

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

Über die Empfindlichkeit des normalen und des protanopischen Sehorgans für Unterschiede des Farbentons.

Von

Dr. PAUL v. LIEBERMANN und Dr. EUGEN MARX.

Den Dichromaten erscheinen, wie bekannt, gewisse, für das normale Sehorgan stark verschiedene Lichter resp. Lichtgemische völlig gleich; für gewisse Änderungen des Farbentons ist also ihre Unterschiedsempfindlichkeit sozusagen gleich Null. Dagegen besitzen sie für andere Modifikationen des Farbentons, die sie vermöge der Natur ihres Sehorgans wahrzunehmen vermögen, wie schon von den älteren Untersuchern bemerkt worden ist, nicht selten eine auffallend feine und sichere Unterscheidung. Aus theoretischen Gründen und wohl auch im Hinblick auf praktische Aufgaben ist die Frage von einigem Interesse, ob auch für solche Unterscheidungen die Leistungsfähigkeit der Dichromaten hinter der der Farbentüchtigen zurückbleibt, sie erreicht oder etwa übertrifft. Zur Beantwortung dieser Frage liegen zurzeit nur sehr wenige Beobachtungen vor, diejenigen nämlich, die BRODHUN mitgeteilt hat. Dieser (selbst Deuteranop) verglich seine eigene Unterschiedsempfindlichkeit für Änderungen der Wellenlänge mit derjenigen von Farbentüchtigen (KÖNIG und UHTHOFF); das Verfahren war das der mittleren Fehler. Die erhaltenen Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle.

Lichtart	Mittlere Fehler in $\mu\mu$.		
	Br.	K.	U.
550 $\mu\mu$	3,56	0,77	1,66
540 „	2,17	0,80	
530 „	1,03	0,77	1,88
520 „	0,47	0,71	
510 „	0,31	0,64	1,29
500 „	0,15	0,35	
490 „	0,15	0,31	0,72
480 „	0,28	0,38	0,95
470 „	0,59	0,68	1,57
460 „	0,92	1,03	1,95
450 „	1,43	1,43	2,16
440 „	2,13	2,18	

Wie man sieht, ist hier der Dichromat in dem brechbareren Teile des Spektrums (etwa von 520 $\mu\mu$ ab) den Farbentüchtigen etwas überlegen, am meisten in der Nähe seines neutralen Punktes.

Da dies, wie gesagt, die einzigen bis jetzt vorliegenden Beobachtungen dieser Art sind, so schien es uns von Interesse, eine ähnliche Paralleluntersuchung für uns beide durchzuführen, von denen der eine (M.) Protanop, der andere (v. L.) normaler Trichromat ist.

Obwohl sich aus mancherlei Gründen vermuten liefs (auch die oben mitgeteilten Beobachtungen BRODHUNS machen es wahrscheinlich), dafs ein Unterschied am ehesten bei einem für den Dichromaten neutralen homogenen Licht sich herausstellen werde, so schien es uns doch zweckmäfsig, die Untersuchung auf eine etwas gröfsere Zahl von Lichtern auszudehnen; und wir haben sie daher bei Wellenlängen von 485,9, 496,9, 509,6, 523,4 und 538,4 $\mu\mu$ ausgeführt.

Wir benutzten für unsere Versuche den HELMHOLTZschen Farbmischapparat, dessen öfters beschriebene Einrichtung wir als bekannt voraussetzen dürfen. Zu erwähnen ist nur, dafs wir ihn mit einem LUMMERSchen Prisma ausrüsteten, so dafs das Licht des einen Kollimators als kreisförmiger Fleck in dem von dem Lichte des anderen erleuchteten Felde gesehen wurde.

Wir benutzten zunächst die Methode der mittleren Fehler. Der Beobachter hatte also die Aufgabe, nachdem dem

den Ring erleuchtenden Kollimator eine bestimmte Stellung gegeben war, den inneren Fleck dem Ring so genau als möglich gleich zu machen. Es ist dabei besonders wichtig, daß nicht nur die Stellung des Kollimators (und somit die Wellenlänge), sondern auch die Spaltweite (und damit die Intensität des einzustellenden Lichtes) ganz frei geändert wurde. Dies ist von Bedeutung, weil mit Änderungen der Wellenlänge nicht nur der Farbenton, sondern auch die Helligkeit der Lichter sich ändert oder, wie man auch sagen kann, der subjektive Unterschied zweier Lichter von den Wellenlängen λ und $\lambda + \delta$ durch eine Differenz der Spaltweiten vermindert wird. In der Tat zeigten auch unsere Versuche, daß hier ein gewisser Parallelismus sich, wenn auch nicht mit ganz strenger Regelmäßigkeit, herausstellte, im allgemeinen bei zu kleiner Wellenlänge grössere, bei zu großer kleinere Spaltweiten eingestellt wurden.

Um die Versuche möglichst wenig durch Ermüdung zu beeinträchtigen, machten wir unsere Einstellungen stets abwechselnd. Auch beschränkten wir uns darauf, an einem Tage die Untersuchung für eine Lichtart auszuführen.

Für die 15 zu einer Reihe gehörigen Einstellungen wurde der mittlere Fehler¹ berechnet. Die Ergebnisse dieser Beobachtungen sind in der nachstehenden Tabelle zusammengestellt.

¹ Für die Berechnung ergab sich hier eine gewisse Schwierigkeit daraus, daß die physikalische Eichung nicht gestattet die objektiv richtige Einstellung, d. h. diejenige, bei der die Wellenlängen der das eine und andere Feld erleuchtenden Lichter gleich sind, mit der erforderlichen Genauigkeit zu ermitteln. Es war aus diesem Grunde unumgänglich, als richtigen Wert den aus den Gleichheitseinstellungen selbst sich ergebenden Mittelwert und als Fehler die Abweichungen von diesem in Rechnung zu bringen. Hier erhob sich dann weiter die Frage, ob wir die Einstellungen jedes einzelnen von uns auf das Mittel seiner Einstellungen beziehen oder als richtigen Wert das Mittel aller Einstellungen beider Beobachter zugrunde legen sollten. Wir haben uns schliesslich für das erstere entschieden; hier werden also die Beobachtungen jedes einzelnen ganz unabhängig für sich behandelt und die angegebenen Zahlen geben ein einwandsfreies Bild von der Sicherheit seiner Beobachtungen, d. h. davon, wieweit seine wiederholten Einstellungen untereinander übereinstimmen. Übrigens würde es, da die Mittelwerte der Beobachter doch immer mit grosser Annäherung die gleichen waren, keinen nennenswerten Unterschied gemacht haben, wenn wir in der anderen Weise zu Werke gegangen wären.

Mittlere Fehler in $\mu\mu$.

M.	v. L.	Diff.
$\lambda = 485,9$		
0,62	0,54	
0,68	0,54	
0,42	0,42	
0,64	0,68	
Mittel 0,59	0,54	0,05
$\lambda = 496,9$		
3,12	1,50	
2,08	1,04	
2,34	1,56	
1,75	1,17	
Mittel 2,32	1,32	1,00
$\lambda = 509,6$		
4,34	2,45	
2,03	1,19	
2,03	0,98	
3,36	2,24	
Mittel 2,94	1,71	1,23
$\lambda = 523,4$		
2,55	1,05	
2,63	1,20	
2,18	1,05	
2,10	1,28	
Mittel 2,34	1,14	1,20
$\lambda = 538,4$		
1,71	1,17	
2,52	1,35	
2,34	0,99	
2,78	0,81	
Mittel 2,34	1,08	1,26

Das Ergebnis dieser Versuche ist, wie man sieht, das entgegengesetzte wie das von BRODHUN gefundene. Die Einstellungen des Trichromaten sind durchweg etwas genauer, seine mittleren Fehler geringer als die des Dichromaten. Nun besteht ja zwischen unseren Versuchen und den BRODHUNSCHEN vor allem der Unterschied, daß es sich bei diesen letzteren um einen Deuteranopen, bei uns dagegen um einen Protanopen handelte. Daß der Unterschied der Resultate hiermit zusammenhängt, erscheint wohl

denkbar; doch wäre es sicher voreilig einen solchen Schluss zu ziehen, um so mehr als die gefundenen Unterschiede zwischen dem Dichromaten und dem Farbentüchtigten nicht von sehr grossem Betrage sind und kaum über das hinausgehen, was wir auch innerhalb derselben Kategorie an individuellen Schwankungen finden.

Da es uns möglich schien, dafs gerade bei der Methode der mittleren Fehler individuelle Besonderheiten der Einübung und Geschicklichkeit ins Gewicht fallen könnten, so haben wir zunächst noch eine Anzahl weiterer Versuche nach der Methode der eben merklichen Unterschiede ausgeführt. Auch hier mußte selbstverständlich aufser der Änderung der Wellenlängen eine solche der Spaltweiten stattfinden. Der Beobachter gab also dem den Fleck erleuchtenden Kollimator sehr kleine Verschiebungen; bei jeder Stellung suchte er durch Einstellung der Spaltweite Fleck und Ring so ähnlich wie möglich zu machen und es wurde so fortgefahren, bis bei dieser Variierung der Spaltweite ein Unterschied bestehen blieb und der Beobachter den Fleck als zu gelb oder zu blau im Vergleich zu seiner Umgebung erkannte.

Beobachtungen dieser Art haben wir nur bei der Wellenlänge $509,6 \mu\mu$ ausgeführt, die für den Protanopen annähernd farblos war.

Die Ergebnisse waren hier die folgenden:

Eben merkliche Unterschiede in $\mu\mu$ bei Wellenlänge $509,6 \mu\mu$.

M.	v. L.	Differenz	Anzahl der Einstellungen
19,8	2,5	17,3	11
11,4	1,8	9,6	11
15,6	2,4	13,2	10
16,6	3,5	13,1	8
17,5	4,1	12,4	5
16,5	6,1	10,4	5
Mittel 16,2	3,6	12,6	50

Bei diesem Verfahren tritt, wie man sieht, die Überlegenheit des Trichromaten noch stärker hervor. Freilich zeigen die Zahlen wohl auch zugleich, wie bei all diesen Versuchen neben der Unterschiedsempfindlichkeit im strengen theoretischen Sinne eine Reihe individueller Eigentümlichkeiten in bezug auf die Ausführung der Beobachtungen ins Gewicht fallen. So ist das Verhältnis des mittleren Fehlers zum eben merklichen Unterschiede

bei dem einen von uns (v. L.) = 1 : 2,1, ähnlich dem von UHTHOFF angegebenen Werte 1 : 1,8; für den anderen dagegen 1 : 5,7.

Es schien uns endlich von einigem Interesse, entsprechende Versuche statt mit reinen Lichtern auch mit Lichtgemischen, insbesondere einer für den Protanopen etwa farblosen Rot-Blau-Mischung auszuführen. Zu diesem Zwecke wurden beide Kollimatoren mit den Doppelspaten ausgerüstet und diese so eingestellt, daß sowohl Ring als Fleck mit einer Mischung zweier Lichter von 670 und 460 $\mu\mu$ erleuchtet wurden. Wir verfahren hierbei wieder nach der Methode der mittleren Fehler. An die Stelle der Kollimatorverschiebung trat hier die Drehung des NIKOLSchen Prismas, durch die das Mengenverhältnis von Rot und Blau verändert wird. Bei dem Versuche, Ring und Fleck so genau als möglich gleich zu machen, mußte natürlich wiederum NIKOL-Stellung und Spaltweite frei variiert werden. Unsere Resultate, nämlich die mittleren Fehler in der Einstellung des NIKOLSchen Prismas, enthält die folgende Tabelle.

Purpurgemisch.		Mittlere Fehler in Graden NIKOL-Drehung.	
M.	v. L.	Differenz	
7° 05'	5° 46'		
10° 52'	15° 58'		
7° 41'	4° 54'		
5° 7'	56'		
4° 9'	3° 22'		
15° 56'	48'		
Mittel 8° 28'	5° 17'	3° 11'	

Als Gesamtmittel ergibt sich für den Protanopen 8° 28', für den Farbentüchtigen 5° 17'.

Im ganzen können wir daher das Ergebnis unserer Beobachtungen dahin zusammenfassen, daß wir in keinem Falle und bei keiner Verfahrensweise für den Protanopen eine Genauigkeit der Farbenunterscheidung gefunden haben, die diejenigen des Farbentüchtigen übertroffen oder auch nur erreicht hätte, überall vielmehr die Leistung des Protanopen hinter der des Trichromaten zurückblieb.