

Ein Beitrag zur Young-Helmholtz'schen Theorie

Von

Professor Dr. Eduard Haschek

(Aus dem II. physikalischen Institut der Wiener Universität)

(Vorgelegt in der Sitzung am 21. Juni 1928)

Die Young-Helmholtz'sche Theorie führt die Fähigkeit des Auges, die nach Helligkeit, Farbton und Sättigung unendlich variierender Lichteindrücke uns vermitteln zu können, auf die Erregung dreier Grundempfindungen zurück. Helmholtz selbst supponierte als hiezu geeigneten Mechanismus drei verschiedene Arten von Nervenendigungen, deren Erregung durch einfallendes Licht je eine der Empfindungen Rot, Grün oder Blau wecken sollte. Wie bekannt, mußte diese Ansicht als nicht mit der Natur vereinbar wieder verlassen werden. Ergibt doch einerseits der physiologische Befund außer Zapfen und Stäbchen keinerlei Unterscheidungsmerkmale, vor allem keine innerhalb der einzelnen lichtempfindlichen Netzhaut-elemente, während anderseits die Erregung jedes einzelnen Zapfens zu den gleichen Farbenempfindungen Anlaß gibt, wie die Erregung größerer Komplexe derselben. Es erscheinen uns deshalb die Sterne weiß oder farbig unabhängig von der Fixation, während sie nach der Annahme Helmholtz' je nach der Lokalisation des Bildes rot, grün oder blau erscheinen müßten. Es reduzierte sich also die Young-Helmholtz'sche Theorie lediglich auf die Annahme dreier Grundempfindungen, ohne aber über den Mechanismus ihrer Erregung eine spezielle Aussage zu machen. Die Verhältnisse ihrer Erregungsstärken im Spektrum weißen Lichtes haben König und Dieterici für die Augen Farbenblinder wie auch für ihre eigenen trichromatischen bestimmt. Allerdings mußten sie hiezu die willkürliche Annahme machen, die Empfindung Weiß werde durch untereinander gleiche Anregungen der Grundempfindungen hervorgebracht. Es ist dadurch für jede Grundempfindung jene Erregung Rot, Grün oder Blau zur Einheit gewählt, wie sie bei der Weißempfindung erregt wird, ohne daß diese Einheiten untereinander auf ein gemeinsames Maß zurückgeführt würden.

Über den Mechanismus der Erregung haben später F. Exner¹ und F. Aigner² eine Annahme zu machen versucht. Sie setzten voraus, daß es sich um einen Resonanzvorgang handle, und ersetzen die Annahme diskreter, den Grundempfindungen zugeordneter

¹ F. Exner, Versuch einer Theorie des Farbensehens. Diese Ber., Abt. IIa, Bd. 131 (1922).

² F. Aigner, Zur Resonanztheorie des Farbensehens. Diese Ber., Abt. IIa, Bd. 131 (1922).

Nervenendigungen durch die, daß in jeder Nervenendigung dreierlei Systeme eingelagert seien, die auf einen von der Netzhaut apperzipierbaren Lichtreiz hin in Schwingungen geraten und dadurch die Nervenendigungen in jenen Erregungszustand bringen, der zur Licht- und Farbenempfindung Anlaß gibt. Diese Anschauung gibt ohne weiteres die Form der experimentell bestimmten Grundempfindungskurven wieder, sie gestattet die Eigenwelle und die Dämpfung des resonierenden Systems zu bestimmen, scheint mir aber doch nicht voll befriedigend zu sein. Ich komme zu dieser Meinung durch das Studium des quantitativen Verlaufs von Erscheinungen, über die die Young-Helmholtz'sche Theorie, wie sie heute sich darstellt, kaum eine Aussage zu machen vermag, nämlich der Variabilität der Lichtempfindlichkeit des Auges und der Ermüdung.

Es ist eine altbekannte Tatsache, daß die durch konstante äußere Reize geweckte Helligkeitsempfindung sehr abhängt von den Bedingungen, unter denen sich die Netzhaut befindet. Das Licht einer Kerzenflamme erscheint uns blendend, wenn wir sie in der Nacht entzünden, sie erscheint als angemessen in der Dämmerung und als schwach am hellen Tag. Aber es erscheint uns auch die volle Mittagshelligkeit eines sonnigen Sommertages nicht übermäßig und die beginnende Abenddämmerung des Dezembertages nicht zu gering als Beleuchtung bei unseren Tätigkeiten. In wie ungeheuerem Ausmaß variiert da die eintretende Energie und wie wenig vergleichsweise die Stärke der durch sie geweckten Empfindung!

Ebenso bekannt sind andere Erscheinungen. Legen wir auf ein weißes Blatt Papier einen Streifen schwarzes, fixieren einige Zeit und ziehen es dann rasch ohne den Blick zu verschieben weg, so sehen wir an der Stelle des schwarzen Streifens das weiße Papier heller. Dieser Unterschied verblaßt mit der Zeit. Wählen wir statt des schwarzen Papieres etwa ein farbiges und leiten den Versuch ebenso wie früher, so beachten wir einen hellen farbigen Fleck in der Komplementärfarbe. Auch hier verblaßt die Erscheinung nach einiger Zeit. Ersetzen wir bei diesen letzteren Versuchen das weiße Papier durch ein farbiges, so können wir bei passender Wahl der Versuchselemente außer der Helligkeits- und Farbtonänderung auch leicht zur Beobachtung von Sättigungsvariationen kommen. Es sind das alles altbekannte Versuche und die zugehörigen Erscheinungen als Erscheinungen des sukzessiven Kontrastes längst beschrieben. Es ist aber meines Wissens bisher noch nie der Versuch gemacht worden, über diese Gruppe von Erscheinungen quantitative Untersuchungen in dem Sinne zu machen, daß man versucht hätte, etwa die Helligkeitsänderung zu bestimmen, die uns dabei vorgetäuscht wird, oder die Farbtonänderung messend zu verfolgen, die als Folge einer vorhergehenden Ermüdung mit farbtongleichem oder -verschiedenem Licht auftreten. Ich habe in der letzten Zeit derartige Untersuchungen durchführen lassen. Die Resultate derselben haben neben manchen anderen persönlichen Beobachtungen und den Ergebnissen verschiedener im II. physikalischen Institut durchgeführten

Arbeiten Anlaß gegeben zur Entwicklung einer Theorie über den Sehprozeß. Diese Anschauungen sind ungefähr im Laufe des letzten Jahrzehntes langsam herangereift und bereits öfters in Vorlesungen mehr oder weniger ausführlich dargelegt worden.¹

Die Young-Helmholtz'sche Theorie spricht nur von den Empfindungen, die als Folge von Erregungen der Sehnervendigungen auftreten, ohne die Empfindlichkeit der Netzhaut und ihre Variationen zu erörtern. Wir müssen also zunächst als vermittelndes Zwischenglied zwischen den physikalischen Reiz und die psychologische Empfindung die Empfindlichkeit setzen, um die Phänomene des Sehens besser beschreiben zu können, respektive dreierlei Empfindlichkeiten, die abhängig sind von der Lichtintensität und der Wellenlänge. Damit allein ist aber nicht allzuviel gemacht, da die Schwierigkeit weiter besteht, daß die Ursache der Veränderlichkeit, die eine physiologische sein muß, damit nicht aufgedeckt ist. Auch die Einführung der Resonanztheorie, wie sie von F. Exner und F. Aigner entwickelt wurde, ändert daran nichts. Wir müssen vielmehr trachten, durch eine plausible Annahme diese zu erweitern, um zu einer Vorstellung zu gelangen, die den Erfahrungstatsachen gerecht wird.

Sicherlich sind die Vorgänge im Sehnerv nicht wesentlich verschieden von den anderen Vorgängen im menschlichen Körper. Wir wissen, daß die normale Funktion eines jeden Organs nur solange im Gange bleiben kann, als ihm Nahrung auf dem Wege des Blutkreislaufes zugeführt wird. Wir werden also erwarten dürfen, daß auch beim Sehnerv, dessen Arbeitsleistung eben in der Reaktion auf den eintretenden Lichtstrahl besteht, diese Fähigkeit nur erhalten bleiben kann, wenn ihm fortdauernd Nahrung in der ihm adäquaten Form zugeführt wird. Wir wollen nun, um die Vorgänge im Sehnerv klar machen zu können, uns kurz ins Gedächtnis rufen, wie in anderen Fällen im menschlichen Organismus die Arbeitsleistung eines Organes durch seine Ernährung ermöglicht wird.

Die Nahrungsmittel, die wir uns in irgendeiner Form als Speisen zuführen, sind unmittelbar für den Haushalt des Körpers nicht geeignet. Er braucht zweierlei Substanzen, solche, welche dem Aufbau oder der Regeneration seiner Substanz dienen, und solche, welche Träger der Energiemengen sind, die die Arbeitsfähigkeit bedingen und erhalten. Beide müssen im Wege der Verdauung im Magen und Darm aus den zugeführten Speisen hergestellt werden. Sie sind im allgemeinen organische Substanzen, die schließlich im Blutkreislauf durch den Körper kreisen. Wenn nun ein Muskel oder ein anderes Organ in Tätigkeit tritt, so ist in seinem Bereich ein gewisses Quantum dieser Nährstoffe enthalten. Die Arbeitsleistung des Organs

¹ Ich habe in den letzten Tagen eine Arbeit von Kravkov: »Über die Adaption des Auges an farbige Lichtreize« (Journal für Psychologie und Neurologie, 1928) zugesendet bekommen, in der eine Theorie von P. Lasareff experimentell geprüft wird. Diese Theorie kenne ich nur aus dieser Mitteilung: Sie scheint mit der hier gegebenen nicht vollständig gleich zu sein, so daß meine Mitteilung vielleicht nicht überflüssig ist.

wird nun in der Weise gedeckt, daß durch irgendeinen chemischen Prozeß die Nährstoffe von ihrem höheren Energiegehalt auf einen niedrigeren sinken, unter Zerfall, chemischer Umlagerung oder dergleichen. Dabei ist es ohne weiteres möglich, daß für spezifische Zwecke auch spezifische Nahrungsmittel bereitgestellt werden müssen, die entweder erst in dem betreffenden Organ aus den allgemeinen Nährstoffen entstehen oder von irgendwo anders ihm zugeführt werden. Sind die Nährstoffe als Folge der Arbeitsleistung des betreffenden Organs in eine Form übergeführt, die beim Abbau innerhalb des Körpers Energie nicht mehr zu liefern vermag, so sind sie zu Abfallstoffen geworden. Soll nun das Organ dauernd Arbeit leisten können, so muß ihm, wenn nicht anders der Vorrat an Arbeitsstoffen in kürzester Zeit verbraucht sein soll, dauernd solcher nachgeliefert werden. Ebenso muß aber auch dafür gesorgt sein, daß die gebildeten Abfallstoffe aus dem Bereich des Organs abgeführt und an einer anderen Stelle umgewandelt oder abgesondert werden. Das Gleichgewicht zwischen arbeitsfähigen Nährstoffen und arbeitsunfähigen Abfallstoffen ist nach dieser Anschauung maßgebend für die Arbeitsfähigkeit des Organs, das Vorhandensein von Abfallstoffen die Ursache für die Müdigkeit. Je größer in dem vorhandenen Vorrat der Anteil der Abfallstoffe ist, desto größer ist die Ermüdung des betreffenden Organs, desto geringer seine Arbeitsfähigkeit. Der Verbrauch an Arbeitsstoffen ist durch den Effekt, die Arbeitsleistung in der Zeiteinheit, bestimmt, ebenso wie die Menge der gebildeten Abfallstoffe.

Dieser Anschauung entspricht die Vorstellung, daß das »Sehen« die Arbeitsleistung der Netzhaut ist und daß daher auch die Netzhaut durch Zufuhr entsprechender Stoffe in jenem Zustand erhalten werden muß, der sie zur Aufnahme der Lichtreize befähigt. Diese bedingt aber die Entstehung von Abfallstoffen, welche die vorhandenen Nährstoffe, die wir hier passend Sehstoffe nennen werden, verdünnen und auf diese Weise bewirken, daß die Empfindlichkeit des Auges sinkt. Es ist also die Anschauung genauer ausgedrückt die folgende: Das ausgeruhte oder wie man gewöhnlich sagt vollständig dunkel adaptierte Auge enthält in der Netzhaut, und zwar auf oder in jedem Netzhautelement verteilt, eine gewisse Menge von Sehstoffen. Trifft nun irgendein Lichtreiz die Netzhaut, so wird seiner Stärke entsprechend ein gewisser Anteil an Sehstoff verbraucht und es entsteht aus ihm Abfallstoff. Handelt es sich nun um Umlagerung innerhalb des Moleküls oder um Zersetzung desselben, also um Vorgänge, bei denen außer den Sehstoffen keine anderen beteiligt sind, so wird die Menge der Abfallstoffe gleich sein der Menge der verbrauchten Sehstoffe. Treten aber noch andere vom Licht nicht unmittelbar in Mitleidenschaft gezogene Stoffe in die Reaktion ein, treten also etwa noch sekundäre Reaktionen auf, so wird die Menge der Abfallstoffe der Menge der verbrauchten Sehstoffe proportional sein. Welche dieser beiden Möglichkeiten tatsächlich statt hat, können wir zunächst nicht entscheiden. Jedenfalls würde aber, wenn nicht

eine Zufuhr neuer Sehstoffe und Abfuhr der gebildeten Abfallstoffe stattfände, auch der geringste Lichtreiz, sofern er über der Schwelle liegt, mit der Zeit allen vorhandenen Sehstoffen verbrauchen und die Empfindlichkeit des Auges müßte auf Null sinken. Da aber Zufuhr und Abfuhr sofort eintreten, so wird bei einem genügend lang dauernden gleichmäßigen Reiz ein Gleichgewicht zwischen den noch übrigen Sehstoffen und den gebildeten Abfallstoffen eintreten und dieses Gleichgewicht bestimmt die Empfindlichkeit des Auges.

In welcher Weise das Licht die chemische Reaktion einleitet, scheint zunächst gleichgültig. Wir werden den Tatsachen am besten nahekommen, wenn wir in diesem Stadium auf die Resonanztheorie zurückgreifen. Wir nehmen also mit Exner und Aigner an, im Bereiche des Sehnervs, respektive seiner Endigungen, wären materielle Systeme — etwa die Moleküle der dreierlei Sehstoffe — vorhanden, die auf eine einfallende Lichtenergie zu resonieren vermögen. Es wird dann die Stärke der Schwingung des Resonators, dem je nach der Dämpfung eine gewisse Resonanzbreite zukommt, abhängig sein von der anregenden Wellenlänge und ihrer Energie. Es ergibt sich so unmittelbar aus der Exner-Aigner'schen Hypothese die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Wellenlänge des erregenden Lichtes.

Konform den obigen Überlegungen müssen wir diese Theorie dahin erweitern, daß das resonierende System nicht beliebige Amplituden erreichen kann, daß vielmehr bei dem Auftreten einer gewissen Maximalamplitude Zerfall des resonierenden Systems eintritt. Es ist ohne weiteres klar, daß dann der Größe der anregenden Energie eine gewisse Zahl zerfallender Systeme entspricht, die aber nicht einfach der einfallenden Energiemenge proportional ist. Es wird eben nur die ein resonanzfähiges System treffende Energie für den Zerfall verbraucht, die Zahl der zerfallenden Systeme also außer von der Energiemenge auch noch von der Menge der resonanzfähigen Systeme abhängen. Werden diese durch die Abfallsprodukte verdünnt, so wird eine größere Energiemenge »ungenützt« passieren.

Man sieht, daß diese Anschauung unmittelbar die Existenz einer Empfindungsschwelle ergibt. Ist die das Molekül der Sehsubstanz passierende Energiemenge so klein, daß die kritische Amplitude nicht erreicht wird, dann tritt eben kein Zerfall und auch keine Empfindung auf. Da wir dreierlei Empfindlichkeiten, also auch dreierlei Sehstoffe voraussetzen, werden wir auch für jeden derselben eine eigene Schwelle annehmen müssen. Jedes resonierende System strahlt seinerseits Energie aus. Unterbrechen wir die erregende Strahlung, so erscheint es als möglich, daß immer noch Zerfall einzelner Resonatoren eintritt, wenn sie nur von der Ausstrahlung ihrer Nachbarresonatoren genug aufzunehmen vermögen. Es braucht also die Empfindung nicht unbedingt zu erlöschen, sobald die Einstrahlung von Licht abgeschnitten wird, sondern sie besteht weiter und klingt ab, so lange noch Zerfall von Sehstoff stattfindet. Etwas ähnliches wird auch eintreten können, wenn wir scharf abgegrenzte Netzhautpartien besonders hell bestrahlen, also helle Objekte auf dunklem

Grund beobachten. Dann wird, ganz abgesehen von dem in der trüben Nervsubstanz diffundierten Licht, die Ausstrahlung der Resonatoren zu einer seitlichen Ausbreitung der Zerfallserscheinungen führen können. Diese beiden hier besprochenen Erscheinungen sind bekannt als positives Nachbild und als Irradiation; sie könnten nach dem eben Gesagten als wesentlich gleichwertig aufgefaßt werden, insofern sie erregt sind durch die Ausstrahlung der resonierenden Systeme.

Da wir, sobald nur die Schwelle überschritten ist, also die Amplituden der Resonanzschwingungen über den kritischen Wert zu wachsen vermögen, die Menge der erregten Sehstoffe proportional der erregenden Energie setzen können, so wird auch die Menge der zerfallenden Sehstoffe ihr proportional sein. Streng wird dies allerdings erst gelten, wenn die wirkende Energie genügend groß gegenüber der Schwellenenergie ist. Bezeichnen wir den in der Zeiteinheit bei der einfallenden Energiemenge 1 bestimmter Wellenlänge in der Einheitsmenge von Sehstoffen zerfallenden Anteil mit σ , so werden wir diese Größe die photochemische Empfindlichkeit des betreffenden Sehstoffes bei dieser Wellenlänge nennen können. Sie variiert mit der Wellenlänge des einstrahlenden Lichtes in derselben Weise wie die Amplitude der Resonanzschwingung nach der Theorie von Exner und Aigner, wir bekommen also die Form der Grundempfindungskurven hier mit derselben Genauigkeit wie dort.

Da wir der Young-Helmholtz'schen Theorie entsprechend drei Grundempfindlichkeiten anzunehmen haben, werden wir auch drei Sehstoffe mit den photochemischen Empfindlichkeiten σ_r , σ_g , σ_b anzunehmen haben. Die Stärke der Empfindung — die Helligkeit — wird dann ohne weiteres sich als die Summe der Einzelerregungen ergeben, so daß, wenn wir nur von der Helligkeit, ohne die beiden anderen Qualitäten der Empfindung, Farbton und Sättigung zu berücksichtigen, sprechen, wir auch von nur einer photochemischen Gesamtempfindlichkeit werden sprechen dürfen. Auch diese ist naturgemäß eine Funktion der Wellenlänge. Ihr Verlauf ist uns gegeben durch die Kurve der Helligkeitsverteilung in einem Spektrum, in dem die Energie konstant ist für alle Wellenlängen.

Durch die Wirkung des Lichtes werden Abfallstoffe aus jedem der drei Sehstoffe gebildet. Ob sie untereinander gleich oder verschieden sind und ob sie mit der gleichen oder mit verschiedener Geschwindigkeit abgeführt und durch neue Sehstoffe ersetzt werden, läßt sich natürlich von vornherein nicht sagen. Jedenfalls aber werden wir annehmen müssen, daß die Empfindung nicht durch das Vorhandensein, sondern durch die Bildung der Abfallstoffe bewirkt wird, daß also die Reizung des Sehnervs in dem Zerfallsprozeß der Sehstoffe ihre Ursache hat. In welcher Art die Reizung des Sehnervs bei der Reaktion vor sich geht, darüber eine spezielle Ansicht zu äußern, scheinen mir noch nicht genügend experimentelle Grundlagen vorzuliegen. Es könnte sich um einen direkten chemischen Reiz der Abkömmlinge der Sehsubstanz auf den Nerven handeln. Dann wären als Abfallstoffe aufzufassen die bei dieser chemischen Reaktion

auf tretenden Körper, als Sehs substanz, die nach geliefert werden müßte, außer dem unmittelbar beeinflussen lichtempfindlichen Körper auch noch die Substanz des Sehnervs, der dauernd regeneriert werden müßte. Es könnte aber beim Zerfall der Sehs substanz auch ein elektrischer Reiz gesetzt werden, sei es durch freiwerdende Elektronen, sei es durch die zeitweilig elektrisch polarisierten Zerfallsprodukte, die dann analog den Ionen aufzufassen wären.

Das Vorhandensein von Abfallstoffen verdünnt die Sehstoffe, bedingt also auch eine geringere Menge von neuen Zerfallsvorkommen, eine geringere physiologische Empfindlichkeit. Nennen wir die Menge an Sehstoffen des dunkel adaptierten Auges S_0 , der die Menge 0 an Abfallstoffen entspricht, und S jene Menge, die in einem dem Licht ausgesetzten Auge vorhanden ist, beide gerechnet pro Nervenendigung, so können wir die physiologische Empfindlichkeit für diese durch das

Verhältnis $\frac{S}{S_0}$ messen. Sie erreicht demnach den Wert 1 im lichtge-

schützten, vollständig dunkel adaptierten Auge und sinkt auf Bruchteile hievon unter dem Einfluß einer Einstrahlung. Die physiologische Empfindlichkeit ist also ebensowohl von der Größe der einstrahlenden Energiemenge als von der Wellenlänge abhängig und ändert sich während der Dauer der Einstrahlung.

Man sieht nach alldem, daß wir es mit mehreren Prozessen zu tun haben. Das einfallende Licht wirkt auf die Sehs substanz ein und regt sie durch Resonanz zu Schwingungen an. Dies ist ein physikalischer Vorgang. In seiner Folge tritt die chemische Umwandlung der Sehs substanz ein. Für die erzeugte Menge an chemischen Reaktionsprodukten ist außer der Einstrahlung der Energie und ihrer Wellenlänge die photochemische Empfindlichkeit der Sehs substanz maßgebend. Sie ist eine Konstante des photochemisch reagierenden Systems, des Moleküls der lichtempfindlichen Substanz. Ihre Abhängigkeit von der Wellenlänge der Einstrahlung wird dargestellt durch eine Kurve, die mit einer Resonanzkurve identisch ist. Der nächste Prozeß ist die Reizung des Sehnervs durch den Zerfall der Sehs substanz. Diese Reizung findet nur während der Dauer des Zerfalls statt, ihre Stärke ist nur indirekt abhängig von der einfallenden Energie und unmittelbar gegeben durch die Menge der zerfallenden Systeme. Diese aber ist wesentlich bestimmt durch die Menge der vorhandenen Sehs substanz. Die Konzentration der Seh-

substanz, $\frac{S}{S_0}$, definiert uns die physiologische Empfindlichkeit. Deren

spektrale Verteilung ist natürlich identisch mit jener der photochemischen, ihre Größe aber abhängig von der Vorgeschichte der Netzhaut. Dieser ganze Prozeß ist ein physiologischer Vorgang und bis hieher läßt sich die Kette verfolgen. Der letzte Teil des Prozesses, die Umsetzung des Nervenreizes in Empfindung, also die psychologische Phase des ganzen Vorganges, bleibt auch weiterhin völlig dunkel.

Es hat sich ergeben, daß für die Empfindung außer der einfallenden Strahlung die physiologische Empfindlichkeit wesentlich bestimmend ist. Es wird deshalb nützlich sein, quantitative Beziehungen zwischen der physiologischen Empfindlichkeit, den Mengen der Sehsubstanz im Bereiche der Nervenendigung, ihrer photochemischen Empfindlichkeit, der einfallenden Lichtenergie und dem Vorgang der Regeneration, d. i. der Nachfuhr neuer lichtempfindlicher Substanz auf dem Wege des Blutkreislaufes aufzustellen.

Wir bezeichnen im folgenden die Mengen der Sehstoffe mit S . Es wird unter dem Einfluß einer einfallenden Lichtenergie der Vorrat an Sehstoffen abnehmen, und zwar proportional der Intensität, also der in der Zeiteinheit einfallenden Energiemenge, und proportional der Größe des Vorrates. Die Änderung der Sehstoffmenge ist also $dS_1 = -\sigma \cdot S \cdot dL/dt \cdot dt$. Setzen wir voraus, daß wir das Auge einer konstanten Intensität aussetzen, so ist $dL/dt = I$ und wir bekommen $dS_1 = -\sigma \cdot S \cdot I \cdot dt$ für die Änderung der Sehstoffmenge. Diesem Prozeß wirkt die Zufuhr entgegen. Wir können sie proportional der Menge der Abfallstoffe, also dem Werte $S_0 - S$ setzen und bekommen demgemäß für die hiedurch bewirkte Änderung der Sehstoffmenge $dS_2 = \rho \cdot (S_0 - S) \cdot dt$, wobei in der Konstanten ρ auch jene Konstante bereits enthalten ist, welche eventuell das Gewichtsverhältnis der zersetzten Sehstoffe und der aus ihnen entstandenen Abfallstoffe bestimmt. Die gesamte Änderung der Sehstoffmenge ist uns gegeben durch $dS_1 + dS_2$. Es ist also $dS = -\sigma \cdot I \cdot S \cdot dt + \rho (S_0 - S) dt$. Wir bekommen durch Integration dieser Gleichung

$$t = -\frac{1}{\sigma I + \rho} \cdot \log_{\text{nat}} k \cdot [\rho S_0 - (\sigma I + \rho) S].$$

Die Konstante k bestimmt sich aus der Bedingung, daß S zur Zeit $t = 0$ dem Anfangswert der Sehstoffmenge gleich sein muß, also jener Menge Σ , die im Auge vorhanden war, als die konstante Intensität I zu wirken begann. Wir erhalten schließlich nach einer leichten Umformung

$$S = \frac{\rho S_0}{\sigma I + \rho} \left(1 - e^{-(\sigma I + \rho)t}\right) + \Sigma e^{-(\sigma I + \rho)t}$$

Dieser Wert S strebt mit wachsender Zeit einem Grenzwert zu, der sich aus der Gleichung ergibt, wenn wir $t = \infty$ setzen, zu

$$\bar{S} = \frac{\rho S_0}{\sigma I + \rho}.$$

Diese Gleichungen geben uns die Sehstoffmenge als Funktion der konstanten Intensität und der Zeit t . Wir können aus ihnen leicht die Gleichungen gewinnen, welche uns quantitativ die Veränderung der physiologischen Empfindlichkeit des Auges geben, wenn wir diese durch das Verhältnis S/S_0 messen.

Da in den obigen Gleichungen σ eine Funktion der Wellenlänge ist, so ist natürlich auch S und ebenso die Empfindlichkeit $E = S/S_0$ eine Funktion der Wellenlänge. Die Konstante ρ ist natürlich von der Wellenlänge unabhängig.

Es läßt sich also die oben dargelegte Anschauung in quantitativer Form darstellen und gibt uns die Empfindlichkeit als Funktion der wirksamen Helligkeit. Durch Messung der Veränderung der physiologischen Empfindlichkeit mit der Zeit lassen sich die Konstanten in diesen Ausdrücken bestimmen.

Es ist nicht zu erwarten, daß die oben gegebenen Gleichungen den physiologischen Vorgang im Auge strenge widerspiegeln. Wir müssen bedenken, daß der Verbrauch an Sehstoffen, ebenso wie die Anhäufung von Abfallstoffen die Betätigung eines nervösen Zentrums zur Folge haben wird, das den Kreislauf der Nährstoffe in den Netzhautelementen dem Bedarf entsprechend regelt. Wir werden also erwarten dürfen, daß die Schwelle, welche für das Einsetzen der Tätigkeit eines solchen nervösen Zentrums unbedingt angenommen werden muß, Modifikationen an diesen Gleichungen hervorbringen wird. Diese setzen ja voraus, daß schon die geringste Menge an Abfallstoffen zu ihrer Abfuhr Anlaß gibt. Es wird aber bestimmt erst einer gewissen Anhäufung bedürfen, bevor der Ersatz und die Abfuhr beginnen. Ändert sich der Lichteinfall und damit die Geschwindigkeit des Abbauprozesses, so wird auch wieder eine gewisse Zeit verstreichen, bevor die entsprechende Änderung in der Zufuhr und Abfuhr einsetzt. Beendigen wir den Lichtreiz durch Abschluß des Lichteinfalls in das Auge, so wird trotzdem die Zufuhr an Sehstoffen und Abfuhr der Abfallstoffe eine Zeitlang ungeändert weitergehen; dies wird zur Folge haben, daß die Sehstoffe rascher zunehmen als es der Menge der Abfallstoffe entspricht und daß wir eine Störung des Gleichgewichtes derselben bekommen. Es wird ganz bestimmt dann Zufuhr und Abfuhr der obigen Gleichung nicht mehr entsprechen, wir werden Schwankungen in der Geschwindigkeit der Zu- und Abfuhr haben.

Wir wollen im folgenden aber von derartigen Erscheinungen absehen und nur strikte die Annahme dreier Grundempfindlichkeiten und die Folgerungen, die sich daraus ergeben, heranziehen. Wir haben also die weiter oben allgemein durchgeführte Ableitung, soweit wir sie überhaupt als strenge gültig annehmen dürfen, für jede der drei Grundempfindlichkeiten durchzuführen. Wir haben demgemäß zwischen dreierlei Sehstoffen, dreierlei Abfallstoffen und dreierlei physiologischen Empfindlichkeiten zu unterscheiden. Natürlich werden wir auch für die Konstanten in den Gleichungen dreierlei Werte zu unterscheiden haben. Wir bekommen die bezüglichen Gleichungen, wenn wir in den weiter oben angeführten Ausdrücken die Größen S , ρ , σ beziehungsweise mit dem Index r , g , b versehen. Wir werden dann ebenso mit E_r , E_g , E_b die drei Grundempfindlichkeiten unterscheiden. Die Empfindungen selbst sind jederzeit bestimmt durch die Empfindlichkeit E und die in der Zeiteinheit einfallende Lichtenergie I .

Wir werden die Annahme machen dürfen, daß die Empfindung dem Produkt $I \cdot E$ proportional sei.

Jegliche Empfindung, die wir unter Vermittlung unseres Sehapparats haben können, ist eine Farbempfindung. Es wird für jedes Netzhautelement entsprechend der Zusammensetzung der einfallenden Lichtenergie eine bestimmte Reizung jeder der drei Grundempfindlichkeiten stattfinden und entsprechend dieser Reizung werden wir zu drei Grundempfindungen kommen, welche durch ihr Verhältnis den Farbton bestimmen. Ich habe in einer neulich veröffentlichten Abhandlung¹ die Ausdrücke gegeben, durch welche sich die psychologischen Bestimmungsstücke Helligkeit, Sättigung und Farbton aus den drei Grundempfindungen errechnen lassen. Bei jenen Überlegungen war natürlich stillschweigende Voraussetzung, daß konstante Grundempfindlichkeiten bestehen. Dann entspricht einer Reizung konstanter Intensität und Wellenlänge auch ein zeitlich unveränderliches Verhältnis der drei Grundempfindungen. Anders aber, solange die Empfindlichkeiten und ebenso die Stärken der Empfindungen inkonstant sind.

Es gibt nun die zwei Möglichkeiten, daß entweder die photochemischen Empfindlichkeiten sowie die Regenerationskonstanten für alle drei Grundempfindlichkeiten identische Werte haben oder daß zu jeder derselben andere Werte gehören. Im ersten Fall würden die drei Grundempfindlichkeiten zeitlich in gleichen Verhältnissen abnehmen, im zweiten aber nicht. Da wir die Empfindlichkeiten durch das Verhältnis S/S_0 messen und sich aus der obigen Gleichung ergibt

$$S/S_0 = E_t = \frac{\rho}{\sigma I + \rho} \left(1 - e^{-(\sigma I + \rho)t} \right) + \frac{\Sigma}{S_0} \cdot e^{-(\sigma I + \rho)t}$$

so wären die Werte $E_2/E_1 = \mu$ für identische σ und ρ untereinander gleich. Sie sind, wenn nur die vorhergehende Beleuchtung der Netzhaut nicht stärker war als jene bei dem zu analysierenden Versuch, stets kleiner als 1 und nähern sich mit wachsender Zeit einem Grenzwert. Man sieht sofort, daß in diesem Fall die Helligkeit auf den Wert $\mu \cdot H$ sinkt, da in der Summe $X_1 + X_2 + X_3 = H$ jeder der drei Summanden mit dem gleichen Faktor multipliziert erscheint. Anders ist es mit der Sättigung und dem Farbton. Wir erhielten für diese beiden Größen die Ausdrücke

$$s = \frac{X_1 + X_2 - X_3}{X_1 + X_2 + X_3} \text{ und } v = \frac{X_1 - X_3}{X_2 - X_3}.$$

Sie ändern ihren Wert nicht, wenn Zähler und Nenner mit dem gleichen Faktor μ multipliziert werden.

¹ E. Haschek, Quantitative Beziehungen der Farbenlehre. Diese Ber., Abt. IIa, Bd. 136 (1927).

² L. c.

Nehmen wir nun den zweiten möglichen Fall, daß die μ für die drei Grundempfindlichkeiten verschiedene Werte haben. Sie sind unter der obigen Voraussetzung alle drei je kleiner als Eins. Man sieht, daß wieder die Helligkeit mit der Dauer des Reizes zu einem Grenzwert absinken muß, daß aber unter dieser Voraussetzung auch die Sättigung und der Farbton einer Empfindung zeitlich variabel werden.

Es bietet uns also die Beobachtung der Abhängigkeit eines Farbtons von der Dauer eines konstanten Reizes die Möglichkeit zu entscheiden, ob die Faktoren μ , respektive die Konstanten σ und ρ für die drei Grundempfindlichkeiten gleich oder verschieden sind. Ich habe deshalb Frau Dr. Theodora Jankovic zu solchen Beobachtungen veranlaßt. Die Methode derselben war sehr einfach. Mit einem großen Rowland'schen Gitter (Krümmungsradius des Spiegels 456 cm, 20.000 Strich pro Zoll) wurde ein Spektrum erster Ordnung erzeugt. In der Fläche der Scharfeinstellung war eine Konvexlinse von +4 D. aufgestellt, die ein scharfes Bild der geteilten Fläche in das Loch einer Blende entwarf, durch das man auf die Linsenfläche blickte. Man sah dort einen der Größe der Linse entsprechenden Ausschnitt aus dem Spektrum in voller Schärfe und maximaler Helligkeit. Eine Abdeckung der Linse gestattete die Beobachtung eines passend gewählten Wellenlängenbereiches: sie hatte die Form eines Rechteckes mit der Länge 2 parallel den Linien und der Seite 1 in der Richtung des Spektrums und gestattete einen Wellenlängenbereich von $1.7 \mu\mu$ zu überblicken. Verdeckte man zunächst die Hälfte dieses Ausschnittes, so daß beiläufig ein quadratisches Feld sichtbar blieb, fixierte den Rand der Abdeckung und entfernte sie nach einiger Zeit, so sah man außer einer Helligkeitsdifferenz eine von der Dauer der vorhergehenden Fixation und der Wellenlänge abhängige Farbtonänderung. Es wurde nun mit einer sehr einfachen Vorrichtung der Wellenlängenunterschied bestimmt, der dieser Farbtonänderung entsprach. Frau Dr. Jankovic erhielt so Werte, die für konstante Zeiten über das ganze Spektrum Größe

Farbton $\mu\mu$	$t = 5 \text{ sec.}$	$t = 25 \text{ sec.}$	Farbton $\mu\mu$	$t = 5 \text{ sec.}$	$t = 25 \text{ sec.}$
670	— 0.41	— 0.64	550	+ 1.40	+ 2.36
660	— 1.05	— 1.72	540	+ 1.95	+ 2.94
650	— 1.63	— 3.17	530	+ 1.59	+ 2.39
640	— 1.91	— 3.02	520	+ 0.11	+ 0.24
630	— 1.85	— 2.75	510	— 0.38	— 0.89
620	— 1.72	— 2.49	500	— 0.74	— 1.28
610	— 1.59	— 2.27	490	— 0.99	— 1.44
600	— 1.40	— 2.01	480	— 1.11	— 1.60
590	— 1.09	— 1.76	470	— 1.16	— 1.69
580	— 0.73	— 1.34	460	— 1.12	— 1.63
570	— 0.25	— 0.70	450	— 0.96	— 1.45
560	+ 0.89	+ 1.66	440	— 0.59	— 1.05

und Sinn der Farbtonänderung geben, die als Folge des Abklingens der Empfindlichkeit auftrat. Ich gebe in der Tabelle auf p. 11 einige dieser Werte wieder.

Positive Werte bedeuten eine Farbtonänderung im Sinne einer Vergrößerung, negative im Sinne einer Verkleinerung der Wellenlänge um den in der Tabelle angegebenen Betrag. Jenseits der hier gegebenen Grenzen gegen die Enden des Spektrums ließen sich Angaben nicht machen, da als Folge der Ermüdung Farbtöne auftraten, die im Spektrum nicht vertreten sind.

Hier wurde die Ermüdung der Netzhaut durch Reiz mit der Farbe bewirkt, deren Farbtonänderung zu bestimmen war. Es war naheliegend, diese Versuche auch zu wiederholen für Ermüdungen, die mit Reizungen bewirkt werden, die wesentlich nur je eine Grundempfindung treffen. Einige der bezüglichen Messungen gibt die folgende Tabelle für eine Ermüdungszeit von 10 Sekunden.

Farbton $\mu\mu$	Rot	Grün	Blau
630	—	+ 6·64	—
620	—	+ 6·42	—
610	— 8·68	+ 6·05	—
600	— 4·09	+ 5·49	—
590	— 3·06	+ 4·47	—
580	— 2·55	+ 3·73	—
570	— 2·09	+ 3·00	+ 0·7
560	— 1·62	+ 2·40	+ 1·49
540	— 1·0	+ 1·21	+ 2·96
520	— 0·45	—	+ 3·04
500	0	—	+ 1·44
480	+ 1·0	— 0·89	—
460	+ 0·89	— 0·38	—
440	0	0	+ 1

Es zeigen also alle diese Versuche unzweifelhaft, daß nicht nur die Helligkeit, sondern auch der Farbton variabel ist, daß also das Verhältnis der Grundempfindungen mit der Dauer des Reizes sich ändert.

Daß wir bei weißen Flächen auch bei eigens angestellten Versuchen im allgemeinen eine Änderung des Farbtönen, wie sie aus obigen Formeln folgt, nicht beobachten, hängt damit zusammen, daß einerseits wohl der Unterschied zwischen den den Grundempfindlichkeiten eigentümlichen Konstanten kein sehr großer ist und andererseits, daß die Nuancenempfindlichkeit des Auges besonders im Gebiete der wenig gesättigten Farbtöne eine zu kleine ist; läßt sich doch im Farbensdreieck ein ganz bedeutender Bereich um den Schwerpunkt des Farbensdreieckes herum abgrenzen, der Farbtönen entspricht, die uns als weiß erscheinen. Es müssen eben für jeden Farbton gewisse Minimalsättigungen erreicht werden, damit die farbige Qualität zur Beobachtung gelangen könne. Gehen wir aber zu extremen Helligkeiten über, so lassen sich die auftretenden Farbtonänderungen auch bei weiß immerhin beobachten; und gerade diese Farbtonänderungen

erschweren ungemein die Beobachtung des Abklingens der Helligkeitsempfindung mit der Zeit bei weißem Licht großer Intensität.

Die Änderung des Farbtons, die als Folge der Ermüdung auftritt, ist schon seit langer Zeit bekannt. Wir können da verschiedene Gruppen von Erscheinungen unterscheiden, die sich ohne weiteres aus der variablen Empfindlichkeit der Netzhaut erklären lassen. In die erste Gruppe von Erscheinungen gehört jene der Farbtonänderungen besonders heller Farbstellen gegenüber einem gleichfarbigen, wesentlich dunkleren Grund, also Farbtonänderungen, die bei simultaner Beobachtung differenter Helligkeiten auftreten. Wir können da als Beispiel etwa die Tatsache anführen, daß die Natriumlinie uns in einem ganz anderen Gelb erscheint, als ihre Umgebung im Spektrum. Man ist sehr erstaunt, eine hellgelbe Linie auf deutlich orangegelbem Hintergrund zu sehen. Es ist diese Erscheinung aber nicht bloß auf die Natriumlinie beschränkt, sondern tritt in allen Fällen auf, wo wir besonders helle Linien auf einem schwachen kontinuierlichen Grunde sehen. So habe ich die langwelligen Linien des Barium-Bogenspektrums gelborange auf dem dunkelroten Hintergrund gesehen, den die zahllosen Linien von schwachen Banden bilden. Ebenso wie Farbtonänderungen beobachtbar sind, so sind unter gleichen Umständen sehr leicht auch starke Sättigungsänderungen beobachtbar. Die starken grünen und blaugrünen Linien des Silbers, des Zinks, des Eisens und vieler anderer erscheinen deutlich weißlich gegenüber den tieffarbigen schwachen Linien, die violetten Linien eines Linienspektrums sind deutlich in Farbton und Sättigung unterschieden von einem kontinuierlichen, lichtschwachen Hintergrund. Die Tatsache, daß bei großer Helligkeit alle Farben sich dem Weiß nähern, erklärt sich auch aus dem oben Gesagten, ebenso wie die von Helmholtz besonders hervorgehobene Beobachtung, daß beim Durchblicken durch ein rotes Glas gegen die Sonne diese gelb erscheint. Wird doch in diesem Falle die Grundempfindlichkeit Rot viel stärker ermüden als die Grundempfindlichkeit Grün und wir bekommen daher ein ganz anderes Verhältnis zwischen diesen beiden Grundempfindungen an der Stelle der Netzhaut, wo das Bild der Sonnenscheibe entsteht, gegenüber den Stellen, welche dem Himmels-hintergrund entsprechen. Wir werden, wenn wir auf die Zahlenwerte von König und Dieterici für einen Augenblick zurückgehen, für das Sonnenbild das Verhältnis Rot zu Grün der Grundempfindungen wesentlich näher an 1 haben als für den Himmelshintergrund, also eine Farbe beobachten, die dem Gelb sehr viel näher liegt als es dem Farbton des roten Glasfilters entspricht.

Auch für das Purkinje'sche Phänomen gibt die hier entwickelte Ansicht eine einfache Erklärung. Purkinje hat die Aufmerksamkeit darauf gelenkt, daß bei abnehmender Helligkeit der Beleuchtung die blauen Farbtöne weniger rasch an Helligkeit einbüßen als die roten. Als Erklärung für diese Tatsache drängt sich die für die drei Grundempfindlichkeiten verschiedene Ermüdbarkeit und Regeneration auf. Es ist im Grunde das Purkinje'sche Phänomen nur ein Hinweis

darauf, daß die Grundempfindung Blau mit zunehmender Helligkeit rascher ermüdet als Rot, so daß in den König'schen Verhältniszahlen mit steigender Helligkeit die Werte für Blau gegenüber jenen für Rot zurücktreten. Es sagt uns also das Purkinje'sche Phänomen unmittelbar, daß μ_r kleiner ist als μ_b . Ebenso können wir aus der Beobachtung an der Natriumlinie schließen, daß μ_r größer ist als μ_g . Da nun bei konstanter Helligkeit I die μ um so kleiner werden, je größer σ/ρ wird, so können wir die entsprechenden Schlüsse auch mit einiger Wahrscheinlichkeit für die photochemischen Empfindlichkeiten σ der drei Sehstoffe ziehen. Es ist ja ziemlich naheliegend, anzunehmen, daß die Regenerationskonstanten ρ nicht allzusehr voneinander abweichen werden, daß also für die Änderungen von σ/ρ wesentlich die σ bestimmend sind. Wir können unter dieser Annahme also schließen, daß bezüglich der photochemischen Empfindlichkeiten das umgekehrte Verhältnis zu Recht besteht, wie für die Größen μ .

Hier hatten wir Änderungen des Farbtones und der Sättigung als Folge der Ermüdungsverschiedenheiten benachbarter Netzhautstellen. Wir bekommen aber ebensolche Erscheinungen und beobachten dann ungewohnte Farbtöne, wenn wir sukzessive Beobachtungen machen. Wir müssen zu diesem Zweck die Netzhaut durch intensiven farbigen Reiz ermüden und vor dem Abklingen der Ermüdung sie mit Lichtern derselben spektralen Zusammensetzung, aber wesentlich geringerer Intensität beleuchten. Wir beobachten so bei dem sogenannten Brücke-Bezold'schen Phänomen auch nichts anderes als eine Farbtonänderung als Folge der Ermüdung und wir beobachten die Annäherung der nuancierten rötlichen, grünlichen und bläulichen Farbtöne an gleichmäßig gefärbtes Rot, Grün und Blau nur dann, wenn wir der Netzhaut vorher das Spektrum mit großer Intensität zugeführt hatten und diese dann rasch schwächen. Beobachten wir aber mit dem unermüdeten Auge das Spektrum, so sehen wir, sobald nur die Reizschwelle überschritten ist, alle die Farben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett, wie wir sie im Spektrum normaler Intensität zu sehen gewohnt sind. Es ist also das Brücke'sche Phänomen nicht so sehr gebunden an die geringe Intensität als vielmehr daran, daß die Netzhautstellen, denen die Spektralfarben zugeführt werden, einseitig sehr stark ermüdet sind.

Haben wir uns bisher nur mit kontinuierlichen und in der Stärke veränderlichen Reizen beschäftigt, so wollen wir uns jetzt zuwenden der Betrachtung einer Reizung des Auges durch intermittierendes Licht. Wir haben solche beim Beobachten elektrischer Funkenströme oder in der Betrachtung der Leinwand bei kinematographischen Vorführungen. In allen solchen Fällen, wo jede Netzhautstelle mit Licht periodisch veränderlicher Intensität gereizt wird, haben wir zwischen Zeiträumen, während welcher Licht das Auge trifft, Zeiträume der Dunkelheit oder viel kleinerer Helligkeit eingeschaltet. Nach dem oben Gesagten müssen wir annehmen, daß die Lichtempfindlichkeit mindestens während der Dauer des Reizes, bei entsprechend kräftigen Reizungen auch über die Dauer dieses Reizes hinaus abnimmt

(Persistenz des Lichteindrucks). Während der Dunkelpause steigt die Empfindlichkeit wieder an, wird aber, wenn nur die Dunkelpause genügend kurz ist und der vorhergehende Lichteindruck genügend stark war, den alten Wert nicht mehr erreichen. Bei der nächsten Belichtung wird also das Auge nicht mehr die ursprüngliche Empfindlichkeit haben und sie wird zu einem noch tieferen Wert beim Eintritt der zweiten Dunkelpause gesunken sein als beim Eintritt der ersten. Es ließe sich ohne weiteres durch Einsetzen von $dL/dt = I \cdot \sin \omega t$ in die weiter oben gegebene Gleichung der Ausdruck für die Änderung der Sehstoffmenge hinschreiben, der diesen Verhältnissen entspricht. Es läßt sich aber die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Zeit für einen solchen periodisch wechselnden Reiz nicht in geschlossener Form angeben und wir können daher streng quantitative Schlüsse nicht ziehen. Wir können aber nach den obigen Überlegungen vermuten, daß die Empfindlichkeit des Auges bei genügend rasch wechselnder Helligkeit sich auf einen geringeren Wert einstellen wird, als es dem Mittelwert der Helligkeit entspricht.

Damit hängt es zum Teil zusammen, daß ein Funkenstrom uns eine geringere subjektive Helligkeit zeigt als seiner photographischen Wirksamkeit entspricht. Aus demselben Grund muß die Intensität der Lichtquelle bei kinematographischen Aufführungen eine wesentlich größere sein als bei der Projektion stillstehender Bilder.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß aus der eben besprochenen Erscheinung die Ungültigkeit des Talbot'schen Gesetzes folgt, sobald die Frequenz der Helligkeitsreize über ein gewisses Maß gesteigert wird. Dieses Gesetz besagt folgendes: Hat man eine rotierende Scheibe mit Sektoren bedeckt, die abwechselnd weiß und schwarz sind, so erscheint sie grau mit einer Helligkeit, die bloß von dem Verhältnis der Sektorgrößen, aber nicht von ihren absoluten Werten abhängt. Es ist also etwa bei der Wahl des Verhältnisses Weiß zu Schwarz wie 1 : 1 darnach gleichgültig, ob man zwei Sektoren zu je 180° wählt oder vier zu je 90° usw. Ich habe nun durch Pater Frodl solche Sektoren herstellen und untersuchen lassen, bei denen die Sektorgrößen auf wenige Grade bis zu 1° herabgingen. Im praktischen Versuch wurde allerdings nicht mit rotierenden Scheiben gearbeitet, sondern es wurden passend hergestellte Raster mit schwarzen und weißen Streifen auf die Mantelfläche eines rotierenden Zylinders so aufgezogen, daß die Streifen parallel der Erzeugenden verliefen. Pater Frodl findet mit dieser Anordnung bedeutende Abweichungen vom Talbot'schen Gesetz durch die photometrische Vergleichung des Mischgrau seiner eng rastrierten Streifen mit solchen, bei denen je 45° Schwarz und Weiß aufeinander folgten. Die folgende kleine Tabelle, die auch den Einfluß der Helligkeit bei der Beobachtung erkennen läßt, gibt eine Probe aus dem Beobachtungsjournal wieder.

Ebenso wie das Talbot'sche Gesetz bei so hohen Frequenzen der Lichtreize bezüglich der Helligkeit versagt, so zeigt sich, daß auch ganz entsprechend der hier vertretenen Ansicht die Sättigung

Helligkeit	Rasterbreite in Winkelmaß				
	$1\frac{1}{2}^{\circ}$	1°	2°	5°	10°
1	0·755	0·796	0·825	0·884	0·937
0·25..	0·789	0·832	0·877	0·917	0·965
0·10..	0·862	0·892	0·928	0·965	0·971

Den Winkelwerten entsprechen Belichtungszeiten jeder Netzhautstelle, die $0\cdot92\cdot10^{-4}$ Sekunden für $1\frac{1}{2}^{\circ}$ bis $18\cdot2\cdot10^{-4}$ Sekunden bei 10° variieren.

und der Farbton der Mischempfindung von der Frequenz abhängig sind, falls man die Raster nicht schwarz-weiß, sondern farbig-weiß wählt. Da aber über die Resultate dieser Untersuchung noch wird ausführlich berichtet werden müssen, erübrigt sich hier trotz der Wichtigkeit des Talbot'schen Gesetzes für viele Zwecke ein weiteres Eingehen auf die Resultate der Untersuchungen Pater Frodl's.

Es ist vielleicht nicht überflüssig zu betonen, daß die obigen Darlegungen alle sich zunächst nur auf das Sehen der Fovea beziehen, also die Lichtempfindlichkeit der Zapfen betreffen. Es dürfte aber kaum ein Grund angeführt werden können, der gegen eine Übertragung der Grundzüge dieser Anschauung auf alle lichtempfindlichen Elemente der Netzhaut spräche. Es scheint mir vielmehr wahrscheinlich, daß auch das Stäbchensehen an die Zersetzung einer, und zwar nur einer lichtempfindlichen Substanz gebunden ist. Wir werden, um den Beobachtungen gerecht zu werden, aber annehmen müssen, daß die photochemische Empfindlichkeit der Stäbchensehsubstanz eine sehr viel größere ist als jene der Zapfensehsubstanz. Dementsprechend setzt schon eine für die Zapfen relativ geringe Helligkeit die Empfindlichkeit der Stäbchen und damit die entsprechende Empfindung so weit herab, daß sie uns neben dem Zapfensehen fast nicht zum Bewußtsein kommt.

Es ist wohl im Laufe aller dieser Darlegungen genügend klar betont, daß sie als eine Weiterführung oder auch eine Ergänzung der Young-Helmholtz'schen Theorie gedacht sind. Sie zeigen wohl durch die Annahme photochemischer Prozesse eine gewisse Ähnlichkeit mit der Hering'schen Theorie, doch besteht diese Ähnlichkeit, wie man sofort erkennt, nur äußerlich in dieser Annahme, während ihre Verwendung von den Darlegungen Hering's weit abweicht.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften
mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse](#)

Jahr/Year: 1928

Band/Volume: [137_2a](#)

Autor(en)/Author(s): Haschek Eduard

Artikel/Article: [Ein Beitrag zur Young-Helmholtz'schen Theorie. 513-528](#)