Bemerkung über den Zusammenhang zwischen Photometrie und Kolorimetrie

Autor(en): **König, H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **14 (1941)**

Heft VII

PDF erstellt am: **03.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-111197

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Bemerkung über den Zusammenhang zwischen Photometrie und Kolorimetrie

von **H. König** (Bern).
(Mitteilung aus dem Eidg. Amt für Mass und Gewicht.)

(25. IX. 1941.)

Die Brücke zwischen Photometrie und Kolorimetrie erblickt man in der erstmals bei ABNEY auftauchenden Beziehung

$$V(\lambda) = \varrho \bar{r}(\lambda) + \gamma \bar{g}(\lambda) + \beta \bar{b}(\lambda) \tag{1}$$

$V(\lambda)$: Hellempfindlichkeitsfunktion

$\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$: kolorimetrische Grundreizfunktionen

ϱ, γ, β: konstante Koeffizienten

Hiernach soll die Helligkeit eine lineare Eigenschaft der Farben sein.

Zweck dieser Notiz ist *1)* den recht komplexen Sinn dieser Gleichung durch Zerlegung in die verschiedenen Bedeutungsmöglichkeiten dem Verständnis zugänglicher zu machen und *2)* einen kleinen Beitrag zur Frage ihrer zahlenmässigen Gültigkeit zu leisten.

1) Das „Hell"-Sein erscheint jedermann als eine selbstverständliche Eigenschaft eines jeden farbigen Lichtes. Wir haben insbesondere keinen Grund, nebeneinanderliegende, vollkommen gleich aussehende, strukturlose farbige Flächen anders als „gleich hell" zu definieren.

Um die Bedeutung dieser Feststellung richtig zu überblicken, müssen wir uns an das namentlich durch SCHRÖDINGER geklärte Verhältnis der Kolorimetrie zur Photometrie erinnern. Dem Übergang von der Kolorimetrie zur Photometrie entspricht

phänomenologisch (experimentell): Der Übergang von Farbgleichungen zu Farb-*Un*gleichungen;

empfindungsmässig: Der Übergang vom einfachen Urteil der vollständigen Gleichheit zum höheren, eine deutliche Überwindung kostenden Urteil über Gleichhelligkeit trotz vorhandener Ungleichfarbigkeit;

mathematisch: Der Übergang von der affinen zur metrischen Mannigfaltigkeit oder, wie man auch sagt, von der niederen zur höheren Farbenmetrik.

Hiernach hat der Helligkeitsbegriff in irgendeiner Form mit der in obigem Sinne abgegrenzten Kolorimetrie nichts zu tun. Die oben als selbstverständlich hingestellte, mit dem Farbeindruck

automatisch gekoppelte „kolorimetrische Helligkeit" (siehe unten die Funktion V_k) ist ein unnötiges Anhängsel, von dem man in der reinen Kolorimetrie nie Gebrauch macht.

Die heterochrome Photometrie andererseits führt, etwas übertrieben gesagt, zu ebenso vielen „photometrischen Helligkeiten", als es Messmethoden und Messbedingungen zur Definition bzw. Realisierung des Begriffs „gleichhell" gibt. Wir brauchen uns nicht zu wundern, wenn z. B. die Flimmer-Hellempfindlichkeiten (siehe unten die Funktionen V_f), wie sie durch das Flimmerverfahren bei verschiedenen Leuchtdichten für verschiedene Flimmerfeldgrössen gewonnen werden, wegen des Mitsprechens des Empfindungsanstieges an die 10% anders ausfallen als die statisch definierten, z. B. durch Direkt-Vergleich realisierten Hellempfindlichkeiten (siehe unten die Funktionen V_d). Für letztere aber können die Messbedingungen für den kolorimetrischen und den photometrischen Versuch, abgesehen vom grundsätzlichen Unterschied, gleich gewählt werden: 2 symmetrische, statische Felder, gleiche Form und Grösse, gleiche Leuchtdichte bei beiden Versuchen.

Es widerspricht nun unserm tief eingewurzelten Bedürfnis nach Vereinfachung, in dieser letzgenannten „photometrischen Hellempfindung" etwas wesenhaft anders erblicken zu wollen als die „kolorimetrische Hellempfindung". Damit wird eine Brücke geschlagen, die in hohem Masse den Stempel der Selbstverständlichkeit, d. h. unserer Betrachtungsweise trägt, aber keine Selbstverständlichkeit ist, denn: Im Augenblick, da man über ungleichfarbige Flächen das Urteil „gleichhell" fällt, ersetzt man die intuitive, kolorimetrisch unnötige, photometrisch unbestimmte „kolorimetrische Helligkeit" durch die experimentelle, durch Apparat, Auge und Entschlusskraft definierte „photometrische Helligkeit". Wir transformieren den Begriff dadurch, dass wir mit ihm zu arbeiten beginnen.

Wir haben uns bisher bemüht, uns möglichst „theoriefrei" auszudrücken. Nun ist die Struktur sowohl der kolorimetrischen als auch der photometrischen Grössen in 1. Näherung linear. Die lineare Theorie, die man daher aufstellen darf und die sehr viele Forscher stückweise mit dem experimentellen Befund verwechseln, gibt uns die Möglichkeit, uns nicht nur symbolisch, sondern in einer der Zahlenrechnung zugänglichen Form auszudrücken:

Kolorimetrie: 3 Grassmann'sche Axiome, die die Linearität, 3-Dimensionalität und Stetigkeit des Farbraumes fordern; es existieren 3 Funktionen $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$; sie geben die unabhängigen Beiträge von Spektrallichtern gleicher Energie zum Rot-, Grün-, Blaueindruck an. $R = \int S(\lambda) r(\lambda) d\lambda$ misst die Rotkomponente der Strahlungsdichte $S(\lambda)$.

Photometrie: Forderung der Linearität; es existiert eine Funktion $V(\lambda)$, welche die unabhängigen Beiträge von Spektrallichtern gleicher Energie zum Helligkeitseindruck angibt.

$B = \int S(\lambda) V(\lambda) d\lambda$ misst die Leuchtdichte der Strahlungsdichte $S(\lambda)$.

In dieser linearen Ausdrucksweise muss die Forderung, dass (kolorimetrisch) „gleich" auch „gleich hell" für alle möglichen $S(\lambda)$ in sich schliesse, zur Form (1) führen, denn man kann beweisen, dass in der allgemeinen Form

$$V(\lambda) = \varrho \bar{r}(\lambda) + \gamma \bar{g}(\lambda) + \beta \bar{b}(\lambda) + f(\lambda) \tag{2}$$

($f(\lambda)$ *nicht* eine Linearkombination von $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$)

$f(\lambda)$ wegzulassen sei: Für 4 Strahlungen $S^i(\lambda)$ findet man wegen der 3-Dimensionalität stets Koeffizienten C_i, $i = 1 \cdots 4$ derart, dass gleichzeitig $\sum_i C_i \int S^i(\lambda) V(\lambda) d\lambda = 0$ und $\sum_i C_i \int S^i(\lambda) [\varrho \bar{r}(\lambda) + \gamma \bar{g}(\lambda) + \beta \bar{b}(\lambda)] d\lambda = 0$ wird, so dass $\sum_i C_i \int S^i(\lambda) f(\lambda) d\lambda = 0$ sein muss, was der Voraussetzung über $f(\lambda)$ widerspricht.

Der Vollständigkeit halber erwähnen wir, dass natürlich bei den Bestrebungen zur Vereinheitlichung der Licht- und Farbbewertung der Beziehung (1) der gebührende Platz eingeräumt wurde. Einer Änderung der Wahl des Farbdreiecks entspricht eine lineare Transformation der $\bar{r}(\lambda) \ldots$ und eine dazu kontravariante Transformation von ϱ, γ, β. Nachdem die Internationale Beleuchtungskommission 1924 ($V(\lambda, \text{int})$ gewählt hatte, wurde 1931 von ihr $\bar{r}(\lambda), \ldots$ auf die damaligen besten Messungen und auf $V(\lambda, \text{int})$ so abgestimmt, dass nach der Transformation ϱ, γ, β zu $0, 1, 0$ und $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ zu den sog. Normalreizfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda, \text{int})$, $\bar{z}(\lambda)$ wurden. Es brauchten also wegen (1) nur noch $\bar{x}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ festgelegt zu werden.

Erst jetzt sind wir in der Lage, die Frage nach der experimentellen Kontrollierbarkeit von (1) zu *formulieren.*

Wir schreiben (1) für die „kolorimetrische Hellempfindlichkeit" an:

$$V_k(\lambda) = \varrho_k \bar{r}(\lambda) + \gamma_k \bar{g}(\lambda) + \beta_k \bar{b}(\lambda). \tag{1a}$$

Fasst man die rechte Seite von (1a) symbolisch (nicht algebraisch) als Ausdruck für das gewogene Zusammenwirken der Teilbeiträge zu einem Ganzen auf, dann ist die Gleichung als Definition beliebig genau, aber sie dient nicht als Rechenbehelf. Kontrollierbar ist sie also nicht; sie ist aber trotzdem nicht sinnlos, weil sie den Anschluss an die Photometrie anbahnt.

Fasst man (1a) gewöhnlich algebraisch auf, dann ist sie in dem Masse, als $\bar{r}(\lambda), \cdots$ bestimmbar sind (s. unten), eine *angenäherte* Beschreibung eines *richtigen* Sachverhaltes. Der Addition auf der rechten Seite ist kein Experiment zugeordnet; ϱ, γ, β

müssen in der reinen Kolorimetrie unbestimmt bleiben, weil sie nur durch photometrische Experimente bestimmbar sind.

Während (1a) der Ausdruck ist für die Art und Weise, wie wir beurteilen wollen, stellen die Gleichungen mit gemessenem $V(\lambda)$ — wir greifen als Beispiele nur die Typen $V_d(\lambda)$ und $V_f(\lambda)$ heraus — kontrollierbare Zahlengleichungen dar:

$$V_d(\lambda) = \varrho_d \bar{r}(\lambda) + \gamma_d \bar{g}(\lambda) + \beta_d \bar{b}(\lambda) \tag{1b}$$

$$V_f(\lambda) = \varrho_f \bar{r}(\lambda) + \gamma_f \bar{g}(\lambda) + \beta_f \bar{b}(\lambda). \tag{1c}$$

Die ganze Entwicklung hat gezeigt, dass die Linearität beim photometrischen Direktvergleich mangelhaft erfüllt ist, und (1b) kann nicht besser stimmen, als V_d überhaupt bestimmbar ist. Entsättigt man die zu vergleichenden Lichter durch Zumischen von Weiss (Kohlrausch), so scheint die Mannigfaltigkeit dadurch linearisiert zu werden. Die Genauigkeit der Kontrolle leidet aber darunter. Schrödinger (Müller-Pouillet, Optik 1 (1926), S. 549) glaubt in den Ergebnissen von Kohlrausch Abweichungen von der Gültigkeit von (1b) von einigen Prozent zu erkennen.

Beim Flimmervergleich ist wegen der hohen Güte des Kriteriums „gleichhell = flimmerfrei" die Abhängigkeit von $V(\lambda)$ von den Messbedingungen am leichtesten bestimmbar. Aber gerade hier überraschen uns Abweichungen von (1c) am wenigsten, denn:

Die kolorimetrischen Untersuchungen werden oft mit grösserem Feld ausgeführt als die photometrischen. Wegen der abgetönten Gelbfärbung der Netzhautmitte ist ein Unterschied in der Feldgrösse der Vorschaltung eines Gelbfilters gleichwertig. Ein Farbfilter ist aber im allgemeinen nicht durch andere Wahl von ϱ, γ, β auszugleichen. Folglich ist anzunehmen, dass die photometrischen $V(\lambda)$ von einer Linearkombination von $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ im allgemeinen abweichen.

Aber auch wenn man diese Filterwirkung in Abzug bringt, so bleibt immer noch der Empfindungsanstieg, der beim Flimmern wirksam ist, beim Direktvergleich und in der Kolorimetrie jedoch nicht, so dass man sich auf komplizierte Abweichungen von (1c) gefasst machen muss.

Zusammenfassend und zugleich etwas schematisierend können wir also sagen:

Wo die Beziehung (1) als Selbstverständlichkeit auftritt, ist sie nicht kontrollierbar;

wo sie nahezu als selbstverständlich erscheint (es aber nicht ist), und wo die Abweichungen von ihrer Gültigkeit theoretisch besonders interessant wären, sind dieselben schwer feststellbar und bis heute auch nicht mit Sicherheit festgestellt worden, und

wo die Abweichungen leicht festzustellen sind und auch in geringem Mass festgestellt wurden, beziehen sich linke und rechte Seite auf verschiedene Apparaturen und Messbedingungen, so dass man sich über diese Abweichungen nicht wundern darf und sie wohl registrieren, aber nicht interpretieren kann.

2) Die zahlenmässige Prüfung von (1c) (Flimmer-$V(\lambda)$), mit welcher allein wir uns hier befassen wollen, kann auf zwei Arten erfolgen:

a) Indem man versucht, durch passende Wahl von $\varrho_f, \gamma_f, \beta_f$ V_f gemäss (1c) möglichst gut darzustellen, und

b) indem man die Beeinflussbarkeit von V_f, im besonderen die Abhängigkeit von V_f von der Leuchtdichte, als

$$\Delta V_f(\lambda) = \Delta \varrho_f \bar{r}(\lambda) + \Delta \gamma_f \bar{g}(\lambda) + \Delta \beta_f \bar{b}(\lambda) \tag{3}$$

darzustellen versucht.

Bei b) fallen die wahren Werte von $\bar{r}(\lambda), \cdots$ weniger ins Gewicht als bei a). Kontrolle b) verdient also theoretisch höheres Interesse.

Es ist bekannt, dass Farbgleichungen, und damit $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{b}(\lambda)$ etwas sehr Stabiles sind; zwei verschieden zusammengesetzte, gleich aussehende Lichter *sind* offenbar für unser Auge dasselbe, denn eine Farbgleichung ist, abgesehen vom Gebiet des Dämmerungssehens (Purkinje) und der Blendung (Wright), in einem Leuchtdichtebereich, der einen Faktor 2 umfasst, von der Leuchtdichte *innerhalb* 1% unabhängig.

In einer demnächst erscheinenden Arbeit von Lüthy werden neue sorgfältig bestimmte Werte für $V_f(\lambda)$ in Abhängigkeit von der Leuchtdichte mitgeteilt.

Zu a) Diese $V_f(\lambda)$-Funktionen sind, wenn man vom Blau absieht, *auf etwa 3%* des Maximalwertes von V_f gemäss (1c) darstellbar.

Zu b) Bei mittleren Leuchtdichten (50 · · · 500 asb) beträgt ΔV_f je Leuchtdichteänderung um einen Faktor 2 einige Prozent, maximal 4% (des Maximalwertes von V_f) im Rot. ΔV_f ist nun *zwischen 470 mμ und 650 mμ auf etwa 1%* (des Maximalwertes von V_f) *genau* gemäss (3) darstellbar.

Im Hinblick auf die vorliegende Analyse der Gleichung (1) wurde von Lüthy (l. c.) die Leuchtdichteabhängigkeit einer Farbgleichung im Gebiet stärkster Beeinflussbarkeit von V_f, also im Rot, flimmerphotometrisch untersucht; es wurde das mit 2 mm OG 3 (Schott) gefilterte Licht einer Glühlampe gegen gleich aussehendes Spektrallicht ($\lambda = 620$ mμ) abgeglichen, und zwar bei Leuchtdichten zwischen 35 und 500 asb.

Für einen Farbtüchtigen ergab sich ein *Gang von ca. 1%*, für einen Deuteranomalen ein solcher von ca. ½% je Änderung der Leuchtdichte um einen Faktor 2.

Es ist nicht leicht, theoretisch auszudrücken, was bei dieser Messung überhaupt geschieht. Da es sich um eine Farb*gleichung* handelt, da man sich also im Gebiet der reinen Kolorimetrie bewegt, ist dafür gesorgt, dass man von einer Abhängigkeit der unbestimmten Koeffizienten ϱ, γ, β von der Leuchtdichte nichts merkt. Insofern stellt dieser Versuch die direkteste Kontrolle einer Gleichung vom Typus (3) dar. Aber die $\bar{r}(\lambda), \cdots$, welche hierbei wirksam sind, sind nicht die kolorimetrisch bestimmten $\bar{r}(\lambda)$, um die es sich bis jetzt stets gehandelt hat, sondern um flimmerphotometrisch wirksame, uns einstweilen unbekannte Funktionen.

Auf beiden Wegen kommen wir jedenfalls grössenordnungsmässig zum *Ergebnis:* Trotz des verschiedenartigen Ursprungs der beteiligten Funktionen ist die zwischen Flimmerphotometrie und Kolorimetrie denkbare *Verknüpfungsgleichung (1c)* in bezug auf die Abhängigkeit der beteiligten Funktionen von der Leuchtdichte in einem einen Faktor 2 umspannenden Bereich der letzteren *innerhalb 1—2%* (des Maximalwertes) *sinnvoll.*

Trotzdem messtechnische Gründe die Einheitlichkeit des Gesamtgebietes stören und Kolorimetrie und heterochrome Photometrie voneinander reissen, so dass (1) nur theoretische Bedeutung zu bewahren scheint, gibt es einen praktischen Fall, in welchem die beiden Teilgebiete in den Anwendungen zusammenstossen und der Gültigkeitsgrad von (1) als Gültigkeitsgrad eines praktischen Verfahrens unmittelbar in Erscheinung tritt, nämlich der Fall des trichromatischen Verfahrens der heterochromen Photometrie. Bei diesem Verfahren handelt es sich darum, durch Herstellung zweier Farbgleichungen zwei Lichter L_1 und L_2 in die Komponenten R_1, G_1, B_1 und R_2, G_2, B_2 zu zerlegen und das Verhältnis der Leuchtdichten B_1 und B_2 nach der Formel

$$\frac{B_1}{B_2} = \frac{\varrho R_1 + \gamma G_1 + \beta B_1}{\varrho R_2 + \gamma G_2 + \beta B_2}$$

zu berechnen. Die ganze Kenntnis über $V(\lambda)$ konzentriert sich in den drei Koeffizienten ϱ, γ, β, die hier bekannt sein müssen. Gleichung (1) erscheint bei diesem Verfahren als erstes Axiom, und für die Übereinstimmung dieses und anderer photometrischer Verfahren, im besonderen des Flimmerverfahrens, gilt grössenordnungsmässig all das, was oben über die Gültigkeit von (1) gesagt wurde.