



Bestell-Nr: A07370332X PPN: 129457574

lok.Nr:

Bestelldatum 11-12-2006:10:04

ONLINE-BESTELLUNG GBV

**Dieser Beleg muss bis zur
Rücksendung im Buch bleiben**

<755> FH

Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, Standort

Emde

- Bibliothek -

Constantiaplatz 4

26723 Emden

Bestellende Bibliothek<755>

<755> FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven,

Standort Emden

- Bibliothek -

Constantiaplatz 4

26723 Emden

Herr/Frau

Prof. Hoffmann

FB M

Benutzer-Ausweisnummer



Lieferbibliothek: 3027/0001

<Bs 68> Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Braunschweig

Bibliothek

Bundesallee 100

Bearbeitungsvermerke

38116 Braunschweig

0531 / 5 92-8132 Bibliothek@ptb.de



Unter Anerkennung der Benutzungsbedingungen wird bestellt:

Verfasser: Luther, Robert
(Aufsatz)

Titel: Aus dem gebiet der Farbreizmetrik
(Aufsatz)

Seiten: 540 - 558

Standort:

! Bs68-K1 ! Zeitschrift

Band Heft
8

Jahr
1927 00 00

Titel (Monographie/ Zeitschrift)
Zeitschrift für technische Physik
Deutsche Gesellschaft für Technische Physik
Leipzig
Barth
0373-0093

Lieferform:
Kopie

Lieferart:
POST

Aus dem Gebiet der Farbreizmetrik

Von R. Luther, Dresden

Inhalt: Im ersten Teil werden durch Ausbau der klassischen Farbenlehre unter Benutzung der Größe „Farbmoment“ neue Parametertriaden behandelt und zur Herstellung dreidimensionaler Farbkörper benutzt, die insbesondere zur Darstellung der chromatischen Eigenschaften von Pigmentfarben von Nutzen sind. Im zweiten Teil werden einige Fragen der Farbmeßtechnik, der heterochromen Photometrie und der Dreifarbenphotographie besprochen.

1. Bei der Kürze der Zeit kann ich keine logisch aufgebaute, zusammenhängende Übersicht, sondern — wie schon der Titel meines Vortrags zeigt — nur mehr oder weniger locker aneinandergereihte Ausschnitte aus dem Gebiet der Farbenlehre geben. Jede Auswahl ist persönlich gefärbt, und in kurzen Zügen möchte ich daher die Grundlagen dieser Auswahl darlegen.

Vor allem möchte ich betonen, daß meine Ausführungen und Überlegungen in praktisch technischen Fragen meines Spezialgebietes ihre Quelle haben, und in diese Fragen wieder münden: Theorie der Farbenphotographie, der Anaglyphen, der Orthochromasie und ihres Gegenpols: der Dunkelkammerbeleuchtung, Methoden der Farbmessung und der heterochromen Photometrie. In Übereinstimmung mit dem Titel meines Vortrags werde ich mich ferner fast ausschließlich mit dem beschäftigen, was v. Kries Farbreize nennt — im Gegensatz zu den von ihnen ausgelösten Farbeempfindungen. Ich werde mich also im allgemeinen auf dem Gebiet der niederen Farbreizmetrik Schrödingers¹⁾ bewegen, allerdings auch vom Begriff der heterochromen Helligkeit Ge-

brauch machen. Auf die sogenannten Theorien des Farbensehens — Helmholtz, Hering, v. Kries — werde ich nicht eingehen. Ich werde mich bemühen, vorzugsweise Unbekanntes oder m. W. weniger Bekanntes zu bringen. Auf die klassische Darstellung der Farbenlehre werde ich nur so weit zurückgreifen, als es zum Verständnis unbedingt notwendig ist, um so mehr als in der letzten Zeit mehrere Zusammenfassungen²⁾ dieser Lehre erschienen sind.

Bezeichnen wir mit Ostwald solche Farbreize als „metamer“, die unter gleichen Umständen gleiche Empfindungen hervorrufen, aber objektiv verschieden spektral zusammengesetzt sind, so können wir die klassische Farbenlehre kurz als die Lehre vom Zustandekommen metamerer — sowohl bunter, wie unbunter — Farbreize definieren.

2. Es ist bekannt, daß unter gewissen einschränkenden Bedingungen: Zapfensehen, durchschnittliches farbenächtiges Auge, Beschränkung auf „reduzierte“ Farben im Sinne von D. Katz³⁾ — die Gesamtheit der hier in Frage kommenden Beziehungen eine dreifache Mannigfaltigkeit ergibt. Ein beliebiger Farbreiz ist demnach durch Angabe dreier passend gewählter, voneinander unabhängiger Parameter in seinem Verhalten vollkommen definiert.

Hat man eine Triade von Parametern gewählt, so kann man natürlich aus ihr eine beliebig große Zahl neuer Triaden ableiten, die denselben Tatsachenkomplex mit der gleichen Vollständigkeit ausdrücken und gleich gut zur Definition eines Farbreizes dienen können.

Im ersten Teil meines Vortrags werde ich mich unter anderm mit einigen bisher nicht benutzten Parameter-Triaden befassen.⁴⁾ Die Auswahl unter der unendlich großen Zahl der Möglichkeiten ist hierbei weniger im Bestreben nach möglichst großer Allgemeinheit als von praktischen Gesichtspunkten getroffen. Nur solche Systeme, die hinreichend anschaulich sind, die möglichst viele Beziehungen in möglichst einfacher Weise zu übersehen gestatten, die das praktische Arbeiten vereinfachen und die endlich — soweit möglich — neue Beziehungen ergeben, sollen berücksichtigt werden. Naheliegende Abwandlungen und Verallgemeinerungen werde ich nicht erwähnen.

3. Ich gehe aus vom bekannten Young-

²⁾ Vor allem von E. Schrödinger in Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik (1926).

³⁾ Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane. Ergänzungsbd. VII.

⁴⁾ Die Abschnitte 3 bis mit 19 sollten inhaltlich weitgehend übereinstimmend, in der Darstellung etwas abweichend von der vorliegenden Fassung bereits im September 1923 als Beitrag zu der Ostwald-Festnummer der Zeitschr. f. angew. Chem. erscheinen. Wegen der hohen Druckkosten (Inflationszeit!) der zahlreichen Abbildungen mußte der Druck unterbleiben, so daß damals von der Abhandlung nur der Titel „Spektrum und Farbe“ veröffentlicht wurde. Vgl. Zeitschr. f. angew. Chem. 36 (1923).

¹⁾ Ann. d. Physik 63 (1920).

Helmholtz-Maxwellschen sogenannten trichromatischen System.

In diesem System wird jeder aus Spektralreizen beliebig zusammengesetzte Farbreiz durch die „Mengen“ der in ihm enthaltenen drei unabhängigen, im übrigen aber willkürlich wählbaren Elementar- oder — nach v. Kries — „Eichreize“ eindeutig bestimmt.

Da alle Mischreize in letzter Instanz aus Spektralreizen zusammengesetzt sind, so ist eine „Spektrumeichung“ (v. Kries) der erste Schritt.

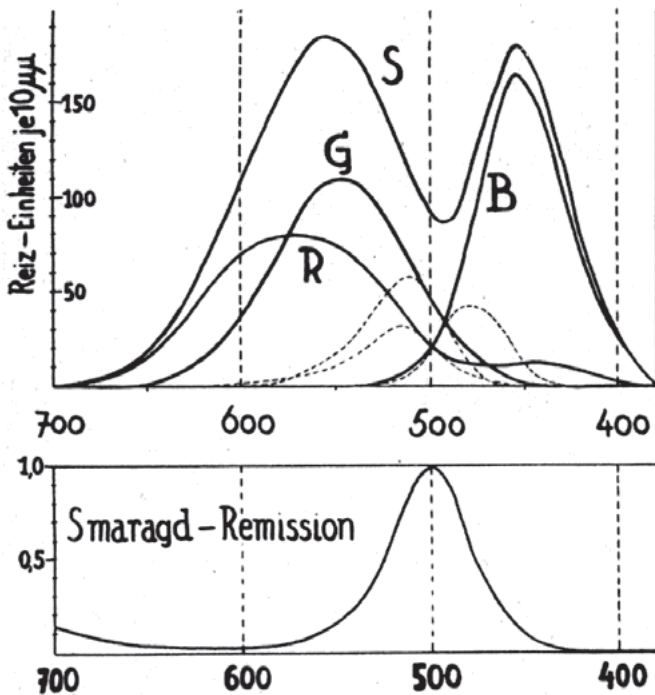


Abb. 1. Eichung des Tageslichtspektrums und Ermittlung der drei Eichreizmengen im Spektrum eines Mischreizes (Smaragdremission)

Abb. 1 zeigt in der oberen Kurventafel eine derartige „Eichung“ des Tageslichtspektrums⁵⁾, wie sie zuerst von Maxwell experimentell durchgeführt wurde. Als Abszissen sind die Wellenlängen des Normalspektrums aufgetragen; als Ordinaten die Mengen R , G und B der drei gewählten Eichreize Rot, Grün und Blau, sowie deren Summe $S = R +$

⁵⁾ Die Kurven wurden von mir aus Messungen von König u. Dieterici, v. Kries, Maxwell, Abney, Exner, Angier u. Trendelenburg u. a. nicht ohne unvermeidliche Willkür bei der Umrechnung zusammengestellt. Die Zahlen werden an anderer Stelle veröffentlicht. Sie ergaben bei nachträglicher Umrechnung auf die von Ives (Frankl. Inst. 1915 und 1923) gewählten Eichreize eine hinreichend gute Übereinstimmung. Die von mir gewählten Eichreize zeigen aber eine Eigentümlichkeit, auf die ich weiter unten (Abschn. 7 Ende) noch zu sprechen komme.

Ich benutze die Gelegenheit für die bei der Herstellung der Abbildungen geleistete Hilfe Herrn W. Bartsch und ganz besonders Herrn cand. M. Wend — letzterem auch für Kontrolle numerischer Rechnungen und Mitarbeit bei der Herstellung der Modelle — an dieser Stelle meinen aufrichtigsten Dank auszusprechen.

$G + B$ für gleich enge Spektrumausschnitte von je $10 \mu\mu$.

Die Mengen der drei Eichreize, die zusammen Weiß ergeben, sind üblicherweise zunächst einander gleich und zwar je $= 1000$ Reizeinheiten gesetzt, so daß dem aus dem gesamten Spektrum zusammengesetzten Weiß unabhängig von der absoluten Helligkeit die Reizsumme

$$\mathfrak{S} = \int_{700}^{380} S(\lambda) \cdot d\lambda = 3000 \text{ Reizeinheiten}$$

zukommt. Die Mengengleichheit der drei Eichreize im Weiß drückt sich in der oberen Kurventafel der Abb. 1 in der Flächengleichheit der von den drei Eichkurven und der Abszissenachse eingeschlossenen Flächen aus:

$$\begin{aligned} \mathfrak{R} &= \int_{700}^{380} R(\lambda) \cdot d\lambda = \mathfrak{G} = \int_{700}^{380} G(\lambda) \cdot d\lambda \\ &= \mathfrak{B} = \int_{700}^{380} B(\lambda) \cdot d\lambda = 1000. \end{aligned}$$

Liegt nun ein beliebiger Mischreiz, d. h. eine Mischung von Spektralreizen vor, wie sie z. B. der von Exner⁶⁾ gemessene Smaragd von Tageslicht beleuchtet in das Auge sendet, so kann man aus dem Remissionsspektrum (Abb. 1 unten) bekanntlich die Mengen der drei Eichreize leicht berechnen. Man muß zu diesem Zweck für eine hinreichend große Zahl von Wellenlängen die Ordinaten der Eichkurven mit den bei den entsprechenden Wellenlängen remittierten Bruchteilen des auffallenden Lichtes $Rm(\lambda)$ multiplizieren und den Inhalt der sich ergebenden Flächen ermitteln, z. B. für Rotreiz

$$\mathfrak{R} = \int_{700}^{380} R(\lambda) \cdot Rm(\lambda) \cdot d\lambda.$$

4. Bei praktischen Massenarbeiten kann man sich diese mühsame Arbeit dadurch erleichtern, daß man z. B. zur Bestimmung von $\mathfrak{R}$ das Spektrum auf der

Abszissenachse so anordnet, daß gleichen Zunahmen der Abszisse gleiche Zunahmen der Rotreizmenge im Tageslichtspektrum entsprechen. Zu diesem Zweck integriert man die R -Eichkurve der Abb. 1 über λ und erhält so in der durch Abb. 2 angegebenen Weise die erforderliche Spektrumeinteilung. Dasselbe macht man für die G - und B -Eichkurven, eventuell zur Kontrolle auch für die S -Kurve.

Wählt man in den ein für allemal hergestellten Koordinaten-Netzen die Einheit der Ordinate gleich der des Remissionsspektrums, so kann man die Ordinaten des Remissionsspektrums ohne Um-

⁶⁾ Wien. Akad. Ber. III (1902).

rechnung übertragen. Die resultierenden Flächen⁷⁾ entsprechen dann den Mengen der drei Eichreize.

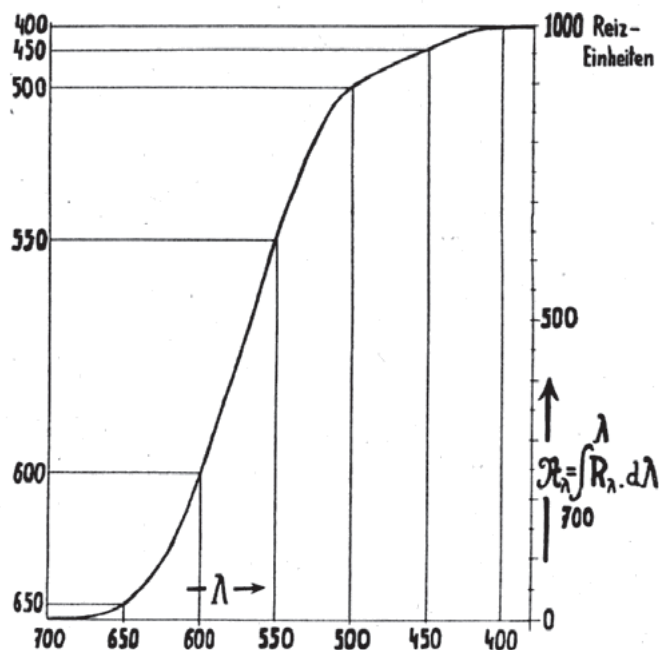


Abb. 2. Einteilung des Spektrums nach gleichmäßig zunehmenden Rotreizmengen

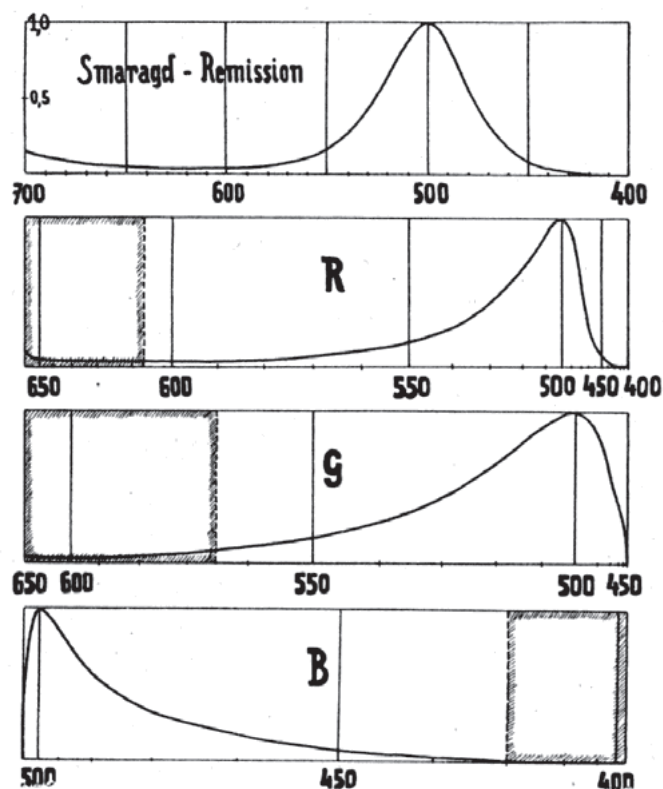


Abb. 3. Bestimmung der Mengen der drei Eichreize im Remissionsspektrum des Smaragdes mittels dreier nach Abb. 2 eingetellter Spektren

Abb. 3 zeigt schematisch diese Operation für das Remissionsspektrum des Smaragdes.

⁷⁾ Die Flächenermittlung geschieht am einfachsten durch Auswägen mit Gegengewichten aus quadratisch eingeteiltem Papier derselben Sorte.

Im vorliegenden Falle ergibt sich, daß der vom Smaragd ausgehende Mischreiz aus insgesamt 713 Reizeinheiten besteht, wovon dem Eichrot 198, dem Eichgrün 317 und dem Eichblau 198 zukommen.

5. Diese Angaben geben zwar ein erschöpfendes, aber nicht ohne weiteres anschauliches Bild vom charakteristischen Aussehen der Smaragdfarbe. Diese Anschaulichkeit wird gewonnen, wenn man

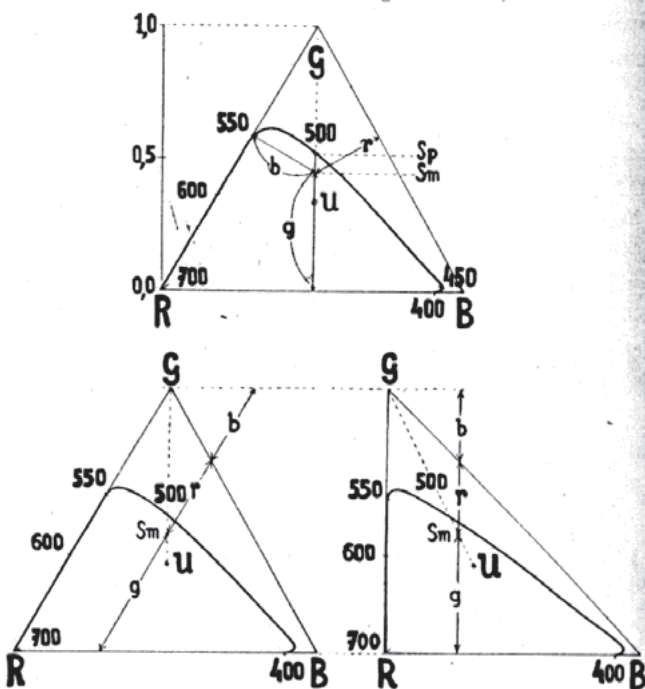


Abb. 4. Ort des Smaragdreizes in der „Farbtafel“ auf Grund der drei Eichreizanteile. Parallelprojektion der Farbtafel

die Anteile sowohl der Spektralreize wie des Smaragd-Mischreizes:

$$r = \frac{R}{S}, \quad g = \frac{G}{S} \quad \text{und} \quad b = \frac{B}{S}$$

an den drei Eichreizen in Dreieckskordinaten zunächst üblicherweise in ein gleichseitiges Dreieck einträgt (Abb. 4 oben). Für den Smaragd ist $r_{sm} = 0,28$; $g_{sm} = 0,44$; $b_{sm} = 0,28$.

Die Eintragung der Spektralreize in die Farbtafel hat im Sinne der Newtonschen Schwerpunktskonstruktion folgende anschauliche Bedeutung: Man stelle sich vor, daß die Spektralkurve der Farbtafel von 10 zu 10 $\mu\mu$ mit roten, grünen und blauen Gewichten behängt ist, deren Beträge den entsprechenden Ordinaten der drei spektralen Eichkurven der Abb. 1 proportional sind. Dann ist das im Weiß- oder Unbuntpunkt U — dem Schwerpunkt — unterstützte System im Gleichgewicht. Auf den Unterstützungspunkt drückt ein Gewicht, das der Summe aller Einzelgewichte (d. i. Reizsumme von Weiß) gleich ist. Von jedem Aufhängepunkt können ohne Störung des Gleichgewichtes die drei farbigen Gewichte entfernt und an den ihrer Farbe entsprechenden Eckpunkten

aufgehängt werden. Der Weiß- oder Unbuntreiz entspricht also einem Gleichgewichtszustand bunter Spektralreize, bei dem diese sich gegenseitig kompensieren, so daß keiner überwiegt.

Jedem bunten Mischreiz entspricht ein Schwerpunkt bzw. Unterstützungspunkt in der Farbtabelle, der zwischen dem Unbuntreize und der Spektralkurve (einschließlich des den Purpurtönen entsprechenden geraden Verbindungsstückes von $\lambda = 380 \mu\mu$ bis $\lambda = 700 \mu\mu$) liegt. Für den Smaragd ist der Punkt *Sm* entsprechend seinen Anteilen an den drei Eichreizen eingetragen.

Eine andere Art der Eintragung ist in Abb. 4 unten angedeutet. Sie wird in manchen Fällen besonders bequem, wenn man die Farbtabelle — was ohne Störung des Newtonschen Schwerpunkts-gleichgewichtes zulässig ist, und wovon wir noch Gebrauch machen werden — durch Parallelprojektion verzerrt — im vorliegenden Fall zu einem rechteckigen Dreieck (Abb. 4 unten rechts).

Aus der Lage des Mischreizes in der Farbtabelle erkennt man, daß sein Farbton der Wellenlänge $\lambda = 500 \mu\mu$ entspricht⁸⁾, und kann im Sinne der Newtonschen Schwerpunktskonstruktion den Mischreiz zusammengesetzt auffassen aus grünem Spektralreiz (*Sp*) von $\lambda = 500$ und Unbuntreiz (*U*). Das Mengenverhältnis des Spektral- und Unbuntreizes zum Gesamtreiz ergibt sich aus dem Hebelverhältnis $\frac{U - Sm}{U - Sp}$ und $\frac{Sm - Sp}{U - Sp}$ (vgl. Abb. 4 oben). Für den Smaragd haben wir das Ergebnis, daß von den 713 Reizeinheiten des Gesamtreizes der Anteil 0,40 dem Unbuntreiz, der restliche Anteil 0,60 dem grünen Spektralreiz $\lambda = 500$ zukommt. Dieser letztere Anteil 0,60 wird „Sättigung“ oder „Farbensättigung“ (in Reizeinheiten) bezeichnet.

Durch Angabe des Farbtons, der Sättigung und der „Intensität“, d. h. des Gesamtgewichtes im Newtonschen Sinne, also der Reizsumme in Reizeinheiten, erhalten wir die Graßmann-Helmholtzsche Parametertriade⁹⁾, die ebenfalls eine eindeutige und bereits anschauliche Definition eines Farbreizes gestattet.¹⁰⁾

6. Unbefriedigend und störend ist hierbei die Rechnung der „Intensität“ und der Sättigung in Reizeinheiten, die als Überbleibsel eines bestimmten trichromatischen Systems auftreten, das im übrigen

⁸⁾ Die Wellenlängen des resultierenden Farbtons und des Remissionsmaximums brauchen nicht zusammenzufallen.

⁹⁾ In der anglo-amerikanischen Literatur wird diese Triade das „monochromatische System“ genannt. Für „Sättigung“ (in Helligkeitseinheiten) (saturation) wird häufig der Ausdruck „Reinheit“ (purity) benutzt.

¹⁰⁾ Farbton und Sättigung oder zwei Anteile an Eichreizen (ohne Angabe der Menge bzw. Intensität) definieren die „Reizart“ (v. Kries) oder den „Farbcharakter“ oder das „Chroma“ eines Farbreizes.

aus dem Graßmann-Helmholtzschen System ausgeschieden ist. Hier tritt nun bereits früh (Graßmann) das Bedürfnis auf, die willkürlich gewählten Reizeinheiten als Intensitätsmaß zu ersetzen durch eine experimentell unabhängig bestimmbare Maßgröße: die Helligkeit (richtiger: Flächenhelligkeit). Ich will hier nicht auf die Kriessche Kritik des Begriffes der heterochromen Helligkeit, sowie auf die diesbezüglichen Ausführungen Schrödingers (Anm. 1) eingehen, mich vielmehr auf den Versuch stützen.

Bei den systematischen Versuchen von Ives¹¹⁾ ergaben mit einer Ausnahme¹²⁾ alle von ihm benutzten Methoden der heterochromen Photometrie zwar mit sehr verschiedener Streuung, jedoch im Endresultat übereinstimmend praktisch die gleiche Abhängigkeit der spezifischen Helligkeit H_λ der Spektralreize von der Wellenlänge. Es ergab sich ferner, daß die so gemessenen Helligkeiten sich praktisch, d. h. innerhalb der unvermeidlichen Versuchsfehler und individuellen Schwankungen rein additiv verhalten.¹³⁾

Wenn das Vorhandensein einer unabhängig von Farbton und Sättigung meßbaren Helligkeit $\mathfrak{H}$ eines Mischreizes, sowie ihr additives Verhalten $\mathfrak{H} = \int H_\lambda \cdot d\lambda$ bei Reizsummierung angenommen wird, so folgt, daß die Helligkeit $\mathfrak{H}$ eines beliebig zusammengesetzten Reizes aus den Mengen der in ihm enthaltenen Eichreize durch eine lineare Formel berechnet werden kann:

$$\mathfrak{H} = \varrho R + \gamma G + \beta B.$$

Hierbei ist zu bemerken, daß bei der üblichen Wahl der drei Eichreize (Rot, Grün und Blau) der Faktor β — die spezifische Helligkeit des blauen Eichreizes — stets sehr klein gegenüber ϱ und γ ist.

7. Welche Änderungen erleiden hierdurch die Eichkurven und die Farbtabelle?

Bei den spektralen Eichkurven müssen natürlich die Ordinaten mit ihren entsprechenden Koeffizienten ϱ , γ , β multipliziert werden. Hierdurch nimmt die Reizsummenkurve *S* die Gestalt der Helligkeitssummenkurve, d. h. der sogenannten spektralen Helligkeitskurve *H* an (Abb. 5 unten).

Die Änderung der Farbtabelle kann durch folgende Überlegung, die uns später auch in anderer Weise nützlich sein wird, dargestellt werden.

Die von 10 zu 10 $\mu\mu$ gezogenen vom Unbuntreize *U* ausgehenden („leuko-zentrischen“) Leitstrahlen der Spektralkurve der Farbtabelle können

¹¹⁾ Philos. Mag. 24 (1912).

¹²⁾ Die einzige Methode, bei der ganz abweichende Resultate auftraten, war die Sehschärfenmethode (wegen der Chromasie des Auges, zu der bei uns Brillenträgern noch die Chromasie der Brille hinzukommt).

¹³⁾ Vgl. insbesondere auch Cl. Schäfer, Physikal. Zeitschr. 26 (1925).

im Sinne der Newtonschen Schwerpunktskonstruktion aufgefaßt werden als ein System untereinander starr verbundener, im Unbuntpunkt unterstützter Hebel, an deren Enden die Reizsummen der einzelnen $10\text{-}\mu\mu$ -Spektrumausschnitte als Gewichte hängen.

Soll beim Ersatz der Reizeinheiten durch Helligkeitseinheiten das Newtonsche Schwerpunktsgleichgewicht weder für die Spektralreize, noch für die Eichreize gestört werden, so kann das offenbar am einfachsten dadurch erreicht werden, daß sämtliche Hebel (= leukozentrische Leit-

Hebelmomente sind in den beiden Farbtafeln leukozentrisch polar als ausgezogene (retortenförmige) Kurve $M^{15)}$ eingetragen, die ebenfalls polar eingetragene feinpunktierte Reizsummenkurve S der linken Farbtafel geht dagegen in die entsprechend eingetragene spektrale Helligkeitskurve $H^{16)}$ der rechten Farbtafel über.¹⁷⁾

Die Umrechnungskoeffizienten ϱ , γ , β hängen von der Wahl der Eichreize ab. Unter Umständen kann daher der stets sehr kleine Koeffizient β gleich Null, oder sogar negativ¹⁸⁾ werden. Die von mir benutzten drei Eichreize sind von vorn-

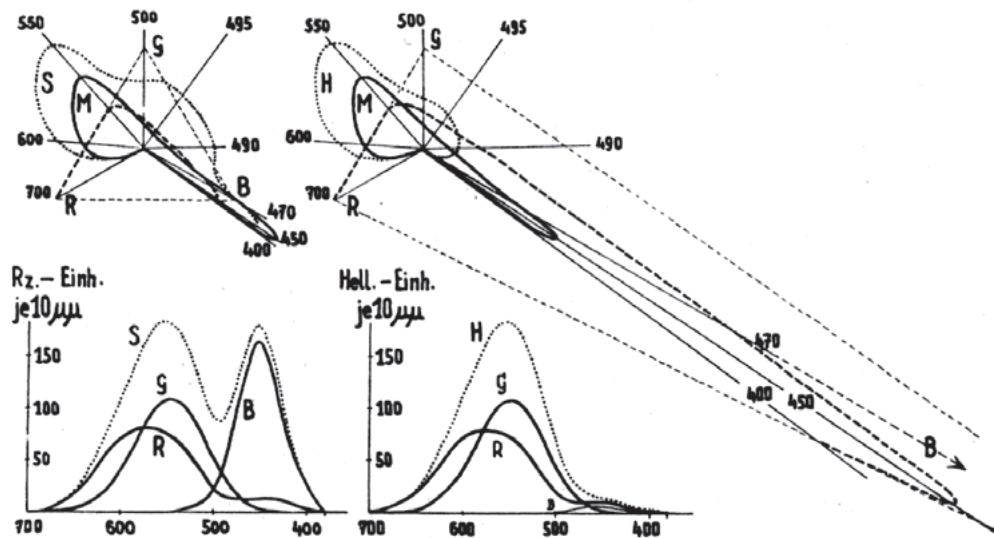


Abb. 5. Schematische Darstellung der Änderung der Farbtafel (oben) und der Eichkurven (unten) beim Übergang von der Rechnung in Reizeinheiten zu der Rechnung in Helligkeitseinheiten. Die polare Momentkurve M bleibt unverändert. Die Reizsummenkurve S geht in die Helligkeitskurve H über. Die nicht ausgezogenen Teile der beiden oberen Figuren stehen zueinander im Verhältnis von Zentralperspektiven

strahlen) ohne Änderung der Richtung entsprechend den neuen an ihnen hängenden Gewichten ebenfalls in ihrer Länge derart geändert werden, daß das Produkt aus Hebellänge und Gewicht, d. h. das leukozentrische Hebelmoment unverändert bleibt.

In Abb. 5 ist dieser Übergang von der Zählung der Gewichte in Reizeinheiten zu der Zählung in Helligkeitseinheiten schematisch dargestellt. Unten ist die Änderung der drei spektralen Eichkurven und der Übergang der Reizsummenkurve S in die spektrale Helligkeitskurve H angedeutet; oben — die entsprechende Änderung der Farbtafel¹⁴⁾. Man erkennt, wie die Hebel, an denen auch Blaureiz hängt, ohne Änderung ihrer Richtung an Länge zunehmen, entsprechend dem sehr kleinen „spezifischen Gewicht“ von Blaureiz.

Die bei diesem Übergang der einen Farbtafel in die andere unverändert bleibenden spektralen

herein so gewählt, daß $\beta = 0$ ist¹⁹⁾, d. h. das unendlich kleine Gewicht des blauen Eichreizes hängt

¹⁵⁾ Diese Kurve, allerdings in anderem Zusammenhang, finde ich unter der Bezeichnung „Spektralfarbenlinie“ zuerst angegeben bei L. Pilgrim: Einige Aufgaben der Wellen- und Farbenlehre des Lichtes (Beilage zum Programm der Realanstalt Cannstadt 1901; vgl. auch Lehmann-Frick II, 2 S. 1793 1901).

¹⁶⁾ Zwei von den drei mit Wellenlängenskala versehenen Kurven jeder der beiden Farbtafeln in Abb. 5 stellen natürlich genau ebenso vollständig den Inhalt der klassischen Farbenlehre dar, wie drei von den vier Kurven der entsprechenden beiden unteren Kurventafeln.

¹⁷⁾ Die nichtausgezogenen Teile der rechten Farbtafel sind schiefe Zentralprojektionen der entsprechenden Kurven der linken Farbtafel.

¹⁸⁾ H. Ives, Frankl. Inst. 1915. Die Spektralkurve in Helligkeitseinheiten bleibt trotzdem stets im Endlichen und rechts von der $R-G$ -Linie, da die experimentell bestimmte spektrale Helligkeitskurve von den willkürlichen drei Eichreizen natürlich unabhängig ist.

¹⁹⁾ Vgl. E. Schrödinger, Wien. Akad. Ber. 134 (1925). Für das praktische Rechnen sehr angenehm ist der Umstand, daß in diesem Fall die beiden anderen Koeffizienten γ und ϱ einander so nahe gleich werden, daß man für praktische Rechnungen $\gamma = \varrho$ setzen kann. Hierdurch wird für die von mir gewählte Eichreiztriade das Umrechnen von Reizmengen auf Helligkeiten sehr vereinfacht;

¹⁴⁾ Die ersten direkten experimentellen Auswertungen der Farbtafel in Helligkeitseinheiten stammen meines Wissens von A. Mitscherling, Wundts Psychol. Studien I Heft 2 (1905) und von Angier u. Trendelenburg, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 39 (1905).

an einem unendlich langen Hebel: das Hebelmoment ändert seinen endlichen Wert nicht.

Bezogen auf die neuen Helligkeitseinheiten sind die charakteristischen Zahlen für Smaragd im Graßmann-Helmholtz'schen „monochromatischen“ System: Helligkeit = 0,26 des Gesamtspektrums = 515 Helligkeitseinheiten, Sättigung = 0,63.

8. Die Einführung der Momente gestattet nun den Ausbau einer neuen Parametertriade, die, abgesehen von ihrer Anschaulichkeit, manche Vorteile bietet.

Man kann nämlich das Newtonsche Schwerpunktsgleichgewicht eines Mischreizes statt auf drei Angriffspunkte: die Orte der drei Eichreize in der Farbtafel, auch auf zwei nicht parallele Achsen in der Farbtafelebene beziehen und die von den einzelnen Gewichten auf diese beiden Achsen wirkenden Drehmomente zur Grundlage der Rechnung machen.²⁰⁾

Wir legen im Anschluß an die psychologische Anordnung der Farbtöne — sog. Vierfarbensystem — die beiden Achsen durch den Unbuntpunkt in der Richtung Grün-Purpur und Blau-Gelb und transformieren der besseren Anschaulichkeit wegen entsprechend der Abb. 6 die schiefwinkligen Achsen durch Parallelprojektion in rechtwinklige (wobei die Gewichte unverändert bleiben). Denken wir uns dann jedes leukozentrische Moment in seine beiden senkrechten Komponenten zerlegt, d. h. in die beiden Drehmomente für die beiden Achsen Grün-Purpur und Blau-Gelb, so erhalten wir folgende Beziehungen.

Die Drehmomente aller Gewichte, die z. B. rechts von der Grün-Purpurachse wirken, entsprechen in ihrer Gesamtheit einem — kurz gesagt — bläulichen Drehmoment oder der „Bläue“ — um einen Ausdruck Herings zu übernehmen. Dieser „Bläue“ wirken entgegen die „gelbstichigen“ Drehmomente der links von der Grün-Purpurachse wirkenden Gewichte, deren Gesamtdrehmoment — wieder nach Hering — als die „Gilbe“ eines Mischreizes bezeichnet werden kann. Überwiegt die Gilbe über die Bläue, so entspricht das Gesamtmoment einem gelbstichigen Ton und umgekehrt. Sind beide gleich, also das Gesamtmoment gleich Null, so entspricht das einem Farbton, der weder bläulich noch gelblich ist, also nur auf der Grün-Purpurlinie liegen kann. Maßgebend ist also die Differenz: Bläue minus Gilbe.

Genau die gleichen Überlegungen können wir

die Helligkeit eines beliebigen Reizes ist einfach gleich der Summe von Rotreiz + Grünreiz, wenn man $\rho = \gamma = 1$, d. h. die Helligkeit des Gesamtspektrums = 2000 Helligkeitseinheiten setzt.

²⁰⁾ Man vergleiche zu den Abschnitten 8 und 9 die verwandten, aber wohl nicht identischen Ausführungen bei Pilgrim, a. a. O. und Schrödinger, Wien. Akad. Ber. 134 (1925), ferner Anm. 4.

für die auf die Blau-Gelbachse wirkenden Grün-Purpurmomente machen, also in Anlehnung an die Heringsche Bezeichnung von der Grüne-Röte, d. h. „Grüne minus Röte“ sprechen. (Das Heringsche Rot, das weniger gelbstichig und mehr purpurähnlich ist als das ebenfalls „Rot“ bezeichnete Eichrot, soll von diesem durch den Zusatzbuchstaben (H) — an Hering erinnernd — unterschieden werden.)

Die beiden Momente Grüne-R(H)öte und Bläue-Gilbe, zusammen mit dem „Gewicht“ eines Reizes, ausgedrückt sei es in Reiz-, sei es in Helligkeitseinheiten, bilden eine neue Parametertriade²¹⁾

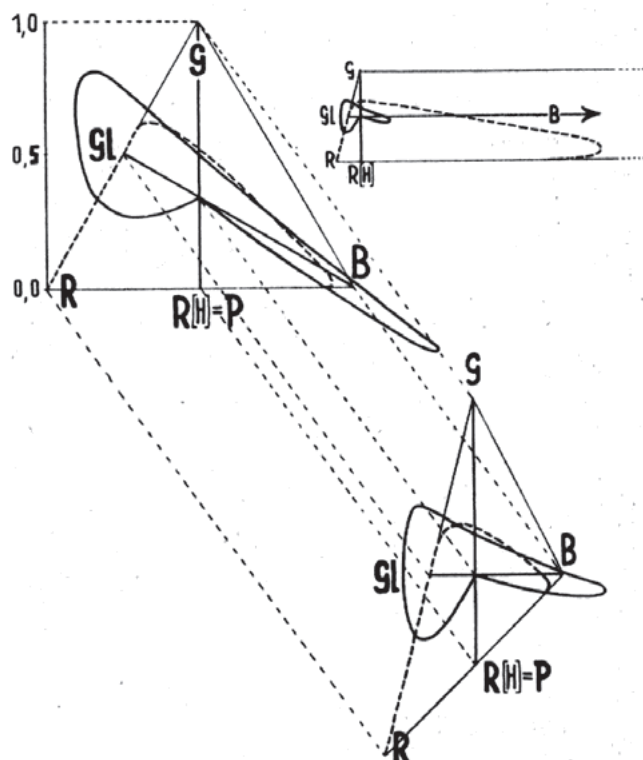


Abb. 6. Parallelprojektive Umwandlung der gleichseitigen Farbtafel mit schiefwinkligen Momentachsen in eine Farbtafel mit rechtwinkligen Momentachsen. Weiterverwandlung in eine Farbtafel mit Helligkeitseinheiten (rechts oben in verkleinertem Maßstab). Die spezifische Helligkeit des Blaureizes ist gleich 0

durch die ein beliebiger Farbreiz eindeutig und recht anschaulich definiert werden kann.

Die beiden Drehmomente addieren sich natürlich wie Vektoren und geben durch Vorzeichen und Betrag ihres Verhältnisses die Richtung in der Farbtafel, und damit anschaulich den Farbton des resultierenden leukozentrischen Farbmoments an, das man nach Analogie vielleicht als „Farbigkeit“ bezeichnen könnte. Dividiert man dieses leukozentrische Farbmoment durch das „Gewicht“ des Reizes, so erhält man die leukozentrische Hebelänge und damit den Ort des Reizes in der Farbtafel, woraus sich dann die Sättigung, die Anteile

²¹⁾ Man könnte sie vielleicht „tetrachromatisches System“ nennen.

und Mengen der drei Eichreize sofort ergeben. Hiermit ist der gegenseitige Umrechnungsschlüssel der tetra-, tri- und monochromatischen Systeme gegeben.

9. Liegt ein zusammengesetzter Mischreiz, z. B. ein Absorptions- oder Remissionsspektrum vor — etwa unser Smaragdspektrum —, so können wir ganz wie früher (Abschnitt 3) jetzt die beiden Eichmomente sowie die Reizsumme bzw. Helligkeit herausziehen. Zu diesem Zweck tragen wir über dem Normalspektrum zunächst die Mengen der

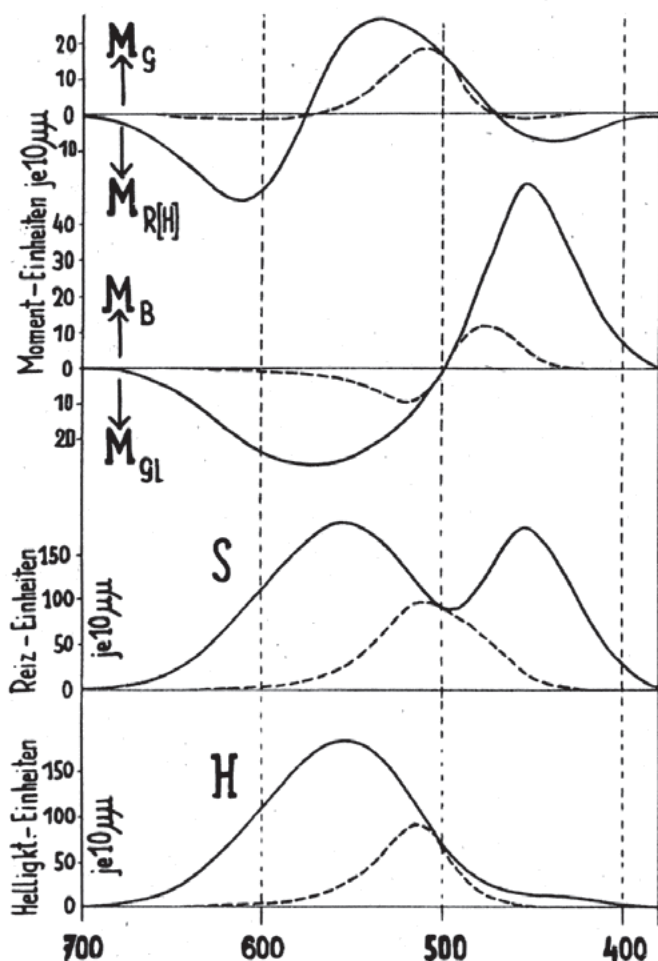


Abb. 7. Spektromeichung nach den beiden Eichmomenten, Reizsumme und Helligkeit. Bestimmung dieser Größen im Remissionsspektrum des Smaragdes

beiden Eichmomente für je $10 \mu\mu$ als Ordinaten auf. Die entstehenden Kurven (Abb. 7) lassen sich aus den entsprechenden Mengen der Eichreize nach der linearen Formel²²⁾ berechnen:

$$M = mR + nG + pB$$

²²⁾ Die Koeffizienten m , n , p hängen von der Wahl der Achsen, der Farbtabelle und der Maßeinheiten ab. Wenn die Achsen durch den Unbuntpunkt gehen, gilt:

$$m + n + p = 0.$$

In meinem Falle gilt:

$$M_{\text{Blau-Gelb}} = \frac{1}{3} B - \frac{1}{3} R; \quad M_{\text{Grün-R(H)ot}} = \frac{2}{3} G - \frac{2}{3} R; \\ S = R + G + B; \quad H = R + G.$$

(Die Fläche zwischen Abszissenachse und $R(H)$ ot-Momentkurve, d. h. die Summe aller spektralen $R(H)$ otmomente, hat natürlich die gleiche Größe, aber entgegengesetztes Vorzeichen, wie die entsprechende Fläche der Grün-Momentkurve, und dasselbe gilt auch für die Flächen der Blau- und Gelb-Momentkurven, da natürlich die beiden Eichmomente des unbunten Gesamtspektrums $= 0$ sind.)

Multipliziert man wieder für eine hinreichend große Anzahl von Wellenlängen die Ordinaten dieser Kurven mit den zugehörigen Remissionszahlen des Smaragdes und wertet — unter Berücksichtigung des Vorzeichens — die Gesamtflächen aus, so erhält man die beiden Gesamtmomente des Smaragdreizes. Dasselbe macht man mit der Reizsummenkurve S bzw. der Helligkeitskurve H .²³⁾

Führt man diese Operationen durch (vgl. gestrichelte Kurven der Abb. 7), so erhält man in den von mir gewählten Maßzahlen folgende Charakteristik der Smaragdfarbe: Bläue-Gilbe $= 0$; Grüne- $R(H)$ öte $= 79$ Momenteinheiten; Gewicht $= 713$ Reizeinheiten ($= 0,24$ des Gesamtspektrums) bzw. $= 515$ Helligkeitseinheiten ($= 0,26$ des Gesamtspektrums).

10. Ein ausgewählter Fall der Summation von Spektralreizen beansprucht besonderes Interesse und führt zu einfachen und anschaulichen geometrischen Darstellungen. Es ist dies der Fall, daß die Spektralreize einen ungeschwächten zusammenhängenden Ausschnitt aus dem Normalspektrum bilden.

Um alle vorkommenden Fälle auf einmal übersehen zu können, stellen wir uns das Spektrum zu einem Kreis geschlossen vor (Abb. 8). Zwei Radien, die man sich als Spaltbacken vorstellen kann, sondern dann je nach ihrer Stellung einen beliebig langen, beliebig zusammengesetzten, zwischen den Wellenlängen λ_1 und λ_2 gelegenen zusammenhängenden ungeschwächten Spektrumausschnitt aus. Schrödinger²⁴⁾ begründete die von Ostwald empirisch gefundene Tatsache, daß alle derartigen Spektrumausschnitte, wie sie im Idealfall durch die Trans- bzw. Remissionsspektren von Pigmenten mit sehr steil begrenzten Absorptionsbanden erhalten werden könnten, Maximeigenschaften haben: Sie entsprechen bei gegebener Sättigung

²³⁾ Wieder (vgl. Abschn. 4) kann man natürlich den Kunstgriff anwenden, daß man das Spektrum auf der Abszissenachse so anordnet, daß gleichen Zunahmen der Abszisse gleiche Zunahmen eines Eichmomentes sowie der Reizsumme bzw. der Helligkeit entsprechen. Das hierbei entstehende Tageslichtspektrum „konstanter Helligkeit“ soll im folgenden „äquiluzentes“ Spektrum genannt werden. Es ist meines Wissens von A. Fick, Pflügers Arch. **64** (1896) eingeführt worden.

²⁴⁾ E. Schrödinger, Ann. d. Physik **62** (1920). W. Ostwald, Physikal. Zeitschr. **17** (1916). Über die Lichtempfindlichkeit derartiger Pigmente R. Luther, Zeitschr. f. Elektrochem. **14** (1908).

den hellsten, bei gegebener Helligkeit den gesättigsten Reizen. (Sie sollen im folgenden optimale Pigmentfarbenreize oder kurz Optimalfarben bezeichnet werden.) Alle übrigen Pigmentfarbenreize können durch Verdunkelung der Optimalfarben erhalten werden.

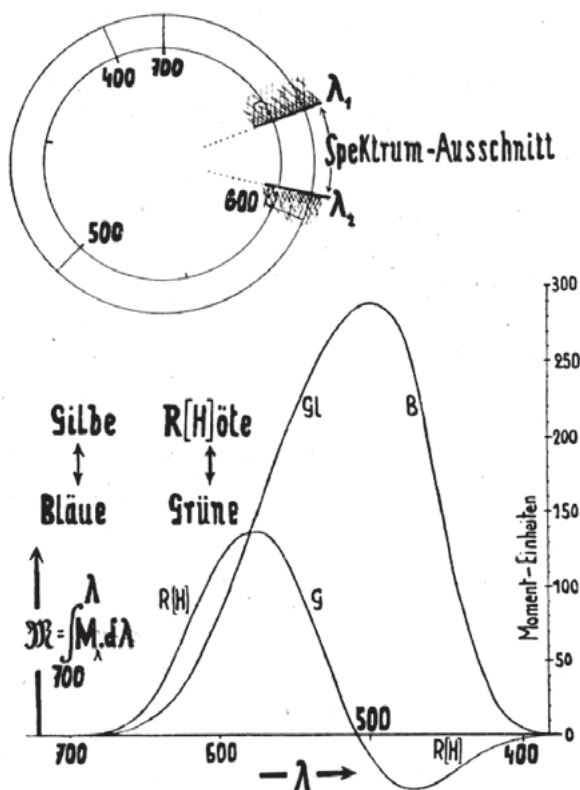


Abb. 8. Die „Optimalfarben“ als Mischreize zusammenhängender ungeschwächter Spektrumausschnitte. Spektrum-eichung nach den beiden Eichmomentintegralen $\mathfrak{M}$ zur Ermittlung der beiden Eichmomentensummen der Optimalfarben

Die beiden Wellenlängen λ_1 und λ_2 zusammen mit der absoluten, d. h. auf das Gesamtspektrum oder relativen, d. h. auf die Optimalfarbe bezogenen „Intensität“ — etwa in Helligkeitseinheiten — bilden wieder eine Parametertriade, die zur vollkommenen Beschreibung eines Farbenreizes ausreicht²⁵⁾ und zur Nachahmung dieses Farbenreizes in geeigneten Apparaten — z. B. dem Maxwell-Ostwaldschen Farbmischer — dienen kann. Vorwiegend möchte ich bemerken, daß für den Smaragd gilt: $\lambda_1 = 561 \mu\mu$, $\lambda_2 = 458 \mu\mu$, Helligkeit = 0,50 der Optimalfarbe = 0,26 des Gesamtspektrums.

Die geometrische Darstellung der Triade: Helligkeit, λ_1 , λ_2 — die man vielleicht „dichromatisches System“ bezeichnen könnte — ist unübersichtlich,

²⁵⁾ Die erste Kenntnis dieser Parametertriade verdanke ich Vorkriegsgesprächen mit Prof. Dr. E. Goldberg. Der diesbezügliche Artikel seiner Artikelserie, Zeitschr. f. Reproduktionstechnik 1914, ist infolge Kriegsausbruches nicht erschienen. Später hat v. Kries diese Triade empfohlen, Diese Zeitschr. 5 (1924).

dagegen führen folgende Überlegungen zu anschaulichen Darstellungen.

11. Da sich gleichgerichtete Momente wie Skalaren addieren, kann man die beiden Momente $\mathfrak{M}$ eines Spektrumausschnittes erhalten, wenn man die einzelnen Spektralmomente M_λ vom Spektrumanfang, also von $\lambda = 700 \mu\mu$ einmal bis λ_2 , das andere Mal bis λ_1 summiert bzw. integriert und die Differenz $\mathfrak{M} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda \cdot d\lambda - \int_{700}^{\lambda_1} M_\lambda \cdot d\lambda$ bildet.

In Abb. 8 unten sind diese Momentensummen bzw. Momentintegrale von $\lambda = 700 \mu\mu$ bis λ als Funktionen von λ in Kurvenform dargestellt. Die Differenz zweier Ordinatenwerte gibt bei jeder der beiden Kurven das Moment des durch die Endabszissen eingeschlossenen Spektrumausschnittes.

Tragen wir nun zu gleichen Wellenlängen gehörige Ordinatenwerte der beiden Kurven in ein in unserem Falle rechtwinkliges Koordinatensystem ein, so erhalten wir eine mit Wellenlängen- und Helligkeits- (bzw. Reizsummen-)Skala versehbare Kurve (Abb. 9), die (spektrale) Momentensummenkurve genannt werden soll. Diese Kurve hat leicht zu verstehende, praktisch wichtige Eigenschaften.

Alle Farbreize werden durch Vektoren dargestellt und zwar die Optimalfarben durch Kurvensehnen. Den nichtoptimalen Reizen, z. B. dem Smaragdreiz S_m , die stets als abgeschwächte Optimalfarben aufgefaßt werden können, entsprechen Teilstücke der Optimalfarbensehnen. Das spektrale Durchlaßgebiet und die Helligkeit einer Optimalfarbe kann an dem Teil der gekrümmten Doppelskala abgelesen werden, der im Uhrzeigersinn zwischen Anfang und Ende der Sehne liegt.

Eine Sehne kann vektoriell in ihre beiden (senkrechten) Eichmomente zerlegt werden, deren Verhältnis nach Absolutwert und Vorzeichen die Richtung und mithin den Farbton angibt. Vektoriell parallele Sehnen gehören daher zu Optimalfarben gleichen Farbtons, den man entweder am Ort der parallelen Tangente (unendlich enger Ausschnitt), oder in der zugehörigen Farbtabelle (Abb. 9 rechts) ablesen kann.

Die Sehnenlänge — als Resultante der beiden Eichmomente — ist das „Farbmoment“ oder die „Farbigkeit“ der Optimalfarbe. Komplementäre Optimalfarben haben entgegengesetzte numerisch gleiche Farbmomente, also gleichgerichtete gleich lange Sehnen von entgegengesetztem Vorzeichen. Zu jeder Optimalfarbe $a \rightarrow b$ gehören mithin zwei komplementäre Optimalfarben $b \rightarrow a$ und $c \rightarrow d$. Komplementäre Spektralfarben, d. h. Optimalfarben mit unendlich engem Spektrumausschnitt haben demnach parallele, aber entgegengesetzt gerichtete Tangenten.

12. Die Parallelverschiebung einer Sehne kann nach Obigem zur bequemen Ermittlung der Spaltbackenstellung bei farbtongleicher oder „isochromatischer“ Spaltverbreiterung dienen. Bei dieser Parallelverschiebung geht die Sehnenlänge, d. h. die Farbigkeit oder das Farbmoment vom Werte Null (unendlich enger Spalt) über ein Maximum V wieder bis Null (Gesamtspektrum). Das Maximum der Sehnenlänge, also die maximale „Farbigkeit“, entspricht den Ostwaldschen Voll-

Gewicht der Optimalfarbe $\times$ Sättigung = Gewicht der Spektralfarbe in Optimalfarbe.

Folglich:

Moment der Optimalfarbe = Hebellänge der Spektralfarbe $\times$ Gewicht der Spektralfarbe in Optimalfarbe.

Die Sehnenlänge (= Moment der Optimalfarbe) ist also proportional der Menge Spektralreiz im Optimalfarbenreiz. Der Proportionalitätsfaktor: die

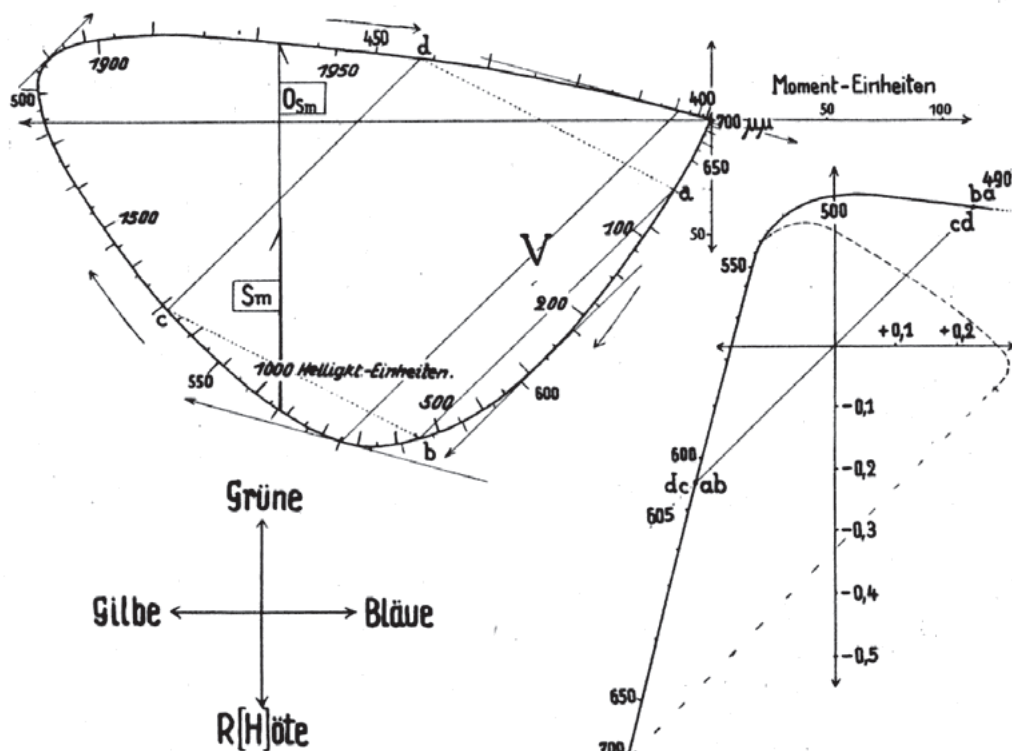


Abb. 9. Mit Doppelskala in Wellenlängen und Helligkeitseinheiten versehene „Momentsummenkurve“ und ihre Beziehung zur Farbtabelle. Vektoriell parallele Sehnen entsprechen Optimalfarben gleichen Farbtons. Der zwischen Anfangs- und Endpunkt einer Sehne im Uhrzeigersinn liegende Teil der Doppelskala gibt Durchlaßgebiet des Spektrumschnittes und seine Helligkeit an. Die Sehnenlänge ist dem „Farbmoment“ gleich und dem Gehalt an Spektralreiz proportional. Die Ostwaldschen Vollfarben V haben das Maximum an Farbmoment und Spektralreiz und schneiden die Kurve entweder bei komplementären Wellenlängen, d. h. in Punkten mit parallelen aber entgegengesetzt gerichteten Tangenten, oder im Knickpunkt. Darstellung zweier „komplementärer“ Uebersichtsfarben für Stereoskopie. Darstellung des Smaragdreizes als abgeschwächte Optimalfarbe

farben, denn bei den Maxima wird die Kurve entweder in zwei komplementären Punkten mit parallelen Tangenten oder in der Ecke geschnitten (vgl. Abb.).

Die Sehnenlänge oder das Farbmoment oder die Farbigkeit kann durch folgende Überlegung eine Veranschaulichung erhalten. Fassen wir die Helligkeit einer Optimalfarbe als ihr „Gewicht“ im Newtonschen Sinne auf, so gelten folgende Beziehungen:

Moment der Optimalfarbe
Gewicht der Optimalfarbe = Hebellänge der Optimalfarbe in Farbtabelle.

Hebellänge der Optimalfarbe
Hebellänge der Spektralfarbe = Sättigung, d. h. Anteil an Spektralfarbe in Optimalfarbe.

Hebellänge des Spektralreizes, hängt natürlich vom Farbton und den gewählten Mengen und Maßeinheiten ab, ist aber für einen bestimmten Farbton, also für eine Schar paralleler, gleichgerichteter Sehnen konstant.

Die Ostwaldschen Vollfarben sind demnach im Sinne der klassischen Farbenmetrik dadurch ausgezeichnet, daß sie das Maximum an Spektralreiz enthalten, das die vollkommensten Pigmente überhaupt enthalten können: sie stellen mithin auch im Sinne der klassischen Farbenlehre „ausgezeichnete Fälle“ dar.

13. In der Momentsummenkurve der Abb. 9 (vgl. auch Abb. 10 und 13) sind noch einige weitere Sehnen eingetragen, die ein Beispiel der Anwendung der spektralen Momentsummenkurve bei der Lösung einer praktischen Aufgabe zeigen sollen. Ein Farb-

stoff mit den beiden komplementären Durchlaßgebieten ab und cd ist ein sogenanntes unechtes Grau. Dasselbe gilt für einen anderen Farbstoff mit den Durchlaßgebieten bc und da , der ebenfalls ein unechtes Grau ergibt, das zu dem ersteren „komplementär“ ist. Anaglyphen, die mittels derartiger „komplementärer“ unecht-grauer Pigmente hergestellt werden könnten, würden einen interessanten Anblick ergeben: Aus einem Gewirr von grauen Linien würde beim Betrachten durch eine graue Brille sich der Gegenstand körperlich herauslösen. Derartige komplementäre unechte Graufilter sind von A. Callier²⁶⁾ hergestellt und demonstriert worden. Sie zeigen in hohem Maße die störende Eigenschaft, daß der gelbe Fleck entoptisch sichtbar wird. Außerdem hängt natürlich ihre Farbe sehr stark von der spektralen Zusammensetzung des Lichtes, sowie von der Farbestimmung und den individuellen Eigenschaften des betrachtenden Auges ab. Alle diese Eigenschaften können zu Meßzwecken verwendet werden.

Es ließe sich noch mancherlei über diese „Momentsummenkurve“ sagen. Ich will mich jedoch darauf beschränken, mit Hilfe der gewonnenen Beziehungen drei räumliche Gebilde zu konstruieren, die in erster Linie zur Darstellung der Eigenschaften von Pigmentfarben geeignet sind.

14. Abb. 10 zeigt vier verschiedenen Farbtönen entsprechende Schnitte durch einen Körper, dessen drei rechtwinklige Koordinaten Farbton, Sättigung und Helligkeit sind. Da in jedem der abgebildeten Schnitte der Farbton konstant ist, so sind in ihm veränderlich: Sättigung und Helligkeit. Die Sättigung ist als Ordinate aufgetragen, die Helligkeit als Abszisse, und zwar wird sie gezählt vom linken (ausgezogenen) Hang der Kurve nach rechts. Der linke Hang entspricht also der Helligkeit Null. Auf dem rechten Hang befinden sich die Optimalfarben, deren Helligkeit durch den horizontalen Abstand vom linken („schwarzen“) Hang, deren Sättigung durch die Ordinate dargestellt wird.

Die beiden Grenzwellenlängen der Optimalfarben lassen sich ebenfalls ablesen, wenn man die Schnittpunkte der horizontalen Linie (gleicher

Sättigung) mit den beiden Kurvenhängen senkrecht auf die Abszissenachse projiziert und die dort angegebenen Wellenlängen abliest (vgl. Kurve für Grünblau 490). Zu diesem Zweck ist die Abszissenachse mit einem äquidistant eingeteilten Spektrum (vgl. Anm. 23) versehen, dessen Anfangspunkt der Zählung natürlich vom Farbton des Schnittes abhängig ist.

Da die Helligkeit des spektralen Anteils einer Optimalfarbe gleich dem Produkt aus der Helligkeit der Optimalfarbe und der Sättigung ist, so wird diese Helligkeit des spektralen Anteils durch

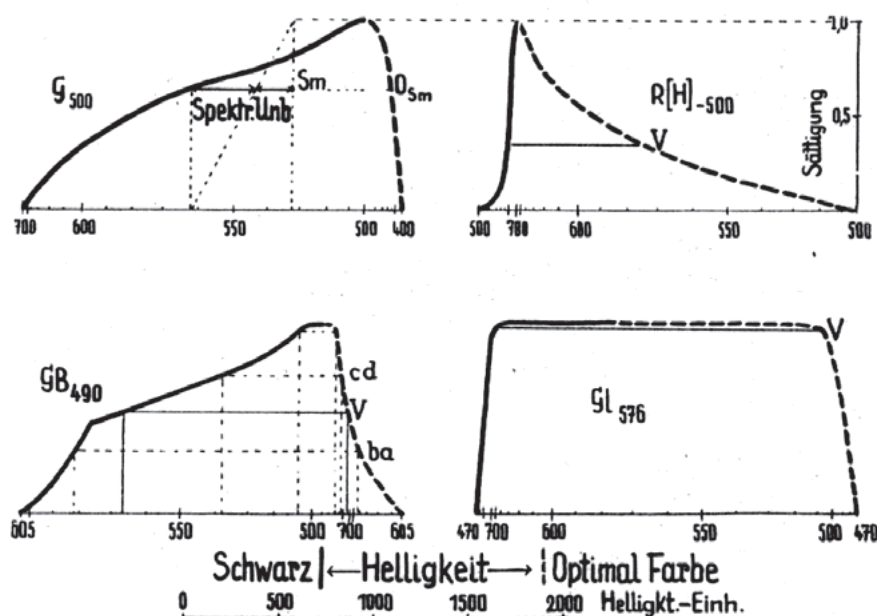


Abb. 10. Vier Schnitte durch ein für Pigmentfarben gültiges räumliches Gebilde mit den Koordinaten: Farbton, Sättigung, Helligkeit. Als Abszisse dient ein äquidistantes Spektrum, die linken Hänge entsprechen der Helligkeit 0, die rechten gestrichelten Kurvengänge enthalten die Optimalfarben. Darstellung der Smaragdfarbe Sm als verdunkelte Optimalfarbe O_{Sm} . Graphische Ermittlung der Menge Spektralreiz im Smaragdreiz. Maximum des Spektralreizes bei den Optimalfarben. (Schnitt Grün-Blau 490). Ausnahme-stellung der gelben Optimalfarben

die Flächen der in der Kurve Grünblau 490 eingezeichneten Rechtecke dargestellt. Diese Fläche ist für sehr schmale Spektrumausschnitte klein, wächst zunächst bei abnehmender Sättigung und zunehmender Helligkeit mit der Verbreiterung des Ausschnittes, geht bei den Ostwaldschen Vollfarben durch ein Maximum, um bei weiterer Verbreiterung des Ausschnittes wieder abzunehmen und schließlich beim Durchlaß des Gesamtspektrums (Sättigung = 0) natürlich gleich Null zu werden.

Die nichtoptimalen Farbreize (z. B. der des Smaragds Sm), die als verdunkelte Optimalfarbreize aufgefaßt werden können, liegen auf den ihrer Optimalfarbe (O_{Sm}) entsprechenden Horizontalen näher zum linken (schwarzen) Kurvenhang (vgl. Kurve Grün 500). Die Horizontalen sind daher Linien konstanter Sättigung und konstanten Farbtönen, also konstanten Farbcharakters bzw.

²⁶⁾ Photographic Journal 37 (1913). Die Anregung stammte aus gelegentlichen früheren Gesprächen mit mir. Die spektrale Momentsummenkurve war mir damals (1906) noch nicht bekannt.

Chromas bzw. Reizart; sie sind identisch mit den Ostwaldschen „Schattenreihen“. Beim Smaragdreiz ist die geometrisch selbstverständliche Zer-

einzelnen Farbtöne gegenüber Änderungen von Helligkeit und Sättigung. Man erkennt die Sonderstellung der gelben Pigmentfarben, da hier die Vollfarbe bei einer Helligkeit von über 85% des Gesamtspektrums nahezu ($\approx 98\%$) gesättigt ist, im Gegensatz z. B. zum R(H)ot, wo die Vollfarbe sehr dunkel und wenig gesättigt ist. Man sieht ferner, wie beim Durchschreiten der einen Grenzwellenlänge durch das Spektrumende ein Knick in dem gegenüberliegenden Kurvenhang auftritt (Kurve G B 490).

Abb. 11 zeigt perspektivisch eine Serie von Schnitten, die über zwei aneinanderstoßende äquivalente Spektren angeordnet sind.

15. Ein anderer „Pigmentfarbenreizkörper“ mit den rechtwinkligen Koordinaten: Bläue-Gilbe, Grüne-R(H)öte, Reizsumme bzw. Helligkeit ist in den Abb. 12, 13 und 14 dargestellt, und zwar gilt in den Abb. 12 oben und 14 die Zählung in Reizeinheiten, in den Abb. 12 unten und 13 die Zählung in Helligkeitseinheiten. Der Körper erinnert in der Gestalt an ein Parallelepiped mit abgerundeten Ecken und Kanten und meist gewölbten Flächen; er besitzt ein zweizähliges Symmetriezentrum.

Der o-Punkt der Koordinatenzählung liegt im unbunten reiz- bzw. helligkeitsfreien „Schwarzpunkt“. Die unbunte Achse mit dem Farbmoment Null steigt von Schwarz über Grau bis Weiß. Jedem nicht in der Achse, aber innerhalb des Körpers liegenden Punkt entspricht daher ein bunter Reiz, dessen Helligkeit bzw. Reizsumme aus seiner vertikalen Koordinate, dessen Farbton aus dem Verhältnis, dessen Farbmoment aus der Resultante seiner beiden horizontalen Koordinaten abgelesen werden kann. Dementsprechend befinden sich auf der Oberfläche die Punkte größter Farbigkeit bei gegebener Helligkeit bzw. Reizmenge, also die Optimalfarben, während die Punkte aller übrigen Pigmentfarbenreize im Inneren liegen.

Bei der additiven Mischung zweier Reize addieren sich ihre beiden Blau-Gelbmomente, ihre beiden Grün-R(H)otmomente und ihre beiden Helligkeiten bzw. Reizsummen. Mit anderen Worten: Die vom Koordinatenanfangspunkt zu den beiden Punkten gezogenen Vektoren setzen sich nach dem Vektorparallelogramm zusammen. Jeder Reiz kann daher auch im Sinne der Graß-

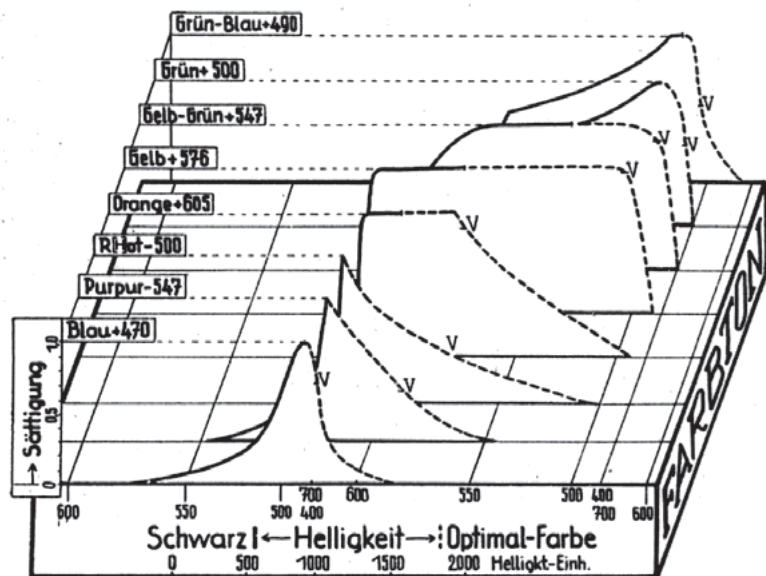


Abb. 11. Parallelperspektivische Darstellung des bei Abb. 10 besprochenen Körpers

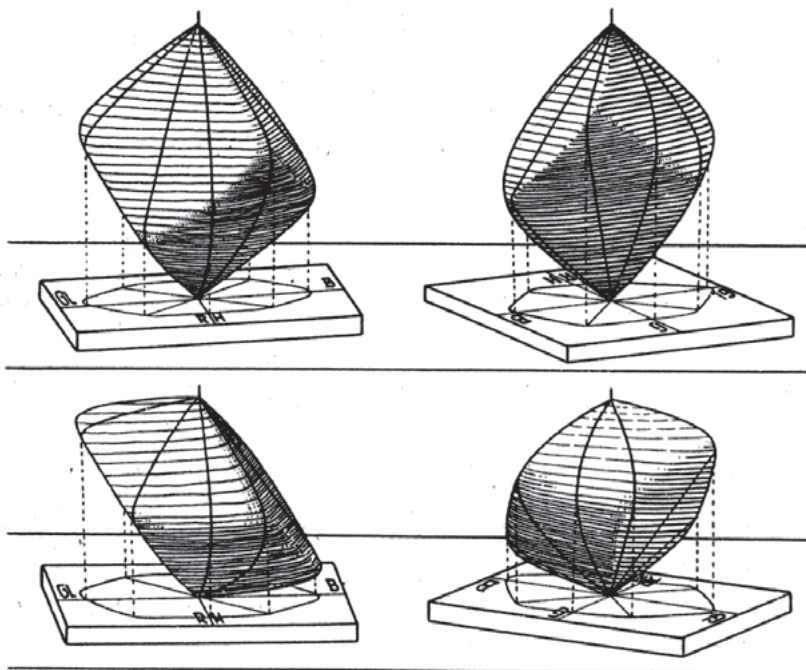


Abb. 12. Perspektivische Darstellung des parallelepiped-ähnlichen „Pigmentfarbenreizkörpers“ mit den wagerechten Koordinaten: Bläue-Gilbe, Grüne-R(H)öte und der senkrechten Koordinate: Helligkeit (untere Reihe) bzw. Reizmenge (obere Reihe). Die Meridiane der unteren Reihe mit dem Winkelunterschied von 45° entsprechen den Schnitten der folgenden Abb. 13. Die Ostwaldschen Vollfarben werden durch die Mantelfläche eines senkrechten, den Körper berührenden Zylinders auf die wagerechte Koordinatenebene projiziert

legung der Gesamthelligkeit des Smaragdreizes in die Helligkeiten des spektralen (Spektr.) und unbunten (Unb.) Anteils durchgeführt.

Aus der verschiedenen Gestalt der vier Kurven erkennt man das verschiedene Verhalten der

Helligkeiten bzw. Reizsummen. Mit anderen Worten: Die vom Koordinatenanfangspunkt zu den beiden Punkten gezogenen Vektoren setzen sich nach dem Vektorparallelogramm zusammen. Jeder Reiz kann daher auch im Sinne der Graß-

mann-Maxwell'schen vektoriellen Darstellung als Vektor aufgefaßt werden (vgl. auch Pilgrim a. a. O.). Bei anteiliger Mischung zweier Reize (etwa mittels Farbenkreisel) liegen demgemäß die Mischreize auf der geraden Verbindungslinie der beiden Punkte in Abständen von diesen, die umgekehrt proportional den Anteilen sind.

16. Jeder Axialschnitt enthält die Gesamtheit aller Pigmentfarbenreize zweier komplementärer Farbtöne. In Abb. 13 sind vier derartige Schnitte

Farbmoment bei den Ostwald'schen Vollfarben (V) ein Maximum erreicht, um weiterhin abnehmend bei total durchgelassenen Spektrum — Weißpunkt — wieder gleich Null zu werden. Jeder Punkt der Kurven kann mit der Angabe der beiden den Spektrumsausschnitt begrenzenden Wellenlängen versehen werden; wegen der Symmetrie der beiden komplementären Hälften eines Schnittes käme man auch mit einer einfachen Wellenlängenskala aus. Die Linien gleicher Wellenlänge bilden auf der Ober-

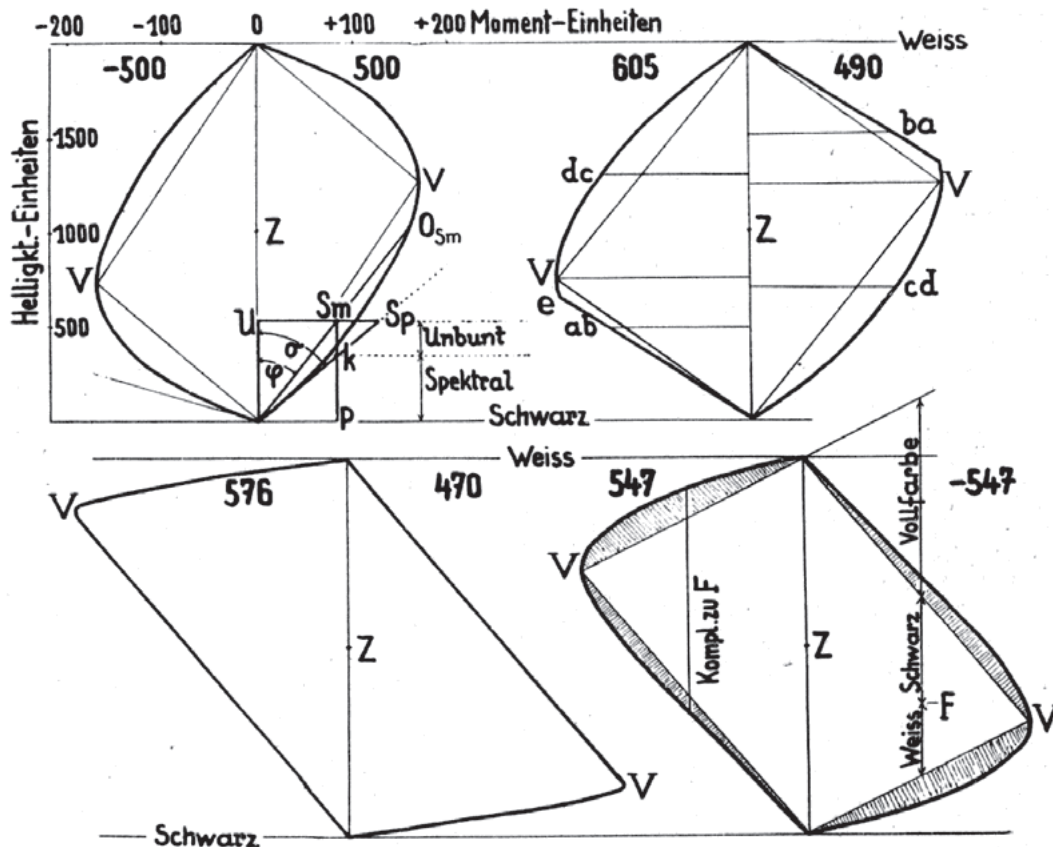


Abb. 13. Vier den um 45° abstehenden Meridianen der Abb. 12 (unten) entsprechende Axialschnitte durch den Pigmentfarbenreizkörper in Helligkeitseinheiten mit gemeinsamer Schwarz-Weiß-Achse und gemeinsamem zweizähligen Symmetriezentrum Z . Die Schnitte entsprechen den Farbtönen: Grün₅₀₀-R(H)ot₅₀₀ (oben links); Orange₆₀₅-Grün-Blau₄₉₀ (oben rechts); Gelb₅₇₆-Blau₄₇₀ (unten links) und Gelb-Grün₅₄₇-Purpur-Violett₅₄₇. Bestimmung (links oben) der Sättigung $\frac{U - S_m}{U - S_p} = \frac{p - k}{p - S_m}$ und der Menge Spektralreiz $p - k$ in der Gesamthelligkeit $p - S_m$ des Smaragdreizes. Bestimmung des Smaragdreizes S_m durch Verdunkelung seiner Optimalfarbe O_{S_m} . Wiedergabe (oben rechts) der in Abb. 9 durch ausgezogene Linien dargestellten Optimalfarben. Darstellung (unten rechts) der Ostwald'schen Triade (Farbton und zwei der Anteile Weiß, Schwarz, Vollfarbe) und der Fehlfarben (gestrichelt). Darstellung (unten rechts) der Gesamtheit der zum Reiz F komplementären Reize. Ausnahmestellung der gelben Pigmente

durch den Körper (in Helligkeitseinheiten) dargestellt. In jedem Schnitt ist die Mitte Z der Schwarz-Weiß-Achse zweizähliges Symmetriezentrum, da zwei sich zum Gesamtspektrum ergänzende Optimalfarben gleiche, aber entgegengerichtete Farbmomente haben, also symmetrisch zum Mittelpunkt liegen.

Der Nullpunkt der Koordinatenzählung — der „Schwarzpunkt“ — entspricht den unendlich engen Spektralausschnitten. Mit Verbreiterung des Spaltes wachsen zunächst Farbmoment und Helligkeit gleichsinnig (vgl. Orange- und Grün-Blausschnitt), bis das

fläche des Körpers unregelmäßige zwischen den Polen verlaufende Spiralen. Diese sowie die Wellenlängenskala sind in den Abbildungen nicht eingetragen.

Die Beziehung dieses — tetrachromatischen — Pigmentfarbenreizkörpers zum monochromatischen und trichromatischen System geht aus den Formeln Abschnitt 12 hervor. Aus ihnen ergibt sich, daß z. B. für den Smaragdreiz S_m des Grün-R(H)ot-schnittes $\lambda = 500$ und $\lambda = -500$ die Hebellänge in der Farbtabelle $\frac{\text{Moment} = U - S_m}{\text{Gewicht} = p - S_m} = q \tan \varphi$ ist.

Für die gesättigte Spektralfarbe, die bei unendlich engem Ausschnitt erhalten wird, ist daher die Hebellänge $= q \operatorname{tg} \sigma$. Der Winkel σ ist der Winkel zwischen Tangente im Schwarzpunkt und Unbuntachse; der Faktor q hängt von den gewählten Maßeinheiten ab und hat im vorliegenden Fall den Wert 0,2. Die Sättigung ergibt sich daher zu $\operatorname{tg} \varphi = \frac{U - S_m}{U - S_p} = \frac{p - k}{p - S_m}$. Hieraus folgt, daß die gesamte Helligkeit $p - S_m$ des Reizes S_m aus der Helligkeit $p - k$ des spektralen Anteils und der Helligkeit $k - S_m$ des unbunten Anteils zusammengesetzt ist.

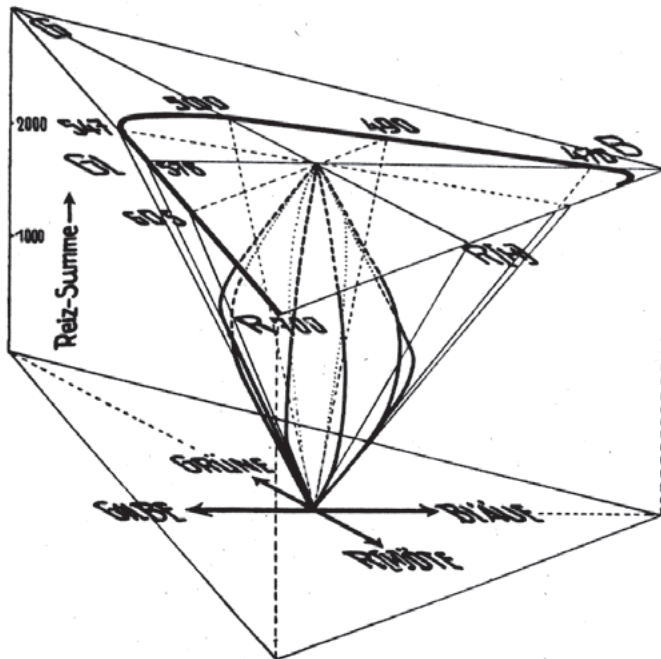


Abb. 14. Beziehung des Pigmentfarbenreizkörpers zur Farbtabelle und dem Maxwellschen Farbenkegel (alles in Reizeinheiten)

Auch die Beziehungen zur Farbtabelle ergeben sich aus den obigen Formeln und sind in Abb. 14 für den Reizeinheitenkörper perspektivisch dargestellt. Die vom Schwarzpunkt nach der Spektralkurve (einschließlich die Purpurlinie) gehenden Strahlen tangieren den Pigmentkörper im Schwarzpunkt und bilden den Maxwellschen spektralen Kegelmantel, innerhalb dessen alle existierenden Farbreize liegen. Aus diesen grenzt der Pigmentkörper die durch Pigmente herstellbaren Reize aus.

17. Der Ort eines Punktes im Körper kann in mannigfacher, z. T. schon besprochener Weise durch drei Zahlen angegeben werden. Eine spezielle Parametertriade muß besonders erwähnt werden, da sie wie es scheint in neuerer Zeit Anklang gefunden hat. Ich meine die Ostwaldsche Triade, bei der einerseits der Farbton, andererseits zwei der drei sich zur Einheit ergänzenden Anteile an Schwarz, Weiß und Vollfarbe die drei Bestimmungsstücke bilden. In der Tat kann man jeden innerhalb der Dreiecke: Weißpunkt, Schwarzpunkt,

Vollfarbe liegenden Punkt eindeutig aus zwei der drei positiven Anteile definieren und zwar am einfachsten (vgl. Abschnitt 5) in der in Abb. 13 im Schnitt $\lambda = -547$ für den Reiz F angegebenen Weise. Man erkennt aber auch sofort — vgl. die gestrichelten Teile dieses Schnittes —, daß das Ostwaldsche System keineswegs alle Pigmentfarben mit positiven Anteilen umfaßt. Zwar im Gelb-Blausschnitt 576, 470 decken sich Kurven und Ostwaldsche Dreiecke fast vollständig, dagegen sind bei den dunklen roten und den hellen blaugrünen Optimalfarben die Abweichungen erheblich. Auch dem Smaragdreiz entspricht ein negativer Weißanteil von $-0,04$, während die Anteile an Schwarz $+0,57$, an Vollfarbe $+0,47$ betragen.

Wichtig erscheint mir indes, daß für das Ostwaldsche System sich überhaupt ein einfaches Verfahren zur Umrechnung in die Triadensysteme der klassischen Farbenlehre finden läßt.

18. Noch einige Bemerkungen zu Abb. 13 müssen gemacht werden. Der Reiz ab im Orangenschnitt $\lambda = 605$ kann sowohl durch entsprechend gewählten Spektrumausschnitt als Optimalfarbe hergestellt werden, wie auch durch Verdunkelung einer beliebigen zwischen den Punkten a und e liegenden Optimalfarbe. Diese „Metamerie“ der Optimalfarben tritt in ausgesprochener Weise nur im geraden Teil der Spektralkurve in den Farbtafeln, also zwischen $\lambda = 700 \mu\mu$ und $\lambda \approx 545 \mu\mu$ auf. Der Knick bei e entsteht, wenn eine der begrenzenden Wellenlängen die Spektrumenden durchschneidet.

Im Schnitt Gelbgrün 547 ist als senkrechte Gerade die Gesamtheit aller zum Reiz F komplementärer Reize dargestellt.

Die besonders große Sättigung (etwa 0,99) und Helligkeit (etwa 0,9 des Gesamtspektrums) der gelben Vollfarben in der Nachbarschaft von $\lambda = 575,5 \mu\mu$ ist auch in der Abb. 13 erkennbar.

Es ließe sich noch mancherlei über den Pigmentfarbenreizkörper, z. B. seine Beziehung zum Ostwaldschen Doppelkegel, zur Rungeschen Farbkugel und den psychologischen Anordnungen von Hering, Ebbinghaus und Höfler sagen, das würde aber zu weit führen.²⁷⁾

19. Ich möchte daher zum Schluß nur noch eine letzte räumliche Darstellung der Gesamtheit aller Pigmentfarbenreize in den gleichen Koordinaten, wie beim Pigmentfarbenreizkörper, kurz besprechen.

Über den den Wellenlängen λ entsprechenden

²⁷⁾ Eine gewisse äußere Ähnlichkeit besteht auch mit dem Munsellschen „Farbenbaum“, den ich vorläufig nur aus Referaten kenne. Nach den mir bekannten Berichten sind indes seine 3 Parameter: Farbton, Helligkeit und Sättigung. Danach müßten axiale Schnitte in einfacher Beziehung zu den Kurven Abb. 10 stehen.

Punkten der Momentsummenkurve Abb. 9 sind senkrecht zur Kurvenebene die Helligkeiten der Spektralausschnitte von $\lambda = 700 \mu\mu$ bis λ aufgetragen. Die Endpunkte bilden eine räumliche Schraubenlinie, von der zwei Schraubengänge genommen sind (vgl. Abb. 15).

Die Gesamtheit aller nach oben gerichteten Sehnen, d. h. der Verbindungsgeraden zweier innerhalb eines Schraubenganges liegender Punkte stellt die Gesamtheit aller Optimalfarben dar. Die nichtoptimalen Reize, die durch Abschwächung, d. h. Verdunkelung ihrer entsprechenden Optimalreize hergestellt werden können, kommen als Teilstücke der Sehnen zur Darstellung.

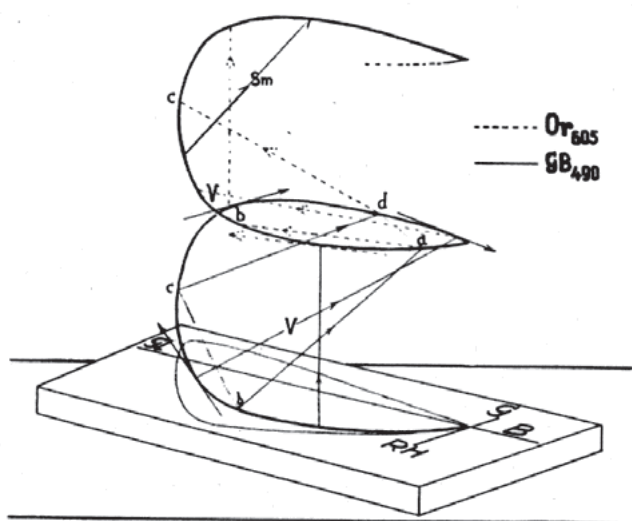


Abb. 15. Perspektivische Darstellung der „Optimalfarbenspirale“. Die Farbreize werden durch Vektoren dargestellt mit den Komponenten: Bläue-Gilbe, Grüne-R(H)öte und Helligkeit. Die eingetragenen Geraden und Buchstaben entsprechen den Bezeichnungen der Abb. 9, 10 und 13. Abb. 9 ist eine senkrechte Parallelprojektion des durch Abb. 15 dargestellten räumlichen Gebildes

Jedem Pigmentfarbenreiz entspricht mit anderen Worten ein bestimmter Vektor, dessen drei senkrechte Komponenten wieder die drei unabhängigen Parameter sind: Helligkeit (senkrecht nach oben) und die beiden Eichmomente (wagerecht). Hieraus ergeben sich in gleicher Weise wie beim vorhin besprochenen Farbreizkörper die übrigen Bestimmungsstücke: Farbton, Hebellänge in der Farbtabelle, Sättigung, Helligkeit des spektralen Anteils usw. Die zur Darstellung der Farbreize dienenden Vektoren dieser „Optimalfarbenspirale“ sind — gleiche Maßstäbe vorausgesetzt — identisch mit den vom Schwarzpunkt ausgehenden Vektoren (Abschnitt 15) des Farbreizkörpers Abb. 12 (untere Reihe) und 13 und sind nur in anderer Weise räumlich angeordnet. Sie sind wieder Linien gleichen Farbcharakters bzw. gleicher Reizart (gleichen Farbtons und gleicher Sättigung), entsprechen den Ostwaldschen „Schattenreihen“ und stehen in Beziehung zu den horizontalen Linien der Abb. 10.

In Abb. 15 sind die gleichen Reize wie in Abb. 9,

13 obere Reihe und 10 links mit gleicher Bezeichnung eingetragen. Die Momentsummenkurve Abb. 9 mit den eingezeichneten Sehnen, Teilsehnen und Tangenten ist eine senkrechte Parallelprojektion der „Optimalfarbenspirale“ Abb. 15.

Auch bei diesem räumlichen Gebilde muß ich mich auf diese kurzen Bemerkungen beschränken und will im zweiten Teil meines Vortrages flüchtig auf einige Fragen der Farbmeßtechnik und der Anwendung der Farbreizlehre eingehen.

20. Von den zahlreichen verschiedenartigen vorgeschlagenen Methoden der Farbmessung und heterochromen Photometrie, die sich übrigens übersichtlich in ein meines Erachtens auch heuristisch wertvolles System einordnen lassen, will ich hier nur an die objektiven Methoden anknüpfen, da sie in unmittelbarer Beziehung zu einigen praktisch wichtigen, im folgenden noch kurz zu besprechenden Problemen stehen.

In gewissem Sinne ist schon die in Abschnitt 3 und 4 besprochene Berechnung der drei Aichreize aus einem experimentell bestimmten Emissions-, Transmissions- oder Remissionsspektrum eine objektive Methode, da die Bestimmung dieser Spektren von den spezifischen Eigenschaften des messenden Auges unabhängig ist und auch mittels objektiver Strahlungsempfänger, z. B. einer Thermosäule, ausgeführt werden kann. Die bei der obigen Methode erforderliche Summierung der Eichreize der einzelnen engen Spektralbezirke über das Gesamtspektrum kann nun auch selbsttätig durch den Apparat bewirkt werden, wie H. Ives²⁸⁾ gezeigt hat.

Bei dem Ivesschen Verfahren (Abb. 16) wird ein Spektrum Sp in der jetzt häufig, z. B. auch in der großen Zeiss-Apparatur benutzten, auf Pouillet und Foucault zurückgehenden Weise durch eine Sammellinse L zu einem gleichmäßig gefärbten Bilde einer in der Nähe des Prismas befindlichen Blende Bl vereinigt. Dieses Bild fällt auf einen geeigneten summierenden Strahlungsempfänger E : Thermosäule, Bolometer, lichtelektrische Zelle oder dgl., der mit einem ebenfalls summierenden Anzeigeinstrument — etwa Galvanometer — verbunden ist. In das Spektrum können verschieden geformte Schablonen Sch eingeführt werden, wodurch dessen Höhe und damit der Energiedurchlaß in den einzelnen Wellenlängenbereichen λ im Verhältnis $Sch_\lambda : 1$ verringert wird, vorausgesetzt, daß der Spalt gleichförmig beleuchtet und das Spektrum hinreichend frei von falschem Licht ist.

Es sei E_λ der Ausschlag, den der Strahlungsempfänger beim Bestrahlen durch den ungeschwächten Ausschnitt des Tageslichtspektrums von der Breite $d\lambda$ bei der Wellenlänge λ im Anzeigeinstrument verursacht. E_λ kann also als die

²⁸⁾ Physic. Rev. 6 (1915). „Künstliches Präzisionsauge“.

spektrale Tageslichtempfindlichkeit des Empfängers im Spektralgebiet λ bezeichnet werden. Nach Einschieben der Schablone ist daher der Ausschlag $A(\lambda)$ gleich $E_\lambda \cdot Sch_\lambda \cdot d\lambda$. Wenn wir nun in den Strahlengang etwa eine farbige Schicht F , deren Durchsichtsfarbe und Helligkeit zu messen sind, einführen und deren Transparenz bei der Wellen-

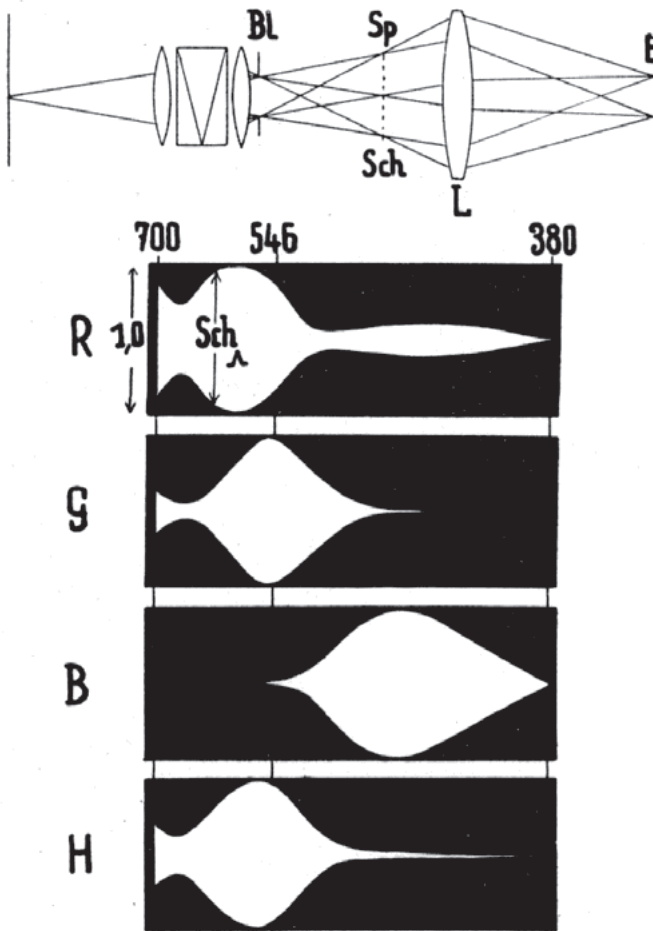


Abb. 16. Strahlengang und Spektralschablonen für die objektive trichromatische Farbenanalyse und die objektive heterochrome Photometrie nach H. Ives

länge λ mit F_λ bezeichnen, so wird der Ausschlag $A(\lambda)$ gleich $E_\lambda \cdot Sch_\lambda \cdot F_\lambda \cdot d\lambda$.

Die Gesamtausschläge mit eingeschalteter Schablone und mit Schablone + farbige Schicht für das gesamte sichtbare Tageslichtspektrum, die man durch Summierung bzw. Integration der Einzelausschläge von $\lambda = 700 \mu\mu$ bis $\lambda = 380 \mu\mu$ erhält, sind

$$\mathfrak{A}_{Sch} = \int_{Sch} A(\lambda) = \int_{Sch} E_\lambda \cdot Sch_\lambda \cdot d\lambda \quad \text{und}$$

$$\mathfrak{A}_{Sch+F} = \int_{Sch+F} A(\lambda) = \int_{Sch+F} E_\lambda \cdot Sch_\lambda \cdot F_\lambda \cdot d\lambda.$$

Wir vergleichen damit die Formeln (Abschnitt 3) für die Mengen etwa von rotem Eichreiz in Tageslichtweiß ohne $\mathfrak{A}_W$ und mit $\mathfrak{A}_{W+F}$ zu messender farbiger Schicht:

$$\mathfrak{A}_W = \int_W R_\lambda \cdot d\lambda \quad \text{und}$$

$$\mathfrak{A}_{W+F} = \int_{W+F} R_\lambda \cdot F_\lambda \cdot d\lambda.$$

Wenn daher die Schablone so ausgeschnitten ist, daß $E_\lambda \cdot Sch_\lambda = R_\lambda$ ist, dann ergibt der Vergleich beider Formelnpaare, daß der Ausschlag $\mathfrak{A}_{Sch+F}$ proportional der Rotreizmenge $\mathfrak{A}_W$ ist. Der Pro-

portionalitätsfaktor ist $\frac{\mathfrak{A}_{Sch}}{\mathfrak{A}_W}$. Dieselben Überlegungen lassen sich natürlich auch für die beiden anderen Eichfarben und die Helligkeit durchführen, so daß eine objektive, d. h. für das „Durchschnittsauge“ gültige Farbmessung und eine ebensolche heterochrome Photometrie ermöglicht ist.

In Abb. 16 sind die von Ives benutzten Schablonen für seine drei Eichreize und die Helligkeit wiedergegeben. Man erkennt die Ähnlichkeit mit den (zugleich nach unten gespiegelten) Kurven der Abb. 1 wieder. Die augenfälligen Abweichungen rühren von spektralen Besonderheiten des Prismas (Dispersion, Absorption) und der Lichtquelle (Kunstlicht mit Tageslichtfilter) her. Die Brauchbarkeit des objektiven Messverfahrens wurde von Ives experimentell erwiesen.

Statt ein durch Schablonen abgeschwächtes Spektrum zu verwenden, kann man natürlich auch unzerlegtes weißes Licht mittels geeigneter Selektionsfilter abschwächen. Die spektrale Transmission T_λ des Filters z. B. für Rotreizbestimmung muß dann natürlich die Bedingung erfüllen: $T_\lambda \cdot E_\lambda = R_\lambda$. In der Tat sind mehrere derartige Selektionsfilter für die objektive heterochrome Photometrie mit „grauen“ Empfängern vorgeschlagen²⁹⁾ und auch mit Erfolg verwendet³⁰⁾ worden. Zur objektiven trichromatischen Farbenanalyse sind dagegen Selektionsfilter nicht vorgeschlagen worden.

21. Wohl aber hat L. Bloch³¹⁾ bei seiner optisch subjektiven Methode der Farbmessung durch trichromatische Filteranalyse diesen Weg beschritten. Die Theorie seiner prinzipiell richtigen Methode ist nach obigem leicht zu übersehen: Es muß in allen Formeln für die spektrale Empfindlichkeit des Empfängers E_λ die spektrale Helligkeitsempfindlichkeit des normalen Tageslichtauges H_λ (Abb. 5) gesetzt werden. Die Transparenz T_λ des Selektionsfilters z. B. für Rotreiz muß, mit anderen Worten, derart von der Wellenlänge abhängen, daß der Ausdruck $\frac{T_\lambda \cdot H_\lambda}{R_\lambda}$ über das ganze Spektrum konstant ist.

²⁹⁾ Vgl. H. Schulz, Das Sehen S. 50. Verl. Enke 1920.

³⁰⁾ H. Ives u. E. Kingsbury, Physic. Rev. **6** (1915)

³¹⁾ Elektrotechn. Zeitschr. 1913.

Für die von mir gewählten drei Eichreize berechnen sich die in Abb. 17 dargestellten, sich teilweise überschneidenden³²⁾ Transmissionskurven der möglichst hell gewählten Filter. Ihre Helligkeit ergibt sich für Rot zu etwa 0,46, für Grün zu etwa 0,74 und für Blau zu etwa 0,04 der Helligkeit des ungefilterten Tageslichtes. In dieser sehr geringen Helligkeit des vom Blaufilter durchgelassenen Lichtes liegt ein Nachteil der an sich sehr bequemen Methode. Zwar läßt sich dieser Übelstand durch Wahl anderer Eichreize etwas mildern, aber

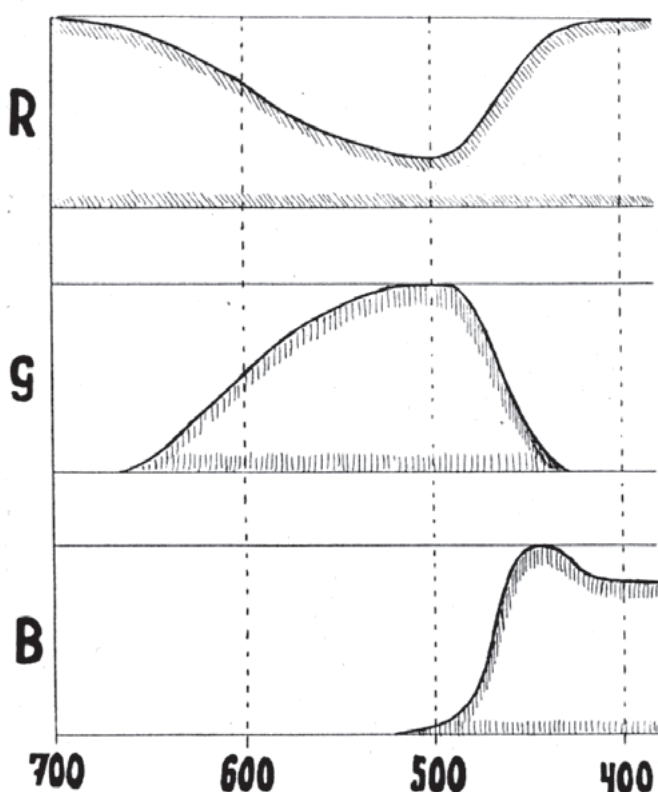


Abb. 17. Theoretische Filter größter Helligkeit für die subjektive trichromatische Farbenanalyse nach L. Bloch.

dies kann nur auf Kosten der Genauigkeit geschehen. Im übrigen sei bemerkt, daß in zahlreichen praktischen Fällen die Transmissionskurven der Selektionsfilter keineswegs genau die theoretischen Forderungen zu erfüllen brauchen: je grauer die auf Farbe zu messende Lichtquelle strahlt, je gleichmäßiger die Re- und Transmissionskurven der zu messenden Farben sind, um so größere Abweichungen von der Theorie sind zulässig. Die von Bloch zur trichromatischen Analyse verwendeten Farbgläser, deren Transmissionskurven ich einer freundlichen brieflichen Mitteilung von Herrn Dr. Bloch verdanke, lassen sich nun mit keiner der bekannten Spektromeichungen in befriedigenden Einklang bringen. Trotzdem stimmen Farbmessungen, die Bloch nach seiner Methode an Temperaturstrahlern ausgeführt hat, sehr gut

mit Zahlen überein, die Ives nach einer ganz abweichenden additiven Methode erhalten hat; bei der Quecksilberbogenlampe treten dagegen, wie zu erwarten, erhebliche Abweichungen auf.

22. An dieser Stelle möchte ich eine kleine Einschaltung machen, die sich auf die Technik der heterochromen Photometrie, z. B. auch mit den nichts weniger als monochromen Filtern nach Abb. 17 bezieht. Es ist bekanntlich sehr schwierig, die Helligkeitsgleichheit oder -ungleichheit beider aneinander stoßenden Teile eines verschiedenfarbigen photometrischen Feldes mit Sicherheit festzustellen. Dies wird aber sofort erleichtert, wenn man nach einem meines Erachtens zu wenig bekannten Vorschlag von Pfund³³⁾ die beiden Hälften eines symmetrischen photometrischen Feldes etwa durch neutralgraue Keile entgegengesetzt abschattiert, wie in Abb. 18 schematisch angedeutet

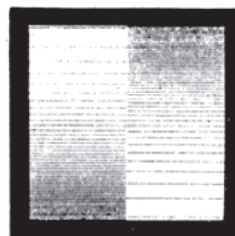


Abb. 18. Photometerfeld nach Pfund für heterochrome Photometrie (schematisch)

ist: es erscheint dann eine schräge 8förmige Figur, aus deren Symmetrie die Einstellung auf Gleichheit verhältnismäßig sicher erkannt werden kann.

Außerlich verwandt hiermit ist ein ebenfalls von Pfund (a. a. O.) angegebenes flimmerphotometrisches Verfahren. Läßt man zwei gleich große, entgegengesetzt abschattierte heterochrome Felder — etwa die beiden Seiten der Abb. 18 — miteinander flimmern, so tritt oben und unten wegen der Helligkeitsverschiedenheit Flimmern ein; dazwischen befindet sich eine flimmerfreie Zone, deren Breite durch Regelung der Flimmerfrequenz auf ein Minimum reduziert, deren Ort durch Verschiebung der Graukeile mit großer Sicherheit auch von Ungeübten in die Mitte des Gesichtsfeldes gebracht werden kann.³⁴⁾

23. Nach dieser meßtechnischen Abschweifung kehre ich zu einem praktisch besonders wichtigen Fall der objektiven trichromatischen Filteranalyse und Synthese zurück: der Dreifarbenphotographie, bei der in gewissem Sinne die Negativplatte die Rolle des „Empfängers“, das Positiv die des „Anzeigeelements“ übernimmt.

³³⁾ Phys. Rev. 4 (1914). Zeitschr. f. Instrum. 35 (1915).

³⁴⁾ Mittels eines Doppelprojektionsapparates mit rotierender Sektorblende am Ort der Lichtquellenbilder kann diese Erscheinung auch einem größeren Auditorium in äußerst effektvoller Weise gezeigt werden.

³²⁾ Vgl. dagegen A. v. Hübl, Physikal. Zeitschr. 18 (1917).

Betrachten wir zunächst den einfachsten Fall: additive Synthese mittels dreier verschiedenfarbig durchleuchteter unbunter Diapositive, sei es durch Übereinanderprojektion, sei es durch Betrachtung im Chromoskop. Die drei Diapositive müssen die Bedingung erfüllen, daß ihre Transparenz an allen Stellen proportional den Lichtmengen ist, die auf die entsprechenden Stellen ihrer Negative eingewirkt hatten. Dies kann mit guter Annäherung erreicht werden.³⁵⁾

Eine Betrachtung des Farbkörpers (Abb. 12 und 13) ergibt dann zunächst die Gesamtheit der

Forderung (Farbton und Helligkeit richtig, Sättigung in konstantem Verhältnis zu der Sättigung der Originalreize) mit einer möglichst großen Sättigung verbinden, so muß man, wie eine einfache Überlegung zeigt, zur additiven trichromatischen Projektion bzw. Betrachtung drei Reize wählen, die den Ecken des inneren Dreiecks der Abb. 19 entsprechen. Jeder enge Ausschnitt der (ausgezogenen) Spektralkurve des Originals wird dann durch den entsprechenden Ausschnitt der weniger gesättigten inneren (gestrichelten) Kurve wiedergegeben. Damit die Sättigung über das

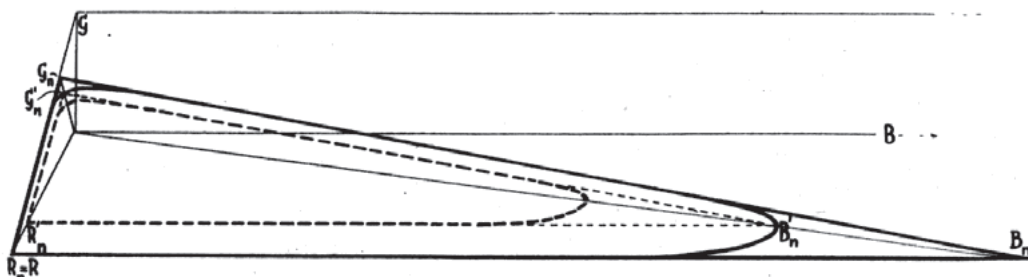


Abb. 19. Auswahl der Projektions- bzw. Betrachtungsfilter R_n' , G_n' , B_n' um sämtliche einfachen und zusammengesetzten Farbzei ton- und hellkeitsrichtig, aber mit konstant verminderter Sättigung ($\approx 3/4$ des Originals) wiedergeben

wiedergehenden Pigmentfarben; sie ergibt aber auch ferner, daß man mit Hilfe dreier recht genau bestimmbarer Optimalfarben durch vektorielle Addition nahezu alle übrigen Pigmentfarbenreize herstellen kann. Diese drei Reize, deren Farbtöne etwa den Wellenlängen 620, 540 und 455 entsprechen, wird man daher bei den additiven Farbmeßverfahren zu wählen haben.

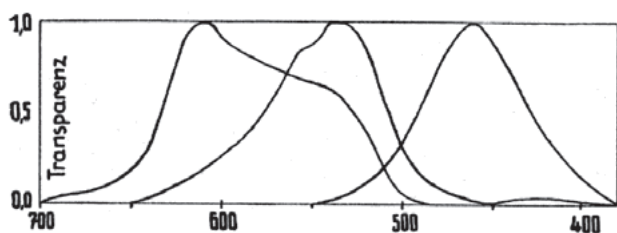


Abb. 20. Spektrale Transparenz der Aufnahmefilter zur additiven Synthese nach Abb. 19 (für eine bestimmte panchromatische Emulsion)

Für die Dreifarbenphotographie sind dagegen diese drei Reize nicht ohne weiteres brauchbar: die Spektral- und Pigmentfarbenreize werden nicht genau hellkeits- bzw. farbtönrichtig bzw. mit einer vom Farbton unabhängigen Sättigung wiedergegeben, oder aber — wenn Farbton und Helligkeit streng richtig und die Sättigung für alle Reize in konstantem Verhältnis verringert wiedergegeben werden sollen — mit einer sehr geringen Sättigung reproduziert. Will man zum mindesten diese letztere

ganze Spektrum und mithin auch in allen Mischreizen konstant und möglichst groß ist, muß eine ganz bestimmte in Abb. 19 angegebene Wahl der beiden Reize G_n und B_n getroffen werden. Die Sättigung in Helligkeitseinheiten beträgt dann überall rund dreiviertel der des Originals.

Für eine bestimmte panchromatische Emulsion berechnen sich unter diesen Voraussetzungen die in Abb. 20 wiedergegebenen Transparenzkurven der Aufnahmefilter. Charakteristisch ist die gegenseitige Überschneidung, die nötig ist, falls auch enge Spektralbezirke (Spektren) „farbenähnlich“ wiedergegeben werden sollen. Falls im Original nur breite Spektralbezirke vorkommen (Pigmentfarben), so können auf Grund mannigfacher Sonderbedingungen und Kompromisse wesentlich andere Projektions- und Aufnahmefilter gewählt werden, doch lassen sich dann bestimmte Regeln nicht mehr aufstellen.

Theoretisch noch schwieriger zu behandeln und daher in der Praxis noch mehr auf Kompromisse angewiesen, sind die additiven Verfahren mit Farbrasterplatten³⁶⁾, bei denen im allgemeinen die Filter für Synthese und Analyse identisch sind, ferner die subtraktiven Verfahren, wie Pinatypie, Uvachromie usw. und endlich die technisch so wichtigen gemischt subtraktiv-additiven Verfahren der Reproduktionstechnik.

24. Bei allen derartigen Kompromissen würde das psychologisch angeordnete System der Farben, ein System, das nach Heringschen „äquidiffe-

³⁵⁾ Hierzu muß das Produkt der Neigungstangenten der „charakteristischen Kurven“ der zueinander gehörigen Negative und Diapositive für Projektion überall den Wert von etwa 0,6, für Chromoskopbetrachtung überall den Wert 1 haben.

³⁶⁾ Vgl. Cl. Schaefer u. K. Ackermann, Diese Zeitschr. 8 (1927).

renten“ Stufen bzw. nach Unterschiedsschwellen eingeteilt ist, von maßgebender Bedeutung sein und viele Willkür ausschließen. Leider ist dieser psychologische Farbkörper noch nicht eindeutig konstruiert. Zwar hat Schrödinger in seiner höheren Farbenmetrik eine allgemeine mathematische Theorie gegeben, zwar sind schon quantitative Ansätze von Ebbinghaus, Höfler, Ostwald und anderen versucht worden, zwar liegt bereits ein ziemlich umfangreiches, quantitatives Beobachtungsmaterial vor über Unterschiedswellen für Helligkeit, Sättigung und Farbton, aber es wird noch mancher experimentellen und geistigen Anstrengung bedürfen, ehe dieses System der psychologischen Ordnung der Farben als einigermaßen abgeschlossen bezeichnet und dem Farbreizsystem einigermaßen gleichwertig zur Seite gestellt werden kann.

25. Erschwerend für die entsprechenden Versuche, andererseits zum Teil erleichternd für die Praxis ist das Hineinspielen von psychischen Erscheinungen des Simultan- und Successivkontrastes, des Wechsels der Farbenstimmung und der Adaptation, der Erfahrungsverknüpfung zwischen Farbe einerseits, Gestalt, Entfernung, Größe andererseits — lauter Erscheinungen, die in überraschend hohem Maße unser Farburteil beeinflussen.

Wer nur ein wenig Erfahrung auf diesem Gebiete hat, wer die auf Goethe und Chevreul zurückgehenden Versuche über Farbenkontrast gesehen hat, wer die verblüffenden Versuche von Hering und Katz über die Erscheinungsweise der Farben wiederholt oder die Versuche über die Beeinflussung des Farbenkontrastes durch Hypnose sich vergegenwärtigt, wer abends in dem weißen Aussehen von lampenlichtbestrahltem Schreibpapier den ungeheuren Spielraum unseres subjektiven Farbniveaus bestaunt und in den Kunstlichtfiltern bei Farbrasteraufnahmen rein subjektive Filter erkannt hat, wer einmal ein farbiges Papierbild mit einem farbigem — additiv oder subtraktiv hergestellten — Projektionsbild und dem farbigem Original selbst verglichen hat, wer den wahrheitsgetreuen Eindruck geschickt, aber objektiv falsch kolorierter Projektionsbilder auf sich hat wirken lassen, wer die bunte Umwelt auf der Kamermattscheibe oder mit Helmholtz „beinlings“³⁷⁾ betrachtet hat, wer über die Empfindungen Schwarz, Weiß, Braun nachgedacht hat, wer beim Betrachten eines guten Zweifarbenfilms staunend Farben gesehen hat, die objektiv gar nicht vorhanden sind, der wird den normalen Einschlag zentraler psychi-

scher Vorgänge in unserer ganzen Stellung zur Farbenmannigfaltigkeit erkennen und mir ohne weiteres darin zustimmen, daß der bekannte Karaffasche Ausspruch: „Mundus vult decipi, ergo decipiatur“ kaum anderswo besser als auf das Gebiet der angewandten Farbenlehre paßt, wenn man für „mundus“ das Wort „oculus“ setzt.

In der Systematisierung dieser „deceptio oculi“, dieser „Augentäuschung“ sehe ich daher eine ganz wesentliche Aufgabe der praktisch angewandten Farbenlehre und glaube, daß dieses schon so häufig in Angriff genommene Gebiet der Farbenempfindungen trotz der Vielseitigkeit seiner Erscheinungen, sich einmal doch noch in ein geschlossenes System zwingen lassen wird, das für den Praktiker vielleicht noch wichtiger sein wird, als für den reinen Wissenschaftler.

Zusammenfassung

Es gibt unendlich viele Parametertriaden, die gleichvollständig die Eigenschaften von Farbreizen darstellen.

Bei der klassischen Drei-Eichreiz-Triade wurde auf den Kunstgriff hingewiesen, die Ermittlung der drei Eichreizmengen aus der Spektralkurve eines Mischreizes durch Verwendung „gleichrot“, „gleichgrün“ und „gleichblau“ angeordneter Spektra praktisch bequemer zu gestalten.

Aus der Newtonschen Schwerpunktsbetrachtung über Farbreizsummierung wurde eine Größe: „Farbmoment“ abgeleitet, die zur Veranschaulichung der von Pilgrim und Schrödinger betonten Beziehungen zwischen dem „Dreifarben-system“ und dem „Vierfarbensystem“ der Farbreize dienen kann.

Mit Hilfe der „spektralen Momentsummenkurve“ lassen sich die beiden Grenzwellenlängen bei farbtongleicher Verbreiterung eines Spektrumausschnittes ohne Mühe graphisch ermitteln.

Ferner läßt sich feststellen, daß die Ostwaldschen „Vollfarben“ auch im Sinne der klassischen Farbreizlehre einen ausgezeichneten Fall darstellen: sie enthalten die größte Menge Spektralreiz, den eine farbtongleiche Pigmentfarbe überhaupt enthalten kann.

Insbesondere lassen sich drei für Pigmentfarbenreiz wichtige dreidimensionale Farbkörper konstruieren: a) ein (Grassmann-Helmholtz-scher) Körper (mit den Koordinaten: Farbton, Sättigung, Helligkeit), der außerdem den Spektralausschnitt der „Optimalfarben“ abzulesen gestattet; b) eine „Optimalfarben-Spirale“ (mit den Koordinaten: Bläue-Gilbe, Grüne-R(H)öte, Helligkeit), die ebenfalls den Spektrumausschnitt der „Optimalfarben“ abzulesen gestattet, und endlich c) ein (Hering-Maxwellscher) „Pigmentfarbenreizkörper“ mit den gleichen Koordinaten.

³⁷⁾ Das lustige gleichnamige Gedicht von Hans Hoffmann mit dem Anfang:

Ich traf einen wunderlichen Mann,
Der sah das Land sich beinlings an,
Hängend nämlich den Kopf durch seine
Selbsteigen ihm gewachsenen Beine usw.
bezieht sich vielleicht auf Helmholtz.

Letztere Konstruktion ermöglicht eine unmittelbare Übersicht über die Beziehung der Ostwaldschen Parametertriade zur klassischen Farbreizlehre und über die im Ostwaldschen System fehlenden Pigmentfarbenreize.

Im Anschluß an die von Ives eingeführte objektive Methode der Farb- und Helligkeitsmessung wurde die Theorie der Blochschen Methode der Farbmessung durch subjektive trichromatische Filteranalyse besprochen.

Durch additive Dreifarbenphotographie kann man sämtliche zusammengesetzten und einfachen Farbreize farbtön- und helligkeitsrichtig, aber mit konstanter relativer Sättigungsverminderung gegenüber dem Original wiedergeben.

An die große praktische Bedeutung der psychischen Erscheinungen bei der Beurteilung von Farbempfindungen wurde erinnert.

(Eingegangen am 20. September 1927)

English version of Luther's article:

<http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&ved=0CDUQFjAB&url=http%3A%2F%2Fiscc.org%2Fpdf%2FLutherColorStimMetrics.pdf&ei=Y5YVU7rylqq8ygO73YKICA&usg=AFQjCNHgvMOF2MYWfBSY-ZXCOvNf33EOLA&bvm=bv.62286460,d.bGQ>

Or search by

Luther Farbreizmetrik Brill

The english version is based on my PDF, which contains reassembled scans from the Physikalisch Technische Bundesanstalt.

Gernot Hoffmann