligkeitsdauer von  $\frac{1}{100}$  bis  $\frac{1}{200}$  Sec. ergiebt.

Sie kamen zu verschiedenen Ergebnissen; während HESS dem Momentverschluss den Vorzug gab, wählte BOSSCHA den elektrischen Funken, weil er damit die einzelnen Theile des Processes am besten beobachten konnte.

Diesen Umstand schrieb B. der kürzeren Dauer der Helligkeit zu. Je mehr er die Oeffnungszeit verlängerte, desto schwieriger war das secundäre Bild wahrzunehmen, und bei einer Belichtung von 1 Sec. war nur dann und wann noch etwas von der complementären Färbung zu sehen. Das tertiäre Bild hingegen hielt um so länger an, je gröfser die Helligkeitsdauer war; betrug diese 4 Sec., so blieb das tertiäre Bild 14 Sec. lang sichtbar.

Um diese Beobachtungen zu controlliren, stellte ich eine Reihe von Versuchen sowohl mit dem Momentverschluss als mit dem elektrischen Funken an.

Einen Funken von genügender Lichtstärke erhielt ich, ebenso wie früher BOSSCHA, mittelst eines grofsen RUHMKORFF'schen Inductors, an dem, um dem Funken eine ausreichende Lichtstärke zu geben, in einer Nebenschließung eine Leidener Flasche angebracht war.

Die vergleichende Untersuchung ergab, dafs kein nennenswerther Unterschied zu bemerken war; dafs also mit beiden Arten momentaner Belichtung für mich die Erscheinung gleich gut wahrnehmbar blieb.

Darauf wurde der elektrische Funke noch des Näheren sorgfältig untersucht, und dabei zeigte sich, dafs dieser, für die von uns getroffene Einrichtung wenigstens, von etwas kürzerer Dauer war als die Oeffnungszeit des Momentverschlusses. Der Funke stellte nämlich nicht ein Ganzes dar, sondern bestand aus einer Folge von gewöhnlich vier oder mehreren kürzeren Funken: wenn im dunklen Raume mit dem Funken eine sich drehende Scheibe beleuchtet wurde, die ganz schwarz war bis auf ein einziges weifses Tüpfelchen, so sah man nicht ein einziges, sondern mindestens vier weifse Tüpfelchen, alle vollkommen scharf wahrnehmbar. Dies kann schwerlich eine andere Erklärung finden, als dafs vier Funken von in der That sehr kurzer



Dauer nach einander übergesprungen waren, durch dunkle Zwischenräume von einander geschieden.

Aus dem geschätzten Abstände der beiden äußersten der vier wahrgenommenen Tüpfelchen und der Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe konnte die Gesamtdauer der vier Funken und der dunklen Zwischenräume berechnet werden, und es zeigte sich nun, daß diese nahezu mit der Oeffnungsdauer des Momentverschlusses übereinkam. Mit vollkommener Sicherheit war diese letztere jedoch nicht zu bestimmen.

Bei einer Einrichtung, analog derjenigen, die BOSSCHA benutzte, arbeitet man also mit vier aufeinanderfolgenden, sehr kurzen Helligkeiten, deren Gesamtdauer jedenfalls wohl kürzer ist als die bei Verwendung des Momentverschlusses.

Die nun folgenden Versuche, mit dem elektrischen Funken angestellt, trugen noch immer einen orientirenden Charakter und konnten darum nicht völlig systematisch aufgeführt werden.

Aus den aufgezeichneten Beobachtungen sind nichtsdestoweniger einzelne Punkte der Erwähnung werth.

Ich will diese Ergebnisse hier kurz mittheilen; die meisten werden bei den später zu meldenden systematischen Versuchsreihen noch näher untersucht werden.

#### 1. Das secundäre Bild betreffend.

Dies kurzdauernde ( $\frac{1}{3}$  Secunde), nahezu complementäre Nachbild wurde für mich nicht, wie für BOSSCHA, weniger gut wahrnehmbar, je länger die Belichtung dauerte; im Gegentheil, je mehr ich die Helligkeitsdauer verlängerte, um so heller wurde das secundäre Bild, und um so besser konnte ich es erkennen.

Was die Frage betrifft, ob es positiv oder negativ war, d. h. heller oder dunkler als seine Umgebung, so konnte ich mich hier durchaus allen anderen Untersuchern anschließen mit alleiniger Ausnahme der ersten Mittheilungen von HESS: es war stets heller, sehr erheblich heller als seine Umgebung.

Seine Färbung war nicht immer eine complementäre. Dem Complementären näherte sie sich am meisten bei einem rothen Object, wobei das secundäre Bild stets grün war. Die stärkste Abweichung erhielt ich mit einem blauen Probeobject, da hierbei das secundäre Bild stets hell roth war. Bei den anderen Farben, die ich gebrauchte: Gelb, Grün und Violett waren die Abweichungen stärker als bei dem rothen, jedoch geringer als bei dem blauen Object.



## 2. Das tertiäre Bild betreffend.

Dies dauerte stets, wie bei HESS und BOSSCHA, verschiedene Secunden an. Was seine Intensität angeht, so trafen meine Beobachtungen mit ihren Beschreibungen gut zusammen: es war nämlich wohl etwas schwächer als das secundäre Bild, indessen noch deutlich heller als die Umgebung, also positiv nach der Auffassung BRÜCKE's.

Meine Beobachtungen betreffs der Farbe endlich stimmten durchaus mit denen von HESS überein:

Wenn ich mich nicht zu lange im dunklen Raume aufgehalten hatte und also noch wenig adaptirt war, so war die Farbe des tertiären Bildes stets im ersten Augenblick der des Objectes gleichnamig, um jedoch bald in ein unbestimmtes Grau überzugehen.

Bei längerer Adaptation war ebenso wie bei HESS wenig oder nichts mehr von dieser gleichnamigen Färbung zu entdecken; das Nachbild erschien dann stets schmutzig grau.

In dieser Hinsicht wichen meine Beobachtungen also ebenso sehr von denjenigen BOSSCHA's ab als die früheren von HESS. Es glückte mir jedoch, drei verschiedene Umstände ausfindig zu machen, die das tertiäre Bild mir ebenso wie BOSSCHA farblos oder nur unrein gefärbt erscheinen ließen; diese waren folgende:

1. Wie ich bereits erwähnte: die Dunkeladaptation. Es ist möglich, daß BOSSCHA zu stark adaptirt war, um die gleichnamige Färbung wahrzunehmen.

2. Je schwächer das Licht, um so weniger deutlich ist die Farbe des tertiären Bildes. Soweit ich es verfolgen konnte, war aber BOSSCHA's Funke nicht schwächer als der meinige.

3. Der Abstand des Auges des Beobachters von dem Objecte.

Betrug dieser nur 10 cm, dann war das secundäre Bild immer röthlich oder schmutzig grau; befand mein Auge sich aber in einem Abstand von 40—50 cm, so war die gleichnamige Färbung stets gut wahrnehmbar.

Bei so geringem Abstand blendete das Licht einigermaßen und es traf obendrein einen erheblich größeren Theil der Netzhaut, zwei Umstände, von denen man schon a priori einen Einfluß erwarten darf.

Nun maß der genannte Abstand bei HESS' Beobachtungen ca. 30 cm, während BOSSCHA einen viel geringeren wählte. BOSSCHA giebt in seiner Inauguraldissertation nicht an, wie weit er sich

von dem Object befand; er theilte mir mündlich mit, daß dies nur wenig mehr als 10 cm betrug.

In den eben erwähnten Umständen kann die Ursache für die Abweichungen zwischen HESS und BOSSCHA gelegen sein.

Da der erhebliche Unterschied, der zwischen den Beobachtungen verschiedener Untersucher besteht, vielleicht zum Theil seinen Grund darin hat, daß ihre Farben nicht völlig übereinstimmen, so erschien es wesentlich, statt der bisher gebrauchten Pigmente Spectralfarben zu verwenden.

Auch HESS hatte dies bereits empfunden und darum einen Theil seiner Untersuchungen mit homogenen Farben angestellt.

Um den beabsichtigten Zweck zu erreichen, benutzte ich ein Spectroskop. Als Lichtquelle diente dabei ein SUGG'scher Gasbrenner, während mittelst eines Regulators dafür Sorge getragen wurde, daß die GröÙe der Flamme und also die Lichtstärke annähernd constant war.

An dem Ocularrohr war ein VIERORDT'scher Schieber angebracht. Der Spalt desselben, der sich dicht vor dem Ocular in der Röhre befindet, kann nach Belieben erweitert und verengt werden. Die Weite, die ich wählte, war so genommen, daß der ganze Spalt stets in einer Farbe erleuchtet war. Er mußte zu dem Ende ziemlich schmal gemacht werden, und ich erhielt so ein aufrecht stehendes, sehr längliches, rechteckiges Lichtbildchen.

Es war natürlich wichtig, zu wissen, wie groß der Theil der Netzhaut sei, der so getroffen wurde, d. h. ob und wie weit ungefähr er sich über den gelben Fleck hinaus erstreckte.

Dazu war es erforderlich, die scheinbare GröÙe des Lichtbildchens zu kennen. Diese bestimmte ich mittelst eines mikroskopischen Zeichenapparates (camera lucida) auf folgende Weise. Der Apparat wurde auf dem Ocular des Spectroskops befestigt und nun auf einem kleinen weißen Schirm, den ein Gehülfe festhielt, das Bildchen nachgezeichnet. Dieser kleine Schirm hatte dabei einen Abstand von 20 cm vom Auge.

Das Bild, das ich so wiederum von dem Lichtbildchen erhielt, war 15 mm hoch und 2,5 mm breit. Ein Bildchen von dieser GröÙe in einem Abstand von 20 cm wird unter einem Winkel von ungefähr  $4,5^\circ$  gesehen.

Nun muß ein Object unter einem Winkel von etwa  $2^\circ$  erscheinen, um ganz in das stäbchenfreie Gebiet des gelben Flecks fallen zu können und unter einem Winkel von  $3,3^\circ$  um gänz-

lich innerhalb des Theiles der Retina zu liegen, wo die Function der Zapfen überwiegt.<sup>1</sup>

Vergleichen wir dies mit der Gröfse des von mir verwandten Lichtbildchens, so erhellt, dafs dies stets, auch wenn es genau fixirt wird, zum erheblichen Theil auf diejenige Netzhautpartie fiel, wo auch die Stäbchen deutlich ihre Function ausüben.

Da dies auch bei HESS und BOSSCHA der Fall war, so lassen sich meine Versuche also in dieser Hinsicht mit den ihrigen in Vergleich stellen.

Dadurch, dafs man dem Ocularrohr in Bezug auf das Collimatorrohr eine verschiedene Stellung gab, war die Möglichkeit der Einstellung für verschiedene Farben vorhanden.

Die Wellenlängen, die bei den Versuchen in Anwendung kamen, entsprachen den FRAUNHOFER'schen Linien *C*, *D*, *b*, *F*, *G* und ihrer unmittelbaren Umgebung.

Mit Sonnenlicht wurde bestimmt, welche Stellung das Ocularrohr erhalten mußte, um die Linien gerade in die Mitte des Ocularspaltes zu bringen. Wurde das Spectroskop nun vor die Gasflamme placirt, so konnte ich aus deren Spectrum eine dieser 5 Farben wählen, die mittels des Ocularrohres in die dafür gefundene Stellung gebracht werden mußte.

Die Weite des Collimatorspaltes betrug stets 2 mm; nur für die wenigen Experimente, die ich mit Violett (Linie *G*) anstellte, wurde sie auf 4 mm erhöht, da sonst die Lichtstärke nicht ausreichte.

Für eine kurze Dauer der Helligkeit wurde auf folgende Weise gesorgt: Zwischen dem SUGG-Brenner und dem Collimatorspalt hing ein kleiner Schirm, der an einem kurzen Pendel befestigt war. In diesem Schirm war eine Oeffnung, die dem Licht das Eindringen in die Collimatorröhre für den Augenblick gestattete, in dem das Pendel seinen tiefsten Stand erreicht hatte. Das Pendel konnte an der einen Seite an einem Häkchen aufgehangen werden, von dem man es in dem richtigen Augenblicke hinabfallen lassen konnte; an der anderen Seite wurde es dann durch eine Feder ergriffen, sodafs es nicht zurückschwingen konnte, was dadurch störend würde gewirkt haben, dafs von Neuem Licht zugelassen worden wäre.

---

<sup>1</sup> W. KOSTER GZN., v. GRAEFE'S *Archiv* 41, Abth. 4, 1.



Die Schnelligkeit, mit der das Pendel den tiefsten Punkt passirte, konnte variirt werden durch Veränderung der Höhe, von der es herunterfiel. Zu dem Zwecke brauchte man nur das ebengenannte Häkchen höher oder niedriger zu stellen.

Je höher es angebracht war, um so schneller passirte das Pendel den tiefsten Punkt und um so kürzer war demnach die Belichtung. Um diese letztere zu variiren, wählte ich für meine Versuche den höchsten und den niedrigsten Stand, den ich dem Häkchen geben konnte, sowie den mitten dazwischen gelegenen.

Die so erhaltenen Oeffnungszeiten betrugen  $\frac{1}{60}$ ,  $\frac{1}{30}$  und  $\frac{1}{15}$  Sec., was durch Anwendung der graphischen Methode bestimmt wurde: an dem Pendel war nämlich ein berufstes Papier angebracht, auf dem eine schwingende Stimmgabel schrieb, derweil das Pendel fiel. Aus der so erhaltenen Curve konnte die Schnelligkeit der Bewegung berechnet werden, und aus dieser die Zeit, die nothwendig war, um die Oeffnung im Schirm des Pendels passiren zu lassen, d. i. also die Helligkeitsdauer.

Mit diesen 3 Helligkeitszeiten wurden die ersten Versuchsreihen gemacht.

Um eine Fixation zu ermöglichen, brachte ich eine schwache Lichtquelle so an, daß die von ihr ausgehenden Strahlen auf diejenige Fläche des Spectroskopprisma fielen, welche dem Ocularrohr zugekehrt ist, die Fläche also, wo das zerstreute Lichtbündel das Prisma verläßt.

Ich wandte stets einen äußerst schwachen Lichtschimmer an, so schwach, daß er nur mit Mühe wahrzunehmen war.

Keine anderen Lichtstrahlen konnten zum Auge des Untersuchers gelangen.

Die farbigen Lichter wurden verwandt in ihrer relativen Intensität, wie sie im Spectrum einer Gasflamme vorkamen. Es ist darauf zu achten, daß dann das rothgelbe Licht am intensivsten ist, dann folgt das gelbe, das grüne, das rothe und das blaue, vom violetten nicht zu sprechen.

Zu Beginn wurden einige Versuche zur Orientirung vorgenommen, um die neue Versuchsanordnung kennen und die Erscheinung damit beobachten zu lernen. Die aus diesen anfänglichen Versuchen erhaltenen Resultate wurden durch die später angestellten systematischen Versuchsreihen alle bestätigt und brauchen deshalb nicht gesondert aufgeführt zu werden.

An erster Stelle wollte ich sogleich den Einfluß der Helligkeitsdauer unterhalb eines bestimmten Maximums, nämlich unter  $\frac{1}{15}$  Sec. verfolgen.

Hierzu wurden die 3 oben genannten Helligkeitszeiten, nämlich  $\frac{1}{60}$ ,  $\frac{1}{30}$  und  $\frac{1}{15}$  Sec. angewandt.

Mit jeder von ihnen wurde für jede Farbe eine Reihe von 10 Versuchen vorgenommen, insgesamt also 15 Reihen, jede zu 10 Versuchen. Alle diese Experimente geschahen mit für das diffuse Tageslicht adaptirtem Auge (nach einem Aufenthalt im Dunkeln von etwa 1 Minute). Nach jedem Versuch bewegte ich mich wieder 5 Minuten im diffusen Tageslicht.

Ich kann mich darauf beschränken, die Ergebnisse aller dieser Untersuchungen in 3 zusammenfassenden Tabellen wiederzugeben.

Die hier abgedruckten Tabellen sind von gleicher Art, wie die ausführlicheren, in denen die Resultate während der Versuche eingetragen wurden: sie setzen sich zusammen aus 7 Colonnen für die 7 Phasen, aus denen das ganze Phänomen bestehen kann. Allerdings sind nicht immer alle diese Phasen wahrzunehmen, sie sind aber dennoch alle zu ihrer Zeit wirklich gesehen und beschrieben worden, wenn auch nicht alle zugleich bei einem einzelnen Versuch.

Diese 7 Phasen sind:

1. das primäre Bild, das gefärbte Lichtbild selbst;
2. ein dunkles Intervall;
3. das secundäre Bild, oder das PURKINJE'sche Nachbild;
4. eine dunkle Phase;
5. das tertiäre Bild, das positiv gleichnamige, das einige Secunden andauert;
6. ein dunkles Intervall;
7. ein wirkliches negatives Nachbild, also dunkel, von einem hellen Hof umgeben, und complementär gefärbt; dasselbe, das man bei einer längeren Helligkeitsdauer viel bequemer zu sehen bekommt. Dies wurde bei so kurzen Helligkeiten allein von HESS hier und da angegeben.

Tabelle I.

Expositionsdauer  $\frac{1}{100}$  Sec. Adaptation für diffuses Tageslicht, 5 Min. Pause zwischen den einzelnen Versuchen.

Primäres Bild	Dunkles Intervall	Secundäres Bild	Dunkles Intervall	Tertiäres Bild	Dunkles Intervall	Quaternäres Bild (negativ)
Roth (Linie C)	fehlt	?	ca. $\frac{1}{2}$ Sec.	purpurfarben, 1 bis 2 Sec.	fehlt	fehlt
Gelb (Linie D)	fehlt	unsicher, ein einzelnes Mal violett	ca. $\frac{1}{2}$ Sec.	gewöhnlich röthlich gelb, 1 bis 2 Sec.	fehlt	fehlt
Grün (Linie b)	unsicher	blauroth <sup>1</sup>	ca. $\frac{1}{2}$ Sec.	grünlich grau, ca. 2 Sec.	fehlt	fehlt
Blau (Linie F)	unsicher	blafs rothblau	ca. $\frac{1}{2}$ Sec.	blaugrau, 1 bis 2 Sec.	fehlt	fehlt
Violett (Linie G) (Collimatorsalt 4 mm)	fehlt	orange	ca. $\frac{1}{2}$ Sec.	undeutlich, grau	fehlt	fehlt

Man hatte den Eindruck, daß das secundäre Bild stets ebenso lange anhielt als das primäre. Die anderen angegebenen Zahlen sind nur grobe Schätzungen.

<sup>1</sup> Um die Farbentöne anzudeuten, die den Uebergang von Purpurn zu Violett bilden, gebrauche ich die folgenden Bezeichnungen: purpurfarben, blauroth, rothblau, violett.



Tabelle II.

Expositionsdauer  $\frac{1}{30}$  Sec. Adaptation für diffuses Tageslicht, 5 Min. Pause zwischen den einzelnen Versuchen.

Primäres Bild	Dunkles Intervall	Secundäres Bild	Dunkles Intervall	Tertiäres Bild	Dunkles Intervall	Quaterinäres Bild (negativ)
Roth (Linie C)	fehlt	?	ca. $\frac{1}{2}$ Sec.	purpurn, 1 bis 2 Sec.	manchmal?	manchmal?
Gelb (Linie D)	fehlt	rothblau (unsicher)	ca. $\frac{1}{3}$ Sec.	gewöhnlich zuerst deutlich gelbroth, dann schmutzig gefärbt, ca. 2 Sec.	fehlt	fehlt
Grün (Linie b)	fehlt	blauroth	ca. $\frac{1}{3}$ Sec.	grün, 2 bis 3 Sec.	manchmal?	zuweilen dunkel mit hellem Hof
Blau (Linie F)	?	blafs rothblau (rosa)	ca. $\frac{1}{2}$ Sec.	meist zuerst schön blau, dann grau, ca. 2 Sec.	fehlt	fehlt
Violett (Linie G) (Collimatorsplatt 4 mm)	?	orange	wie lange?	violett, kurz und undeutlich	fehlt	fehlt

Dauer des secundären Bildes ungefähr gleich der des primären.

Tabelle III.

Expositionsdauer  $\frac{1}{15}$  Sec. Adaptation für diffuses Tageslicht, 5 Min. Pause zwischen den einzelnen Versuchen.

Primäres Bild	Dunkles Intervall	Secundäres Bild	Dunkles Intervall	Tertiäres Bild.	Dunkles Intervall	Quaternäres Bild (negativ)
Roth (Linie C)	?	gelbgrün oft unsicher	ca. $\frac{1}{2}$ Sec.	zuerst scharf und blau-roth, dann grau, 2 bis 3 Sec.	fehlt	fehlt
Gelb (Linie D)	?	rothblau	kürzer als $\frac{1}{3}$ Sec., fehlt manchmal	röthlich gelb od. manchmal grau, 2 bis 3 Sec.	fehlt	fehlt
Grün (Linie b)	?	blauroth	kurz	zuerst schön grün, dann schmutzig grau, 2 bis 3 Sec.	fehlt	fehlt
Blau (Linie F)	fehlt	blafs rothblau	$\frac{1}{3}$ Sec.	zuerst schön blau, dann schmutzig grau, ca. 2 Sec.	fehlt	fehlt
Violett (Linie G) (Collimatorspalt 4 mm)	fehlt	orange, oft unsicher	?	manchmal als ein schwacher Schimmer	fehlt	fehlt

Das secundäre Bild halt ungefähr ebenso lange an als das primäre.

Das tertiäre Bild ist meist zuerst gleichnamig und sehr scharf begrenzt, dann grau und weniger scharf umrandet.

Diese Tabellen lehren, daß für alle Phasen der Erscheinung die längere Helligkeitsdauer von  $\frac{1}{15}$  Sec. viel günstiger ist, sowohl das secundäre wie das tertiäre Bild werden hierbei für alle Farben viel besser wahrgenommen.

Das secundäre Bild (PUBKINJE's Nachbild) ist lange nicht immer deutlich complementär. Am meisten nähert es sich einem solchen, wenn das primäre Bild roth ist. Hierbei ist es viel schwieriger wahrzunehmen als bei irgend einer anderen Farbe; es folgt verblüffend schnell auf das primäre Bild und dauert erstaunlich kurze Zeit. Bei einer Belichtungszeit unter  $\frac{1}{15}$  Sec. wurde es kein einziges Mal mit Sicherheit beobachtet. Auch bei einer Expositionsdauer von  $\frac{1}{15}$  Sec. entgeht es noch häufig der Wahrnehmung, aber dabei wurde es doch einige Male unzweifelhaft gesehen und mit Sicherheit als Grün erkannt.

Bei den anderen Farben geschieht die Wahrnehmung dieses Nachbildes mit viel größerer Bestimmtheit und ich erkannte es dann auch bereits manchmal bei  $\frac{1}{60}$  Sec. Helligkeitsdauer.

Auf das deutliche Sichtbarwerden des tertiären Bildes ist eine längere Helligkeitsdauer von noch größerem Einfluß. Vor Allem, wenn diese  $\frac{1}{15}$  Sec. betrug, wurde mit Sicherheit constatirt, daß das tertiäre Bild im Beginn die gleichnamige Farbe zeigt, diese jedoch schnell verliert und dann noch einige Augenblicke als ein schmutzig grau gefärbtes Bildchen bestehen bleibt. Zu einem Theil der Versuche war es sehr frappirend, daß das tertiäre Bild auf den ersten Augenblick, während es deutlich gleichnamig gefärbt war, viel schärfer begrenzt erschien als später, bei nur mehr grauer Färbung. Ganz im Anfang bildete es ein scharf begrenztes kleines Rechteck, darauf einen weniger deutlich umschriebenen, länglichen, grauen Fleck.

Darauf suchte ich zu erforschen, inwieweit die Dunkeladaptation diese Nachbilder beeinflusst bei einer so kurzen Belichtung.

Zu dem Zwecke wurden für jede Farbe Reihen von 6 Versuchen angestellt, und zwar so, daß wir jedesmal 3 Versuche mit dem rechten und 3 mit dem linken Auge vornahmen.

Vor dem Beginn einer jeden Versuchsreihe hielt ich mich während 20 Min. in absoluter Dunkelheit auf, während ich nach jedem Experiment wieder 5 Min. wartete und mich adaptirte, bevor das folgende in Angriff genommen wurde.



Bei diesen Versuchen wurden Helligkeitszeiten von  $\frac{1}{60}$  und  $\frac{1}{15}$  Sec. verwandt; da die Resultate in beiden Fällen völlig übereinstimmten, wie nach den obigen Ergebnissen auch zu erwarten war, so werden sie hier nur in einer einzigen Tabelle wiedergegeben.

(Siese nebenstehende Tabelle IV.)

Aus dieser Tabelle geht hervor, daß das Phänomen durch die Dunkeladaptation keine eingreifende Veränderung erfährt, aber es giebt dabei doch einzelne Punkte, die der Mühe werth sind, noch eben besprochen zu werden.

Zunächst war für sämtliche Farben das secundäre Bild besser wahrnehmbar als bei Tageslichtadaptation; selbst bei einem rothen primären Bild war es stets gut zu erkennen, auch wenn die Helligkeitsdauer nur  $\frac{1}{60}$  Sec. betrug.

Ganz anders war es jedoch mit dem tertiären Bild bestellt; auf dieses hat die Adaptation einen sehr verschiedenen Einfluß je nach der Farbe des primären Bildes.

War dies letztere roth oder gelb, so war das tertiäre Bild gewöhnlich noch viel besser gefärbt und deutlicher wahrzunehmen als bei Adaptation für Tageslicht. War jedoch das primäre Bild grün oder blau, so war das tertiäre undeutlich, verschwommen, seine Farbe nicht gut zu erkennen, kurz, es erschien viel weniger schön als bei der Adaptation für diffuses Tageslicht.

Während also der Aufenthalt im Dunklen das secundäre Bild bei allen Farben entschieden günstig beeinflusste, wurde das tertiäre bei zwei Farben (Roth und Gelb) deutlicher, bei zwei anderen (Grün und Blau) viel weniger deutlich. Dieser unversehene Unterschied war wirklich sehr auffallend.

Das tertiäre Bild des sehr schwachen Violett war, sowohl bei der Adaptation für Tageslicht als für die Dunkelheit, undeutlich und fehlte öfters überhaupt. Dasselbe eignet sich also nicht gut zum Vergleich dieser beiden Zustände des Auges.

Noch ein anderer Punkt schien mir einer genaueren Untersuchung werth zu sein, nämlich wie der Verlauf der Erscheinung sich bei einer längeren Helligkeitsdauer gestalten würde.

Hierzu wurde ein Elektromagnet in Anwendung gezogen, an dessen Hämmerchen eine Schnur befestigt war, welche wiederum an einem um eine horizontale Axe beweglichen Hebel zog. An diesem Hebel war ein kleiner Schirm angebracht, der, wenn er herunterhing, den Lichteinfall in die Collimatorröhre verhinderte,

Tabelle IV.

Resultate, die bei einer Expositionsdauer von  $\frac{1}{30}$  und  $\frac{1}{15}$  Sec. und bei Dunkeladaptation (20 Min.) sich ergaben.

Primäres Bild	Dunkle Phase	Secundäres Bild	Dunkle Phase	Tertiäres Bild	Dunkle Phase	Quaternäres Bild (negativ)
Roth (Linie C)	ja	gelbgrün, stets schön	ca. $\frac{1}{3}$ Sec.	stets schön purpurroth ca. 2 Sec.	fehlt gewöhnlich	einmal olivgrün mit hellem Rand
Gelb (Linie D)	?	rothblau	ca. $\frac{1}{3}$ Sec.	röthlich gelb ca. 3 Sec.	fehlt	fehlt
Grün (Linie b)	?	blauroth	ca. $\frac{1}{3}$ Sec.	grau, nicht sehr deutlich	fehlt	fehlt
Blau (Linie F)	ja?	blafs purpurfarben, sehr schön	?	nie deutlich, oft sogar sehr undeutlich	fehlt	fehlt
Violett (Linie G)	?	orange gelb	?	unsicher	fehlt	fehlt

(Collimatorsalt 4 mm)

das Licht aber wohl durchliefs, sobald er durch das Hämmerchen des Elektromagneten nach oben gezogen wurde. Mittels eines Secundenpendels konnte die Zeit, während welcher der kleine Schirm in die Höhe gehoben war, regulirt werden. Durch dieses Pendel nämlich wurde jede Secunde eine metallene Scheibe ein Stückchen fortbewegt, in der kleine kupferne Federn angebracht waren, die bei Bewegung der Scheibe durch ein Quecksilber-näpfchen gingen. Die Länge dieses Quecksilbernäpfchens konnte man nun so wählen, daß das Pendel 1, 2 oder 4 Sec. nöthig hatte, um eine solche kleine Feder durch das Quecksilber zu führen. Solange die Feder sich in dem Quecksilber befand, ging der Strom fortgesetzt durch den Elektromagneten und der kleine Schirm wurde so emporgehoben.

Im Uebrigen war die Einrichtung ganz die gleiche wie bei allen früheren Experimenten.

Die drei folgenden zusammenfassenden Tabellen geben eine Uebersicht über die Resultate dieser Versuche.

(Siehe die Tabellen V, VI u. VII.)

Außer wenn das primäre Bild roth war, wurde das secundäre um so schöner und besser wahrnehmbar, je länger die Helligkeit andauerte.

Das tertiäre Bild, d. h. das positive, gleichnamig gefärbte, ist bei einer Helligkeitsdauer von 1 Sec. noch recht gut zu erkennen, allein es hält dann erheblich kürzere Zeit an, als bei mehr momentanen Lichteindrücken; bei einer Helligkeit von 2 Sec. Dauer ist nur dann und wann etwas davon zu sehen, und bei einer solchen von 4 Sec. wird es nicht mehr erblickt.

Je länger die Belichtung währt, um so besser wird das quaternäre Bild wahrgenommen, das stets negativ und complementär erscheint.

Vergrößert man nun die Helligkeitsdauer noch mehr, so bleibt die Erscheinung dieselbe, wie sie bei 4 Secunden bereits ist; nur bleibt das letzte, negative Nachbild länger bestehen und kehrt einige Male wieder. Dies negative Nachbild ist dann nicht mehr ein quaternäres, sondern ein tertiäres Bild geworden, da das positiv gleichnamige bei einer so langen Dauer der Helligkeit wegfällt. Wir haben hier also einen Fall, bei dem die etwas allzu neutrale Bezeichnungsweise BOSSCHA's Verwirrung anrichten könnte.



Tabelle V.

Expositionsdauer 1 Sec. (Mit jeder Farbe wurden 10 Experimente angestellt.)

Primäres Bild	Dunkle Phase	Secundäres Bild	Dunkle Phase	Tertiäres Bild	Dunkle Phase	Quaternäres Bild
Roth (Linie C)	?	hellgrün	manchmal	einige Male deutlich purpurfarben, sehr kurz, ca. $\frac{1}{3}$ Sec.	ca. $\frac{1}{3}$ Sec.	olivgrün mit hellen, zu- weilen rosa Rändern; einige Secunden
Gelb (Linie D)	?	rothblau	?	bisweilen ein wenig Gelbes	?	schwarz mit hellgelbem Randchen; einige Secunden
Grün (Linie b)	?	blauroth (sehr gesättigt)	kurz	grün oder grünblau, sehr kurz	ja	schwarz m. hellem Rand, der zuweilen roth war; einige Secunden
Blau (Linie F)	?	purpurfarben (sehr gesättigt)	kurz	einige Male blau, sehr kurz	kurz	schwarz, gewöhnlich mit einem schwach hellen Randchen; einige Secunden

Das secundäre Bild war stets deutlicher und dauerte etwas länger als dies jemals bei kurzer Belichtung der Fall war.

Tabelle VI.

Expositionsdauer 2 Sec. (Mit jeder Farbe wurden 10 Experimente angestellt.)

Primäres Bild	Dunkle Phase	Secundäres Bild	Dunkle Phase	Tertiäres Bild	Dunkle Phase	Quaternäres Bild
Roth (Linie C)	?	grün (recht deutlich)	kurz	einige Male, sehr kurz, roth	kurz	dunkelgrün mit breiten rosa Rändern; einige Secunden
Grün (Linie D)	?	rothblau (sehr deutlich)	?	nichts	ca. 1 Sec.	schwarz (einige Male dunkelviolett) mit hell- gelben Rändern; einige Secunden
Gelb (Linie b)	?	zuerst purpur- farben, dann für einen Augenblick violett	?	zuweilen, doch unsicher	kurz	schwarz (zuweilen dunkel rothblau) mit schwach hellem (zu- weilen gelbgrünem) Rand; verschiedene Secunden
Blau (Linie F)	?	purpurn (sehr gesättigt)	kurz	einige Male sehr kurz graublau	kurz ca. $\frac{1}{3}$ Sec.	schwarz in kleinem hell- grauen Felde; einige Secunden

Tabelle VII.

Expositionsdauer 4 Sec. (4 Experimente mit jeder Farbe angestellt.)

Primäres Bild	Dunkle Phase	Secundäres Bild	Dunkle Phase	Tertiäres Bild	Dunkle Phase	Quaternäres Bild
Roth (Linie C)	?	hellgrün, nicht sehr deutlich	fehlt	?	?	dunkel blaulich grün in sehr hellem, gelb- rothem Feld; verschie- dene Secunden
Gelb (Linie D)	?	rothblau (sehr deutlich)	?	?	?	violett in hell gelbem Feld, noch einmal zu- rückkehrend
Grün (Linie b)	?	blauröth (sehr deutlich)	?	?	?	dunkel violett in hellem gelbgrünem Feld; ver- schiedene Secunden
Blau (Linie F)	?	purpurroth (sehr gesättigt)	?	?	?	schwarz in kleinem grauen Feld; einige Secunden

Endlich machten die Arbeiten von v. KRIES es nöthig, die Untersuchung noch nach einer weiteren Richtung auszudehnen. Das Lichtbild mußte nämlich auch noch so klein gemacht werden, daß es bei Fixation allein das Centrum des gelben Fleckes traf, also eine Partie der Netzhaut, wo Stäbchen gänzlich fehlen.

Zu diesem Zwecke wurde der Collimatorsplatt des Spectroscops um soviel erniedrigt, daß das Lichtbildchen ebenso hoch als breit wurde. Dies fiel also auf ein Netzhautgebiet von der gleichen Ausdehnung, wie es durch ein quadratisches Object von  $2\frac{1}{2}$  mm Seite, in einem Abstand von 20 cm betrachtet, getroffen würde. Solch ein Object erscheint unter einem Winkel von etwa  $0,8^\circ$ .

Bei den hiermit zum Vergleiche des gelben Flecks mit der daran angrenzenden Netzhautpartie angestellten Versuchen, wurde zuerst eine Helligkeitsdauer von 1 Sec. benutzt.

Damit das Bildchen gerade neben den gelben Fleck fiel, brachte ich es in die oberste Hälfte des Ocularspaltes und fixirte das untere Ende dieses. Der scheinbare Abstand von Fixationspunkt und Lichtbild entsprach dann einer Länge von 1 cm in einem Abstand von 20 cm gesehen.

Da bei diesen Versuchen merkwürdiger Weise vom tertiären und quaternären Bild nichts wahrgenommen wurde, so beschränken sich die erhaltenen Resultate lediglich auf das secundäre Bild. Sie sind sehr interessant, wie aus einer Nebeneinanderstellung derselben hervorgeht:

Primäres Bild (1 Sec.)	Secundäres Bild	
	innerhalb	aufserhalb
	des gelben Flecks	
Roth	grün	purpurfarben?
Gelb	fehlt	hell rothblau
Grün	purpurroth	rothblau
Blau	fehlt	prächtig purpurfarben
Violett	fehlt	hell grüngelb

Jedes dieser Resultate wurde für eine Reihe von 10 Versuchen in jedem derselben bestätigt. Dabei sind folgende Beobachtungen zu erwähnen:



Das secundäre Bild, das bei Roth und bei Grün wahrgenommen wurde, wenn man sie direct fixirte, dauerte erheblich kürzere Zeit und war in Folge dessen schwieriger zu sehen als die secundären Bilder, die bei allen Farben durch indirecte Betrachtung erhalten werden konnten.

Hinter das purpurfarbene secundäre Bild des rothen Lichts, aufserhalb des gelben Flecks setze ich ein Fragezeichen, da ich bezüglich seiner nicht ganz sicher bin.

Endlich war das Nachbildchen von Grün bei indirectem Sehen deutlich verschieden von dem, was auf dem gelben Fleck entworfen worden. Das letztere erschien purpurroth, das erstere rothblau, also sicher weniger rein complementär, und dies dauerte aufserdem erheblich länger an.

Diese Untersuchungen bestätigen also in erster Linie durchaus die Resultate von v. KRIES, was die Verschiedenheit zwischen gelbem Fleck und seiner nächsten Umgebung angeht. Gleich ihm constatire ich, dafs aufserhalb des gelben Flecks ein schönes, deutlich wahrnehmbares secundäres Bild zu erhalten ist, welches im Centrum fehlt.

Zweitens finde ich, dafs bei zwei Farben, Grün und Roth, auch im gelben Fleck ein derartiges Nachbild auftritt, das aber in diesen beiden Fällen viel deutlicher complementär ist, als die Nachbilder, die man durch excentrische Fixation erhält und das weiterhin in beiden Fällen viel kürzere Zeit dauerte und dadurch sicher viel leichter der Wahrnehmung entgehen kann.

Interessant war es nun, zu untersuchen, wie es mit dem tertiären Bilde im Bereich des gelben Flecks und aufserhalb desselben bestellt war. Zu dem Ende mußte mit einer Helligkeitsdauer von  $\frac{1}{15}$  Sec. experimentirt werden, da gemäßs den früheren Versuchen hierbei das tertiäre Bild am besten zu sehen ist.

Ich machte für jede Farbe fünf Aufnahmen mit und fünf Aufnahmen ohne Fixation; alle Versuche stimmten darin überein, dafs bei genauer directer Betrachtung niemals ein tertiäres Bild erschien, ebensowenig wie ein secundäres, derweil bei excentrischer Betrachtung des Lichtbildchens stets ein schwaches, undeutliches Fleckchen sichtbar war, entsprechend dem tertiären Bild, doch nie sehr deutlich, nie scharf begrenzt; nur selten war an ihm eine Färbung zu erkennen, gleichnamig mit der Farbe des primären Bildes. Alle diese Versuche wurden mit einer gröfseren Lichtstärke (AUER'sches Gasglühlicht) wiederholt und

zwar mit vollkommen demselben Resultate: bei Fixation nie ein tertiäres Bild, im indirecten Sehen stets ein solches, das aber hier, ebenso wie bei der schwächeren Beleuchtung, weniger scharf begrenzt war, kürzere Zeit dauerte und vor Allem viel weniger deutlich gefärbt erschien als bei dem früher benutzten gröfseren Lichtbildchen. Eine Uebersicht über alle diese Resultate giebt die folgende Tabelle:

Tabelle VIII.

Expositionsdauer  $\frac{1}{15}$  Sec.

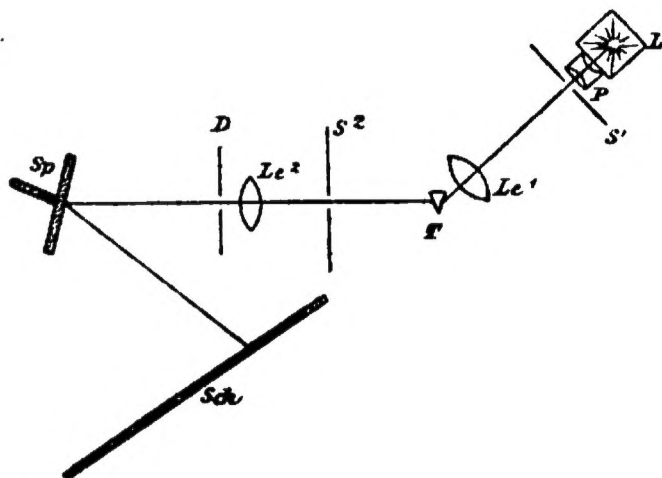
Primäres Bild		Dunkle Phase	Secundäres Bild		Dunkle Phase	Tertiäres Bild
Roth	Centr.	—	—	—	—	—
	Excentr.	—	purpurfarben?	—	—	schwach
Gelb	Centr.	—	—	—	—	—
	Excentr.	—	hellpurpurfarben	—	—	röthliches Fleckchen
Grün	Centr.	—	—	—	—	—
	Excentr.	—	hell rosa	—	—	schwaches, schmutziges Fleckchen
Blau	Centr.	—	—	—	—	—
	Excentr.	—	purpurfarben	ja	—	grau, zuweilen blau, 1 bis 2 Secunden

Violett gab kein einziges Nachbild; vermuthlich ist es bei so kurzer Lichteinwirkung und so kleinem Bildchen zu schwach hierzu.

## § 2. Beobachtungen, angestellt mit einer Versuchsanordnung gleich BIDWELL.

Um die Versuche BIDWELL's und vor Allem die interessanten Resultate von v. KRIES nachzuprüfen, wandte ich die Methode des erstgenannten Autors an. Die v. KRIES'sche weicht von ihr ja nur in unwesentlichen Punkten ab.

Soweit sich aus BIDWELL's kurzer Beschreibung ersehen läßt, glich meine Versuchsanordnung vollständig der seinigen. Eine schematische Darstellung derselben giebt die Figur:



$L$  ist die Lichtquelle, eine Zirkonlampe, die mit gewöhnlichem Sauerstoff und Leuchtgas gespeist wurde.  $P$  ist ein Projectionssystem, bestehend aus 2 Convexlinsen von 8  $D$ ,  $S^1$  ein Schirm mit einem Spalt, der nach Belieben verengert und erweitert werden kann. Die Lampe ist zu dem Projectionssystem  $P$  so gestellt, daß die Lichtstrahlen sich zwischen  $S^1$  und  $Le^1$  vereinigen und also wieder divergirend auf die Convexlinse  $Le^1$  (6  $D$ ) fallen. Die letztere entwirft von dem Spalt in  $S^1$  ein Bild auf dem Schirm  $S^2$ , das jedoch zu einem Spectrum auseinandergezogen ist, da das Lichtbündel inzwischen durch das Schwefelkohlenstoffprisma  $Pr$  zerstreut wurde. Mittels einer verstellbaren Oeffnung in dem Schirm  $S^2$  ist es möglich, die Farbe, mit der man experimentiren will, allein passiren zu lassen.

Das hier durchgelassene homogene Lichtbündel fällt, natürlich von Neuem divergirend, auf die positive Linse  $Le^2$  (4  $D$ ), die von der Oeffnung in  $S^2$  mit Hülfe des Spiegels  $Sp$  ein scharfes Bild auf dem weißen Schirm entwirft. Den Spiegel kann man mehr oder weniger schief zu seiner Axe stellen, so daß, wenn diese Axe gedreht wird, das Lichtbildchen auf dem Schirm  $Sch$  einen Kreis durchläuft.  $D$  ist ein Diaphragma, das dazu dient, soviel als möglich, überflüssige Lichtstrahlen abzublenzen.

Bei einer näheren spectroskopischen Untersuchung der verschiedenen Farben, die ausgeschnitten wurden, ergab sich, daß man mit der beschriebenen Einrichtung von Roth, Grün, Blau und Violett homogene Bündel wohl erhalten konnte. Gelb hin-

gegen war stets ein Gemengsel von Roth, Gelb und Grün. Wie sehr auch der Spalt in  $S^1$  verengert und die Oeffnung in  $S^2$  verkleinert wurde, es glückte nicht, auch nur annähernd ein homogenes Gelb zu bekommen.

Da BIDWELL's Versuchsanordnung wahrscheinlich ganz dieselbe war, so ist es ihm vermuthlich ebenfalls nicht gelungen, ein reines Gelb zu isoliren. Es ist übrigens eine bekannte Thatsache<sup>1</sup>, daß es beinahe unmöglich ist, dies aus dem Spectrum zu erhalten.

In Hinsicht darauf benutzte ich, ebenso wie BIDWELL, bei meinen Versuchen an Stelle von Gelb die beiden angrenzenden Farben, orangegelb und grüngelb.

Als Fixationspunkt diente anfänglich ein Tüpfelchen einer phosphorescirenden Farbe, das auf dem Schirm *Sch* angebracht war. Bei den späteren, systematischen Versuchen, die in den unten folgenden Tabellen wiedergegeben sind, wurde im Anschluß an das Vorgehen von v. KRIES ein schärferer und hellerer Fixationspunkt gewählt. Ich machte nämlich in den Schirm eine kleine kreuzförmige Oeffnung und brachte hinter diese ein kleines schwaches Licht. Auf diese Weise war es viel leichter, die Fixation inne zu halten als es mit Hülfe der äußerst schwach leuchtenden phosphorescirenden Farbe möglich ist.

Schon bei den allerersten Versuchen wurde das durch BIDWELL und v. KRIES beschriebene nachlaufende Bild sehr deutlich wahrgenommen.

Es folgte dem primären Lichtbild bei seinem Kreislauf als ein echter Satellit. Diese Bezeichnung werde ich in der Folge für dasselbe gebrauchen.

Die ganze Erscheinung liefs aber noch etwas weiteres erkennen. Die aufeinanderfolgenden Phasen mögen hier beschrieben werden:

Das Lichtbildchen<sup>2</sup> war stets erheblich verlängert; es erhielt bei seiner Bewegung immer, wie wir es für die Folge nennen

---

<sup>1</sup> Dr. W. A. NAGEL, Ueber flüssige Strahlenfilter. *Biol. Centralbl.* 18 (17), 653.

<sup>2</sup> Gewöhnlich war dies länglich viereckig; ein Theil der Versuche wurde nach Vorgang von BIDWELL und v. KRIES mit einem runden Bildchen angestellt, doch es zeigte sich, daß das Phänomen mit einem Viereck viel deutlicher wahrnehmbar war, und wir nahmen darum von dem runden Bildchen Abstand.



werden, einen kurzen Schweif, der sich unmittelbar an dasselbe anschloß, also mit dem primären Bildchen zusammen ein einziges leuchtendes Ganzes darstellte. Dieser Schweif war durchschnittlich 2mal so lang als das primäre Bild selbst. Während letzteres ungefähr  $3^{\circ}$  des Kreises einnahm, bildeten also das Bild mitsammt dem kurzen Schweif einen Bogen von etwa  $9^{\circ}$ .

Die Färbung dieses Schweifes war sehr verschieden. In vielen Fällen war sie dem primären Bild völlig gleich, sodaß unmöglich eine Grenze zwischen beiden zu sehen war; in anderen Fällen hingegen erschien der Schweif weiß, zuweilen selbst glänzend weiß und sogar heller als das primäre Bild. Dann stimmte er genau mit der Beschreibung überein, die v. KRIES von der hellen weißen Verlängerung des Bildes giebt, die er wahrnahm, wenn er sehr stark dunkeladaptirt war.

Auf diesen kurzen Schweif folgte ein dunkles Intervall, das im Mittel ungefähr  $10\text{--}15^{\circ}$  des Kreises einnahm. Bei einer Anzahl von Beobachtungen war diese Phase exquisit schwarz und stach als solche scharf gegen die Umgebung ab, die doch ganz dunkel war.

Diesem dunklen Zwischenraum folgte dann der Satellit, er hatte gewöhnlich deutlich dieselbe Form wie das primäre Bild und war ungefähr ebenso groß. Er war nicht immer gleich deutlich zu erkennen, was, wie es schien, vornehmlich von dem Zustand des Auges abhing. Dies wird aus den unten folgenden Tabellen noch des Näheren hervorgehen.

Während der kurze Schweif bei allen Farben beobachtet wurde, fehlte der Satellit stets bei Roth.<sup>1</sup> Bei den übrigen Farben konnte er unter günstigen Umständen immer wieder gesehen werden. Seine Farbe war bei

Orange: sehr dunkelgrün, oder es fehlte eine Färbung;

Grün: gesättigt grünblau;

Blau: grau mit einem Stich ins Rothblau;

Violett: grau;

Violett: grau mit einem Stich ins Grünblau.

---

<sup>1</sup> Bei späteren Versuchen, den letzten, die ich angestellt habe, bemerkte ich wiederholt hinter dem fast weißen kurzen Schweif des Roth noch einen dunkel grünen Schein, der sich unmittelbar daran anschloß und, wie mir schien, in keiner Weise mit einem Satelliten zu vergleichen

Nach dem Satellit erschien wiederum ein dunkles Intervall, gewöhnlich in der Ausdehnung von ungefähr  $50^\circ$ , nie schwärzer als die Umgebung. Dahinter kam dann wieder ein sehr langer, schwach leuchtender Schweif.

Die Länge desselben betrug gewöhnlich etwa  $360^\circ$  oder selbst noch mehr, wie deutlich wurde, wenn man ein wenig von der ursprünglichen Fixation abwich; der Schweif erschien dann als eine Spirale. Da der ganze Umlauf in ein paar Secunden vollendet wurde, dauerte dies Nachbild also auch nur einige Secunden. Es war schwach, viel schwächer als der kurze Schweif oder der Satellit, aber doch noch deutlich heller als seine Umgebung, also positiv nach BRÜCKE's Bezeichnung. Scharf begrenzt war es niemals, gewöhnlich schwach gefärbt; diese Färbung varrierte in den meisten Fällen zwischen Blauviolett und Rothviolett.

Aus dem oben Gesagten geht hervor, daß bei der ganzen Erscheinung 6 Phasen wahrzunehmen sind:

1. Primäres Bild ca.  $3^\circ$ ;
2. Kurzer Schweif ca.  $6^\circ$ , entweder gleichnamig gefärbt, oder mehr oder weniger weiß;
3. Dunkles Intervall 10—15", oft pechschwarz;
4. Satellit ca.  $3^\circ$ , je nach der Farbe des primären Bildes verschieden gefärbt, bei Roth stets fehlend;
5. Dunkles Intervall ca.  $50^\circ$ ;
6. Langer Schweif ca.  $360^\circ$ , schwach positiv, meist von einigermaßen violetterm Ton.

Bei dem Studium der Erscheinung, das die eben angeführten Resultate ergab, befand sich der Fixationspunkt in der Mitte des Kreises, den das Lichtbild auf dem Schirm (*Sch Fig.*) durchlief. So ist jene am besten in allen ihren Theilen wahrzunehmen.

Zur Nachprüfung der Mittheilungen von v. KRIES, betreffend die Verschiedenheit zwischen gelbem Fleck und Peripherie, mußte das Lichtbildchen über den Fixationspunkt geführt werden.

Hierbei fanden seine Resultate volle Bestätigung: sowohl der kurze weiße Schweif als auch der Satellit fehlten stets in der Umgebung des Fixationspunktes, d. h. in dem Theile des Ge-

---

war. Ich konnte ihn nie während eines ganzen Kreislaufes wahrnehmen, nur dann und wann einen Augenblick.

sichtsfeldes, der mit der Fovea gesehen wird. Wie auch die Umdrehungsgeschwindigkeit, der Adaptionszustand des Auges etc. variirt wurde, immer ergab sich dasselbe Resultat.

Wenn der kurze Schweif mit dem primären Bild gleichnamig gefärbt war, so war dies nicht der Fall; dann wurde er auch im directen Sehen ebenso deutlich wahrgenommen.

Diese Beobachtungen bestätigten sich so constant wieder bei jeder weiteren Prüfung, daß ich geglaubt habe, bei den später mitzutheilenden systematischen Versuchsreihen hierauf nicht weiter Rücksicht nehmen zu brauchen, um so mehr, als die Tabellen dadurch nur unnöthig complicirt würden.

Es mußte noch dargethan werden, daß jenes Phänomen sein Entstehen nicht dem Einfluß des fixirten objectiven Lichtes auf den gelben Fleck verdankte. Zu diesem Zwecke wurde in einem excentrisch gelegenen Punkt der Bahn des Bildchens ein völlig gleicher Lichtpunkt angebracht, und es zeigte sich, daß dieser mindestens nicht störend auf die Wahrnehmung des kurzen Schweifs und des Satelliten wirkte; beide liefen über diesen excentrischen Lichtpunkt ohne Unterbrechung fort.

Viel schwieriger ist es, zu entscheiden, ob der lange Schweif im directen Sehen fehlt oder nicht. Trotz einer großen Anzahl von Versuchen, in denen ich dies zu eruiren bestrebt war, ist es mir nicht gelungen, darüber Sicherheit zu erhalten. Einmal glaubte ich, eine deutliche Lücke in dem Schweif zu bemerken, dann wieder schien er continuirlich über den Fixirpunkt hin zu laufen.

Wie ich schon sagte, ging aus allen diesen Versuchen hervor, daß die Erscheinung nicht sehr constant ist, vor Allem sind der kurze Schweif und der Satellit nicht immer gleich deutlich und von demselben Farbenton. Folgende Factoren können hierauf Einfluß haben:

1. Die Farbe des primären Bildes;
2. Größere oder geringere Excentricität der Beobachtung;
3. Umlaufgeschwindigkeit des Bildes, d. h. die Dauer der Helligkeit für jeden Theil der Retina;
4. Der Adaptionszustand des Auges;
5. Die Lichtstärke.

Den letztgenannten Punkt konnte ich nicht verfolgen, da ich nur über eine einzige Lichtquelle von genügender Stärke zu verfügen hatte.



Um die anderen Fragen zu beantworten, wurden systematisch Versuchsreihen angestellt, deren Resultate in unten stehenden Tabellen wiedergegeben sind. Für alle 6 Tabellen mas der Abstand des Beobachters vom Fixirpunkt ca. 1 m, und die Gröſse des Bildchens  $1\frac{1}{2} : \frac{3}{4}$  cm. Bei den ersten 3 Reihen betrug der Durchmesser der Kreisbahn, die das Bildchen durchlief, 20 cm, bei den 3 letzten 30 cm.

Zunächst wurden 2 Rotationsgeschwindigkeiten mit einander verglichen, während das Auge für diffuses Tageslicht adaptirt war, dann die Versuche mit Adaptation für schwaches Dämmerlicht wiederholt mit der Umlaufgeschwindigkeit, welche die besten Resultate ergeben hatte.

(Siehe die Tabellen IX—XIV.)

Für die letzten drei Tabellen war die Umdrehungsgeschwindigkeit  $1\frac{1}{2}$  mal so klein gewählt als für die correspondirenden drei ersten, wodurch erreicht wurde, daß die lineare Geschwindigkeit des Bildchens in den Tabellen IX und XII und ebenso in den Tabellen X, XI, XIII und XIV die gleiche Gröſse erhielt.

Unsere Beobachtungen lehren, daß eine Aenderung in der Gröſse der Excentricität und der Umlaufgeschwindigkeit keinen erheblichen Einfluſs besitze; nur lies sich bei einer längeren Bahn und einer geringeren Geschwindigkeit die ganze Erscheinung etwas leichter und deutlicher wahrnehmen.

Ganz anders verhält es sich mit dem Adaptationszustand des Auges. Hatte ich mich eine Viertelstunde lang im Dunkeln oder in äußerst schwachem Dämmerlicht aufgehalten, so wurden alle Phasen der Erscheinung viel deutlicher; vor Allem der Satellit lies sich dann viel besser und bei allen Farben erkennen, stets jedoch Roth ausgenommen. Der kurze Schweif erfuhr außerdem eine qualitative Aenderung; an Stelle einer einfachen, gleichfarbigen Verlängerung des Bildes wurde er weiß oder erschien wenigstens mit sehr viel weiß gemischt. Bei Grün, Blau und Violett wurde er sogar so glänzend weiß, daß er erheblich heller war als das farbige primäre Bild.

Ich wiederholte darauf BIDWELL's Versuch, wobei nicht eine einzelne Farbe aus dem Spectrum ausgeschnitten, sondern auf dem Schirm ein Bild des ganzen Spectrum entworfen wird, etwa 1 cm hoch und 7—8 cm breit.



Tabelle IX. Tageslichtadaptation. — Durchmesser der Umlaufsbahn 20 cm. — Eine Umdrehung in 2 Sec.

Primäres Bild	Kurzer Schweif	Dunkles Intervall	Satellit	Dunkles Intervall	Langer Schweif
Roth	roth	—	—	ca. 50°	blauviolett, etwas schwach
Orangegeb	orangegeb	ca. 15°	grau, nur ab und zu sichtbar	"	deutlich violett
Grüngelb	grüngelb	"	nur ab und zu	"	schwach blauviolett
Grün	grün	"	röthlich grau	"	schwach, blaugrau
Blau	blau	"	sehr schwach, grau	"	schwach, bläulich
Violett	violett	?	?	?	?

Tabelle X. Eine Umdrehung in 4 Sec., im Uebrigen wie in Tabelle IX.

Primäres Bild	Kurzer Schweif	Dunkles Intervall	Satellit	Dunkles Intervall	Langer Schweif
Roth	roth	—	—	ca. 40°	sehr schwach violett
Orangegeb	orangegeb	?	?	"	ziemlich deutlich, röthlich
Grüngelb	grüngelb	?	?	"	schwach, violett
Grün	grün	ca. 10°	grau, ziemlich schwach	"	schwach, blaugrau
Blau	blau	"	röthlich, schwach	"	schwach, mit röthlichem Ton
Violett	violett	"	grau, sehr schwach	?	?

Tabelle XI. Adaptation für schwaches Dämmerlicht, im Uebrigen wie in Tabelle X.

Primäres Bild	Kurzer Schweif	Dunkles Intervall	Satellit	Dunkles Intervall	Langer Schweif
Roth	bläulich weiß	—	—	?	?
Orange gelb	bläulich od. grünlich weiß	?	?	ca. 40°	röthlich, ziemlich deutlich
Grüngelb	kurz, Farbe?	ca. 10°	gesättigt blaugrün	„	deutlich rothviolett
Grün	grauweiß	—	rothblau-grau	„	hellgrau
Blau	grauweiß	—	röthlich grau	„	schwach, röthlich grau
Violett	grau	?	?	?	grau

Tabelle XII. Adaptation für diffuses Tageslicht. — Durchmesser der Umlaufsbahn 30 cm. — Eine Umdrehung in 3 Sec.

Primäres Bild	Kurzer Schweif	Dunkles Intervall	Satellit	Dunkles Intervall	Langer Schweif
Roth	roth	—	—	?	?
Orange gelb	orange gelb	—	—	?	schwach, blauviolett
Grüngelb	grüngelb	ca. 15°	?	ca. 60°	schwach, blauviolett
Grün	grün	„	rothblau-grau	„	schwach, violettgrau
Blau	blau	„	grau, schwach	„	schwach, bläulich
Violett	violett	pechschwarz pechschwarz	nur ab und zu, grau	?	?

Tabelle XIII. Eine Umdrehung in 6 Sec, im Uebrigen wie in Tabelle XII.

Primäres Bild	Kurzer Schweiß	Dunkles Intervall	Satellit	Dunkles Intervall	Langer Schweiß
Roth	roth	—	—	—	—
Orangegeb	orangegeb	schwärzer als die Umgebung	?	ca. 40°	deutlich blau-violett
Grüngelb	grüngelb	schwarz?	ziemlich gesättigt grün	„	grau, mit einem violetten Ton
Grün	grün	schwarz?	rothblau-grau	„	violett
Blau	blau	pechschwarz	grau oder hellrosa	„	sehr schwach
Violett	violett	schwarz	grau?	?	?

Tabelle XIV. Adaptation für schwaches Dämmerlicht, im Uebrigen wie in Tabelle XIII.

Primäres Bild	Kurzer Schweiß	Dunkles Intervall	Satellit	Dunkles Intervall	Langer Schweiß
Roth	weiss mit einem Stich ins grünblaue	—	—	?	schwach, blau-violett
Orangegeb	weiss	ca. 5°	gesättigt grün	ca 40°	schön, violett
Grüngelb	weiss	„	gesättigt blaugrün	„	schön, roth-violett
Grün	glänzend weiss, heller als das primäre Bild	„	rosagrau	„	röthlich grau
Blau	desgl.	„	grau oder gelbgrau?	„	röthlich
Violett	desgl.	„	grünlich grau	?	?

Ebenso wie BIDWELL dies beschreibt, sah ich hier an diesem Spectrum einen Satelliten folgen, ungefähr so breit, als das Gelb, Grün und Blau zusammengenommen. Am hellsten war der Theil desselben, der mit Grün correspondirte, die seitlichen Partieen (Nachbilder von Gelb und Blau) waren etwas schwächer. Ueberdies blieben diese letzteren bei der Bewegung etwas zurück, sodafs der ganze Satellit leicht gekrümmt erschien, die Convexität zum primären Bild hin gekehrt.

Er war gleichwie bei BIDWELL von ganz gleichmäfsigem Farbenton. Während BIDWELL diesen aber als violett schildert, möchte ich ihn eher grau, mit einem Stich ins röthliche nennen.

Weiterhin folgte eine Wiederholung des Versuches mit einem nahezu weissen Lichtbildchen. Hierzu benutzten wir das annähernd weisse Licht einer AUER'schen Gasglühlampe. Dies weisse primäre Bild erhielt einen ebenfalls weissen kurzen Schweif, dahinter einen schwachen, doch deutlich wahrnehmbaren grauen Satelliten und einen sehr deutlichen röthlichen langen Schweif.

Schliesslich wurde die Aufnahme mit dem grünen Bild noch einmal gemacht, nachdem zuvor die Augen zuerst für rothes und später für grünes Licht ermüdet waren. Etwas besonderes förderte dies nicht zu Tage. Bei Ermüdung für Roth sah man die ganze Erscheinung ebenso gut als bei Dunkeladaptation. Dies paßt sehr gut zu der Theorie von v. KRIES, nach der ja rothes Licht auf die Stäbchen wenig Einfluß hat. Bei Ermüdung für Grün erschienen die Nachbilder ziemlich undeutlich, ebenso bei Tageslichtadaptation. Grünes Licht wirkt denn ja auch sehr stark auf die Stäbchen.

Bei den beschriebenen Experimenten machten wir noch einige Beobachtungen, die nicht ohne Bedeutung sind.

Zunächst sieht man, wenn das Bildchen seine Bewegung beginnt und man bereits dabei ist, den leuchtenden Mittelpunkt des Kreises zu fixiren, an der Stelle wo ersteres soeben noch in Ruhe war, eine sehr schöne, gesättigte, dunkle Farbe auftreten, die aber eben nur im allerersten Augenblick, nachdem die Bewegung begonnen hat, wahrzunehmen ist. Ich konnte nicht mit Sicherheit ergründen, ob diese Erscheinung mit dem Satelliten etwas zu thun habe, den man erst etwas später auftauchen sieht, wenn die Bewegung völlig im Gange ist. Das Phänomen läßt sich vor Allem, weil es so dunkel ist, nur sehr schwer erkennen,



sodafs dies mir bei manchen Farben erst nach einiger Uebung glückte.

Es ist bei

Rot	gesättigt	olivgrün,
Orangegelb	„	grün,
Grüngelb	„	„
Grün	„	rothblau,
Blau	„	„
Violett	„	grüngelb.

Eine zweite auffällige Erscheinung, die ich zufällig bei den oben beschriebenen Versuchen wahrnahm, erhält man, wenn man nicht im Dunkeln experimentirt, sondern den Schirm schwach erleuchtet. Man erblickt dann dicht hinter dem Bildchen, durch keine Lücke von ihm getrennt, einen schwarzen Schweif folgen, an beiden Seiten von einem lichten Saum begrenzt.

Dieser Schweif ist nach Schätzung etwa 30—40° lang und breitet sich also noch etwas über die Stelle aus, wo man im Dunkeln den Satelliten erblickt. Ueberdies sieht man unter diesen Umständen den in den Tabellen beschriebenen langen Schweif auch öfters schwarz; doch ist dies nicht so deutlich.

Beide Erscheinungen lassen sich bei allen Farben beobachten. Sie liefern eine entfernte Analogie zu den von Prof. SNELLEN und Dr. BOSSCHA gemachten Beobachtungen. Diese sahen nämlich, dafs das tertiäre Bild durch sehr schwaches objectives Licht compensirt wurde, so dafs man dann keins von beiden wahrnimmt.

### § 3. Schlufs.

Es ist wohl unnöthig zu beweisen, dafs der Satellit dieselbe Erscheinung darstellt wie das Nachbild PURKINJE's und BOSSCHA's secundäres Bild. Jedoch ist in gewisser Beziehung wohl ein Unterschied vorhanden.

Auffallend ist z. B., dafs die Verschiedenheiten in den Beobachtungen von BIDWELL und von DAVIS betreffs „recurrent vision“ bei Gelb sich bei meinen Versuchen genau so wiederfanden. DAVIS experimentirte nämlich mit einem ruhenden Bild und erhielt ein violettes Nachbild von Gelb, während BIDWELL dem in Bewegung befindlichen gelben Bildchen eine „recurrent vision“ von grüner Farbe folgen sah. In meinen Versuchen nun, die ebenso wie diejenigen von DAVIS nach BRÜCKE's Princip

angestellt wurden, war das secundäre Bild von Gelb stets deutlich violett, während ich, ebenso wie BIDWELL, mit einem sich bewegenden gelben Bild, das die Grenzen des Gesichtsfeldes nicht überschritt, einen gesättigt grünen Satelliten erhielt.

Der lange Schweif, der bei den in § 2 beschriebenen Experimenten wahrgenommen werden konnte, darf mit dem positiv gleichnamigen Nachbild von HESS (dem tertiären Bild BOSSCHA's) auf eine Stufe gestellt werden. Freilich war die Farbe des Schweifes niemals derjenigen des primären Bildes gleich, jedoch was seine Intensität und Dauer betrifft, ist die Uebereinstimmung mit BOSSCHA's tertiärem Bild eine so gute, wie man nur wünschen kann.

Dafs die Beobachtungen bezüglich der Färbung desselben weniger gut mit denen von HESS übereinkommen, wird wahrscheinlich vor Allem einer störenden Einwirkung des stets sichtbar bleibenden primären Bildes zuzuschreiben sein. Einen wie grofsen Einflufs dieser Umstand ausübt, zeigt sich, wenn man die Augen schliesst, nachdem das Bild nur eine oder einige wenige Umdrehungen gemacht hat. Man sieht dann den langen Schweif viel besser, er hält viel länger an und wenn das Schliessen der Augen sehr schnell geschieht, glückt es in einer Anzahl von Fällen, auch dann noch die anfängliche gleichnamige Färbung desselben zu erblicken.

Noch besser erkennt man den langen Schweif als ein wirkliches gleichnamig gefärbtes Nachbild, wenn man nach dem Vorgange von HESS ein kleines elektrisches Glühlämpchen benutzt, das vor dem Auge vorüber bewegt wird und dann aus dem Gesichtsfeld verschwindet.

Hierbei braucht man die Augen nicht zu schliessen, was ja immer die Wahrnehmung des ersten Auftretens des tertiären Bildes störend beeinflusst, bei dem allein die gleichnamige Färbung zu sehen ist.

Es erscheint daher der Schluss gerechtfertigt, dafs man mit beiden Untersuchungsmethoden die gleiche Reihe von Erscheinungen nach momentanen Lichteindrücken auftreten sieht, nur ist für die Beobachtung der ersten Phasen die PURKINJE'sche, für das Studium des tertiären Bildes BRÜCKE's Methode am geeignetsten.

Bei längerer Helligkeitsdauer ändert sich gegenüber den momentanen Eindrücken vor Allem die zweite Hälfte der Erscheinung. Es kommt dann noch ein Nachbild hinzu, näm-

lich das gewöhnliche, rein complementäre, negative, das allgemein bekannt und bei etwas längerer Fixation stets leicht zu sehen ist. Nach BOSSCHA's Benennung würde dies das quaternäre Bild heißen müssen.

Das tertiäre Bild hingegen (das positiv gleichnamige) dauert um so kürzere Zeit, je länger die Helligkeit währt, und über eine gewisse Belichtungszeit hinaus wird es gewöhnlich nicht mehr wahrgenommen. Es läßt sich jedoch eine Expositionsdauer finden (bei meinen Versuchen in § 1 betrug sie 1 bis 2 Sec.), innerhalb deren wohl regelmäfsig sowohl das tertiäre wie das quaternäre Bild wahrgenommen wird, beide durch einen dunklen Zwischenraum von einander getrennt.

Identisch oder analog sind also diese beiden Nachbilder sicher nicht, was man wohl einmal angenommen hat.

Unter diesen Umständen wurde die Dauer des tertiären Bildes sehr erheblich verkürzt, jedoch ist seine gleichnamige Färbung noch gut zu erkennen.

Uebrigens weicht auch bei noch längerer Helligkeitsdauer der Verlauf des Processes nicht so sehr von dem ab, was man bei momentanen Lichteindrücken beobachtet, wie dies, wie mir scheint, wohl allgemein angenommen wird.

Bei längerer Helligkeitsdauer findet man in der Regel allein das gewöhnliche negative complementäre Nachbild beschrieben, das bereits GOETHE<sup>1</sup> eingehend studirt hat.

Meine Versuche lehren jedoch, dafs selbst bei lange dauernder Helligkeit stets das secundäre Bild wahrnehmbar bleibt; es wird dann selbst deutlicher als es bei momentanen Eindrücken ist.

Der Unterschied zwischen langer und kurzer Belichtung läuft daher vor Allem darauf hinaus, dafs das tertiäre Bild, was seine Dauer betrifft, stark reducirt wird (es bleibt jedoch deutlich gleichnamig), und dafs das gewöhnliche negative (quaternäre) Bild noch dazu kommt.

Dafs das gleichnamige, tertiäre Bild selbst bei sehr lange dauernder Helligkeit (z. B. 20 Sec.) noch wahrgenommen werden kann, bemerkte ich bei folgendem Versuch: fixire ich in einem durch eine Gaslampe erhellten Zimmer ungefähr 20 Sec. lang ein nicht zu kleines farbiges Object und drehe dann ganz plötzlich

---

<sup>1</sup> Siehe ALEXANDER ROLLET, Versuche über subjective Farben. Pflüg Arch. 49, 1.



die Lampe aus, so sehe ich nur dann und wann eine Spur von dem secundären Bild, jedoch in der Regel sehr deutlich, nach Schätzung ungefähr  $\frac{1}{8}$  Sec. dauernd, das positiv gleichnamige Nachbild (tertiäres Bild nach BOSSCHA).

Von den theoretischen Schlusfolgerungen sind die wichtigsten und, wie mir scheint, am meisten feststehenden die, welche sich aus der constatirten Verschiedenheit zwischen gelbem Fleck und seiner Umgebung ableiten.

Man wird hierbei an verschiedene Möglichkeiten denken können. An erster Stelle kann der Unterschied ohne Zweifel dem Umstand zu verdanken sein, daß in den peripheren Partien Stäbchen vorhanden sind, die im gelben Fleck fehlen. Dem entspricht denn auch v. KRIES' Annahme.

Ferner sind aber auch die Zapfen in diesen beiden Abschnitten der Retina nicht ganz die gleichen, ihr Bau differirt etwas, und es zeigt sich auch in ihrer Function ein Unterschied, so daß man an die Möglichkeit wird denken müssen, daß die Reaction der peripheren Zapfen auf einen Lichtreiz nicht ganz dieselbe ist, wie diejenige der centralen. Meiner Meinung nach stehen jedoch die genannten Verschiedenheiten zwischen den centralen und circumfovealen Zapfen nicht im Verhältniß zu dem so bedeutenden Unterschied im Verlauf der Erscheinungen.

Doch es wird noch etwas Anderes hinzukommen können, nämlich der Einfluß des Stäbchenroth auf die Zapfen. Dieser Substanz ist von DONDEERS<sup>1</sup> u. A. ein sensibilisirender Einfluß zugeschrieben worden, und da sie sich möglicherweise nicht allein in den Aufsengliedern der Stäbchen befindet, sondern sich vielleicht auch durch Diffusion durch die ganze äußerste Schicht der Retina ausbreitet, so wird man daran denken können, daß unter ihrer Einwirkung die Zapfen der Peripherie vielleicht perceptionsfähig werden für übrigbleibende Processe, die zu schwach sind, um durch die Zapfen des Centrums wahrgenommen zu werden, auf welche ein gleicher sensibilisirender Einfluß nicht ausgeübt wird.

Wenn man also die Nachbilder der Peripherie den dort befindlichen Zapfen<sup>2</sup> zuschreiben könnte, so würde dies den großen

<sup>1</sup> F. C. DONDEERS, Ueber Stäbchenroth als Sensibilisator. v. GRAEFE's Arch. 30, Abth. 1, 154.

<sup>2</sup> Hiermit wird nicht behauptet, daß die Nachbilder wirklich auf Processen in der Netzhaut beruhen. Es ist ebenso gut möglich, daß sie



Vorthail bieten, daß die Farben des Satelliten dann gleichfalls erklärt wären. Dieser Auffassung steht jedoch ein schwerwiegendes Bedenken entgegen, nämlich, daß der Satellit bei einem rothen primären Bild niemals zu sehen ist. Wäre er vor Allem an die Zapfenfunction gebunden, so läßt sich nicht einsehen, warum er bei rothem Licht fehlen sollte, und ich meine daher, dieser Grund sei wichtig genug, uns dazu zu zwingen, dies Nachbild wenigstens in der Hauptsache den Stäbchen zuzuschreiben, da ja diese letzteren durch rothes Licht nicht oder nur schwach gereizt werden.

In Verbindung damit ist die Frage von Belang, ob durch weißes Licht ein Satellit zur Erscheinung gebracht wird oder nicht. In der Literatur finden wir hierüber nur 2 Mittheilungen. Die älteste ist diejenige von DAVIS, der auf ein weißes primäres Bild eine bläulich-weiße „recurrent vision“ folgen sah, die andere stammt von HESS, der dies nicht wahrnahm.

Ich wiederholte deshalb den Versuch mit dem rundlaufenden Bilde mit weißem Licht und fand denn in der That ein (graues) nachfolgendes Bild, wie es im vorigen Capitel mitgetheilt wurde. Ich kann mich hierin also DAVIS anschließen. Unser beider Resultat stimmt durchaus mit der Auffassung überein, daß der Satellit in den Stäbchen gebildet wird, da diese natürlich durch weißes Licht ebenso sehr gereizt werden als durch jede einzelne der darin enthaltenen Farben.

Schwierig lassen sich nun aber die manchmal sehr intensiven Farben des Satelliten erklären, und diese zwingen uns anzunehmen, daß bei seinem Entstehen aufser den Processen, die in den Stäbchen vor sich gehen, noch andere Einflüsse im Spiele sind.

Auf ungefähr die gleichen Schwierigkeiten stößt man, wenn man nach einer einfachen Erklärung für das tertiäre Bild sucht. Man wird dabei sicher an die Zapfen denken müssen, um die sehr deutliche gleichnamige Färbung verstehen zu können, die im ersten Augenblick seines Entstehens zu sehen ist. Doch um den darauf folgenden farblosen oder schwach gefärbten Theil desselben deuten zu können, wird man wieder genöthigt sein, die Wirkung der Stäbchen zu Hülfe zu nehmen.

---

in den cerebralen Elementen ihren Sitz haben, die mit den Zapfen oder den Stäbchen zusammenhängen.

Meiner Ansicht nach läßt sich dies Alles am besten verstehen, wenn man annimmt, daß zwei von einander unabhängige, ungefähr gleichzeitig verlaufende Processe in einander überspielen und, zum Theil zusammenfallend, combinirte Empfindungen erregen.

In beiden, Stäbchen und Zapfen, wird man dann eine Reihe von Bildern voraussetzen können, von denen die in den Zapfen die Entstehungsursache für die Farben abgeben, derweil die der Stäbchen sich entweder als weiß präsentiren, wenn sie stark, oder violettartig gefärbt, wenn sie schwach sind.

In den Stäbchen hätte man dann:

1. den primären Reizzustand, der um so intensiver ist und um so länger dauert, je vollständiger die Dunkeladaptation ist;
2. den Satelliten, der vor Allem bei einem bestimmten Grad von Dunkeladaptation deutlich wahrnehmbar wird;
3. einen tertiären Proceß: den langen Schweif oder, was damit identisch ist, das röthlich gefärbte tertiäre Bild BOSSCHA's.

In den Zapfen wird man anzunehmen haben:

1. den primären Proceß, mit dem der Stäbchen zusammenfallend, jedoch von diesem an Intensität und Dauer übertroffen, wenn durch Adaptation viel photochemische Substanz in den Stäbchen aufgehäuft ist. In diesem letzten Falle kommt der kurze weißse Schweif zu Stande, in unmittelbarem Anschluß an das farbige primäre Bild;

2. das secundäre Bild, das stets complementär gefärbt ist. Es wurde im gelben Fleck allein bei Roth und bei Grün wahrgenommen, doch ist es sehr leicht möglich, daß sich dort auch bei den anderen Farben ein gleicher secundärer Proceß abspielt, aber dann so schnell, daß ich ihn mit meinem ziemlich träge reagirenden Sehorgan nicht bemerkte.

Dies Nachbild würde dann in den Zapfen der Netzhautperipherie langsamer verlaufen, so daß es dort (wenigstens theilweise) zusammenfällt mit dem secundären Bilde der Stäbchen (dem Satelliten), und diesem die Farbe verleiht.

Es besteht keine Schwierigkeit, einen solchen ziemlich geringen functionellen Unterschied zwischen den Zapfen im Centrum und denjenigen der Peripherie anzunehmen. Ist ja ihr morphologischer Bau auch nicht ganz derselbe, und sind obendrein zwischen Zapfen aus verschiedenen Netzhautgebieten viel größere gegenseitige functionelle Abweichungen

bekannt. v. KRIES<sup>1</sup> war es, der gezeigt hat, daß in der äußersten Netzhautperipherie selbst Zapfen vorkommen, die total farbenblind sind.

Dies secundäre, complementäre Bild der Zapfen ist weiterhin sehr dunkel und aus diesem Grunde, wenn es nicht durch einen Stäbchenproceß verstärkt wird, neben dem lichtstarken primären Bild, das stets im Gesichtsfeld bleibt, nur sehr schwierig oder überhaupt nicht zu sehen. Darum bleibt es bei einem rothen primären Bilde gewöhnlich unbemerkt, und ich habe es dabei nur zuletzt, als meine Uebung am größten war, gesehen; es war gesättigt grün, in der That sehr dunkel.<sup>2</sup>

3. Das tertiäre Bild, das gleichnamig gefärbt ist und zusammenfällt mit dem allerersten Beginn des tertiären Bildes der Stäbchen. Bei dieser Annahme erklärt es sich sehr gut, daß das tertiäre Bild der Regel nach zuerst gleichnamig gefärbt, darauf ungefähr farblos ist; während zugleich auch begreiflich erscheint, daß die anfänglich gleichnamige Färbung nicht mehr wahrgenommen wird, wenn in Folge von Dunkeladaptation der Stäbchenproceß um so viel stärker geworden ist, daß er gänzlich die Oberhand gewinnt. Gleichzeitig würde man verstehen lernen, daß HESS den langen Schweif auch den Theil des Gesichtsfeldes durchlaufen sah, der mit dem gelben Fleck correspondirt, jedoch zugleich bemerkte, wie er dort eher verschwand.

Ich würde dann weiterhin zu der Annahme geneigt sein, daß bei längerem Fixiren, durch den größeren Verbrauch der photochemischen Substanz der Stäbchen, ihr tertiäres Bild verschwindet oder sehr stark reducirt wird, und dann allein das rein gleichnamig gefärbte und viel kürzere Zeit dauernde tertiäre Bild der Zapfen übrigbleibt. Dies ist denn auch, wie wir sahen, selbst bei lange anhaltender Fixation (ca. 20 Sec.) unter günstigen Umständen noch sichtbar.

4. Ein Nachbild, für das ein Analogon in den Stäbchen anzunehmen bisher kein Grund vorhanden war, nämlich das gewöhnliche negative<sup>3</sup> complementäre Nachbild, das erst bei längerer Fixation gut wahrnehmbar wird.

<sup>1</sup> J. v. KRIES, Ueber die Farbenblindheit der Netzhautperipherie. *Zeitschr. f. Psych. u. Phys. der Sinnesorgane* 15, 247.

<sup>2</sup> Siehe Fußnote S. 25.

<sup>3</sup> Mit „negativ“ ist gemeint, daß jenes einen deutlich helleren Hof hat, also dunkler ist als seine Umgebung (negativ in dem Sinne von BRÜCKE).



Wie mir scheint, ist die oben entwickelte Auffassung im Stande, manchen dunklen Punkt in dem Capitel der Nachbilder aufzuklären, jedoch haben wir damit noch keine befriedigende Vorstellung von dem Verlauf und der Art der Vorgänge, die sich in jedem der beiden Apparate abspielen.

Eigentlich der einzige Punkt, den zu erklären einige der bestehenden Lichtsinntheorien bestrebt sind, ist die complementäre Färbung der gewöhnlichen Nachbilder.

Zunächst ist da die alte, von FECHNER<sup>1</sup> vertheidigte Theorie, nach der man die complementäre Farbe erklären müsse durch Ermüdung für die ursprünglich betrachtete. Die „inneren Reize“, welche die Ursache des Eigenlichtes der Retina sind, reizen die für die Perception der verschiedenen Farben bestimmten Fasern alle in gleichem Maasse, werden jedoch natürlich, ebenso wie objectives Licht, weniger gut von den Fasern percipirt, die durch die Farbe des primären Bildes ermüdet sind; dies hat zur Folge, daß die Complementärfarbe erscheint.

Nach dem Urtheile BRÜCKE's kann jedoch diese Erklärung unmöglich für alle complementären Nachbilder passen, da sie dann sämmtlich übereinstimmend negativ, d. h. dunkler als ihre Umgebung sein müßten. Hiermit steht sehr entschieden das PURKINJE'sche Nachbild (dasselbe wie unser Satellit) in Widerspruch, da dies positiv und complementär ist.

Wenn nun aber die Auffassung zutrifft, die ich oben entwickelt habe, wenn also die Helligkeit (das Positive) des PURKINJE'schen Nachbildes einem Process in den Stäbchen zu verdanken ist, der ganz unabhängig ist von dem complementären und auch dunkleren Nachbild der Zapfen und sich diesem nur anschliesst, dann würde damit BRÜCKE's Einwurf zum Theil wegfallen. Es würde sich zwar nicht leugnen lassen, daß das PURKINJE'sche Nachbild, wie wir es beobachten, unmöglich allein durch Ermüdung für die primäre Farbe erklärt werden kann, aber FECHNER's Theorie könnte darum wohl noch gelten für die eine Componente des PURKINJE'schen Nachbildes, nämlich das complementäre Bild, das in den Zapfen entsteht.

Jedoch bleibt, wie es mir vorkommt, auch gegen diese Auffassung noch eine wesentliche Einrede bestehen: nämlich, daß

Man beachte hierbei jedoch, daß es in sehr vielen Fällen heller ist, als das sogenannte „Eigenlicht“ der Retina.

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



man, vor Allem durch die längere Fixation, complementäre Nachbilder erhalten kann, die erheblich heller sind als das Eigenlicht der Retina; wohl sind sie dann von einem noch helleren Hof umgeben und haben also insofern ein Recht auf den Namen negativ.

DONDERS<sup>1</sup> hat eine Darstellung gegeben, die diesen Schwierigkeiten begegnet. Er meint, daß die psychophysischen Prozesse als nicht umkehrbare Dissociationsvorgänge betrachtet werden können. Mit der Wahrnehmung von Weiß ist dann die vollständige Dissociation der Moleküle verbunden. Die dadurch entstandenen Moleküle sind für keine weitere Dissociation angreifbar.

Die Empfindung der einfachen Farben (Roth, Gelb, Grün und Blau) läßt er an eine partielle Dissociation derselben Moleküle gebunden sein. Von dieser primären (partiellen) Dissociation bleiben Moleküle übrig, deren secundäre Dissociation die complementäre Empfindung verursacht. Diese letzteren dissociiren nach und nach spontan, auch ohne adäquaten Reiz, da sie nicht selbständig fortbestehen können.

Diese secundäre Dissociation, welche die complementäre Empfindung hervorruft, geht noch weiter, nachdem das objective Licht einzuwirken aufgehört hat, und sie ist dann die Ursache des complementären Nachbildes.

Manche dieser partiellen Dissociationen können neben einander bestehen; den Beweis dafür liefern die zusammengesetzten Farben, z. B. ein Gemisch von Grün und Gelb, oder Grün und Blau, Roth und Gelb etc. Jede dieser Combinationen beruht auf zwei Arten partieller Dissociation, die neben einander in denselben Molekülen zu Stande kommen, ohne sich zu einer totalen Dissociation zu verbinden.

Aus Grün und Roth oder aus Gelb und Blau kann sich keine zusammengesetzte Farbe bilden, weil beide Combinationen den Anlaß zu vollständiger Dissociation der Moleküle geben, und hierdurch die Empfindung von Weiß entsteht.

Solcherlei Darstellungen von nicht umkehrbaren Dissociationsprocessen haben CHRISTINE LAD-FRANKLIN<sup>2</sup> und W. KOSTER

<sup>1</sup> F. C. DONDERS, Over Kleurstelsels. *Onderz. Phys. Labor. Utrecht*, 6, 97 u. f.

<sup>2</sup> CHRIST. LAD. FRANKLIN, Eine neue Theorie der Lichtempfindungen. *Zeitschr. für Psych. und Phys. d. Sinnesorgane* 4, 211.

GZN.<sup>1</sup> gegeben. Beide unterscheiden sich aber in einem Hauptpunkte von DONDERS; sie verlegen die Processe nämlich nicht in das Gehirn, sondern in die Netzhaut.

Sie nehmen an, daß die dissociirbaren Moleküle<sup>2</sup> sich in den percipirenden Elementen der Retina befinden.

DONDERS hingegen knüpft in der Netzhaut die verschiedenen Vorgänge an verschiedene Formelemente, weil das Zustandekommen mehrerer Processe in derselben Zelle auch mehr als einen Leitungsproceß in derselben Neuronenkette voraussetzen würde.

Will man also die Lehre von den specifischen Energien in Anwendung bringen, so ist man genöthigt, die complementären Nachbilder in das Centrum zu verlegen und dann veranlaßt uns die Analogie, auch in den positiven, gleichnamigen Nachbildern und in denjenigen des monochromatischen Apparates centrale Processe zu sehen. Dieser Annahme stehen, wie mir scheint, unüberwindliche Schwierigkeiten nicht entgegen, jedoch weicht eine solche Auffassung von den allgemein gangbaren Vorstellungen ab. Die Frage wurde u. A. behandelt von EXNER<sup>3</sup> und von EBBINGHAUS.<sup>4</sup> Ersterer meint, daß alle Nachbilder in der Retina entstanden, während dieser bezüglich aller gewöhnlichen

<sup>1</sup> W. KOSTER GZN., *Nederl. tijdschr. voor Geneeskunde* 1, 62. 1896.

<sup>2</sup> Von diesen Molekülen geben beide eine schärfer umschriebene Darstellung als DONDERS, der sich über ihre Structur nicht ausläßt. KOSTER hat Schemata angefertigt, die die Ansicht von DONDERS illustriren sollen. Sie sind auf eine Tafel in der Fläche gezeichnet, man muß sie sich aber natürlich körperlich vorstellen. LADD-FRANKLIN gab eine räumliche Vorstellung des Processes, die durch die Annahme charakterisirt ist, daß die Moleküle einen Kern haben, um den die einzelnen Theile gruppiert sind, die durch die verschiedenen Lichtsorten losgelöst werden können. Während also KOSTER's Moleküle unter dem Einfluß von weißem Licht gänzlich zerfallen, bleibt bei denen von LADD-FRANKLIN der Kern unter diesen Umständen bestehen. Um Mißverständnissen vorzubeugen, sei noch einmal daran erinnert, daß DONDERS sich seine Moleküle nicht wie diese beiden, in der Netzhaut, sondern in der grauen Substanz der Sehsphäre (MUNK) gelegen denkt.

<sup>3</sup> S. EXNER, Ueber den Sitz der Nachbilder im Centralnervensystem. F. EXNER's *Repertorium der Physik* 20, 374.

Idem, Ueber die Functionsweise der Netzhautperipherie und den Sitz der Nachbilder. v. GRAEFE's *Arch.* 32, Abth. 1, 233.

<sup>4</sup> H. EBBINGHAUS, Ueber Nachbilder im binocularen Sehen und die binocularen Farbenerscheinungen überhaupt. *Pflüg. Archiv* 46, 498.

Nachbilder die gleiche Vermuthung hegt, jedoch neben diesen noch andere kennt, die in dem einen Auge entstehen, wenn die Wahrnehmung des betrachteten Objectes allein mit dem anderen Auge geschieht. Während dann in dem fixirenden Auge ein negatives Bild entsteht, ist dasjenige des anderen positiv; letzteres kann also schwerlich durch Combination der beiden Gesichtsfelder entstehen. Er meint, es beruhe wahrscheinlich auf dem Einfluß, den die beiden Sehsphären der grauen Substanz gegenseitig auf einander ausüben. Der primäre Reizzustand würde sich dann von links nach rechts (oder umgekehrt) ausbreiten, doch hier später beginnen und später ablaufen und so als ein positives Nachbild zur Wahrnehmung gelangen.

Für solche Nachbilder giebt uns übrigens eine Deutung wie diejenige von DONDERS keine Erklärung; nur die complementären lassen sich so verstehen. Ebenso wenig giebt jene Theorie Rechenschaft über die merkwürdige Thatsache, daß die Empfindungen so sehr wechseln, kommen und gehen. Dies kann man sowohl bei dem trichromatischen als bei dem monochromatischen Apparat beobachten. Bei beiden wechseln helle und dunkle Phasen mit einander ab. In den Zapfen sind die hellen Phasen überdies noch umschichtig gleichnamig und complementär gefärbt.

Der ganze Vorgang hat also einen oscillatorischen Charakter, der übrigens durchaus nicht auf die Nachbilder allein beschränkt ist. Bereits während der Dauer des objectiven Lichtes sind derartige Schwankungen zu verzeichnen. CHARPENTIER<sup>1</sup> lieferte hierzu einen bemerkenswerthen Beitrag:

Läßt man eine schwarze Scheibe, auf der ein weißer Sektor angebracht ist, sich ziemlich langsam (1 mal in 2 Sec.) umdrehen, so sieht man Folgendes: während der ganzen Zeit, die die Bewegung dauert, erblickt man (wenn man die Mitte der Scheibe fixirt) den Sektor nicht gleichmäÙig weiß, wie er wirklich ist, sondern etwas hinter dem vordersten Rand desselben zeigt sich ein schmaler Streifen in Form eines Sektors. Manchmal nimmt man hinter diesem noch einen zweiten und dritten dunklen Streifen wahr.

Es ist, dünkt mich, schwer, sich jetzt schon ein Urtheil über die Frage zu bilden, ob diese Schwankungen wirklich analog

---

<sup>1</sup> A. CHARPENTIER, Réaction oscillatoire de la rétine. *Archives de Phys.* 24. Année, 541.

sind dem Kommen und Gehen, das bei den Nachbildern zu beobachten ist; doch ist es vorläufig wünschenswerth, nach einer Deutung zu suchen, nach der sich beides zusammen erklären läßt und die sich nicht einseitig auf die Nachbilder allein beschränkt. Dazu wird es vielleicht nöthig erscheinen, genaue Messungen über die Dauer jeder einzelnen Phase zu veranstalten.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ueber die Methodik s.: M. VON VINTSCHGAT u. A. LUSTIG, Zeitmessende Beobachtungen über die Wahrnehmung des sich entwickelnden positiven Nachbildes eines elektrischen Funkens. *Psych. Archiv* 33, 494.

Ueber eine mechanische Theorie zur Erklärung des oscillatorischen Charakters der Wahrnehmung s.: *Leçons de Physiologie générale et comparée* par RAPHAËL DUBOIS, Prof. à l'Université de Lyon; Paris 1898, S. 228 ff.

(Eingegangen am 16. April 1899.)

---