

Versuchsanleitung 09 : Farbmeterik / Remission

1 Einleitung

Zuweilen bezeichnet man umgangssprachlich mit dem Begriff Farbe irreführend z. B. Farbstoffe (Pigmente), die man in der Drogerie kauft, um seine Wohnung zu verschönern.

Demgegenüber wird in der Farbmeterik mit Farbe der Sinneseindruck bezeichnet, der in unserem Gehirn infolge des Eintretens einer physikalischen Strahlung in das Auge entsteht. Es handelt sich dabei um die elektromagnetische Strahlung in dem Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm, die wir als sichtbares Licht bezeichnen. Wenn der durch die objektive physikalische Erscheinung hervorgerufene subjektive physiologische Eindruck quantitativ beschrieben werden soll, bedient man sich der Farbmeterik.

Diese spielt überall dort eine Rolle, wo die Bewertung bestimmter (nämlich farbiger) Eigenschaften von Gegenständen durch das menschliche Auge objektiviert werden soll. Dabei kann es sich um modische, künstlerische oder technische, kurz beliebige Gegenstände handeln. In ganz besonderem Maße trifft das auf polygraphische Erzeugnisse wie Farbdrucke zu. Die Technologie der Herstellung polygraphischer Erzeugnisse ist nur mit einer fundierten Farbmessung reproduzierbar zu bewerkstelligen. Aus diesem Grunde muss sich der mit diesen Problemen befasste Ingenieur das physikalische Rüstzeug aneignen. Der vorliegende Versuch soll dazu einen Beitrag leisten.

2 Grundlagen

Der Farbeindruck wird durch drei Einflussgrößen bestimmt:

- die Lichtquelle mit ihrer spektralen Leistungsverteilung
- der Gegenstand mit seinen spektralen Remissionseigenschaften
- das Auge mit seinen spektralempfindlichen Rezeptoren.

Die spektralen Strahlungseigenschaften der Lichtquelle werden durch eine physikalische Größe, die spektrale Strahlungsdichte $L_\lambda = \frac{\partial L}{\partial \lambda}$ beschrieben. Sie gibt für jede Wellenlänge λ an, wieviel Strahlungsleistung pro

Fläche der Strahlungsquelle in einen bestimmten Raumwinkel $d\omega$ und im Wellenlängenintervall $d\lambda$ ausgesandt wird. Die Größe L_λ ist eine Funktion der Wellenlänge und wird in $\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-3}$ gemessen, oft wird der spektrale Verlauf auch nur in relativen Einheiten angegeben. Alle Strahlungsquellen besitzen ihre spezifischen spektralen Strahlungsverteilungen.

Bei konstant gehaltenen geometrischen Mess- bzw. Betrachtungsbedingungen ist L_λ proportional dem spektralen Strahlungsfluss $\frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda)$, der unmittelbar mit einem Messinstrument oder dem Auge erfasst wird. In die nach-

folgenden Beziehungen geht deshalb dieser spektrale Strahlungsfluss $\frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda)$ ein (vgl. Bild 1).

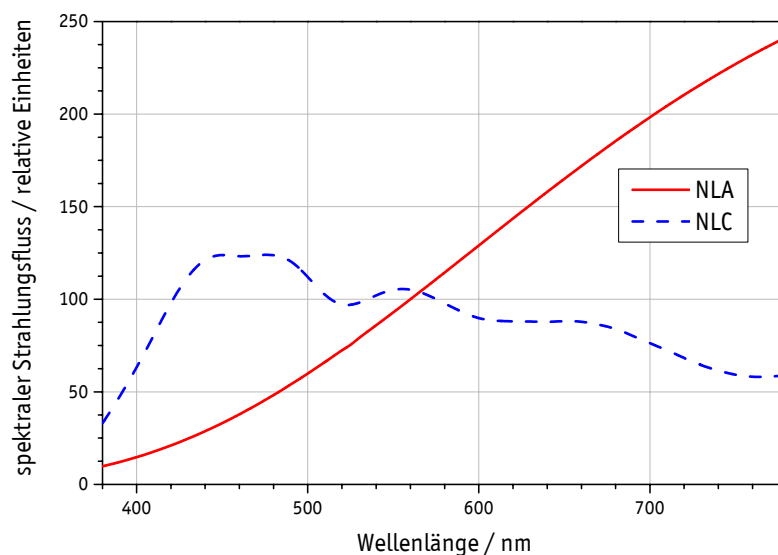
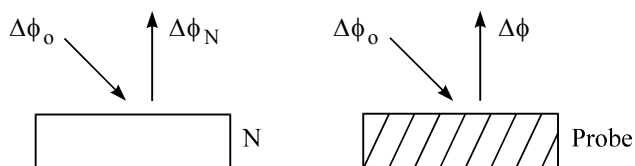


Bild 1 Der spektrale Strahlungsfluss für die Normlichtarten A und C in relativen Einheiten

Für die Reflexion des Lichtes an einem zu untersuchenden Gegenstand sind dessen Eigenschaften durch seinen spektralen Remissionsgrad $\beta(\lambda)$ bestimmt. Es gilt mit den Bezeichnungen des Bildes 2



$$\text{Remissionsgrad } \beta(\lambda) = \frac{\Delta\phi(\lambda)}{\Delta\phi_N(\lambda)} .$$

Bild 2 Zur Definition des spektralen Remissionsgrades $\beta(\lambda)$
 (N bedeutet Weißnormal, $\Delta\phi(\lambda)$ und $\Delta\phi_N(\lambda)$ sind die Teilstrahlungsflüsse in einem kleinen Intervall $\Delta\lambda$ um eine bestimmte Wellenlänge λ)

Als Beispiel wird im Bild 3 für drei Druckfarben Gelb (Yellow), Blaugrün (Cyan) und Purpur (Magenta) der spektrale Remissionsgrad $\beta(\lambda)$ dargestellt.

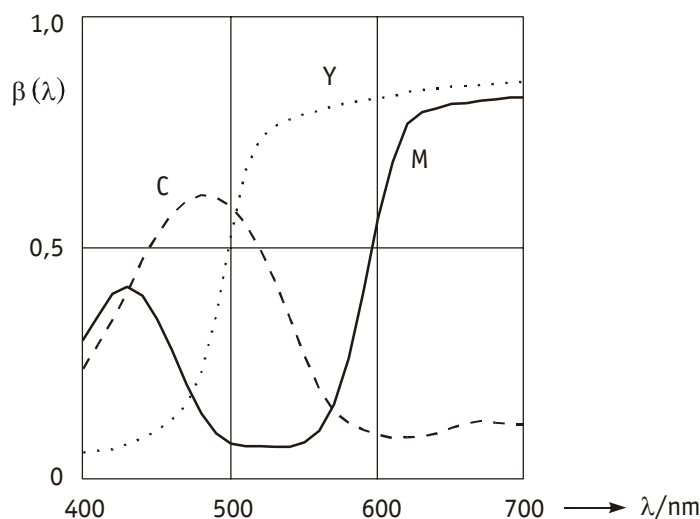


Bild 3 Beispiele für den spektralen Remissionsgrad $\beta(\lambda)$ für drei Druckfarben

Die Farbreizfunktion $\varphi(\lambda)$ ist das Produkt aus dem von der Lichtquelle herrührenden spektralen Strahlungsfluss und der Remissionsfunktion

$$\varphi(\lambda) = \frac{\partial\phi}{\partial\lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) . \quad (2-1)$$

Die Farbreizfunktion $\varphi(\lambda)$ ist objektiv, d. h. sie ist unabhängig von den spektralen Empfindungseigenschaften des Auges. Sie erfasst die physikalischen Ursachen der Farbempfindung und verursacht auf den Rezeptoren im Auge Reize, die an das Hirn weitergeleitet werden und dort den physiologischen Farbsinneseindruck hervorrufen.

Da auf der Netzhaut des Auges drei Arten von Rezeptoren unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit existieren, gibt es drei verschiedene Reizarten, die das Hirn zu einem Sinneseindruck zusammensetzen kann. Die unterschiedlichen Spektralempfindlichkeiten der drei Augenrezeptoren werden durch die Normspektralwerte $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ beschrieben. Diese sind standardisiert und in Bild 4 dargestellt.

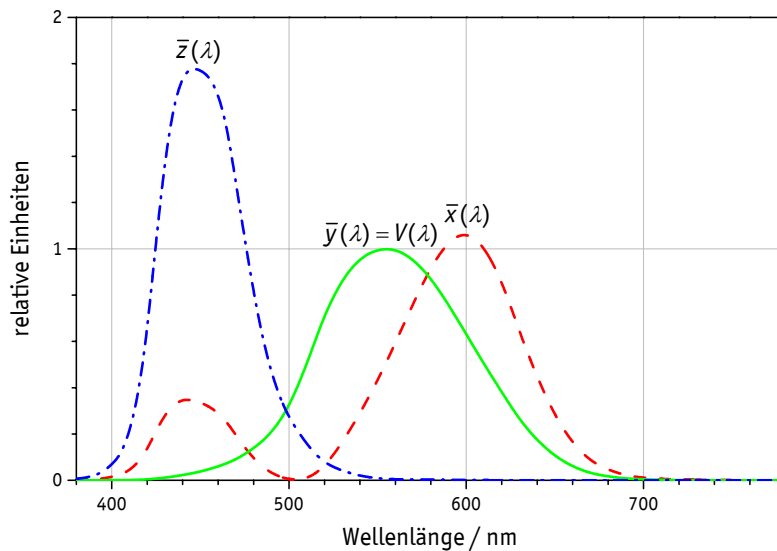


Bild 4 Die Normspektralwerte des Auges

In der Praxis werden verschiedene Systeme eingesetzt, um die Farbempfindung quantitativ zu bemessen. Von diesen werden hier das CIE-Normvalenzsystem und das CIELAB-System beschrieben und ihr Zusammenhang dargestellt.

Beide Farbsysteme gehen von den Normfarbwerten X , Y , Z aus. Die physikalischen Ursachen [die Farbreizfunktion $\phi(\lambda)$] und die physiologischen Eigenschaften des Auges [Normspektralwerte $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$] werden zu neuen Größen X , Y , Z zusammengefasst, die den Sinnesreizen entsprechen. Diese werden im Gehirn zu einer Farbempfindung zusammengesetzt. Im Falle der Remission gelten die nachstehenden Beziehungen, wobei der Faktor $\frac{1}{k}$ ein noch zu bestimmender Proportionalitätsfaktor ist

$$X = \frac{1}{k} \int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda, \quad Y = \frac{1}{k} \int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda, \quad Z = \frac{1}{k} \int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (2-2)$$

Im Falle der Transmission gelten analoge Beziehungen für X , Y , Z , wobei statt $\beta(\lambda)$ die spektrale Transmission $\tau(\lambda)$ zu schreiben ist.

Die Integration ist über den sichtbaren Spektralbereich von 380 nm bis 780 nm durchzuführen. Da die Normspektralwerte unterhalb 400 nm und oberhalb 700 nm sehr klein werden und dort nur unwesentlich zu den Normfarbwerten beitragen, begeht man nur einen unwesentlichen Fehler, wenn man die Integration von 400 nm bis 700 nm führt. Dieser Umstand ist in den Bildern 1, 3, 4 berücksichtigt worden.

Die Tatsache, dass das menschliche Auge sehr empfindlich für grünes Licht (500 nm) und relativ unempfindlich für blaues (400 nm) und rotes (700 nm) reagiert, wird durch den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ beschrieben. $V(\lambda)$ hat den gleichen Verlauf wie der Normspektralwert $\bar{y}(\lambda)$. Es gilt $V(\lambda) \equiv \bar{y}(\lambda)$. Damit ist es möglich, einen Helligkeitsbezug zu definieren. Man betrachtet dazu ein Weißnormal, für das bei allen Wellenlängen $\beta(\lambda) = 1$ gilt. Für dieses Weißnormal legt man den Helligkeitswert $Y_N = 100$ fest. Es gilt nach (2-2)

$$Y_N = \frac{1}{k} \int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot 1 \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda = 100. \quad (2-3)$$

Damit ist der Faktor $\frac{1}{k}$ bestimmt.

Will man eine beliebige Körperfarbe nur bezüglich ihrer Helligkeit (unabhängig von ihrem Farbton) mit dem Weißnormal vergleichen, so dient hierfür der Hellbezugswert Y . Für diesen gilt

$$Y = 100 \cdot \beta_v = 100 \cdot \frac{\int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot 1 \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}, \quad (2-4)$$

β_v wird als visueller Remissionsgrad bezeichnet.

Die Normfarbwertanteile x , y , (z) im CIE-Normalvalenzsystem erhält man durch Normierung der einzelnen Normfarbwerte auf die Summe der drei Normfarbwerte

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad , \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad , \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad . \quad (2-5)$$

Es gilt automatisch $x+y+z=1$. Der sogenannte Farbort kann daher in einer zweidimensionalen Darstellung - der Normfarbtafel - als Punkt dargestellt werden (Bild 5). Den Hellbezugswert Y gibt man zusätzlich an, um die Farben einer bestimmten Farbart, die alle den gleichen Farbort einnehmen, hinsichtlich ihrer Helligkeit zu unterscheiden.

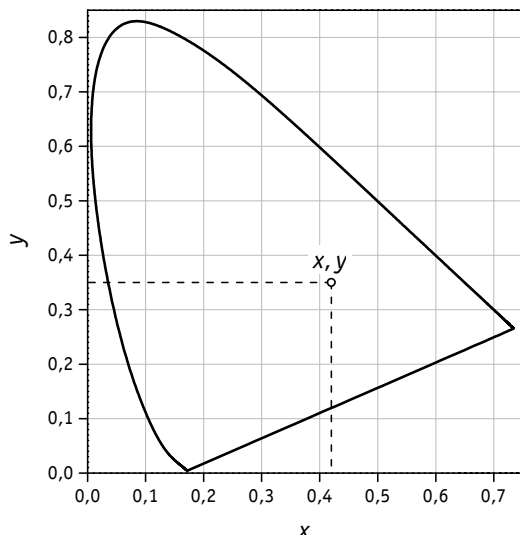


Bild 5 Normfarbtafel zur Darstellung der Farborte

Jede in der Natur vorkommende Farbe kann in der auf dem Bild 5 geschlossen umrandeten Fläche als ein Punkt dargestellt werden. Die reinen Spektralfarben findet man auf dem gekrümmten Rand. Der Farbort des Weißnormals liegt im Regelfall im zentralen Bereich der umrandeten Fläche und ändert sich mit dem Spektrum der Lichtquelle. Dieser Farbort wird mit Unbunt bezeichnet. Farborte auf der Verbindungsgeraden zwischen Unbunt und einem Randpunkt haben den gleichen Farbton, aber unterschiedliche Sättigung. Zur Berandung hin nimmt die Sättigung einer Farbe zu. Der gerade Teil der Berandung heißt Purpurgerade und entsteht durch additive Mischung von spektralem Rot und spektralem Blau. Punkte außerhalb der geschlossenen Fläche haben in der Natur keine Entsprechung als Farbe.

Man erhält die Koordinaten des Unbuntpunktes, indem in die Beziehungen (2-2) der Normfarbwerte $\beta(\lambda) \equiv 1$ gesetzt wird. Will man die Abweichungen einer Körperfarbe von der Farbe der Lichtquelle deutlich herausheben, so sucht man eine Darstellung (Bild 6) in deren Zentrum sich das Unbunt befindet. Die folgenden mathematischen Transformationen berechnen aus den bekannten Normfarbwerten X , Y , Z die CIELAB-Werte a^* , b^* und L^* .

Die Werte a^* und b^* charakterisieren den Farbort. L^* ist ein Maß für die Helligkeit des Körpers. Bei der Aufstellung der angewendeten Transformationen wurden gleichermaßen das physiologische Empfinden für gleichabständige Farborte als auch für gleichabständige Helligkeit berücksichtigt. Insofern ist dieses CIELAB-Farbsystem dem physiologischem Empfinden des Auges besser angepasst als das CIE-Normalvalenzsystem und wird in der Praxis zunehmend öfter angewendet. Die Umrechnung erfolgt nach

$$X^* = \sqrt[3]{\frac{X}{X_i}} \quad , \quad Y^* = \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_i}} \quad , \quad Z^* = \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_i}} \quad (2-6)$$

$$a^* = 500(X^* - Y^*) \quad , \quad b^* = 200(Y^* - Z^*) \quad , \quad L^* = 116 Y^* - 16 \quad . \quad (2-7)$$

Der Index i an den Normfarbwerten X_i , Y_i , Z_i bezeichnet die Normlichtart i . Die graphische Darstellung wird üblicherweise gemäß Bild 6 vorgenommen.

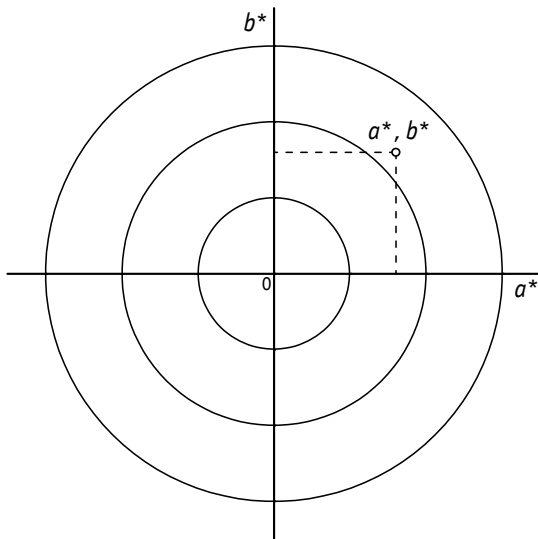


Bild 6 CIELAB-Darstellung der Farborte

3 Versuchsanordnung

Das im Versuch eingesetzte Einstrahlspektrometer als Farbmessgerät ist im Bild 7 schematisch dargestellt. Von der Lampe (LA) der Lichtquelle CLH 300 wird das Licht über ein Lichtleitkabel (LK) zum über der Probe (P) stehenden Messkopf (MK) geleitet und unter 45° auf die Probe (P) gestrahlt. Unter einem Winkel von 0° nimmt ein Lichtleitkabel (LK) das remittierte Licht auf und leitet es zum Spektrometer MCS 400. Dort wird es auf ein Hologrammgitter (HG) geleitet, das die spektralen Anteile infolge Beugung in verschiedene Richtungen lenkt. So kann das von der Diodenzeile (DZ) empfangene Signal zur Darstellung des Spektrums dienen, das mittels eines Rechners (PC) auf einem Monitor (M) angezeigt wird. Mittels der Tastatur (T) wird der Rechner gesteuert.

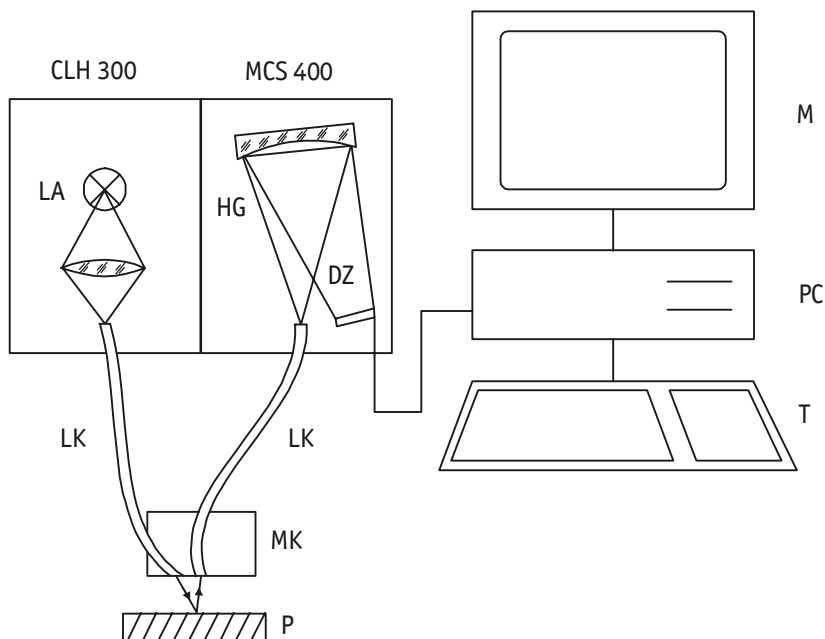


Bild 7 Schema des Einstrahlspektrometers (Remissionsmessung)

4 Aufgaben

- 4.1 Ordnen Sie die auf der vorliegenden Probe befindlichen sechs Farben, das Papier und das Weißnormal nach der von Ihnen empfundenen Helligkeit. Notieren Sie das Ergebnis.
- 4.2 Messen Sie an den sechs Farbflächen der Probe, an dem unbedruckten Papier und an dem Weißnormal die Remissionsspektren. Erfassen Sie die Messwerte $(X, Y, Z, x, y, a^*, b^*, L^*)$ in einer Tabelle.
- 4.3 Ordnen Sie die untersuchten Flächen nach der objektiv (für NL A und NL C) gemessenen Helligkeit $(Y$ und $L^*)$. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem von 4.1.
- 4.4 Tragen Sie die Farborte aller gemessenen Proben in ein CIELAB-Diagramm und in die Normfarbtafel ein.
- 4.5 Kennzeichnen Sie in der Normfarbtafel die Farbverschiebung für die beiden Farborte der Magenta-Probe bei NL A und NL C.
- 4.6 Bestimmen Sie mit Hilfe der Normfarbtafel graphisch durch Extrapolation der Verbindungsgeraden der Farborte für Gelb und Unbunt auf den Rand der Kurve die farbtongleiche Wellenlänge λ_f für NL A und für NL C.

5. Fragen

- 5.1 Skizzieren Sie die relativen spektralen Strahlungsflüsse der Normlichtarten A und C.
- 5.2 Auf weißes Papier werden die Druckfarben Gelb und Purpur (Magenta) übereinandergedruckt. Erläutern Sie anhand der spektralen Eigenschaften, welche Farbe dadurch entsteht.
- 5.3 Skizzieren Sie die Normspektralwerte des menschlichen Auges.
- 5.4 Erläutern Sie die Konstruktion zur Bestimmung der farbtongleichen Wellenlänge λ_f bei gegebenem Farbort (x, y) .
- 5.5 Schreiben Sie die Definitionsgleichung des Normfarbwertes X (des CIE-Normvalenzsystems) auf und erklären Sie die dabei verwendeten Größen.
- 5.6 Gegeben ist eine Farbe F_1 mit $X_1 = 54$, $Y_1 = 63$ und $Z_1 = 18$. Welche Normfarbwerte müsste eine Farbe F_2 mit $X_2 = 18$ besitzen, um der gleichen Farbart wie F_1 anzugehören?
- 5.7 Wie ist im CIE-Normvalenzsystem der Hellbezugswert definiert?
- 5.8 Erläutern Sie die Bedingungen für die Messung des spektralen Remissionsgrades $\beta(\lambda_0)$ bei gegebener Wellenlänge λ_0 .
- 5.9 Eine Farbe besitzt die Normfarbwerte $X = 50$, $Y = 70$, $Z = 10$. Berechnen Sie ihren Farbort in der CIE-Normfarbtafel.
- 5.10 Die Farborte F_1 , F_2 und F_3 haben in der CIELAB-Farbtafel folgende Lage:
 $F_1: (a^* < 0, b^* = 0)$, $F_2: (a^* = 0, b^* = 0)$, $F_3: (a^* = 0, b^* > 0)$. Um welche Farbarten handelt es sich?

Literatur

- [1] Bergmann, L. und Schäfer, C. : Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III, Optik
Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1993
ISBN : 3-11-012973-6
- [2] Etzold, F. : Lichttechnik (1. - 3. Lehrbrief)
(ehemalige) Zentralstelle des MHF, Dresden, 1987
Bestell-Nr. : 02 1850 010/020/030
- [3] Richter, M. : Einführung in die Farbmeterik
Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1981
ISBN : 3-11-008209-8