

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

Messende Versuche über die Qualitätsänderungen der Spectralfarben in Folge von Ermüdung der Netzhaut.

Von
H. VOESTE.

Es sind bislang über die Veränderung, welche die Lichtempfindungen in Folge von Ermüdung der Netzhaut erleiden, keine messenden Versuche angestellt. Die Wichtigkeit derselben für die Theorie der Nachbilder und für die Theorie der Farbenempfindungen überhaupt liegt auf der Hand. Diese Lücke in dem Beobachtungsmaterial zu einem Theile auszufüllen und in einem einfachsten Falle genaue Messungen über die Art der Veränderung der Lichtempfindung anzustellen, beabsichtigen die folgenden Versuche. Dieselben wurden auf Anregung und unter gütiger Leitung des Herrn Professors ARTHUR KÖNIG in der physikalischen Abtheilung des physiologischen Instituts der Berliner Universität im Wintersemester 1895/96 und im Sommersemester 1896 angestellt.

Es wurde nur der einfachste Fall in Betracht gezogen, bei dem das primäre Licht und das reagirende ein und dasselbe sind, wobei die Ausdrücke „primäres“ und „reagirendes Licht“ in dem von HELMHOLTZ eingeführten Sinne verstanden sind¹. Beobachtet wurde also die successive Veränderung, die die Lichtempfindung erleidet, wenn ein Licht eine gewisse Zeit hindurch auf dieselbe Netzhautstelle einwirkt. Bekanntlich macht sich die hier eintretende Ver-

¹ HELMHOLTZ, *Physiol. Opt.* § 23.

änderung nach drei Richtungen hin bemerkbar. Das Licht verliert bei fortdauernder Einwirkung an Sättigung, an Intensität, und ändert seine farbige Qualität. Die Aufgabe meiner Versuche war nun die, diese Qualitätsänderungen der Spectralfarben bei längerer Einwirkung auf die Netzhaut in messender Weise zu bestimmen. Diese Messungen sind insofern ausführbar, als man eine Netzhautstelle durch ein Licht ermüdet, und dann auf unmittelbar benachbarte unermüdete Netzhauttheile ein anderes Licht als Vergleichslicht einwirken läßt. Stellt man dieses nun seiner Qualität, Intensität und Sättigung nach so her, daß auf der unermüdeten Netzhautstelle dieselbe Empfindung erregt wird, wie von dem ermüdenden Lichte auf der ermüdeten Netzhautstelle, so läßt sich aus dem Verhältniß des Vergleichslichtes zu dem ermüdenden eine Vorstellung gewinnen von der Art und dem Grade der durch die Ermüdung hervorgerufenen Aenderung der Empfindung. „Der Unterschied der Lichter wird genau compensirt durch den Unterschied im percipirenden Apparat, so daß ermüdendes Licht, wirkend durch den ermüdeten Theil, und Vergleichslicht, wirkend durch den unermüdeten Theil dieselbe Empfindung ergeben“ (vgl. J. v. KRIES, Die Gesichtsempf. u. ihre Analyse, S. 107).

Zur Ausführung dieser Versuche wurde der seinerzeit von den Herren ARTHUR KÖNIG und KONRAD DIETERICI¹ beschriebene HELMHOLTZ'sche Farbenmischapparat benutzt, bei dem aber hier die Doppelspathe dicht an die Collimatorspalte herangeschoben waren, so daß jedes der beiden aneinandergrenzenden Felder monochromatisch erleuchtet war. Als Lichtquellen dienten bei meinen Versuchen für beide Collimatorrohre Auerlampen. Im Nachfolgenden ist das Collimatorrohr, welches das ermüdende Licht lieferte, als das erste bezeichnet und dementsprechend auch das von ihm erleuchtete Feld. Das Collimatorrohr, welches das Vergleichslicht gab, ist als das zweite bezeichnet. Zwischen der vorgesetzten Lichtquelle und dem Spalte dieses zweiten Rohres (Vergleichslicht) war eine fallschirmartige Vorrichtung angebracht, die es ermöglichte, den Spalt plötzlich zu verdecken und ebenso plötzlich für den Gang der von der

¹ A. KÖNIG und C. DIETERICI, „Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsvertheilung im Spectrum“ Bd. IV dieser Zeitschrift.

Lichtquelle ausgehenden Strahlen zu öffnen. Für jeden Versuch wurden zunächst die beiden Collimatorrohre so eingestellt, daß sie dasselbe monochromatische Licht für die zugehörigen Felder lieferten, daß mithin beide vordere Prismenflächen des Apparates das gleiche Aussehen zeigten. Dann wurde das beobachtende Auge ausgeruht; war es genügend „unermüdet“, so wurde, während das zweite Feld mit Hülfe des oben erwähnten Fallschirmes verdunkelt, das erste aber erleuchtet war, die Mitte der Grenzlinie zwischen beiden Feldern mit der Stelle des deutlichsten Sehens fixirt. War nun die betreffende Netzhautstelle während der vorgesetzten Versuchszeit, die meist 10 Sec. betrug (vgl. Tabelle I), ermüdet, so wurde plötzlich mittelst des Fallschirmes das zweite Collimatorrohr für den Gang der Lichtstrahlen freigemacht, und ihm dann möglichst schnell eine solche Stellung gegeben, daß die beiden Felder wieder gleich erschienen. Selbstverständlich wurde von dem Auge während der ganzen Versuchszeit die erwähnte Fixation festgehalten. Auf diese Weise war es möglich ein Licht zu finden, das für die unermüdete Netzhautstelle denselben Farbenwerth hatte, wie das anfänglich eingestellte Licht für die ermüdete Stelle. Die Versuche, die von der Wellenlänge $660 \mu\mu$ bis zu $430 \mu\mu$ reichten, wurden sehr oft wiederholt und aus den Notirungen der Mittelwerth genommen (vgl. den Auszug aus dem Versuchsprotokoll). Gleichzeitig wurden auch in den meisten Fällen die Intensitätsänderungen, die in Folge der Ermüdung hervortraten, genau beobachtet und durch Herstellen der gleichen Intensität beim Vergleichslichte mittelst Spaltänderung am zweiten Collimatorrohre gemessen. Wo die Angabe der Intensitätsänderung im Versuchsprotokoll und in der Tabelle fehlt, war es nicht gelungen, diese Intensitätsänderung in zweifelsfreier Weise zu bestimmen. Die eintretende Aenderung der Sättigung hingegen wurde vernachlässigt. Dies geschah zunächst, um die Versuche von Anbeginn an nicht zu sehr zu compliciren; und es ergab sich auch, daß, trotzdem es unterlassen wurde, diese Sättigungsunterschiede durch Zumischung von Weiß auszugleichen, sich eine große Sicherheit in der Bestimmung der eintretenden Nuancenänderung gewinnen liefs, wie aus dem Versuchsprotokoll hervorgeht. Der Verfasser ist sich aber der hier vorhandenen Lücke in den Versuchsreihen wohl bewußt; er wurde an seiner Absicht, durch

Fortführung der Versuche diese Lücke auszufüllen, durch äußere Umstände gehindert; trotzdem schien das Erhaltene wichtig genug, um die Veröffentlichung zu rechtfertigen.

Um eine bessere Einsicht in die Art und Genauigkeit der Beobachtung zu geben, drucke ich auf S. 262 u. 263 als Beispiel die auf die Wellenlängen $590 \mu\mu$ und $530 \mu\mu$ bezüglichen Theile meines Versuchsprotokolls ab.

Die vollständigen Versuchsergebnisse sind übersichtlich in den folgenden Tabellen zusammengestellt und werden durch die auf S. 266 beigegebenen Curven veranschaulicht.

Die erste Columne der nebenstehenden Tabelle I enthält die Angabe der Wellenlänge des ermüdenden Lichtes in Milliontelmillimeter ($\mu\mu$). Die Columnen 2, 4, 6, 8 und 10 enthalten die beobachtete Qualitätsänderung, die durch die Ermüdung hervorgerufen wurde. In diesen Columnen ist angegeben, um wieviel $\mu\mu$ die Farbe, der am Ende des Versuches die ermüdende glich, sich von der eingestellten unterschied; und zwar bedeutet ein vorgesetztes + Zeichen, daß die ermüdende Farbe in Folge der Ermüdung einer mehr nach dem langwelligen Ende hingeleghenen Region des Spectrums glich; eine scheinbare Verminderung der Wellenlänge (Verschiebung nach dem kurzwelligen Ende) ist also mit einem — Zeichen bezeichnet. Einige Beispiele mögen zur Erläuterung der Tabelle angeführt werden. Wurde das Auge z. B. durch Licht der Wellenlänge $660 \mu\mu$ bei der Intensität 1 ermüdet, so glich am Ende der Versuchszeit die Farbe einer, die um $27,7 \mu\mu$ weiter nach dem kurzwelligen Ende des Spectrums hin gelegen war; Licht der Wellenlänge $660 \mu\mu$ erschien also bei Intensität 1 wie Licht der Wellenlänge $632,3 \mu\mu$; bei der größeren Intensität 2 erschien sie wie Licht der Wellenlänge $619 \mu\mu$. Licht der Wellenlänge $500 \mu\mu$ glich bei Intensität 1 am Ende des Versuches einem Lichte von der Wellenlänge $502,0 \mu\mu$.

Die verschiedenen benutzten Intensitäten sind durch die Zahlen 1, 2, 4, 6, 8 bezeichnet; diese Zahlen sind den benutzten Spaltbreiten proportional; dieselben waren 0,06 mm, 0,12 mm, 0,24 mm, 0,36 mm, 0,48 mm. Fixirt wurde immer 10 Sec. lang, nur bei der ersten Intensität betrug die Fixationsdauer 15 Sec. Die durch die Ermüdung hervorgerufene Intensitätsverminderung ist in den Spalten 3, 5, 7, 9 und 11 in der Weise angegeben,

Tabelle I.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Eingestellte Wellenlänge in $\mu\mu$	Qualitäts- änderung in $\mu\mu$	Zugehörige Spalt- weite in % der ursprünglichen	Qualitäts- änderung in $\mu\mu$	Zugehörige Spalt- weite in % der ursprünglichen	Qualitäts- änderung in $\mu\mu$	Zugehörige Spalt- weite in % der ursprünglichen	Qualitäts- änderung in $\mu\mu$	Zugehörige Spalt- weite in % der ursprünglichen	Qualitäts- änderung in $\mu\mu$	Zugehörige Spalt- weite in % der ursprünglichen
660	-27,7	-	-41,1	-	-	-	-	-	-	-
640	-16,3	48,3	-28,8	-	-	-	-	-	-	-
620	-9,1	83,3	-14,7	33,3	-	-	-	-	-	-
600	-5,2	68,3	-7,1	50,0	-11,7	41,7	-	-	-	-
590	-3,0	66,6	-4,0	66,6	-7,1	20,8	-	-	-	-
580	-2,3	65,0	-3,2	80,8	-5,5	27,0	-	-	-	-
570	-1,7	71,6	-1,7	76,6	-3,6	29,1	-	-	-	-
560	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
550	+1,2	73,3	+2,4	80,0	+2,9	37,9	-	-	-	-
540	+2,8	66,6	+5,3	76,6	+4,9	18,9	+2,5	47,3	-	-
530	+3,5	71,6	+7,6	62,5	+5,6	60,5	+3,3	50,0	+1,2	47,9
520	+4,1	76,6	+9,0	58,3	+5,9	37,5	+3,2	58,3	+1,3	50,0
510	+4,6	80,0	+7,9	66,6	+4,6	29,1	+2,6	36,1	+1,6	66,2
500	+2,0	78,3	+4,0	62,5	+2,4	62,9	+1,8	50,0	+1,5	-
490	-	-	+0,4	66,6	-0,6	-	+1,6	-	+2,3	-
480	-	-	-0,9	83,3	-1,2	-	-2,6	-	+3,3	-
470	-	-	+1,6	-	-	-	-	-	-0,71	-
460	-	-	+2,7	-	-	-	-	-	-	-
450	-	-	+3,7	-	+4,3	-	+2,6	-	-	-
440	-	-	-	-	-	-	-	-	+1,3	-
430	-	-	-	-	-	-	-	-	+2,6	-

dafs der schliesslich eingestellte (stets verengerte) Spalt in Procenten des ursprünglich eingestellten eingetragen ist.

Fassen wir die Versuchsergebnisse kurz zusammen, so ergibt sich, dafs vom äufsersten Rothende bis zur Wellenlänge $570 \mu\mu$ die Wellenlänge scheinbar abnahm, die Vergleichsfarbe also mehr nach dem kurzwelligen Ende des Spectrums hinlag als das ermüdende Licht. Die eingestellte Farbe wurde also — soweit sie diesem Theile des Spectrums angehörte — weniger roth und mehr gelb resp. grün. Die Wellenlänge $560 \mu\mu$ zeigte bei Ermüdung keine Qualitätsänderung, wie dieses durch vielfach wiederholte Versuche festgestellt wurde; die Intensität war auch hier verringert, und es erschien die Farbe nach der Einwirkung weifslicher. Die Beobachtungen bezüglich dieses Punktes sind in Tabelle II zusammengestellt. Von Wellenlänge $560 \mu\mu$ bis

Tabelle II.

Intensität	Eingestellte Wellenlänge	Nuancenänderung nach d. Ermüdung	Zugehörige Intens. nach Ermüd. in % d. ursprüngl.	Sättigungsänderung
1	$560 \mu\mu$	keine	70 %	geringes Grauerwerden
2	$560 \mu\mu$	keine	58,3 %	etwas mehr
4	$560 \mu\mu$	keine	60,0 %	weifsgrau
6	$560 \mu\mu$	keine	60,2 %	weifslicher
8	$560 \mu\mu$	keine (?)	81,8 %	ganz weifs

$500 \mu\mu$ trat eine scheinbare Vergrößerung der Wellenlänge ein: das Vergleichslicht lag also weiter nach dem rothen Ende des Spectrums hin als das ermüdende. Blaues Licht der Wellenlänge $490-460 \mu\mu$ wurde aber in Folge der Ermüdung blauer. Die genauen Versuchsergebnisse sind in Tabelle I angegeben. Tabelle III giebt die Lichter zwischen 500 und $490 \mu\mu$ die keine Qualitätsänderung in Folge der Ermüdung zeigen. Hier waren aber diese Punkte bei den verschiedenen Intensitäten nicht wie bei der Wellenlänge $560 \mu\mu$ die gleichen. Vielleicht ist dieser Umstand auf Unsicherheit der Beobachtung, die in diesem Theile des Spectrums hervortrat, zurückzuführen. Es sei hier noch darauf hingewiesen, dafs die Unsicherheit in der

Tabelle III.

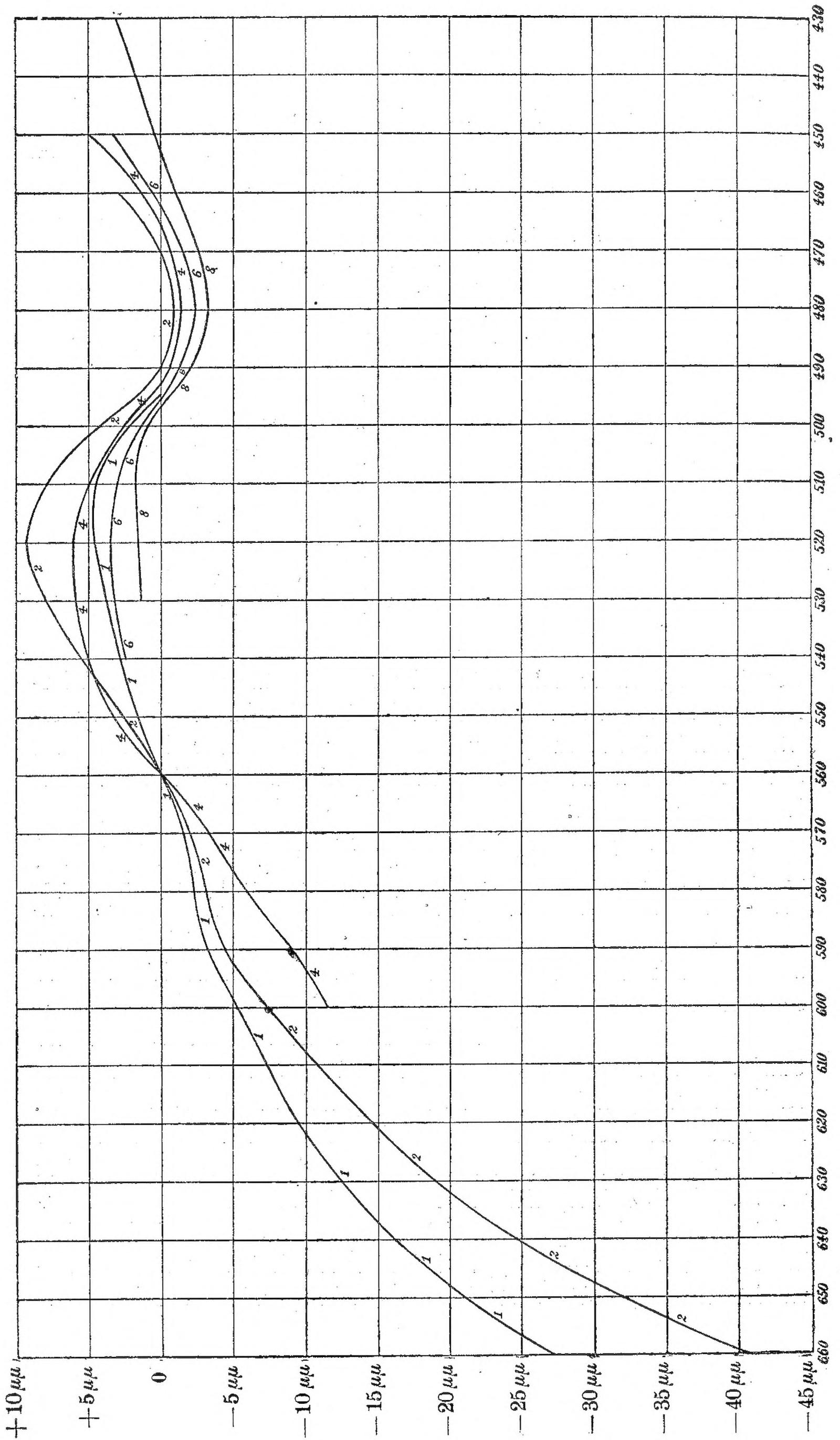
Keine Nuancenänderung in Folge von Ermüdung zeigten die Lichter folgender Wellenlängen:

Wellenlänge	Bei der Intensität	Intensit. am Ende der Ermüdung in % d. ursprüngl.	Sättigungsänderung
496	1	?	schwach grau
493	2	89,1 %	„ „
495	4	86,2 „	grauer
496	6	88,0 „	weifslich
498,5	8	83,3 „	sehr weifslich
—	—	—	—
470	2	80,8 „	grauer
467	4	73,7 „	sehr weifslich
465	6	88,0 „	noch weifslicher
460	8	90,6 „	ganz weifs

Bestimmung dieser Punkte, die keine Qualitätsänderung bei Ermüdung zeigen, möglicher Weise bedingt ist durch die oben erwähnte Nichtbeachtung der Sättigungsdifferenzen; Fortsetzung der Versuche nach dieser Richtung hin würde diesen Punkt jedenfalls aufhellen.

Beobachtungen betreffend Lichter von kürzerer Wellenlänge als 460 $\mu\mu$ waren sehr schwierig anzustellen, und nur bei gröfserer Spaltöffnung möglich; doch ergaben sie eine scheinbare Vergrößerung der Wellenlänge; die Vergleichsfarbe lag also weiter nach dem rothen Ende des Spectrums hin als die ermüdende.

Besonders beachtenswerth ist noch die Thatsache, dafs der Grad der Veränderung der Qualität nicht überall mit der Versuchsintensität steigt, wie man a priori zu erwarten glaubt. Zwar war dies vom äufsersten rothen Ende bis zur Wellenlänge 560 $\mu\mu$ durchgehends der Fall. Hier lag, je gröfser die Intensität war, auch das Vergleichslicht um so weiter nach dem kurzwelligen Ende des Spectrums hin. Anders war es zwischen den Wellenlängen 560—500 $\mu\mu$. Hier wurde bei den höheren Intensitäten 4, 6, 8 die Veränderung der Empfindungsqualität eine



geringere. Am meisten zeigt sich hier die Qualität geändert bei der Beobachtungsintensität 2; geringere Aenderung trat ein bei 4, 1, 6, und am geringsten war sie bei der höchsten Intensität 8. Die Wellenlängen 490—480 $\mu\mu$ wurden auch, je größer die Intensität war, um so blauer.

Uebersichtlich veranschaulicht sind diese Versuchsergebnisse in der nebenstehenden graphischen Darstellung. Als Abscissen sind die eingestellten Wellenlängen eingetragen, während die Ordinaten die Größe der beobachteten Wellenlängenänderung gemessen in $\mu\mu$ angeben. Und zwar bedeuten die positiven Ordinaten oberhalb der mit 0 bezeichneten Horizontallinie die Qualitätsänderung nach dem langwelligen Ende des Spectrums hin, die negativen nach unten hin eine scheinbare Verminderung der Wellenlänge, also Verschiebung nach dem kurzwelligen Ende hin. Die Schnittpunkte der Curven mit dieser Null-Axe bezeichnen die Punkte des Spectrums, die sich in Folge der Ermüdung nicht verändern. —

In der vorstehenden Abhandlung sind nur die erhaltenen Versuchsergebnisse mitgetheilt worden. Auf die Theorie soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Zum Schlusse habe ich die angenehme Pflicht, Herrn Professor Dr. ARTHUR KÖNIG für die mir bei den Beobachtungen erwiesene hilfreiche Berathung und vielfache Anregung auch an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank auszusprechen.