

Über das Talbot'sche Gesetz

Von

Prof. Dr. Eduard Haschek

Aus dem II. physikalischen Institut der Universität Wien

(Vorgelegt in der Sitzung am 31. Jänner 1929)

In einer vorhergehenden Veröffentlichung¹ habe ich eine Theorie der Wirkung gegeben, welche das Licht auf die empfindlichen Endigungen des Sehnervs ausübt. Ich habe dort neben anderen Hinweisen auf bekannte Erscheinungen auch dargetan, daß das Talbot'sche Gesetz nicht allgemein, sondern nur mit gewissen Einschränkungen gültig ist. Dabei bezog ich mich auf Versuche, die Pater Vinzenz Frodl auf meine Veranlassung und unter meiner Leitung ausgeführt und für seine Doktordissertation² verwendet hat. Es ist vielleicht nicht überflüssig, die dort gemachten Andeutungen auszuführen und auf die Versuche näher einzugehen.

Die theoretischen Überlegungen über den Vorgang des Zerfalls und der Regeneration der Sehstoffe im Auge führten, wenn mit S die Menge der Sehstoffe, mit σ die Konstante des Zerfalls, mit ρ jene der Regeneration bezeichnet wird und t die Zeit bedeutet, zu der allgemeinen Gleichung:

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

S_0 ist dabei die maximale Sehstoffmenge entsprechend der vollen Dunkeladaptation, Σ die zur Zeit $t = 0$ tatsächlich vorhandene. Lassen wir die konstante Intensität I genügend lange Zeit einwirken, so strebt S einem Grenzwert \bar{S} zu, der durch

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

gegeben ist.

Durch die verfügbare Sehstoffmenge ist die Empfindlichkeit der Netzhaut definiert, weshalb in der angezogenen Publikation das Verhältnis S/S_0 als Maß derselben verwendet wurde. Dementsprechend wäre die Empfindlichkeit für Lichtreize bei voller Dunkeladaptation gleich der Einheit zu setzen, während $S/S_0 = 0$ den Fall vollständiger Blendung, d. i. Blindheit, bedeutet. Diese Definition ist scheinbar

¹ E. Haschek, Ein Beitrag zur Young-Helmholtz'schen Theorie, diese Ber., Bd. 137, Abt. IIa (1928).

² P. V. Frodl, Über die Grenzen der Gültigkeit des Talbot'schen Gesetzes (1927).

nicht in Übereinstimmung mit der gewöhnlichen. Diese setzt das Verhältnis der Empfindung zu der sie erregenden Energie als Empfindlichkeit fest. Da nun nach der von mir vertretenen Ansicht eine Reizung des Sehnervs nur durch den Zerfallsprozeß, nicht aber durch die Zerfallsprodukte, ihre Regeneration usw. stattfindet, so müssen wir die Empfindung proportional setzen der Zahl der zerfallenden Sehstoffsysteme.

Es bedeutet dies gewissermaßen einen quantenhaften Aufbau der Empfindung. Es setzt sich danach eine jede Gesichtsempfindung aus einer endlichen Anzahl von Elementen zusammen, deren jedes der Art nach jener Empfindung entspricht, wie sie durch den Zerfall der betreffenden Sehstoffsysteme entsteht, der Stärke nach gegeben ist durch die Gesamtzahl der zerfallenden Systeme derselben Art. Es ist natürlich nicht notwendig, anzunehmen, daß der Zerfall eines Einzelsystems bereits eine wahrnehmbare Empfindung hervorruft, es wird vielmehr schon der Schwellenwert den Zerfall einer größeren oder kleineren Anzahl von Einzelsystemen zur Bedingung haben. Wir können dies daraus schließen, daß bei der Beobachtung des Spektrums Farbtonänderungen nicht oder wenigstens fast nicht beobachtet werden, wenn wir seine Helligkeit von Beträgen, die unter der Schwelle liegen, immer höher steigen lassen.

Wir könnten, wenn wirklich die Schwelle schon durch den Zerfall eines Einzelsystems erreichbar wäre, an den Enden des Spektrums sowie mindestens in der Gegend von $500 \mu\mu$ die Grundempfindungen rein erhalten. Das bekannte Brücke'sche Phänomen kann hier nicht als Gegenbeweis herangezogen werden, da es nur bei Herabsetzung der Helligkeit auftritt, wenn diese genügend rasch vorgenommen wird. Beobachtet man aber das Spektrum von Helligkeiten an, die unter der Schwelle liegen, so sieht man alle Farben in derselben Art und Verteilung im lichtschwächsten wie im hellen Spektrum. Bei einer Helligkeitssteigerung im Spektrum ist keine Andeutung eines dem Brücke'schen Phänomen analogen zu konstatieren.

Wir können also die Stärke einer Empfindung durch die Zahl der Empfindungselemente, das ist durch die Zahl der zerfallenden Resonatorsysteme, messen. Diese ist gemäß den 1. c. entwickelten Voraussetzungen gegeben durch

$$dS = -\sigma \cdot \frac{dL}{dt} \cdot S \cdot dt$$

Darin bedeutet S wie oben die Sehstoffmenge, t die Zeit, dL/dt die pro Zeiteinheit einfallende Energiemenge der Strahlung bestimmter Wellenlänge, σ die in der Zeiteinheit durch die Menge Eins dieser Strahlung zerfallende Sehstoffmenge. Das negative Vorzeichen deutet an, daß die Sehstoffmenge abnimmt. Gemäß der gewöhnlichen Definition der Empfindlichkeit als Empfindung pro Energieaufwand ergibt sich daraus

$$\varepsilon = dS/dL = -\sigma S$$

für jede Wellenlänge. Man sieht daraus, daß die l. c. gemachte Supposition richtig ist, daß man tatsächlich den momentanen Sehstoffvorrat als Maß für die momentane Empfindlichkeit setzen kann und daß uns das Verhältnis S/S_0 ein bequemes relatives Maß ergibt.

Es ist vielleicht nicht überflüssig, nochmals ausdrücklich zu betonen, daß wir für jede der drei nach der Young-Helmholtz'schen Theorie vorausgesetzten Grundempfindungen auch eigene Grundempfindlichkeiten voraussetzen müssen. Das bedeutet die stete Berücksichtigung dreier ganz gleich gebauter Gleichungen mit Konstanten σ , ρ , S_0 , \bar{S} , die für jede der Grundempfindungen andere Werte haben. Obwohl nun jede der drei Grundempfindungen beim Tagessehen an der Empfindung beteiligt ist, so werden wir trotzdem häufig so überlegen können, als ob nur eine einzige Empfindlichkeit vorhanden und erregt wäre, nämlich stets dann, wenn sie alle drei in gleicher Weise betroffen werden. Wir werden aber stets genötigt sein, zu überlegen, ob nicht etwa auch im Verhältnis der Grundempfindlichkeiten und -empfindungen zu einander Änderungen eintreten, die zu geänderten Farbton- oder Sättigungsempfindungen Anlaß bieten könnten.

Die Young-Helmholtz'sche Theorie berücksichtigt nur das Tagessehen. Außer diesem haben wir aber auch noch das Dämmerungssehen bei ganz geringen Helligkeiten. Die dabei geweckten Empfindungen, als deren Vermittler allgemein die Stäbchen der Netzhaut angenommen werden, sind farblos, sie haben nur die Qualität der Helligkeit. Die Empfindlichkeit des Stäbchensehens ist aber eine wesentlich größere als jene des Zapfensehens. Wir kommen zu schon sehr gut merkbaren Helligkeitsempfindungen bei einfallenden Energiemengen, die weitaus noch nicht hinreichen, farbiges Sehen zu wecken. Ich hoffe, demnächst schon über Versuche in dieser Hinsicht berichten zu können und möchte hier nur bemerken, daß mir ein prinzipieller Unterschied zwischen Dämmerungssehen und Tagessehen insofern nicht zu bestehen scheint, als wir wohl auch für jenes eine ebensolche Theorie aufstellen können wie ich sie für das Zapfensehen entwickelt habe. Wir brauchen nur anzunehmen, daß die Empfindlichkeit eine viel größere ist, das ist, daß die dem Dämmerungssehen zugehörigen, hauptsächlich in den Stäbchen der Netzhaut lokalisierten Sehstoffe die zum Zerfall nötigen Amplituden der Resonanzschwingung schon bei viel kleineren eindringenden Energiemengen erreichen als die drei vorzugsweise in den Zapfen verteilten Sehstoffe. Dann genügen einerseits sehr viel kleinere Einstrahlungen bereits zur Erregung einer Empfindung, andererseits wird die Empfindlichkeit aber auch bei viel geringeren Werten der Helligkeit zu sehr kleinen Beträgen absinken, d. i. der Bländung unterliegen, als dies bei den farbigen Grundempfindlichkeiten der Fall ist. Dies erklärt, warum wir im Tagessehen von der Lichtempfindlichkeit der Stäbchen normalerweise kaum etwas bemerken und eigene Versuche anstellen müssen, um ihr Vorhandensein nachzuweisen.

Um nach dieser Abschweifung wieder auf die Frage nach dem Gültigkeitsbereich des Talbot'schen Gesetzes und auf die darauf bezüglichen Versuche von P. V. Frodl zurückzukommen, wollen wir die allgemeine Gleichung für die Empfindlichkeit wieder heranziehen. Sie ist abgeleitet unter der Voraussetzung der Einwirkung einer konstanten Helligkeit I . Wir können sie, da Sehstoffmengen und Empfindlichkeiten einander proportional sind, unter Berücksichtigung der Grenzbedingungen leicht in die Gestalt bringen

$$S = \bar{S} - (\bar{S} - \Sigma) \cdot e^{-(\sigma I + \rho)t},$$

wenn die Intensität I wirkt. Herrscht aber während der Beobachtungszeit Dunkelheit, ist also $I = 0$, so erhalten wir den Ausdruck für die ungestörte Regeneration

$$S = S_0 - (S_0 - \Sigma) \cdot e^{-\rho t},$$

da \bar{S} für die wirkende Intensität Null den Wert S_0 annimmt.

Zur Prüfung des Talbot'schen Gesetzes werden allgemein am Farbenkreisel schwarze und weiße Sektoren angebracht, so daß die konstante Winkelsumme derselben in beliebiger Weise zerlegt erscheint. Man bringt also etwa 180° Weiß und 180° Schwarz, je zweimal 90° Schwarz und Weiß, je viermal 45° usw. an. Auf diese Weise prüften Plateau, Helmholtz sowie E. Wiedemann und J. B. Messerschmitt, letztere bis zu Winkelwerten von $22 \cdot 5^\circ$ herab das Gesetz und fanden es bestätigt. Bei allen Versuchen wurde die Umdrehungsgeschwindigkeit des rotierenden Kreisels so gewählt, daß dieser eine gleichmäßige, flimmerfreie Fläche darstellte. Es wird also bei diesen Versuchen die beobachtende Netzhaut in gleichen einander folgenden Zeiträumen abwechselnd belichtet mit der Intensität I und dann wieder verdunkelt. Wir wollen diese Voraussetzungen auch einer kleinen theoretischen Überlegung unterlegen. Die Dauer der Belichtung ebenso wie jener der Dunkelpause sei τ , der Anfangswert der Sehstoffmenge zur Zeit $t = 0$ sei Σ . Dann gilt nach Ablauf von

$$1 \quad \cdot S_1 = \bar{S} - (\bar{S} - \Sigma) \cdot e^{-(\sigma I + \rho)\tau}$$

$$2 \cdot \tau \quad \cdot S_2 = S_0 - (S_0 - S_1) \cdot e^{-\rho\tau}$$

$$3 \cdot \tau \quad \cdot S_3 = \bar{S} - (\bar{S} - S_2) \cdot e^{-(\sigma I + \rho)\tau}$$

$$4 \tau \quad \cdot S_4 = S_0 - (S_0 - S_3) \cdot e^{-\rho\tau}$$

$$(2n-1) \cdot \tau \quad \cdot S_{2n-1} = \bar{S} - (\bar{S} - S_{2n-2}) \cdot e^{-(\sigma I + \rho)\tau}$$

$$2n \cdot \tau \quad \cdot S_{2n} = S_0 - (S_0 - S_{2n-1}) \cdot e^{-\rho\tau}$$

Da wir die Versuchsdauer beliebig lange wählen können, wird die Gesamtdauer $t = 2n \cdot \tau$ jedenfalls einen so großen Wert erreichen, daß wir ihn als unendlich rechnen können. Betrachten wir die Gleichungen, so sehen wir sofort ein, daß $\sigma I + \rho > \rho$, da alle Größen wesentlich positiv sind, daß daher $e^{-(\sigma I + \rho)\tau}$ kleiner bleiben muß als $e^{-\rho\tau}$. Das besagt aber, daß die Empfindlichkeit während der Dunkelpause um weniger zunimmt als sie während der Dauer der Lichtwirkung abgenommen hat, wenn nur die Zeitdauer der Dunkelheit, also der ungestörten Regeneration, nicht vergleichsweise unendlich groß, d. i. so groß ist, daß volle Erholung eintreten kann.

Ist die Zeitdauer τ so groß, daß praktisch die Empfindlichkeit zwischen den zwei Grenzwerten herumschwankt, die durch S_0 und S , wie es der angewendeten Helligkeit I entspricht, gegeben sind, dann haben wir die unangenehme Empfindung des Flackerns oder Flimmerns. Lassen wir τ immer kleiner werden, so werden wir den fortwährenden Wechsel der Empfindlichkeit nicht merken, es wird ihr Wert aber immer mehr sinken, und zwar um so rascher, je kleiner τ wird. Den Endwert der Empfindlichkeit, wie er sich bei den gewählten Versuchsbedingungen einstellt, können wir leicht bestimmen, wenn wir in den obigen Gleichungen sukzessive einsetzen. Wir bekommen dann folgende zwei Ausdrücke, je nachdem wir den oberen oder den unteren Grenzwert der Empfindlichkeit während einer Belichtung oder mutatis mutandis einer Dunkelpause bestimmen.

$$S_{2n-1} = [\bar{S}(1 - e^{-(\sigma I + \rho)\tau}) + S_0 e^{-(\sigma I + \rho)\tau} (1 - e^{-\rho\tau})] (1 + e^{-(\sigma I + 2\rho)\tau} + e^{-(\sigma I + 2\rho) \cdot 2\tau} + \dots + e^{-(\sigma I + 2\rho) \cdot \frac{2n-2}{2}\tau}) + \Sigma \cdot e^{-(\sigma I + 2\rho) \cdot \frac{2n-2}{2}\tau};$$

$$S_{2n} = [S_0(1 - e^{-\rho\tau}) + \bar{S} e^{-\rho\tau} (1 - e^{-(\sigma I + \rho)\tau})] (1 + e^{-(\sigma I + 2\rho)\tau} + e^{-(\sigma I + 2\rho) \cdot 2\tau} + \dots + e^{-(\sigma I + 2\rho) \cdot \frac{2n-2}{2}\tau}) + \Sigma \cdot e^{-(\sigma I + 2\rho) \cdot \frac{2n}{2}\tau}.$$

Da σ , I und ρ jedenfalls positiv sind, können wir die Reihe addieren und erhalten, wenn n sehr große Beträge erreicht, also »unendlich« wird, als Grenzwerte

$$\bar{S}_{2n-1} = \frac{\bar{S}(1 - e^{-(\sigma I + \rho)\tau}) + S_0 e^{-(\sigma I + \rho)\tau} (1 - e^{-\rho\tau})}{1 - e^{-(\sigma I + 2\rho)\tau}}$$

und

$$\bar{S}_{2n} = \frac{\bar{S} e^{-\rho\tau} (1 - e^{-(\sigma I + \rho)\tau}) + S_0 (1 - e^{-\rho\tau})}{1 - e^{-(\sigma I + 2\rho)\tau}}$$

Der Faktor von Σ strebt unter der gleichen Voraussetzung der Null zu, d. h. die zufällige Anfangsempfindlichkeit bei dem Versuch ist für das Resultat ohne Bedeutung. Wir erhalten, da die Grenzemphindlichkeiten, wie das Experiment lehrt,¹ sich sehr rasch

¹ Vgl. H. Schober und M. Tritsch, Diese Ber., Bd. 137, Abt. IIa (1928).

einstellen, diese beiden Grenzwerte schon bei sehr geringer Dauer des Versuches. Sie rücken um so näher aneinander und an den Wert \bar{S} , je mehr sich $e^{-\rho\tau}$ der Einheit nähert, je kleiner also τ wird. \bar{S} ist aber jener Wert, auf den sich die Sehstoffmenge einstellt, wenn während der ganzen Dauer des Versuches stets die Helligkeit I herrschen würde. Das heißt aber, daß für die sich einstellende Empfindlichkeit die volle Helligkeit der Lichtzeiten maßgebend ist und nicht die unter der Annahme strenger Gültigkeit des Talbot'schen Gesetzes sich ergebende mittlere. Diese wäre $I/2$, da während der Versuchsdauer wegen der eingeschalteten Dunkelpausen nicht die volle Energie der Strahlung, sondern nur die halbe zur Geltung kommt. Die Empfindung ist nun gegeben durch das Produkt aus Energie und Empfindlichkeit. Solange (bei genügend großen Werten von τ) die Empfindlichkeit praktisch konstant ist, folgt die beobachtete Helligkeit der Scheibe dem Talbot'schen Gesetz, wenn aber für genügend kleine τ die Grenzemfindlichkeit sinkt, werden wir die Scheibe dunkler sehen, und zwar um so dunkler, je kleiner wir bei unserem Versuch τ wählen.

Es ist also eine Abhängigkeit der Erscheinung von der Dauer der Einzelbelichtung der Netzhaut vorauszusehen, die sich in der praktischen Ausführung des Versuches als Abhängigkeit von der Tourenzahl der rotierenden Scheibe oder auch von der Größe des Sektorwinkels ausdrücken wird. Ebenso ist vorauszusehen, daß auch die Helligkeit der Beleuchtung von einem gewissen Einfluß auf die zur Beobachtung gelangende Helligkeit der Scheibe sein wird.

Wir haben bisher immer einen Wechsel von Hell und Dunkel vorausgesetzt. Da wir aber vollkommene Lichtlosigkeit in dem Moment der Passage des Dunkelsektors, respektive seines Bildes an der fixierenden Netzhautstelle nicht erreichen können, so müssen wir strenge genommen einen Wechsel zwischen zwei Helligkeiten I und i voraussetzen. An den Überlegungen ändert dies nichts. Die oben gegebenen Grenzwerte erscheinen dann in der Form

$$\bar{S}_{2n-1} = \frac{\bar{S}_I(1 - e^{-(\sigma I + \rho)\tau}) + \bar{S}_i e^{-(\sigma I + \rho)\tau} (1 - e^{-(\sigma i + \rho)\tau})}{1 - e^{-(\sigma I + \sigma i + 2\rho)\tau}},$$

$$\bar{S}_{2n} = \frac{\bar{S}_I e^{-(\sigma i + \rho)\tau} (1 - e^{-(\sigma I + \rho)\tau}) + \bar{S}_i (1 - e^{-(\sigma i + \rho)\tau})}{1 - e^{-(\sigma I + \sigma i + 2\rho)\tau}}$$

Es ändert sich nichts Wesentliches an den weiteren Überlegungen. Auch die Voraussetzung, daß die Dauer der hellen und dunklen Phase gleich sei, ist nicht wesentlich. Es wird nur die Rechnung mühsamer, wenn wir ungleiche Werte für die beiden Zeiten einführen, also voraussetzen, daß den hellen und dunklen Sektoren andere Winkelwerte zukommen. Es ergeben sich natürlich kleine quantitative Unterschiede gegenüber der hier durchgeführten Annahme, doch sind sie für das schließliche Resultat irrelevant.

Die Versuche, die P. Vinz. Frodl anstellte, waren in der folgenden Weise angeordnet. Es bereitet beträchtliche Schwierigkeiten, rotierende Scheiben, wie sie sonst immer zur Anwendung gelangten, so rasch rotieren zu lassen oder mit Sektoren von so kleinen Winkelwerten zu belegen, daß mit einiger Aussicht auf genügende Zuverlässigkeit der Resultate gehofft werden könnte. Es gelangten deshalb statt rotierender Scheiben Zylinder zur Anwendung, deren Mantelfläche mit engeren oder weiteren Schraffen bedeckt war. Dies wurde so erzielt, daß Holzzylinder, die auf der Achse eines Elektromotors befestigt waren, an der Mantelfläche mit Rastern beklebt wurden, deren Strichbreite Sektorwinkeln von 0.5° , 1° , 2° , 5° und 10° entsprach. Der Gleichförmigkeit der Strichbreite und namentlich der Schwärzentiefe der Striche wegen wurden diese Raster in Buchdruck hergestellt. Als Vergleichsobjekt wurde ein sonst gleicher Zylinder verwendet, dessen Mantelfläche zweimal je 90° Schwarz und 90° Weiß trug. Da die Tourenzahl der rotierenden Zylinder dreißig Umdrehungen pro Sekunde betrug, ergeben sich für die Zahl der Helligkeitswechsel in der Sekunde ν und für die Zeit τ unserer obigen Überlegungen für die einzelnen Schraffenbreite die Werte der folgenden kleinen Tabelle:

	10°		1°		0.5°
$\nu =$	1080	2160	5400	10800	21600
$\tau =$	9.26	4.63	1.85	0.93	0.46×10^{-4} Sec.

Zur Beleuchtung der rotierenden Zylinder wurde, um den Einfluß von I der obigen Formeln zu konstatieren, verwendet: helles, diffuses Tageslicht, stark gedämpftes Tageslicht, sehr abgeschwächtes Tageslicht (Dämmerlicht), weiters das Licht einer 60-wattigen Glühlampe in verschiedenen Entfernungen und jenes einer 500-wattigen, sogenannten 1000kerzigen Lampe. Die Messung selbst stellt sich als eine photometrische dar, die mit Hilfe eines sogenannten Exner'schen Polarimeters¹ mit zwei Lichteintrittsöffnungen durchgeführt wurde. Es wurde dabei die Helligkeit eines engschraffierten Zylinders in Bruchteilen der Helligkeit des Zylinders mit je zweimal 90° Schwarz und Weiß ausgedrückt. Die beiden folgenden Tabellen fassen die Resultate der Messungen zusammen

	10°		1°		0.5°
Tageslicht, hell.	0.965	0.949	0.908	0.862	0.830
gedämpft	0.982	0.969	0.932	0.908	0.877
Dämmerlicht	1	1	1	0.982	0.947
Glühlicht $I = 1$	0.937	0.884	0.825	0.796	0.755
$I = 1/4$	0.965	0.917	0.877	0.832	0.789
$I = 1/9$	0.971	0.965	0.926	0.892	0.862

¹ O. Tomaschek, Über das Exner'sche Polarimeter etc. Diese Ber., Bd. 134, Abt. IIa (1925).

und lassen sowohl den Einfluß der Helligkeit (I) als jenen der Dauer des Einzeleindrucks (τ) ohneweiters erkennen.

In der folgenden Tabelle sind die Werte zusammengestellt, die sich unter Benutzung der starken Glühlampe ergaben. Sie war in ein lichtdichtes Gehäuse eingeschlossen, dessen eine Seitenwand von einer Milchglasscheibe gebildet war. Diese konnte durch undurchsichtige Blenden teilweise verdeckt werden, so daß gleichmäßig leuchtende Flächen im Verhältnis von 4 3 2 1 zur Beleuchtung der rotierenden Zylinder zur Verfügung standen. Die nächste Tabelle gibt die so erhaltenen Resultate wieder.

	10°			1°	0·5°
Helligkeit 4.	..0·974	0·959	0·933	0·888	0·851
3.	..0·996	0·979	0·965	0·890	0·859
2.	..1	0·995	0·971	0·900	0·873
1	..1	1	0·979	0·913	0·900

Man sieht aus all diesen Zahlen, daß die theoretisch vorhergesagten Abweichungen sich tatsächlich experimentell bestätigen lassen. Man erkennt, daß es nicht so sehr auf die Sektorenwinkel oder die Schraffenbreite oder Ähnliches ankommt, sondern daß tatsächlich als wesentlich bestimmendes Moment neben der Helligkeit die Dauer des elementaren Reizes auftritt.

Bei der theoretischen Begründung der hier referierten Versuche haben wir von der Erleichterung Gebrauch gemacht, die Helligkeitsempfindlichkeit als eine einheitliche auffassen zu dürfen. Wir durften dies deshalb, weil alle drei Grundempfindungen gleichförmig an der Gesamtempfindung beteiligt sind und erfahrungsgemäß eine Verfärbung der Scheibe nicht beobachtet werden kann. Daß heißt aber, daß, falls eine Änderung in den Anteilsverhältnissen, in denen die Grundempfindungen an der Gesamtempfindung beteiligt sind, eintreten sollte, sie doch so klein bleibt, daß sie unmerklich ist. Ganz anders aber ist die Sache, wenn diese Voraussetzung nicht zutrifft, wenn der Versuch so geleitet wird, daß eine sehr ungleiche Ermüdung für die drei Grundempfindlichkeiten resultieren muß. Wir können diesen Fall dadurch verwirklichen, daß wir statt schwarzer Schraffen auf weißem Grund farbige verwenden. Hier müssen wir das Problem in seine Teilprobleme zerlegen und für jede der drei Grundempfindlichkeiten getrennt überlegen. Am einfachsten zu übersehen sind die Verhältnisse, wenn wir etwa den Fall roter, grüner oder blauer Schraffen, d. i. solcher wählen, deren Farbton im wesentlichen als Resultat der Reizung nur einer der Grundempfindungen erscheint. Dann haben wir gleichzeitig folgende Fälle: für die gleichfarbige Grundempfindung schwankt die Helligkeit überhaupt nicht oder nur zwischen verhältnismäßig engen Grenzen, für die beiden anderen aber zwischen größerer und kleinerer Helligkeit. Für diese gelten also vollständig die Über-

legungen, wie wir sie früher für den Fal weiß-schwarzer Schraffen angestellt haben. Das heißt aber, daß diese zwei Grundempfindungen nicht entsprechend dem Talbot'schen Gesetz, sondern schwächer gereizt werden, also diese beiden Teilempfindungen in der Gesamtempfindung zurücktreten. Bezüglich der dritten Grundempfindung aber müssen wir überlegen, daß bei einem Wechsel zwischen zwei Helligkeiten für die Endempfindlichkeit stets die größere maßgebend ist. Es kommt also auf die Wahl der relativen Helligkeiten des Weiß und der Farbe an, welcher Endeffekt erreicht wird. Reizt die farbige Schraffe die Grundempfindung im gleichen Maß wie sie durch das Weiß erregt wird, so erzielen wir die gleiche Endempfindlichkeit wie für die beiden anderen Grundempfindungen, sonst wird sie durch den stärkeren Reiz bestimmt. Ist also die farbige Schraffe für die ihr entsprechende Grundempfindung heller als das verwendete Weiß, so ist die Endempfindlichkeit kleiner, im entgegengesetzten Fall aber größer als es der Helligkeit des Weiß entspricht. Im ersten Fall bekommen wir kleinere, im letzteren größere Sättigung des letztlich beobachteten Farbtons. Da sich mit den absoluten Beträgen, mit denen schließlich jede Grundempfindung an der Farbempfindung beteiligt ist, im allgemeinen auch das Verhältnis derselben ändert, so werden wir neben der Sättigungsänderung auch eine solche des Farbtones beobachten können. Auch hier wird der Sinn der Nuancenverschiebung von der Helligkeit der farbigen Schraffe relativ zu Weiß abhängen, ob also ein Rot röter oder gelber, ein Grün gelber oder blauer erscheint.

Auch diesbezüglich hat Herr P. Frodl Versuche angestellt, indem er die schwarz-weißen Schraffen durch rot-weiße, grün-weiße und blau-weiße, die auch im Buchdruck hergestellt waren, ersetzte. Er beobachtete tatsächlich die erwartete Erscheinung; leider standen ihm die Muster nur in einerlei Ausführung zur Verfügung, so daß er nur die eine der oben als möglich erkannten Alternativen bestätigen konnte. Es wurden hiezu zunächst durch spektrophotometrische Ausmessung die Remissionskurven der verwendeten farbigen Schraffen bestimmt, und zwar ebensowohl am ruhenden als am rotierenden Zylinder. Dies geschah ebenso für die 45° wie für die 0.5° Schraffen. Dann wurde unter Zugrundelegung der König'schen Annahme gleichstarker Reizung der Grundempfindungen im Weiß und der durch F. Exner modifizierten Grundempfindungskurven der Farbton und die Sättigung bestimmt und die den Beobachtungen entsprechenden Punkte im Farbendreieck eingetragen. Es ergab sich für die von ihm zufällig benützten Farbtöne neben einer gut merkbaren Herabsetzung der Sättigung eine Farbtonänderung, die durch Angabe der zugehörigen Wellenlängen im Spektrum im folgenden wiedergegeben sei:

Rot ruhend 618 $\mu\mu$
bewegt 607

Grün ruhend 545 $\mu\mu$
bewegt 536

Blau ruhend 483 $\mu\mu$
bewegt 494 »

Wenn auch auf diese letztbesprochenen Versuche des P. Frod wegen ihrer Unvollständigkeit kein besonderes Gewicht zu legen ist und sie als bloß qualitative zu werten sind, so scheinen sie, wenn auch nicht eine voll umfassende Bestätigung der Theorie zu geben, sie doch sehr wahrscheinlich zu machen.

Es ergibt sich also zusammenfassend, daß sich aus der Sehstofftheorie folgern läßt, es müsse das Talbot'sche Gesetz für genügend hohe Wechselzahlen der Reize seine strenge Gültigkeit verlieren. Die Versuche bestätigen diese Voraussage und damit indirekt die Theorie, und zwar sowohl bezüglich der Helligkeit als auch bezüglich des Farbtons und der Sättigung.

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: 1929

Band/Volume: [138_2a](#)

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

Artikel/Article: [Über das Talbot'sche Gesetz. 17-26](#)