

« Farbfilter, Farbenblindheit und Farbensehen »

Von U. EBBECKE¹, Bonn

«Farben sind Taten des Lichts»
(GOETHE, Farbenlehre)

In den vergangenen großen Zeiten der deutschen Sinnesphysiologie, als die beiden großen Meister HELMHOLTZ und HERING mit der Dreifarbentheorie und der Lehre von den Gegenfarbenpaaren einander gegenüberstanden, und der Streit der Meinungen die Gemüter lebhaft bewegte, gab die Beschäftigung mit der Farbenblindheit die Hoffnung, eine Entscheidung im einen oder anderen Sinne herbeizuführen, da sich an ihr als Prüfstein die Theorien zu bewähren hatten. Aber beide Lager fanden Bestätigung und Widerlegung; die Hoffnung enttäuschte. Seitdem sind die Symptome gründlicher untersucht und besser bekannt, aber noch ist nicht einmal die Nomenklatur ganz einheitlich, indem die verschiedenen Formen der Farbenblindheit im Sinne der Gegenfarben als Rotgrünblindheit und Gelbblaublindheit oder im Sinne der Dreifarbenlehre als Protanopie, Deutanopie und Tritanopie geordnet werden.

Es herrscht darin Übereinstimmung, daß die verschiedenen Formen der Farbenfehlsichtigkeit Reduktionssysteme sind, in denen eine Farbenkomponente oder ein Farbenpaar ausgefallen ist. Die Häufigkeit ihres Vorkommens, rund 8% Farbschwäche (partielle Farbenblindheit und Anomalie) im männlichen, 0,5% im weiblichen Geschlecht, und der durch die Generationen zu verfolgende Erbgang, der ähnlich wie bei der Bluterkrankheit (Hämophilie) eine rezessiv geschlechtsgebundene Vererbung anzeigt, charakterisieren die angeborene Farbschwäche gegenüber der erworbenen Rotgrünblindheit, die bei Erkrankung der Nervenbahnen zwischen Netzhaut und Großhirnrinde, und der erworbenen Blaugelbblindheit, die bei Netzhautveränderungen vorkommt. Angeborene Blaugelbblindheit ist sehr selten. Die Rotgrünblindheit in ihren verschiedenen Graden von Anopie und Anomalie und ihren individuellen Modifikationen bleibt dem Rotgrünblinden selbst unbemerkt und wird erst bei zufälligen Gelegenheiten oder besonderen Prüfungen entdeckt, etwa bei Kindern in ihren ersten Malversuchen, beim Einsammeln von Erdbeeren, wobei sich der Rotgrünblinde nur nach der Form, nicht nach der hervorleuchtenden Farbe richten kann, bei der Schwierigkeit, ein braunes Reh im grünen Wald zu erkennen, trotz guter Sehschärfe. Da die Rotgrünblinden für die

Farben die Bezeichnungen anwenden, die sie von Kind an gelernt haben, und die fehlende Bunterkennung durch eine um so genauere Beachtung der Helligkeitsdifferenzen ersetzen, fallen sie im täglichen Leben nicht auf, bis etwa das Einsetzen eines roten Flickens in einen schwarzen Stoff, das Stopfen eines grauen Handschuhs mit grünem Faden auf die Störung hinweist. Wichtiger sind die schweren Eisenbahn- und Verkehrsunfälle, die durch Verwechslung der roten und grünen Signallichter hervorgerufen worden sind und zur sorgfältigen Prüfung auf Farbenblindheit im Eisenbahndienst, Marine und Flugverkehr mittels HOLMGRENSCHER Wollproben, Anomaloskop oder Verwechslungsfarben geführt haben. Die Einstellung der Rayleigh-Gleichung

$$670 + 535 = 589$$

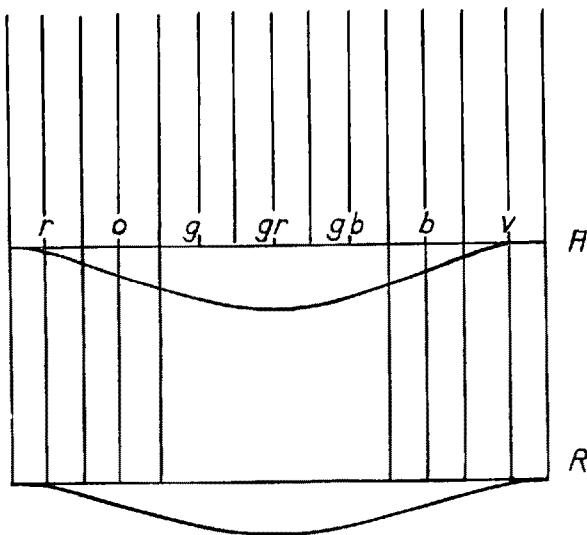
Lithiumlicht + Thalliumlicht = Natriumlicht

erlaubt eine quantitative Bestimmung. Es zeigt sich allerdings, daß der Rotgrünblinde auch in seinen Blauempfindungen vom Normalen abweicht und daß für die richtige Farberkennung die Beleuchtung oder Beschattung, die Weißverhüllung (Nebel), die Größe der Farbfläche und der Simultankontrast eine ausschlaggebende Rolle – viel mehr als bei den Normalsichtigen – spielen.

Als der Wunsch, mir eine anschaulichere Vorstellung davon zu verschaffen, wie eigentlich die Farbenblindnen die farbige Welt ansehen, mich zur Untersuchung der Farbenfehlsichtigkeiten führte, stellte sich allmählich der folgende Gedankengang ein: durch Vorschalten einer Konvexlinse verhält sich ein normales Auge wie ein myopes, durch eine Konkavlinse wird es hypermetrop; das Verständnis des Strahlengangs, der Dioptrik, wird durch die unmittelbare Beobachtung und Demonstration erleichtert. Will man sich statt dessen die Wirkung der Strahlen beim Auftreffen auf die Retina mit ihren Rezeptoren veranschaulichen, so kann man das Auge durch Vorsetzen eines Schwarzbettes zeitweilig blind machen, die Sehelemente für die Dauer der Strahlenausschaltung außer Funktion setzen. Was geschieht nun, wenn man nur einen Teil des weißwirkenden Strahlengemisches und damit nur einen Teil der Rezeptoren ausschaltet? Es muß eine künstliche «absorptive Fehlsichtigkeit» entstehen, und die Frage ist, wie sich diese partiellen Blindheiten bei den verschiedenen Farbfiltern verhalten und ob sich unter ihnen einige finden, die den natürlich vorkommenden Formen ähneln.

¹ Physiologisches Institut der Universität Bonn.

Damit ist eine Aufgabe gestellt, die auch mit geringen zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln durch Vorsetzen von allerlei Farbfiltern, bunten Farbgläsern, Farbfolien, Farbbrillen experimentell in Angriff zu nehmen ist. Farbfilter lassen sich in beliebiger Zahl, Farbtönung und Farbkonzentration schon durch Überziehen von gläsernen Objektträgern mit einer durch irgendeinen Farbstoff gefärbten Gelatineschicht herstellen, unter Umständen auch zu mehreren hintereinanderschalten. Im Spektroskop ist der Grad ihrer Durchlässigkeit festzustellen, wobei mehr noch als auf den durchgelassenen Strahlenanteil auf den absorbierten Anteil zu achten ist. Es gibt da Paßfilter wie ein Gelbglass, das bis auf einen kleinen Bezirk im komplementären Blauviolett alle Strahlen passieren läßt, und Sperrfilter wie ein Rotglas, das bis auf das



In dem Schema ist A das vor dem Auge oder vor der Strahlungsquelle vorgeschaltete Absorptionsfilter, R das retinale Rezeptivfilter. Die beiden, nach unten gezeichneten, Absorptionskurven sollen, der Annahme nach, ähnlich sein.

langwellige Spektralende sämtliche Strahlen absorbiert, und allerlei Zwischenformen. Am besten sind diejenigen Filter, die ein Drittel oder die Hälfte des sichtbaren Spektralbereichs zurückhalten.

Dann stehen sich, wie das Schema der Abbildung andeutet, beim Vorschalten des Buntglases zwei Filter – ein äußeres Okularfilter und ein inneres Retinalfilter – gegenüber. Das äußere ist nur ein Absorptionsfilter, ist lichtecht und verwandelt die absorbierte Strahlung in Wärme, ohne zersetzt zu werden; das innere ist zugleich Rezeptivfilter, maximal lichtunecht, den photographischen Sensibilisatoren vergleichbar und gibt durch seine photochemischen Zersetzungprodukte den Anlaß zur Nervenerregung, die dann auf Nervenwege zentralwärts durch die Zwischenstationen bis zur Großhirnrinde weitergeleitet wird. Beide enthalten Farbstoffe. Sollten ihre Absorptionskurven einigermaßen übereinstimmen, so wäre der Vergleich von absorptiver und rezeptiver Fehlsichtigkeit möglich.

Für die Vorschaltung des Absorptionsfilters gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder befindet es sich als Okularfilter unmittelbar vor dem Auge oder als Strahlungsfilter, von dem Rezeptivfilter getrennt, dicht vor der Lichtquelle. Das erste Verfahren ist einfacher und vielseitiger anwendbar; die Gläser begleiten den Beobachter im Zimmer, im Laboratorium, im Freien, im Wechsel der Tages- und Jahreszeiten mit ihren wetterabhängigen Himmelsbeleuchtungen, vor Farbproben, Farbkreisen, Alltagsgegenständen, Gemälden und Landschaften; sie können mit der Hand leicht auswechselbar vor ein oder beide Augen gehalten oder für länger dauernde Umstimmungsversuche in Brillen nach Art einer Autobrille oder Strahlenschutzbrille gefaßt werden; sie gestatten jederzeit den beim Farbenblindem fast immer fehlenden Vergleich mit dem Normalauge; sie sind aber nur dem Einzelindividuum «subjektiv» zugänglich. Daher dient das zweite Verfahren zur Ergänzung. Es erfordert einen großen lichtdichten Lichtkasten, ähnlich dem zur Betrachtung von Röntgenfilmen üblichen, der vorn offen ist und eine sehr starke (200 W) elektrische Glühbirne trägt; ihre Farbtemperatur muß hoch genug sein, damit die Strahlung, nach dem WIENSchen Gesetz, einen genügenden Anteil auch der kurzweligen Strahlen enthält, wenn sie auch dem Tageslicht nicht ganz gleichkommt. Der Kasten trägt an seiner offenen Vorderseite eine Schlittenvorrichtung zum Einschieben der großen Rahmen mit den Absorptionsfilmen, für die sich alte entsilbernde und gefärbte Röntgenfilme (35 × 35 cm) bewährten. Für manche Zwecke genügt schon ein Diapositivprojektionsapparat, der den Farbton auf die Wand projiziert. Der Raum muß im übrigen sorgfältig verdunkelt sein. Das Verfahren gestattet die Demonstration im größeren Kreise, etwa im Hörsaal¹ und wird somit zu einer Untersuchung farbiger Beleuchtungen.

Ohne auf die fast unerschöpfliche Fülle von Variationsmöglichkeiten und Einzelbeobachtungen oder auf theoretische Voraussetzungen einzugehen, sei nun das experimentelle Ergebnis für die drei Filter, die sich als am besten geeignet erwiesen, geschildert: das *Orangefilter* mit dem Absorptionsmaximum im Blau, das *Purpurfilter* mit dem Maximum im Grün und das *Grünblaufilter* mit dem Maximum im Rot.

Als Übersichtsobjekt dient ein Farbenkreis, nach Art eines HERINGSchen, TRENDLENBURGSchen oder OSTWALDSchen Farbenkreises, der vor dem Beobachter auf dem Tisch liegt oder, in größerer Ausführung aus Buntpapieren angefertigt, an der Wand hängt. Einschalten des Orangefilters gibt den Gesamteindruck von sonniger, strahlender Beleuchtung, manche Beobachter sprechen sogar von größerer Helligkeit, die meisten achten nur auf den Farbenkreis, dem das

¹ Vorführung auf der Physiologentagung in Frankfurt, September 1948.

Auge zugewendet ist, und sehen die schönen, frischen, hellen roten und grünen Farbtöne, die die beiden gegenüberliegenden Hälften des Kreises bedecken, verhältnismäßig wenig nuanciert und nur in ihren Helligkeitsabstufungen verschieden sind, wobei das f-Grün¹ auch den n-Grünblaubereich¹, das f-Rot den n-Violettbereich überzieht, die aber an ihren beiden Enden von einander durch zwei unbunte Zwischenstellen getrennt sind. Die eine Stelle ist das n-Blau, das dunkel, schwarz oder grau erscheint; die andre umfaßt eine Gruppe nebeneinander liegender Farben von n-Gelb, n-Rötlichgelb und n-Grünlichgelb, die alle weiß oder in hellem Grau erscheinen. *Das Filterauge ist rotgrün-sichtig und blaugelbblind geworden und zeigt im Farbenkreis zwei Neutralstellen im Blau und im Gelb, die einem Helligkeitston der Schwarzweißreihe im n-Auge entsprechen.* Es verhält sich auch insofern blaugelbblind, als es die zur Prüfung auf Blaugelbblindheit (Tritanopie) bestimmten Farbverwechslungstafeln (HERTEL-STILLING) nicht mehr lesen kann, die, wie ausdrücklich angegeben, nur bei Tageslicht zu verwenden sind. In der Tat gibt elektrisches Licht eine rötlichgelbe Beleuchtung und muß daher, wie nun einzusehen, eine geringe Blaugelbschwäche machen; ebenfalls ist der Gesamteindruck eines Auges mit Orangefilter, das eine Landschaft betrachtet, dem einer n-Landschaft im hellen Sonnenschein bei tiefstehender Sonne ähnlich, wobei die roten und grünen Töne leuchtend prävalieren. Es ist nicht erstaunlich, daß mit dem Orangefilter ein reines Blau verschwindet, denn seine Strahlung wird absorbiert, so daß nur je nach seinem Sättigungsgrad (Weißvalenz, Weißverhüllung, Grauverhüllung) ein verschieden heller unbunter Ton übrigbleibt. Es ist nicht einmal so sehr erstaunlich, daß auch das Gelb verschwindet, das doch uneingeschränkt vom Orangefilter durchgelassen wird; denn es hebt sich nicht vom weißen Untergrunde ab. Aber der Untergrund ist gar nicht weiß, er ist orangefarben. Nur ist das längst vergessen oder von Anfang an übersehen. Darum überrascht die Feststellung der absorptiven Blaugelbblindheit, deren Ähnlichkeit mit der rezeptiven Blaugelbblindheit und den charakteristischen beiden Neutralstellen deutlich genug ist. Dennoch liegen hier bei aller Selbstverständlichkeit mehrere Probleme verborgen. Wieso kann der Beobachter den generellen Farbton so völlig übersehen? Ist das Ermüdung, Adaptation, Gewöhnung, Umstimmung, Transformation? Was ist dann Weiß? Wie kommt der Beobachter dazu, eine strahlende Beleuchtung, vielleicht sogar eine größere Helligkeit als vorher anzugeben, wo doch das Orangefilter nichts hinzufügen, sondern nur etwas — nämlich wie das Absorptionsspektrum zeigt, das Blau und Violett und noch eine Hälfte des Grüns — wegnehmen kann? Wenn aber das Filter etwas vom Grün weg-

nimmt, warum sieht das Filterauge das Grün der Vegetation in einer Landschaft so ausgesprochen kräftig, frisch, gesättigt, fast überstark, manche sagen « giftgrün »? Da bleibt manches zu analysieren. Doch vorerst ist das Beobachtungsmaterial zu vergrößern. Auch ist Tritanopie eine große Seltenheit, Rotgrünblindheit viel häufiger.

Nehmen wir statt des Orangefilters das grünabsorbierende Purpurfilter zur Hand oder bedecken die Front des Lichtkastens mit dem großen purpurfarbenen Absorptionsfilm, so ist wiederum ein zwei-farbiger Sehen, eine reine Dichromasie, eingetreten. Diesmal ist das Rot und Grün ausgefallen, und statt dessen stehen sich zwei große, ziemlich einheitlich gefärbte Bereiche gegenüber, die eine Seite in tiefem Blau oder Ultramarinblau, die andere in einem leuchtenden, warmen Gelbton, der je nachdem als orangefarben, rötlichgelb, goldgelb, warmgelb, reingelb bezeichnet wird. Zwischen den beiden Zonen liegen sich diametral gegenüber zwei Neutralstellen von unbestimmt verwaschen grauer Tönung. Es ist leicht, zu zeigen, daß hier wirklich eine Rotgrünblindheit oder besser Rotgrünverwechslung besteht; zwei an die Wand gehängte Farbpapiere, ein grasgrünes und ein etwas dunkleres himbeerrotes, erscheinen dem f-Auge völlig zum Verwechseln gleich in einem leicht bräunlichen Grau, fast ganz unbunt, während eine andre Farbzusammenstellung aus einem etwas grauen Grün und einem helleren Rot deutlich als heller und dunkler unterschieden wird. Die Farbbezeichnung ist stark abhängig von der Belichtungsintensität, der Flächengröße und der Dauer der Filterwirkung und außerdem von individuellen Unterschieden der Beobachter, da einige von vornherein das n-Rot als f-orange, andere als f-gelb sehen. Aber auch die ersten geben bei starker Belichtung, nicht zu großer Fläche und besonders nach einer Umstimmung von ein bis wenigen Minuten Dauer ein reines f-Gelb an. Kleine Änderungen der Belichtung, durch Beschattung mit der Hand, durch Abkehr der Farbfläche von der Lichtquelle herverufen, machen große Änderungen des Farbtons. Herabsetzung der allgemeinen Belichtungsintensität, Tageslicht gegen Abend, macht das f-Gelb rötlicher, ähnlich wirkt Vergrößerung der Farbfläche. Daher macht auch die Entfernung, von der aus die Farbe gesehen wird, schon einen Unterschied. Die für das normale Auge charakteristische Farbenkonstanz der Sehdinge ist nicht mehr gewährleistet. Auch hier hat eine genauere Analyse einzusetzen.

Nehmen wir drittens das rotabsorbierende Grünblaufilter, so ergibt sich nochmals eine Rotgrünblindheit und Blaugelbichtigkeit mit zwei Neutralstellen. Aber mit eindrucks voller Deutlichkeit ist es nun ein ganz anderes Blau und Gelb, das gesehen wird, mit einer anderen Helligkeitsverteilung der Blauzone und Gelbzone und mit einer Drehung der im Kreis sich gegenüberliegenden unbunten Stellen. Gegenüber dem

¹ Zur Vereinfachung des Ausdrucks ist der subjektive oder falsche Farbton, den das Filterauge sieht, als f-Farbe von dem sog. objektiven oder richtigen n-Farbtone des Normalauges unterschieden.

leuchtend warmen, üppig prächtigen, wenn auch nuancenarmen Gesamteindruck der vorhergehenden Rotgrünblindheit herrscht nun ein kaltes, düsteres oder schattiges Lokalkolorit. Der Beobachter, der anfangs in der Bezeichnung der gesehenen Farbtöne schwankt (Violettblau? Grünlichgelb?), braucht einige Zeit, bis er sich hineingesehen und inzwischen die anfangs zu geringe Helligkeit zugenommen hat. Danach sieht er das rotgrüne Farbenpaar, das dem Purpurfilterauge verwechslungsgleich grau oder bräunlichgrau erschien, in schönem gelben und blauen Farnton und deutlichem Gegensatz, während ihm das andre Farbenpaar, das im Purpurfilter gegensätzlich wirkte, in Farnton und Helligkeit nahezu gleich erscheint, wenn es auch schwierig ist, die Farbflächen so auszuwählen, daß die Helligkeitsnuancen ganz verschwinden¹. Das ist viel leichter der Fall, wenn der Beobachter durch Verengung der Lidspalte blinzelnd die Helligkeit herabsetzt oder im Augenblickssehen eine Momentbelichtung (kurzes Öffnen und Wiederschließen der Augen) vornimmt. Im ganzen wirken für das Grünblaufilter die n-Grüntöne heller, die n-Rottöne dunkler als im vorhergehenden Fall. Das Auge mit dem Purpurfilter ist «relativ rotsichtig», ohne Verkürzung des langwelligen Spektralendes, das Auge mit dem Grünblaufilter ist «relativ grünsichtig», sein Spektrum am langwelligen Ende verkürzt.

Die beiden Formen stehen sich gegenüber wie Deutanopie und Protanopie, und die Vergleichbarkeit wird noch besser gesichert, wenn wir die zur Prüfung des Farbensinns dienenden pseudoisochromatischen Tafeln zu Hilfe nehmen. So werden z. B. von den HERTEL-STILLINGSchen Tafeln (19. Auflage 1935) Nr. 15, 17, 19 sowohl vom Protanopen wie vom Grünblaufilterauge nicht gelesen, Nr. 16, 18, 20 sowohl vom Deutanopen wie vom Purpurfilterauge nicht erkannt. Es ist bei Betrachtung solcher Tafeln eigenartig, zu sehen, wie unmittelbar beim Vorschalten des Filters die Immediaterinnerung der kurz vorher noch gesehenen Zahl im ersten Augenblick noch besteht, aber sogleich zerflattert, sich auflöst und unkenntlich wird, oder wie beim Vorschalten eines weniger konzentrierten Farbilters, das nur eine Farbschwäche (Protanomalie und Deutanomalie) macht, der Beobachter mit unsicherem Suchen und langsamem Nachfahren der Zahlenlinien sich einem Farbuntüchtigen ähnlich verhält und mühsam konstruiert, was der Farbuntüchtige in Augenblicksschnelle erfaßt. Wir haben da in vervollkommeneter Form die Verwendung von Farbfiltern vor uns, wie sie der Arzt als «Filterfalle» zur Überführung von Dissimulanten benutzt, die ihre Zahlen auswendig gelernt haben, oder wie sie dem Rotgrünblindem die Unterscheidung von Rot und

Grün erleichtern. Denn ein Protanop wird durch ein Purpurglas das Rot, ein Deutanop durch ein Blaugrünglas das Grün an seiner verhältnismäßig gesteigerten Helligkeit erkennen.

Wenn wir im Okularfilter oder am Lichtkasten das Purpur- und das Orangefilter kombinieren, der Rotgrünblindheit (Deutanopie) die Blaugelbblindheit (Tritanopie) hinzufügen, so resultiert durch die verdoppelte Absorption ein reines Rotfilter und für den Beobachter eine *totale Farbenblindheit*. Schon im Anfang meiner Farbfilterversuche, als sich farbenblinde Studenten für die Untersuchung zur Verfügung stellten, waren mir einige aufgefallen, die bei Betrachtung eines Farbkreises nach Vorsetzen eines Orange-glasses angaben, daß dann alle Farben verschwunden und nur noch Helligkeitsunterschiede zu sehen wären. Der Befund ist nunmehr durch die künstliche Synthese zweier Farbenblindheiten bestätigt und erklärlieb und als schnelles diagnostisches Hilfsmittel zur Erkennung einer Deutanopie verwendbar. Es ist eine totale Farbenblindheit ohne Verkürzung des langwelligen Spektrumendes, vergleichbar der Farbenblindheit, die für das helladaptierte Normalauge in der Peripherie des Gesichtsfeldes besteht. Daß ein Rotfilter, das ausschließlich die langwelligen Strahlen durchläßt, die Erkennung aller Buntfarben aufhebt, ist, wie man sagen kann, selbstverständlich, da die andern Farben nicht mehr, oder nur noch mit ihrer Weißvalenz, wirken können und Rot sich von Rot nicht «abhebt», in der Untergrundfärbung aufgeht. Wir haben es wie im Alltagsleben mit Pigmentfarben zu tun, die im physikalischen Sinne niemals rein, monochromatisch, sondern mit einem beträchtlichen Weißanteil von Strahlengemisch behaftet sind¹. Das Geheimnis liegt, wie schon anfangs erwähnt, darin, wie es möglich ist, einen doch so stark wirksamen generellen Farnton weitgehend oder völlig unbeachtet zu lassen, sich an das allgemeine Rot zu gewöhnen, es zu übersehen, es vielleicht in Weiß umzuwerten, was, wie der Versuch lehrt, um so rascher und gründlicher geschieht, je intensiver die Belichtung ist, also bei Benutzung des Lichtkastens in nächster Nähe der rotgefilterten Lichtquelle. Ist das Rotfilter nicht dicht genug, so bleibt noch ein Rest von Blaugelbempfindung bei vollkommener Rotgrünblindheit.

Das Gegenstück hierzu liefert ein Grünfilter von genügender Konzentration, dessen elektive Gründurchlässigkeit unter Umständen erst durch Hintereinanderschalten mehrerer Grünscheiben zu erreichen ist. Nun ist es eine totale Farbenblindheit mit Verkürzung des Spektrums am langwelligen Ende, dem gewöhnlichen Dämmerungssehen vergleichbar, mit dem Helligkeits-

¹ Hier bewährt sich die OSTWALDSche Farbennormung, die jeden Farbton mit seiner Nummer und Kennziffer versieht und seine Stellung im 100teiligen oder 24teiligen Farbenkreis sowie seinen Weiß- und Schwarzgehalt festlegt.

¹ Weißes Schreibpapier absorbiert 15% und mehr der auffallenden Strahlung, schwärzester Druck reflektiert 4%, gesättigte violette, blaue oder grüne Anilinfarben haben einen Graugehalt von 50-80%, gelbe oder orange Malfarben können bis 90% Bunt enthalten.

maximum im Gelbgrünen, nach der Duplizitätstheorie ein reines Stäbchensehen und photochemisch betrachtet ein Sehpurpursehen, da Absorptionskurve und Bleichungskurve des Sehpurpurs mit der Helligkeitskurve des Dämmerungssehens übereinstimmen (TRENDELENBURG). Es müßte, wenn die anderen photochemisch zersetzlichen Sehstoffe infolge der unterschwellig gewordenen Strahlenwirkung nicht mehr ansprechen und nur noch der reichlicher gebildete und in größerer Konzentration vorhandene Sehpurpur den Reiz auffängt, eine reine Grünempfindung zustande kommen. Der Grünfilterversuch und ebenso der Rotfilterversuch lehren aber, daß es eine Monochromasie mit elektiver Buntempfindung nicht gibt. Grün wird weiß, und Rot wird weiß, und Orange und Purpur und Grünblau werden weiß, und es erhebt sich die seltsame, schwer zu beantwortende Frage: Was ist dann Weiß?

Es würde zu weit führen, hier noch auf die Sonderstellung des Violetfilters einzugehen, das bei schwacher Konzentration durch Zurückdrängen des Gelbgrüns das Rot in überstarker Deutlichkeit heraushebt und die andern Farben mit warmer Leuchtkraft « verschönzt » und das bei starker Konzentration möglicher- und fraglicherweise eine zweite Form von Blaugelbblindheit hinzufügt. Und erst recht muß darauf verzichtet werden, die vielen Einzelheiten anzuführen, die sich dem Beobachter darbieten, wenn er die bunte Fülle der sichtbaren Dinge mit den Farbfiltern betrachtet und dabei zu neuen ganz ungewohnten Farbeindrücken und Farberlebnissen kommt, zumal die Beschreibung den eigenen unmittelbaren Eindruck nicht ersetzen kann. Auch der wichtige Vergleich der hier an Pigmentfarben ausgeführten Versuche mit den an Spektralfarben zu erhebenden, am NAGELSchen Anomaloskop zu untersuchenden Befunden, muß einer gesonderten Behandlung überlassen bleiben. Die in der vorangegangenen Darstellung geschilderten Befunde genügen, um mitten in den Fragenkomplex von Farbenblindheit und Farbensehen hineinzuführen und einige Folgerungen abzuleiten. Denn die Beschäftigung mit den Farbfilterversuchen, die zunächst für den Beobachter den Wert hat, seinen eigenen Farbensinn und auch seine Farbenfreudigkeit zu verfeinern und zu differenzieren und ihm die Einfühlung in das Sehen der Farbenblindten zu erleichtern, scheint doch auch einige Lehren oder Anhaltspunkte über das Zustandekommen der Farbenblindheiten und in notwendigem Zusammenhang damit über das Zustandekommen des Farbensehens zu geben, so daß nunmehr die theoretische Verwertung der Befunde anzuschließen ist.

Daß eine weitgehende Übereinstimmung der Symptome bei den absorptiven und den rezeptiven Fehlsichtigkeiten vorliegt, ist deutlich. Der künstlich Rotgrünblinde erkennt die Erdbeeren zwischen den grünen Blättern, die roten Kirschen am Baum ebensowenig wie der natürlich Farbuntüchtige und hat Mühe, solche Gegenstände rein nach der Form herauszufinden.

Anderseits wirken auf ihn manche Farben, die dem Normalsichtigen ähnlich erscheinen, stark verschieden, weil er sich nach den Helligkeitsdifferenzen richtet. Oder er sieht durch Simultankontrast eine Schieferplatte, einen stählernen Gegenstand, der dem n-Auge grau aussieht, in schönem Blau. Er ist in der Farberkennung und -benennung sehr von der Belichtung und Beleuchtung abhängig, von Sättigung und Verhüllung und von der Flächengröße des Farbflecks (Feldgröße). Die beiden Neutralstellen im Farbenkreis liegen dort, wo sie auch der Farbenblinde angibt. Die im Grünebeizirk gelegene Neutralstelle liegt bei dem f-Auge mit deutanopenem Purpurfilter etwas mehr zum langwolligen Ende hin als mit dem protanopen Grünblaufilter. Bei Benutzung beider Augen, von denen nur das eine filterfehlsichtig ist, entscheidet das n-Auge; das f-Auge ist gegenüber dem n-Auge amblyop. So geht die Übereinstimmung bis in Einzelheiten. Sicherlich ist sie nicht vollkommen; die Aussagen weichen in bezug auf Helligkeitswerte und besonders bei Prüfung mit Spektrallichtern im Dunkelraum ab und sind noch genauer zu prüfen. Aber die Ähnlichkeit, ob Analogie oder Verwandtschaft, berechtigt, die künstliche Fehlsichtigkeit wie einen Modellversuch zu behandeln und in den einfacheren Bedingungen ihres Zustandekommens zu analysieren.

Es sind drei Formen partieller Farbenblindheit, die durch funktionelle Ausschaltung je eines Farbbereichs entstanden sind; das entspricht der YOUNG-HELMHOLZSchen Theorie. Aber niemals gibt es eine isolierte Rotblindheit oder Grünblindheit oder Blaublindheit; darin hat HERING recht. Wiederum gibt es zwei Formen von Rotgrünblindheit, und es sind nicht Untergruppen einer gemeinsamen Form (relativ grünsichtige und relativ rotsichtige), sondern so verschieden, wie Purpur und Blaugrün verschieden sind; hierin behält v. KRIES gegen HERING recht. Dieser dagegen hat mit vollem Recht die notwendige Verbundenheit der Gegenfarben und die starke Wirkung des Kontrastantagonismus betont.

Vom physikalischen Standpunkt ist der Widerspruch zwischen dem, was das f-Auge sieht, und dem, was die subtraktive Farbenmischung verlangt, auffällig. Denn die Wirkung einer Pigment- oder einer Körperfarbe, durch ein Farbfilter gesehen, ist der Hintereinanderschaltung zweier Farbfilter gleichzusetzen. Das Überdecken einer grünen Farbfläche mit einem orangeflaschen Glas gibt ein abgestumpftes matteres Grün, kein kräftiges oder « giftiges » Grün, wie es das f-Auge sieht. Die Kombination eines Purpurfilters und eines Rot- oder Orangefilters gibt ein einwandfreies Rot, nicht das orangefarbene, rötlichgelbe oder warmgelbe des künstlich Deutanopen. Das Grünblaufilter vor einer gelben Fläche gibt ein Grün durch die subtraktive Farbenmischung statt des gesehenen Grünlichgelbs, kalten oder reinen (Zitronen-)Gelbs. Was das f-Auge sieht, ist physikalisch falsch, wird aber

physiologisch durch folgenden Versuch verständlich: Der Beobachter betrachtet ein mäßig großes rotes oder gelbes Feld durch das dicht vor das Auge gehaltene Purpurfilter und sieht das Feld in warmgelber Farbe; dann hält er das Filter unweit vor die Farbfläche und sieht diese rot. Er kann den Versuch mehrfach wiederholen. Schließlich führt er das Purpurfilter zwischen Objekt und Auge langsam hin und her und sieht die Färbung von rot zu gelb umschlagen, wenn er das Filter dem Auge nähert, von gelb zu rot, wenn er es dem Objekt nähert. Der Umschlag erfolgt, wenn das purpurfarbige Umfeld des Untergrundes mitspricht und wenn es aufhört mitzusprechen, also beim Übergang von der bezugsfreien zur bezogenen Farbe. Das Wissen, daß das Objekt unverändert seine Farbe behält, kann den Wechsel des Farbeindrucks nicht verhindern. Es ist ein gutes Beispiel für die Umfeld/Innenfeld-Wirkung, den Simultankontrast. Der Farbwechsel ist um so stärker, je intensiver die allgemeine Beleuchtung ist, am krassesten, wenn die Farbfläche auf einem weißen sonnenbeschienenen Untergrund liegt, entgegen der seinerzeit von HELMHOLTZ gegebenen Deutung, die an den Florkontrast anknüpfte, und in Übereinstimmung mit der HERINGSchen Auffassung, die den Simultankontrast als einen rein physiologischen Vorgang erklärte. Durch den Simultankontrast zu dem Gesamton des Gesichtsfeldes, der dem ganzen gesehenen Bezirk das gemeinsame Lokalkolorit gibt, addiert sich beim Purpurfilter das «subjektive» Kontrastgrün zu dem «objektiven» Rot der subtraktiven Farbmischung, beim Blaugrünfilter das Kontrastrot zum subtraktiven Grün – in beiden Fällen resultiert ein, wenn auch etwas verschiedenes, Gelb – und beim Orangefilter das Kontrastgrün zum Grün oder Graugrün, das verstärkt wird. Es sind die natürlichen Bedingungen des Sehens, das niemals eine Einzelheit des Gesichtsfelds für sich allein betrachten kann, sondern es in Beziehung zu dem gleichzeitig gesehenen Ganzen setzen muß. Es sind die Bedingungen, die im gewöhnlichen Sehen die Konturen verschärfen, die Farben gegeneinander absetzen, und die nach dem Prinzip von der Farbenkonstanz der Sehdinge die Gleichmäßigkeit der Farberscheinung bei dem alltäglichen Wechsel der Beleuchtungen herstellen, die physikalischen Schwankungen durch die physiologischen zentralnervösen Korrekturen ausgleichen. Es ist die antagonistische «Wechselwirkung der Sehfeldstellen» (HERING), die «Rettung der subjektiven Farbe», deren sich GOETHE mit Stolz rühmte. Wenn HERING seine Lehre von der Wechselwirkung in die Form seiner Assimilations/Dissimilations-Theorie kleidete, so ist diese Form unhaltbar geworden. Von einer assimulatorischen Erregung oder gar von der Aufhebung einer photochemischen Zersetzung durch eine andere entgegengesetzte photochemische Einwirkung ist nichts bekannt. Wohl aber steht, wie hier nicht näher auszuführen ist, diese Lehre von der antagonistischen Wechselwirkung

in bestem Einklang mit der Lehre von dem zentralnervösen Zusammenwirken der Erregung und Hemmung, von der SHERRINGTONSchen «reziproken Innervation». Schwarz-Weiß, Rot-Grün, Blau-Gelb in ihrer zentralnervösen Vertretung gehören zusammen wie die spinalen Neuronengruppen der Beuge- und Streckzentren. Es ist in seinem sensorischen Ausdruck und in seinem motorischen Ausdruck dasselbe allgemeine zentrale Funktionsprinzip der simultanen und sukzessiven Induktion.

Vom photochemischen Standpunkt kann die Annahme dreier lichtzersetzlicher retinaler Sehstoffe durch unsere Befunde eine Stütze erfahren, da es möglich ist, die vorkommenden Formen von Fehlsichtigkeit durch die mehr oder weniger vollkommene absorptive Ausschaltung einer von drei Komponenten nachzuahmen. Dem Blaugrünfilter, das als äußeres Okularfilter dient, steht ein inneres Retinalfilter von gleicher Farbe und gleicher Absorptionskurve gegenüber, dessen photochemische Zersetzung mit anschließender Erregung und Nervenleitung Rot «bedeutet», in Rotempfindung übersetzt wird. Ebenso bewirkt das purpurfarbene Okularfilter (vgl. Abb.) die zeitweilige Ausschaltung eines purpurfarbenen Retinalfilters, das normalerweise dank seiner Farbe und Absorption durch die Strahlen mittlerer Wellenlänge zersetztlich, grünempfindlich ist, sich dem Sehpurpur ähnlich verhält und in der zentralen Übertragung die Grünempfindung auslöst. Und das Orangefilter ist das Gegenstück eines orangefarbenen Sehstoffes mit dem Absorptionsbereich im blau-grünen, blauen und violetten Spektralteil; seine Zersetzung meldet die Blauempfindung. Es scheint nicht ohne Bedeutung, daß das Blaugrünfilter, das sich experimentell für die Protanopie als geeignet erwies, außer dem langwelligen Strahlenanteil auch noch eine Absorption am kurzweligen Ende bewirkt, wodurch nunmehr die zum Spektralende zunehmende Rottfärbung des Blaus in der Verschmelzungsfarbe des Violetts, die physikalisch unverständliche Ähnlichkeit in der Farbwirkung der beiden entgegengesetzten Spektralenden verständlich wird. Die Zersetzung der drei Sehstoffe mit anschließender Nervenerregung liefert das Rohmaterial, aus dessen Verarbeitung in zentraleren Stationen der Sehbahn schließlich die nach dem Schema der reziproken Innervation geordneten Grundempfindungen und die durch assoziative Fusion nicht weniger reinen Mischempfindungen entstehen. Von der Eigenfarbe der drei Sehstoffe, um deren Extraktion und chemischen Nachweis (STUDNITZ) und um deren Nachweis durch Untersuchung der elektrischen Aktionsströme (GRANIT) sich die Forschung bemüht, ist freilich der Retina nichts anzusehen. Dazu ist die Verdünnung viel zu groß. Auch bei den licht- und farbempfindlichen Sensibilisatoren, die in der photographischen Technik den Filmschichten zugesetzt werden und von denen 1 g genügt, um 10000

mittelgroße Platten zu sensibilisieren, ist bekanntlich nichts von ihrer Färbung sichtbar.

Es ergibt sich hier ein vielleicht für beide Teile nützlicher Anschluß der physiologischen Farbuntersuchungen an die jüngst in raschem Aufschwung entwickelte Farbenphotographie. In der fortschreitenden Chemie der organischen Farbstoffe haben die zunächst wegen ihrer Lichtnechtheit unbrauchbaren hochzersetlichen Produkte besondere Bedeutung gewonnen. Die Chemie kennt im Gegensatz zu den gesättigten Kohlenwasserstoffen, die farblos sind, die ungesättigten Verbindungen, welche die Chromophoren- und Auxochromengruppen tragen und bei denen durch Einfügen von einer und mehreren Vinylengruppen, — CH = CH —, die Strahlenabsorption aus dem Ultraviolettbereich stufenweise in den Bereich der sichtbaren Wellenlängen vorrückt. Zu solchen langen Kettenmolekülen gehören die in der Natur vorkommenden karotinoiden Farbstoffe (Mohrrübe, Paprika, Tomate, Hagebutte, Maiskörner, Safran, aber auch Eidotter, Hummerschale). Das Carotin selbst, der Farbstoff der Karotte, hat Vitamin-A-Wirkung, da es im Organismus in zwei Teile Vitamin A aufgespalten wird. Ihm verwandt ist der Sehpurpur, dieser wahrscheinlich ursprünglichste und älteste Sehstoff des Auges, der die Strahlenenergie chemisch ausnützt und sich durch seine hohe Zersetzungsfähigkeit und Regenerationsfähigkeit auszeichnet. Die Kenntnis der Cyanine oder Methinfarbstoffe, die als Sensibilisatoren der photographischen Platte zugesetzt werden und je nach ihrer Färbung im Grün, Gelb, Orange, Rot oder auch Infrarot sensibilisieren, hat gelehrt, daß bei den Benzothiazolcyaninen oder anderen entsprechenden Ringsystemen die Einfügung einer Vinylengruppe den Absorptionsbereich jedesmal in einem Sprung von rund einem Drittel der Spektralbreite verschiebt. Es ist daher wohl nicht zu gewagt, wenn wir annehmen, daß der Organismus, der den Sehpurpur produziert, auch imstande ist, durch Hinzufügen oder Herausnehmen einer Vinylengruppe andere ähnliche Sehstoffe herzustellen, einen rotempfindlichen grünblauen und einen blauempfindlichen orangefarbenen, auf deren Anwesenheit und Wirksamkeit die hier geschilderten Farbfilterversuche hinweisen. Und es ist zu erwarten, daß die Chemie der photographischen Platte, die aus dem Stadium der totalen Farbenblindheit in das Stadium der Farbentückigkeit getreten ist, für die Erkenntnis der in der Augennetz haut einsetzenden photochemischen Vorgänge fruchtbar wird. Dabei hat das Sehen vor der Farbenphotographie den Vorteil voraus, daß die umständlichen Umkehr- und Entwicklerverfahren wegfallen, da die Zersetzung eines Sehstoffes, auf Nervenwege weiter vermittelt und transformiert, die zugehörige Farbe *be-deutet*, *be-zeichnet*, die Anwesenheit solcher Strahlen anzeigen oder vielmehr die Eigenschaften der solche Strahlen aussendenden Gegenstände signalisiert.

Wir dürfen uns hiernach vorstellen, daß im einfachsten Fall ein einziger undifferenzierter Sehstoff vorhanden ist, dessen photochemische Zersetzung allgemeine Helligkeit, Licht bedeutet, wobei sich der Grad der Helligkeit nach der Menge der Zersetzungprodukte, in Abhängigkeit von dem Produkt aus Strahlungsintensität und Dauer (TALBOTSches Gesetz) und auch von der Menge des jeweils vorhandenen Sehstoffes, richtet. So etwa ist das Helligkeitssehen bei der Sandmuschel (*Mya arenaria*), die ihre Siphone zieht, wenn sie von der Strahlung getroffen und in ihrer geschützten Lage bedroht wird, und ähnlich undifferenziert auch noch bei den Stäbchen der Netzhaut, die nur Helligkeit («weiß») in verschiedenen Abstufungen melden und, um genügend erregt zu werden, große, schon mit bloßem Auge sichtbare, Sehstoffkonzentrationen benötigen. Ein zweites Stadium differenziert und sondert zu genauerer Unterscheidung von Beleuchtungen und Objekten den optischen Analysator in zwei Sehstoffe für die warmen, sonnigen, lebhaften (langwelligen) und die kalten, matteren, schattigen (kurzwelligen) Beleuchtungen; es ist das Stadium einer Blaugelbsichtigkeit, wobei nach wie vor das Zusammenwirken der beiden Strahlengemische oder Reizarten die allgemeine Helligkeit bedeutet, da die beiden Reize, obgleich getrennt aufgefangen, geleitet und zentralnervös repräsentiert, doch wie Licht und Schatten im typischen Antagonistenverhältnis zusammengehören. Erst das dritte Stadium differenziert die Gelbkomponente nochmals in zwei gesonderte Empfangsapparate, für das nahrhaft vegetative Wachstum und Leben in Wald und Wiese und für das Blutvoll-Feurige. Ihre gemeinsame Erregung bedeutet noch immer Gelb, während sie sich in Einzelerregung als Rot und Grün in reziproker Wechselwirkung gegenüberstehen, so daß nun erst die gleichzeitige Erregung aller dreier Komponenten die ursprüngliche Helligkeitsempfindung ergibt. Von diesen beiden zentralrepräsentierten Partnern kann der eine oder der andere beeinträchtigt sein, so daß eine *Rotgrünblindheit* oder eine *Grünrotblindheit* entsteht, aber immer ist dabei auch der Gegenpartner in Mitleidenschaft gezogen. Denn wenn die Empfindung nicht gänzlich fehlleiten soll, muß noch immer das Zusammenwirken aller photisch wirksamen Strahlen «allgemeine Helligkeit» bedeuten. Die Seltenheit der Fälle von angeborenom Ausfall der Blaukomponente (Tritanopie) gegenüber der Häufigkeit von Deutanopie und Protanopie könnte als größere Resistenz des Altbestandes entwicklungsgeschichtliche Gründe haben, und auch die Tatsache, daß Netzhauterkrankungen mit Blaugelbblindheit, Sehbahnnerkrankungen mit Rotgrünblindheit einhergehen, erscheint bedeutsam, wenn auch noch nicht verständlich. Das hier angegebene kurze Schema stützt sich außer auf die HELMHOLTZ-HEBBINGSchen Ergebnisse, die noch kürzlich in fortlaufender Tradition von zwei Seiten her (TRENDELENBURG,

TSCHERMAK) ihre Darstellung fanden, auf die SHERINGTONSchen Reflexgesetze und auf die entwicklungsgeschichtliche Ableitung (LADD-FRANKLIN, SCHENCK, GÖTHLIN), geht im Grunde bis auf die physikalisch hoffnungslos irrgen, biologisch um so wertvolleren GOETHESchen Gedankengänge zurück und ist veranlaßt durch die bei den Farbfilterversuchen sich mehrfach aufdrängende Frage: Was ist nun Weiß?

Vom biologisch-entwicklungsgeschichtlichen Standpunkt aus ist festzustellen, daß der Menschen und Tieren gemeinsame Licht- und Farbensinn wie alle Sinne die ursprüngliche Aufgabe hat, das Lebewesen in seiner Selbsterhaltung zu unterstützen, ihm das Zurechtfinden in seiner Umgebung, die Orientierung über die ihm wichtigen Dinge und ihre Eigenschaften zu ermöglichen, und erst sehr spät unter Führung des Menschengeistes die Aufgabe übernimmt, Schwingungen, Wellenlängen, Lichtquanten und Elektronensprünge zu messen und zu registrieren. Von diesem Standpunkt aus ist es leichter, zu dem wesentlichen Kernpunkt, den wir bisher umgangen haben und der auch hier nur kurz behandelt werden kann, Stellung zu nehmen, da er sich noch in experimenteller Bearbeitung befindet. Es ist die Frage nach der Farberscheinung des weißen Untergrundes, der mit physikalischer Selbstverständlichkeit orangefarben, grünblau oder purpur gefärbt ist oder gefärbt sein müßte, wenn eine der drei Komponenten fehlt, sowohl bei der künstlichen absorptiven Fehlsichtigkeit wie bei der natürlichen rezeptiven Farbenblindheit. Es ist der Einwand, der seinerzeit gegen die HELMHOLTZsche Erklärung der Farbenblindheit erhoben wurde. Wie ist es möglich (vgl. S. 128 und S. 129), daß der Beobachter, der auf die Erkennung und Bezeichnung der einzelnen Farben eingestellt ist, den stark wirksamen generellen Farbton weitgehend oder völlig unbeachtet läßt? Ist es Ermüdung, Gewöhnung, Umstimmung oder Adaptation? Oder ist es ein Übersehen und Vergessen, eine Transformation und Transposition, eine Umwertung und Umdeutung? Ist es noch physiologisch oder schon psychologisch zu werten oder gibt es Zwischenstufen? Jedenfalls ist das Übersehene nun besonders zu beachten. Die Beantwortung der Frage, die in die Erörterungen über die Wirkung farbiger Beleuchtungen hineinführen würde, scheint in folgender Richtung zu liegen. Wenn wir von den Veränderungen, die der retinale Sehstoff bei länger dauernder Beanspruchung erleidet, absehen, so ist einerseits eine physiologische Vorrichtung wirksam, die durch Gegenhemmung nach den Gesetzen des Reflexgeschehens jede langdauernd eintönige Erregung allmählich immer mehr zugunsten anderer und gegenteiliger Erregungen zurückdrängt, so wie eine Buntfläche sich bei streng fixiertem Blick allmählich mit einem grauen Nebel oder Schleier überzieht. Dieser Vorrichtung ist aber eine zweite Vorrichtung übergeordnet, die viel rascher arbeitet, jedesmal unverzüglich einsetzt, sobald das Filter vorgeschaltet

wird, und ebenso schnell beim Absetzen wieder zurückschlägt. Sie tritt ein, wenn kein n-Weiß gleichzeitig beobachtbar ist, und ist dem Vergleichen und Bewerten ähnlich, obgleich sie unbewußt geschieht. Sie ist beim Orangefilter am stärksten, beim Purpurfilter am wenigsten wirksam. Auf die Dauer wird schließlich jede gleichmäßige allgemeine Buntfärbung unbunt, wie sich am besten durch Tragen einer Buntbrille verfolgen läßt, oder sie gibt nur noch ein Lokalkolorit ab. Sie wird für Weiß genommen, als Weiß anerkannt. Normalerweise geschieht das für die Rotbeleuchtung, unter der das Auge, ohne davon gewöhnlich etwas zu merken, dauernd steht, die durch die Rotreflexion des Augenleuchtens und der Augenspiegeluntersuchung demonstriert wird, die Folge des dem Sehepithel als Rotfilter vorgesetzten blutgefüllten kapillaren Maschenwerks. Es ist vielleicht auch die Ursache, daß im Dämmerungssehen ein purpurfarbener Sehstoff vorliegt, ohne ausgesprochene Grünenempfindung oder doch nur mit dem leicht bläulich-grünlichen (Mondlicht-)Schimmer. Diese Wirkung des Lokalkolorits erklärt die eine Graustelle der Protanomalen und Deuteranomalen, die sich von dem Gesamtton nicht «abhebt», und unter Beteiligung des zugehörigen antagonistischen Partners den stärkeren Fall der Protanopen und Deutanopen, bei denen der entsprechende Sehstoff oder Absorptivfilter nicht nur in zu geringer Konzentration vorhanden ist, sondern fehlt, mit ihren beiden, im Farbkreis sich gegenüberstehenden Graustellen. Wir würden so zu dem Schluß kommen: Weißwirkung oder unbunte Helligkeitswirkung hat dasjenige Strahlengemisch, das, wie immer es zusammengesetzt sei, dem gesamten Gesichtsfeld den generellen Farbton gibt; die Weiß- oder Helligkeitsempfindung repräsentiert die Gesamtheit der einwirkenden und photochemisch wirksamen Strahlung; auf diesen Grundton werden die andern gleichzeitigen Farben bezogen. Die Metapher «Grundton» möge den bildlichen Vergleich gestatten, der den Vorgang der Umformung oder Umwertung andeutet. Für jeden, der eine Melodie singen kann, ist es selbstverständlich, daß er sie, ohne es besonders gelernt zu haben, in verschiedener Tonlage anstimmen kann, und der geübte Klavierspieler transponiert in die verschiedenen Tonarten, wobei der Sinn des Ganzen erhalten bleibt, weil es auf die Proportionen und Beziehungen ankommt. Der einzelne Ton und Farbton erhält seine Bedeutung durch seine Stellung im Zusammenhang des Ganzen. Schon der erste Takt und Akkord entscheidet über den Grundton. So transponiert der Farbfehlsichtige, und auch der Normale unter farbiger Beleuchtung, sein Weiß. Der Vergleich, der nicht in jeder Beziehung zutrifft, sagt immerhin, daß es auch ein absolutes Tongedächtnis und ein, bei den meisten Individuen sehr wenig entwickeltes, Farbgedächtnis gibt.

Mit dieser Schlußfolgerung wäre freilich das physiologische, gesehene Weiß von dem Weiß der Physik so

weit entfernt wie das gesehene Schwarz vom physikalischen Schwarz. Aber wir brauchen nur an den historischen GOETHE-NEWTON-Streit zu denken, um zu wissen, wie notwendig die strenge sprachliche Säuberung, die scharfe begriffliche Sonderung des «weißen Lichts» in weißwirkende Strahlung und Weißempfindung ist. Ebenso ist das «ideale Schwarz» der Physik eine völlige Abwesenheit von Strahlung, die Schwarzempfindung aber, untrennbar mit der Weißempfindung verbunden und als ihr antagonistischer Partner im Sinne der reziproken Innervation in Schwarzneuronen der Sehrinde vertreten, ist, obgleich ihr physikalisch kein äußeres Agens entspricht, eine kräftige positive, wirkungsvolle und unentbehrliche Farbe.

So münden auch unsere kleinen Farbfilterversuche in große allgemeine Fragen aus, und es sei unvergessen, daß einstmals dem Altmeister der Farbenbeobachtung ein PURKINJÉ seine *Beiträge zur Kenntnis des Sehens in subjektiver Hinsicht* widmete, ein JOHANNES MÜLLER seine optischen Schriften überreichte.

Summary

A green-blue filter placed before the eye produces red-green colour blindness, a purple filter a green-red colour-blindness, an orange filter a blue-yellow colour-blindness. These artificial absorptive visual defects have great similarity with the naturally occurring forms of colour-blindness (proto-, deutero-, tritanopia and anomaly and display typical confusions of colours, exaggeration of brightness differences and of simultaneous contrasts, and great dependence of the chromatic impression upon strength of illumination and size of field. The similarity is based on the fact that the filter cuts out approximately that range of colour for the normal eye for which the colour-blind eye possesses no photochemical receptor in the retina. The simple experiments, which can be demonstrated not only by placing a colour filter before the eye, but also by means of coloured illumination produced in a dark room, permit us to understand why an absorptive or receptive visual defect never results in red-blindness or green-blindness alone, because the general chromatic tone of the visual field is confused with white, and enable persons with normal colour vision to feel how the colour-blind see colour. The experiments are related to the general theory of colour vision with special reference to the photochemical data on sensitizing pigments decomposed by light and to central nervous regulation (antagonistic effects in reciprocal innervation).

Brèves communications - Kurze Mitteilungen Brevi comunicazioni - Brief Reports

Les auteurs sont seuls responsables des opinions exprimées dans ces communications. — Für die kurzen Mitteilungen ist ausschließlich der Autor verantwortlich. — Per le brevi comunicazioni è responsabile solo l'autore. — The editors do not hold themselves responsible for the opinions expressed by their correspondents.

Les développantes généralisées du second ordre d'une courbe plane

Nous considérons une courbe plane (M): $x(t)$, $y(t)$ à laquelle nous associons la courbe-adjointe (L): $F(t)$, $G(t)$; la paramétrisation est la même pour les deux courbes. Sur la tangente en M à (M) on porte le segment $\overrightarrow{MN} = \tau(t)$, d'où une courbe (N) dite *développante généralisée ordinaire*; sur la tangente en N à cette dernière, on porte $\overrightarrow{NP} = \chi(t)$ d'où une courbe (P) dont la tangente doit passer par le point L correspondant de la courbe-adjointe. La courbe (P) ainsi engendrée est alors appelée *développante généralisée du second ordre* de la courbe-base (M). Nous désignons par σ l'élément d'arc de la courbe-base, par σ_1 l'élément d'arc de la développante (N) et nous utilisons les notations

$$\cos \alpha = \frac{d\vec{M}}{d\sigma}, \quad \sin \alpha = \frac{d\vec{N}}{d\sigma_0}, \quad \cos \beta = \frac{d\vec{N}}{d\sigma_0}, \quad \sin \beta = \frac{d\vec{P}}{d\sigma_0}, \quad \text{avec } \sigma_1^2 = \alpha'^2 \tau^2 + (\sigma' + \tau')^2.$$

D'autre part, il nous faut introduire les quantités vectorielles suivantes

$$\omega_1 = \overrightarrow{ML} \wedge \frac{d\vec{M}}{d\sigma} \cdot \sigma'; \quad \omega_2 = \overrightarrow{ML} \wedge \frac{d^2\vec{M}}{d\sigma^2} \cdot \frac{\sigma'^2}{\alpha'}.$$

La mise en équation du problème géométrique précédemment défini conduit à l'équation

$$(1) \quad A(\chi' + \sigma'_1) + \beta' \chi(B - \sigma'_1 \chi) = 0 \quad \text{avec} \\ (2) \quad A \equiv \omega_1(\tau' + \sigma') - \alpha' \tau(\sigma' \tau - \omega_2) \\ B \equiv (\omega_2 - \sigma' \tau)(\tau' + \sigma') - \omega_1 \alpha' \tau.$$

Remarquons que nous avons, dans des études antérieures¹, signalé:

- 1) le cas $A = 0$ qui donne une *équation de RICCATI* en $\tau(t)$ la tangente à la développante (N) passe par L et nous avons, en outre

$$\chi = 0 \text{ et } \chi = -\frac{\omega_1}{\alpha' \tau} \sigma'_1$$

- 2) le cas $B = 0$ qui fournit une *équation du type ABEL* en $\tau(t)$; la normale à la développante (N) passe par le point L .

Ce qu'il y a de remarquable dans le problème général c'est que, connaissant la fonction $\tau(t)$ c'est-à-dire une

¹ G. VIGUIER, Ann. Fac. Sci. Toulouse 59, fasc. 9, 1 (1945); C. R. Acad. Sci. Paris 227, N° 21-22, nov. 1948.