

(Aus dem Physiologischen Institut zu Freiburg i. Br).

Über den Einfluß des Makulapigments auf Farbengleichungen.

Von

Dr. BREUER.

Bei der Bedeutung, welche die Lichtabsorption im Pigment des gelben Flecks für die Empfindungseffekte gemischter Lichter besitzt, erschien es nicht ohne Interesse, etwas Genaueres, auch quantitatives, durch direkte Beobachtung über jene Absorptionen zu erfahren. Um so mehr erschien dies erwünscht, als wir durch die messenden Versuche von SACHS¹ zwar erfahren haben, in welchem Verhältnis jene Pigmente die verschiedenen Lichtarten absorbieren, hierin aber, wie HERING² betont, doch nur eine qualitative Bestimmung des Pigments gegeben ist, da die Beobachtungen an ausgeschnittenen Netzhäuten vorgenommen wurden, auf die Stärke aller Absorptionen resp. die Menge des in vivo vorhandenen Pigments aber kein Rückschluß gestattet ist.

Eine direkte Bestimmung der makularen Lichtabsorptionen wird möglich sein, wenn wir auf der Makula gültige Mischungsgleichungen mit extramakularen vergleichen können. Da es wünschenswert ist, für solche Gleichungen, die nicht für das Zentrum selbst, aber für dessen nahe Nachbarschaft gelten, eine kurze Bezeichnung zu haben, und da andererseits die Benen-

¹ SACHS, Über die spezifische Lichtabsorption des gelben Fleckes der Netzhaut. *Pflügers Arch.* L. S. 574.

² E. HERING, Über den Einfluß der Macula lutea auf spektrale Farbengleichungen. *Pflügers Arch.* LIV. S. 281.

nungen extramakulare, exzentrische oder periphere Gleichungen meist für solche verwendet werden, die sich auf grössere Zentralabstände und somit auf Partien mit bereits herabgemindertem Farbensinn beziehen, so will ich die auf die nähere Nachbarschaft der Makula sich beziehenden parazentral nennen. Eine Ermittlung der makularen Absorption könnte also, wie gesagt, ausgehen von der Gegenüberstellung zentraler und parazentraler Gleichungen, vorausgesetzt allerdings, daß die Natur der lichtempfindlichen Substanzen an beiden Stellen die gleiche ist. Die Grundlage eines derartigen Versuchs ist die Thatsache, daß ein homogenes Licht durch die Absorption wohl quantitativ, aber nicht qualitativ verändert wird. Nehmen wir an, um das Prinzip an einem einfachen Beispiel zu erläutern, daß ein homogenes Orange $600 \mu\mu$ parazentral einem Gemisch von 1 Teil Rot ($670,8 \mu\mu$) und q_1 Grün (517) gleich erscheine, während makular, um Gleichheit mit demselben Orange zu erzielen, auf 1 Teil Rot q_2 Grün erforderlich wären, so dürfen wir schließen, daß die Absorption im makularen Pigment, wenn sie das Rot in dem (nicht bekannten) Verhältnis $1 : \alpha$ schwächt, das Grün auf den Bruchteil $\alpha \frac{q_1}{q_2}$ vermindert. Lautet die ganze Gleichung extramakular

$$1 R + q_1 Gr. = p_1 Or.$$

und makular

$$1 R + q_2 Gr. = p_2 Or.,$$

so wäre, die Schwächung des Rot $= \alpha$ gesetzt, diejenige des Grün $\frac{q_1}{q_2} \alpha$, die des Orange $= \frac{p_1}{p_2} \alpha$. Alle Bestimmungen sind, wie hieraus hervorgeht, nur relative. Da indessen, soweit man weiß, das langwellige Licht im Makulapigment keine merkliche Absorption erfährt, überdies auch, selbst wenn es der Fall wäre, die beständige Mitführung dieses unbekannten Koeffizienten überflüssig wäre, so soll in Folgendem von der Voraussetzung ausgegangen werden, daß $\alpha = 1$ sei. Wenn also gesagt wird, daß das Licht $517 \mu\mu$ durch die makulare Absorption auf 0,8 geschwächt wird, so bedeutet das streng genommen eine Schwächung auf 0,8 von jenem Bruchteile, auf den auch das am schwächsten absorbierte langwellige Licht vermindert

wird. — Eine Bestimmung der obigen Art liefert, wie man sieht, die relative Absorption nicht nur für das mit dem Rot gemischte Grün, sondern auch für das mit dem Gemisch verglichene homogene Licht. Die Erfahrung lehrt indessen, daß diese letzteren Bestimmungen weniger zuverlässig sind, als die anderen. Die Genauigkeit dieser nämlich (der Grünabsorption in unserem obigen Beispiel) hängt von der Genauigkeit ab, mit der wir die Farben beider Felder gleich machen können, d. h. von unserer Unterschiedsempfindlichkeit gegen Differenzen des Farbentons. Dagegen richtet sich die Sicherheit der Bestimmung der Orange-Absorption nach der Unterschiedsempfindlichkeit gegenüber Intensitätsdifferenzen.

Da Versuche dieser Art bisher, soviel mir bekannt, nicht angestellt worden sind, so unternahm ich es gern auf Vorschlag von Herrn Prof. v. KRIES, mich mit denselben zu beschäftigen. Es war dabei allerdings im voraus klar, daß es nicht gelingen kann, die Stärke der Pigmentierung etwa des genaueren, wie sie vom Zentrum gegen die Peripherie abnimmt, zu verfolgen. Der Methode konnte vielmehr kaum eine weitere Aufgabe gestellt werden, als die Vergleichung zweier Stellen, von denen die eine möglichst zentral, die andere aber doch nur soweit exzentrisch zu wählen war, daß eine hinreichende Genauigkeit für die Herstellung der Mischungsgleichungen noch erreicht werden konnte. Ich verfuhr (nach einer Reihe orientierender Vorversuche) so, daß ich einerseits die Einstellungen mit einem Felde von nur 1° Durchmesser bei direkter Fixierung machte; für die parazentralen Einstellungen wurde so zu Werke gegangen, daß dem kreisförmigen Felde ein Durchmesser von 3° gegeben wurde; darüber wurde im Gesichtsfeld ein Fixierzeichen derart angebracht, daß dasselbe 3° über dem oberen Rande des Feldes erschien, das Feld somit von 3 — 6° Zentralabstand sich erstreckte. Eine Ungleichmäßigkeit in dem Aussehen des Feldes konnte bei dieser letzteren Anordnung ebensowenig wie bei der ersteren bemerkt werden. Wie die auf solche Weise gewonnenen Ergebnisse mit Rücksicht auf die ganze Ausdehnung des gelben Fleckes etc. zu beurteilen sind, soll am Schluß noch kurz erörtert werden.

Eine gewisse Schwierigkeit schien allerdings den Versuchen insofern entgegen zu stehen, als ja bekanntlich die Mischung zweier homogener Lichter in zahlreichen Fällen blasser, weniger gesättigt erscheint, als ein homogenes Licht irgend einer mitt-

leren Wellenlänge. Indessen zeigte sich, daß dieser Übelstand bei passender Wahl der zu mischenden Lichter von äußerst geringer Bedeutung ist, und es gelingt sogar, was für das einzuhaltende Verfahren von Wichtigkeit war, die relative Absorption auch kurzwelliger Lichter zu ermitteln, ohne daß man das Verfahren durch Aneinanderfügung sehr vieler Stufen kompliziert. Das Licht von der Wellenlänge etwa $= 517 \mu\mu$ hat nämlich die Eigenschaft, mit äußerstem Rot gemischt ein Gelb oder Orange zu liefern, welches hinter dem homogenen noch ungemein wenig an Sättigung zurückbleibt, ebenso aber auch mit kurzwelligem Blau (etwa $460 \mu\mu$) ein Blaugrün, welches nur sehr wenig von dem homogenen Blaugrün unterschieden ist.¹ Hiernach empfahl sich für die Versuche der *modus procedendi*, daß zunächst in einer Reihe von Bestimmungen die Schwächung des Grün (517) bestimmt wurde, wobei dieses mit Rot (670) zu mischen und das Gemisch verschiedenen homogenen Lichtern mittlerer Wellenlänge gleich zu machen war, sodann aber die Absorption des Blau relativ zum Grün in Versuchen ermittelt wurde, bei denen Gemische von Grün und Blau wiederum mit homogenen Lichtern dazwischen gelegener Wellenlängen zu vergleichen waren. Die ganze Absorption des Blau ergab sich dann einfach durch die Multiplikation beider Werte. Da es in erster Stelle wichtig erschien, diese stärksten Absorptionen kurzwelliger Lichter zu ermitteln, so war es erwünscht, durch nur zwei Bestimmungen, also noch einigermaßen direkt, zu ihnen gelangen zu können. Der eben angegebene Weg wurde daher umsomehr eingehalten, als bei den beiden hier ins Spiel kommenden Vergleichen die erwähnten Sättigungsdifferenzen so klein waren, daß sie eine merkliche Störung des Versuchs nicht involvierten. Ich habe einige Male versucht, sie noch auszugleichen, durch Zusetzung kleiner Mengen unzerlegten weißen Lichtes zu dem homogenen, ohne aber einen Vorteil davon konstatieren zu können, und bin daher wieder davon abgekommen.

Es wäre schließlich hinsichtlich der Ausführung der Versuche noch hinzuzufügen, daß in allen Fällen der HELMHOLTZ'sche Farbmischapparat benutzt wurde, über dessen Einrichtung und

¹ Für die Mischungen des Rot und Grün ist hierbei sehr wesentlich, daß mit helladaptiertem Auge gearbeitet werde; sonst werden allerdings die Unterschiede erheblich wegen der beträchtlich größeren Stäbchenvalenz des Gemischs gegenüber dem homogenen Gelb.

Verwendungsweise auf die Abhandlung von v. KRIES und NAGEL (*Diese Zeitschrift* XII. S. 1) verwiesen werden kann. Stets wurde mit helladaptiertem Auge gearbeitet, und es wurden durchgängig sechs Einstellungen mit zentraler, sodann sechs mit parazentraler Beobachtung gemacht. Die sich hieraus ergebenden Mittelwerte sind den folgenden Angaben zu Grunde gelegt. Die Anbringung eines Fixierzeichens geschah gleichfalls in der a. a. O. S. 25 beschriebenen Weise. Natürlich mußte ferner, da im hellen Zimmer gearbeitet wurde, Sorge getragen werden, daß nicht mit der Spiegelung des Fixierzeichens etwa noch gespiegeltes Licht dem Beobachtungsfelde sich beimischte; durch Aufstellung eines Hintergrundes von schwarzem Sammet hinter dem als Fixierzeichen dienenden Gasflämmchen war das leicht zu erreichen.

Im Folgenden sind nun zunächst die Ergebnisse einer Anzahl von Versuchen zusammengestellt, welche die Absorption des Grün betreffen, und bei welchen verschiedene homogene Lichter als Vergleichslichter benutzt wurden. Der erste Stab enthält die Wellenlänge des benutzten homogenen Lichtes, der zweite die sich ergebende zentrale Grün-Absorption (also den

Wert $\frac{\left(\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}\right)_{\text{exz.}}}{\left(\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}\right)_{\text{zentr.}}}$, der dritte die sich berechnende

Schwächung des homogenen Lichtes (also $\frac{\text{Rot zentr.}}{\text{Rot exz.}}$)

Tabelle I.

Homogenes Licht	Absorption des Grün 517	Absorption des homogenen Lichtes
620 $\mu\mu$	0,80	0,95
620 „	0,81	1,05
589 „	0,81	0,993
589 „	0,80	1,09
560 „	0,79	1,2
560 „	0,70	1,25
560 „	0,73	1,22

Man sieht, daß bei Anwendung des homogenen Lichtes 560 $\mu\mu$ die Absorptionen etwas höher erscheinen. Die Differenzen sind zwar gering, aber da sie in allen Fällen wiederkehren, wohl kaum als Beobachtungsfehler zu deuten. Worin sie ihren Grund haben mögen, darüber können wir zur Zeit nur eine Vermutung aussprechen. Es ist nämlich bekannt, daß in den Gleichungen der hier benutzten Art stets das homogene Licht eine kleinere Stäbchenvalenz besitzt als die Mischungen. Aus diesem Grunde dürfte bei der parazentralen Beobachtung die wohl niemals ganz zu beseitigende Funktion der Stäbchen dahin tendieren, das Gemisch blasser erscheinen zu lassen. Erfahrungsmäßig aber verwechselt man in diesem Gebiete sehr leicht Differenzen der Sättigung mit solchen des Farbentons, und zwar so, daß man das rote Licht für gesättigter hält. Je mehr also Sättigungsdifferenz Platz greift, um so mehr wird zu befürchten sein, daß man das blässere Licht etwas zu rot, d. h. im Gemisch zu wenig grün nimmt. Dieser Unterschied, der wohl bei dem Licht 560 schon etwas mehr ins Gewicht fallen könnte, würde also dahin tendieren, die Grünabsorption zu hoch erscheinen zu lassen. Vermutlich aber dürfen wir hiernach als den korrektesten denjenigen Wert ansehen, bei welchem das homogene Licht 620 benutzt und somit nur eine sehr kleine Grünbeimischung erfordert wurde.

Im dritten Stabe der Tabelle sind die Absorptionswerte hinzugefügt, welche sich für die benutzten homogenen Vergleichslichter selbst ergaben. Da die Quantitäten des homogenen Lichts bei zentraler und exzentrischer Beobachtung dieselben waren, so berechnen sich diese als die Quotienten aus den in der zentralen und der exzentrischen Gleichung erforderlichen Rotmengen. Wie aber schon erwähnt, können diese Zahlen keinen Anspruch auf sehr große Genauigkeit machen. Bei den homogenen Lichtern von 620 und 589 $\mu\mu$ ergeben sie indessen ganz zutreffend, daß eine merkliche Absorption nicht stattfindet, bei 560 $\mu\mu$ dagegen berechnet sich eine nicht bedeutende, aber doch in allen Versuchen wiederkehrende Absorption im verkehrten Sinne, d. h. es ist in der parazentralen Gleichung sogar etwas weniger Rot als in der zentralen genommen. Der Grund dieser Erscheinung dürfte wohl in demselben Umstand zu finden sein, der eben berührt wurde, nämlich in der größeren Stäbchenvalenz der Mischung, welche es

mit sich bringt, daß parazentral die Gesamtmenge des Gemisches etwas zu gering eingestellt wird. Im ganzen möchte ich hiernach diejenigen Zahlen, welche bei Benutzung der langwelligen Vergleichslichter erhalten wurden (620 und 589 $\mu\mu$), für die zuverlässigeren halten.

Im ganzen durchaus ähnlich gestaltete sich der Versuch über die relative Absorption des Blau (460,8 $\mu\mu$). Die Bestimmungen wurden ausgeführt mit homogenen Lichtern von 510, 500 und 490 $\mu\mu$ und lieferten die nachstehend zusammengestellten Resultate.

Tabelle II.

Wellenlänge des homogenen Lichts	Absorption des Blau 460,8 $\mu\mu$ relativ zum Grün 517 $\mu\mu$	Absorption des homogenen Lichts relativ zum Grün
510	0,70	0,98
510	0,65	0,86
500	0,79	0,85
500	0,78	0,89
490	0,67	0,66
490	0,63	0,83

Wir erhalten hier somit für die Absorption des Blau relativ zum Grün Zahlen, die sich zwischen 0,63 und 0,79 bewegen. Der dritte Stab zeigt auch hinsichtlich des benutzten homogenen Vergleichslichts die mit abnehmender Wellenlänge stärker werdende Absorption; doch lassen die starken Schwankungen auch hier die verhältnismäßig geringe Sicherheit dieses Verfahrens erkennen.

Die obigen Zahlen dürften, auch wenn man ihre Genauigkeit nicht zu hoch veranschlagt, genügen, um zu zeigen, daß das Verfahren überhaupt ausführbar ist, und auch, um mindestens über die Größenordnung der betreffenden Absorptionen eine gewisse Vorstellung zu geben. Berechnen wir im Mittel die relative Absorption des Grün auf 0,77, die des Blau im Verhältnis zu Grün nach Tabelle II auf 0,70, so würde sich für die relative Absorption des Blau der Wert $0,77 \cdot 0,70 = 0,54$

ergeben, d. h. die relative Schwächung des blauen Lichtes wäre etwa auf 0,54 zu veranschlagen. Es ist nicht ohne Interesse, darauf hinzuweisen, daß diese Zahl sich nicht sehr weit von den Absorptionswerten entfernt, welche SACHS an den gelben Flecken herausgeschnittener Netzhäute gefunden hat. Diese Zahlen bewegen sich für das Licht 486 $\mu\mu$ zwischen 0,656 und 0,786. Im übrigen darf angeführt werden, daß, nach Ausweis der zahlreichen im hiesigen physiologischen Institut ausgeführten Bestimmungen über Makula-Pigmentierungen, die meinige sich wohl als eine etwas unter dem Durchschnitt rangierende (z. B. ein wenig schwächer als die von Dr. NAGEL) bezeichnen läßt, jedoch noch keineswegs zu den schwächsten gehört.

Die im Obigen zusammengestellten unmittelbaren Ergebnisse der Versuche lassen sich in einigen Beziehungen auf Grund nur qualitativer Beobachtungen ergänzen, wobei man sich z. T. auch auf SACHS' Beobachtungen an Netzhautpräparaten stützen darf. Wiewohl nämlich meine Messungen sich nur auf zwei Punkte des Spektrums erstrecken und es bei der beschränkten Genauigkeit der Bestimmungen auch kaum rätlich erschien, sie auf zwischenliegende Punkte auszudehnen, so können wir doch bemerken, daß die Absorptionswerte durchgängig mit abnehmender Wellenlänge wachsen. SACHS hat dies gefunden, und ich muß dem, soweit meine Beobachtungsweise darüber ein Urteil gestattet, zustimmen. Vergleicht man Mischungen aus 517 $\mu\mu$ und 490 $\mu\mu$ mit einem dazwischen liegenden homogenen Licht, oder Mischungen aus 490 und 460 mit einem homogenen Licht 480, stets sieht man, daß, wenn die Gleichung zentral richtig eingestellt ist, bei exzentrischer Betrachtung das Gemisch zu blau, das homogene Licht relativ zu grünlich wird. In allen Fällen gewinnt also durch den Übergang zur Peripherie der brechbarere Bestandteil mehr als der weniger brechbare. Wenn nun auch in Bezug auf den genaueren Gang, der die Absorption als Funktion der Wellenlänge darstellenden Kurve Differenzen bestehen mögen, so dürfen wir es danach doch wohl als ausgeschlossen ansehen, daß irgendwelche Lichtarten von zwischenliegenden Wellenlängen erheblich stärkere Absorptionen als das untersuchte Licht erfahren.

Im Hinblick auf die an ausgeschnittenen Netzhäuten ge-

machten Erfahrungen erschien es ferner von Interesse, zu prüfen, ob etwa ein Fehlen des Makulapigments in der Fovea selbst konstatiert werden könne. Es hätte sich dies dadurch ver-raten müssen, daß bei Benutzung sehr kleiner Felder die zentral eingestellte Gleichung bei geringen Blickabweichungen im verkehrten Sinne, entsprechend einer zunehmenden Pigmentierung, unrichtig geworden wäre. Hiervon habe ich indessen trotz mannigfach variiertter Versuche niemals etwas entdecken können, so wenig wie (nach mündlicher Mitteilung) Herr Prof. von KRIES. Es ist danach wohl zu vermuten, daß im lebenden Auge (wenigstens in den unsrigen) das Zentrum die höchstgradige Pigmentierung besitzt. Erscheint im Präparate die Fovea selbst ungefärbt, so mag das vielleicht an der hier vorzugsweise schnell auftretenden Zersetzung des Pigments liegen. Möglich bleibt freilich auch das Vorhandensein individueller Verschiedenheiten.

Geht man aber auch von der hiernach wohl wahrscheinlichsten Annahme aus, daß die Pigmentierung in einem kleinen zentralen Bezirk ihren stärksten Grad erreicht und von da nach allen Seiten allmählich abnimmt, so wird es natürlich doch unmöglich sein, die ermittelten Zahlen als quantitativ genaue Absorptionswerte irgend einem bestimmten Teile zuzuschreiben, und wir werden auch nicht hoffen können, die als ideales Ziel zu stellende Aufgabe, eine Bestimmung der Absorptions- (oder Färbungs)werte als Funktion des Zentralabstandes, lösen zu können. Indessen wird es vielleicht im Hinblick auf sonstige physiologisch-optische Fragen auch weniger darauf ankommen, als auf gewisse Vergleiche, für welche die hier gewonnenen Zahlen doch vielleicht eine genügende Unterlage abgeben können. In vielen Fällen nämlich wird es sich nur darum handeln, einigermaßen überschlagen zu können, welchen Einfluß etwa die abnehmende Makulapigmentierung, beim Übergang von dem Zentrum selbst auf Nachbarteile, auf Farben-gleichungen u. dergl. ausüben kann. Ein Beispiel hierfür ist die folgende Thatsache. Bekanntlich nimmt die Empfindlichkeit der Netzhaut in dunkeladaptiertem Zustande vom Zentrum gegen die Peripherie sehr erheblich zu, wobei es übrigens von Bedeutung ist, mit was für einer Lichtart geprüft wird. Ich habe über diesen Gegenstand eine Anzahl von Versuchen angestellt, über welche in einem anderen Zusammenhang berichtet werden wird.

Da die Steigerung der Empfindlichkeit vorzugsweise stark für kurzwelliges Licht bemerkbar ist, so kann sich hier in der That die Frage erheben, ob etwa die Unterempfindlichkeit des Zentrums ganz oder zum Teil auf Rechnung der Makulaabsorptionen zu setzen ist. In dieser Richtung nun ermöglichen Zahlen wie die obigen ganz wohl eine bestimmte Beurteilung. Denn wenn ich z. B. finde, daß der Schwellenwert in 3^o Abstand nur etwa $\frac{1}{20}$ des zentralen beträgt, so wird man sagen dürfen, daß an dieser Steigerung die verminderte Makulaabsorption sicher nur einen ganz geringen Anteil haben kann, die Erscheinung aber in der Hauptsache auf andere Umstände zurückgeführt werden muß.

Über den Einfluß, den das makulare Pigment in der Richtung besitzt, daß durch die Verschiedenheiten seiner Stärke die zentralen Farbengleichungen individuelle Differenzen aufweisen, können natürlich meine Versuche keinen direkten Aufschluß gewähren. Wenn indessen meine Resultate darauf hinweisen, daß der Gesamtbetrag der Absorptionen kein so sehr gewaltiger zu sein scheint, so machen sie es doch wahrscheinlich, daß auch die hierin begründeten Differenzen und Schwankungen keine sehr hohen Beträge erreichen werden.

Berichtigung.

In den Tabellen VI und VII meiner Arbeit „Über Farbensysteme“ (S. 277 und 278 dieses Bandes) sind durch ein Versehen die Überschriften des 2. und 3. Stabes („zu hell“ und „zu dunkel“) vertauscht worden. Ich bitte also über Stab 2 „zu dunkel“ und über Stab 3 „zu hell“ zu lesen.

v. KRIES.