

## Versuchsanleitung 09 : Farbmeterik / Remission

### 1 Einleitung

Umgangssprachlich werden mit dem Begriff Farbe meist Zubereitungen mit Farbstoffen oder Pigmenten bezeichnet, wie man sie beispielsweise im Baumarkt kaufen kann, um Hauswände oder Wohnungen zu streichen. Demgegenüber versteht man in der Lichttechnik unter Farbe den Sinneseindruck, der in unserem Gehirn infolge des Eintretens einer sichtbaren Strahlung in das Auge entsteht. Es handelt sich dabei um elektromagnetische Strahlung in einem Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 780 nm. Die Beschreibung des quantitativen Zusammenhangs zwischen den objektiven physikalischen Strahlungsgrößen und dem durch sie hervorgerufenen subjektiven physiologischen Sinneseindruck ist Aufgabe der Farbmeterik.

Diese spielt überall dort eine Rolle, wo die Bewertung farbiger Eigenschaften von Gegenständen durch das menschliche Auge objektiviert werden soll. Dabei kann es sich um beliebige Gegenstände wie zum Beispiel modische, künstlerische oder technische Objekte handeln. In ganz besonderem Maße trifft das auch auf polygraphische Erzeugnisse wie beispielsweise Farbdrucke zu. Die Technologie der Herstellung solcher Produkte ist nur mit einer fundierten Farbmessung reproduzierbar möglich. Ebenso erfordert der Umgang mit Farben auch auf anderen Gebieten der Produktion oder Bearbeitung von Medien ein sicheres Verständnis für den Zusammenhang von Licht, Objekt und Wahrnehmung. Deshalb ist die Beherrschung der farbmeterischen Grundlagen eine wesentliche Voraussetzung für eine Ingenieurstätigkeit auf diesem Gebiet. Der vorliegende Versuch führt Sie in einige dieser Grundlagen und ihre Anwendung ein.

### 2 Grundlagen

Der Farbeindruck, den wir von einer Oberfläche wahrnehmen, wird durch drei Einflussgrößen bestimmt:

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

Die elektromagnetische Strahlung, die eine Lichtquelle emittiert, transportiert Leistung, die in der Lichttechnik als Strahlungsfluss  $\Phi$  bezeichnet und in der Einheit Watt (W) gemessen wird. Die Verteilung des Strahlungsflusses auf die Wellenlängen der Strahlung ist charakteristisch für eine Lichtquelle. Sie wird als spektraler Strahlungsfluss  $\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda)$  bezeichnet und in der Einheit W/nm angegeben. Anschaulich beschreibt diese Funktion die Leistung  $\partial \Phi$ , die von der Strahlung innerhalb eines winzigen Wellenlängenintervalls  $\partial \lambda$  um die Wellenlänge  $\lambda$  transportiert wird (vgl. Bild 1).

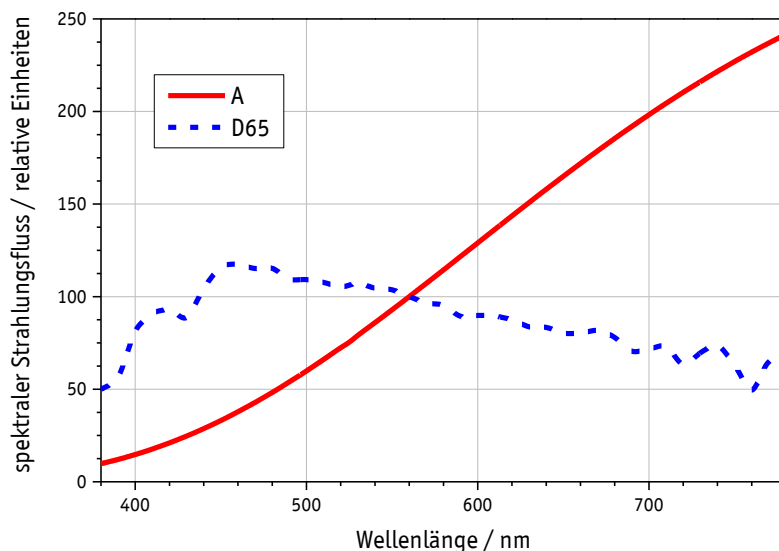


Bild 1 Der spektrale Strahlungsfluss für die Normlichtarten A und D65 in relativen Einheiten

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

$$\beta(\lambda) = \frac{\Delta\Phi(\lambda)}{\Delta\Phi_N(\lambda)} \quad (2-1)$$

Darin sind  $\Delta\Phi(\lambda)$  und  $\Delta\Phi_N(\lambda)$  die Teilstrahlungsflüsse in einem kleinen Intervall  $\Delta\lambda$  um eine bestimmte Wellenlänge  $\lambda$ .

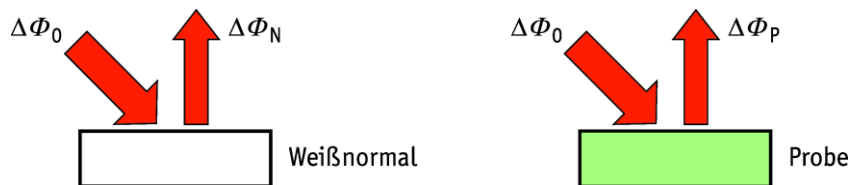


Bild 2 Zur Definition des spektralen Remissionsgrades  $\beta(\lambda)$

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

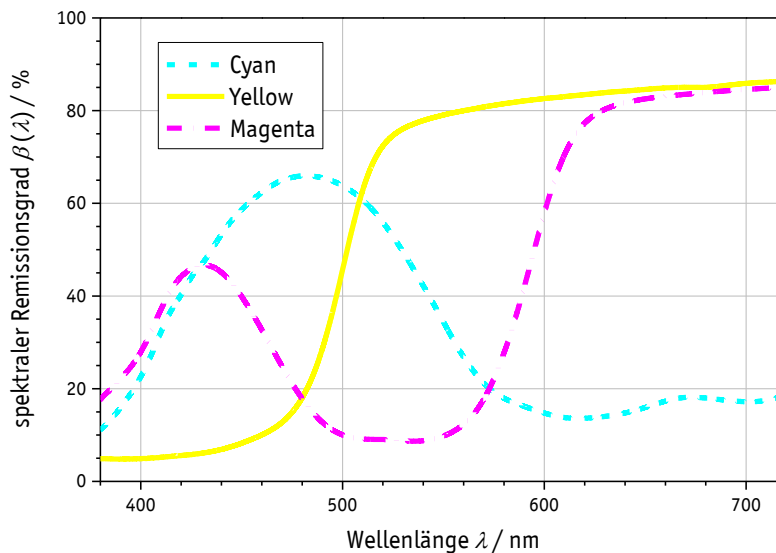


Bild 3 Beispiele für den spektralen Remissionsgrad  $\beta(\lambda)$  für drei Druckfarben

Die Farbreizfunktion  $\Phi(\lambda)$  ist das Produkt aus dem von der Lichtquelle herrührenden spektralen Strahlungsfluss  $\frac{\partial\Phi}{\partial\lambda}(\lambda)$  und der Remissionsfunktion  $\beta(\lambda)$  und beschreibt somit den nach Wechselwirkung der Strahlung mit dem Objekt auf das Auge auftreffenden spektralen Strahlungsfluss:

$$\Phi(\lambda) = \frac{\partial\Phi}{\partial\lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \quad (2-2)$$

Die Farbreizfunktion  $\Phi(\lambda)$  ist objektiv, d. h. sie ist unabhängig von den spektralen Empfindlichkeitseigenschaften des Auges. Sie erfasst die physikalischen Ursachen der Farbempfindung und beschreibt quantitativ den Reiz der Rezeptoren im Auge. Diese erzeugen in Abhängigkeit vom Reiz neuronale Signale, welche mittels der Sehnerven an das Hirn weitergeleitet werden und dort den physiologischen Farbsinneseindruck hervorrufen.

Auf der Netzhaut des Auges existieren drei Arten von Rezeptoren mit unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten. Jede Art erzeugt bei Bestrahlung mit einem bestimmten spektralen Strahlungsfluss ein individuelles Nervensignal. Das Hirn stellt dann die relativen Anteile der einzelnen Signalstärken am Gesamtsignal in Form einer Einfärbung des Sehfeldes dar. 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.

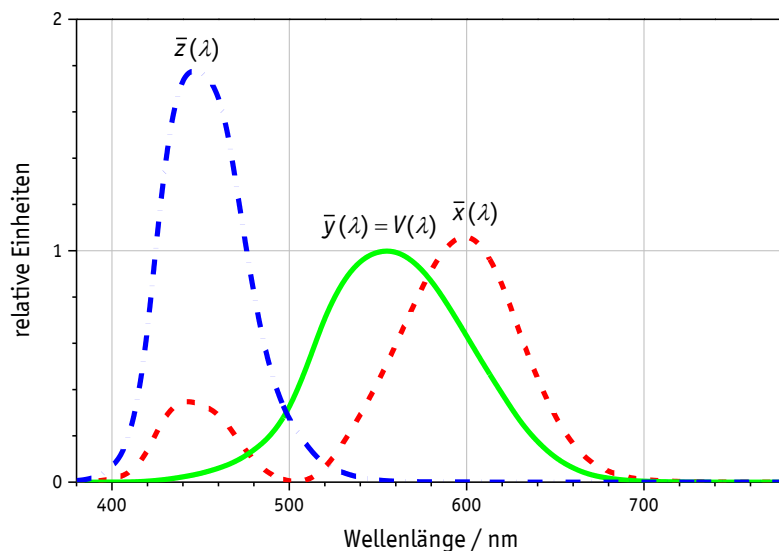


Bild 4 Die Normspektralwerte des Auges

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

Beide Farbsysteme gehen von den Normfarbwerten  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  aus, die als die Stärke der Ausgangssignale der drei Zapfentypen interpretiert werden können. Sie ergeben sich aus den physikalischen Ursachen der Farbwahrnehmung, also der Farbreizfunktion  $\Phi(\lambda)$ , und den physiologischen Eigenschaften des Auges, also den Normspektralwerten  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ , aus folgenden Beziehungen:

$$X = \frac{1}{k} \cdot \int \Phi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad Y = \frac{1}{k} \cdot \int \Phi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad Z = \frac{1}{k} \cdot \int \Phi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad (2-3)$$

wobei der Faktor  $\frac{1}{k}$  ein noch zu bestimmender Proportionalitätsfaktor ist. Im Falle der Remission gehen diese Bestimmungsgleichungen in die nachstehenden Beziehungen über:

$$\begin{aligned} X &= \frac{1}{k} \int \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \\ Y &= \frac{1}{k} \int \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \\ Z &= \frac{1}{k} \int \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \quad . \end{aligned} \quad (2-4)$$

Im Falle der Transmission gelten analoge Beziehungen für  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , wobei statt  $\beta(\lambda)$  die spektrale Transmission  $\tau(\lambda)$  zu verwenden 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 Bild 3 berücksichtigt worden.

Die Tatsache, dass das menschliche Auge sehr empfindlich auf Strahlung in der Mitte des sichtbaren Spektralbereichs (550 nm) reagiert, zu den Rändern hin aber schnell an Empfindlichkeit verliert, 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, die Helligkeit, in der eine Oberfläche einem Betrachter erscheint, zu bestimmen und in Bezug zur Helligkeit einer Referenzoberfläche zu setzen. Als Referenz definiert man ein sogenanntes Weißnormal, für das bei allen Wellenlängen  $\beta(\lambda) = 1$  gilt und das vollständig diffus reflektiert. Für dieses Weißnormal legt man den Helligkeitswert  $Y_N = 100$  fest. Es gilt nach (2-4)

$$Y_N = \frac{1}{k} \int \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot 1 \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda = 100 \quad . \quad (2-5)$$

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

$$Y = 100 \cdot \beta_V = 100 \cdot \frac{\int \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot 1 \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (2-6)$$

$\beta_V$  wird als visueller Remissionsgrad bezeichnet.

Entscheidend für die Farbe, die das Hirn einer bestimmten Strahlung zuordnet, sind allerdings nicht die Absolutwerte der Normfarbwerte sondern deren relative Verhältnisse. Deshalb definiert man im CIE-Normalvalenzsystem die Normfarbwertanteile  $x, y, z$  durch Normierung der einzelnen Normfarbwerte auf die Summe der drei Normfarbwerte

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad , \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad , \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2-7)$$

Folglich sind die Normfarbwertanteile nicht unabhängig voneinander, denn es gilt:  $x+y+z=1$ . 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.

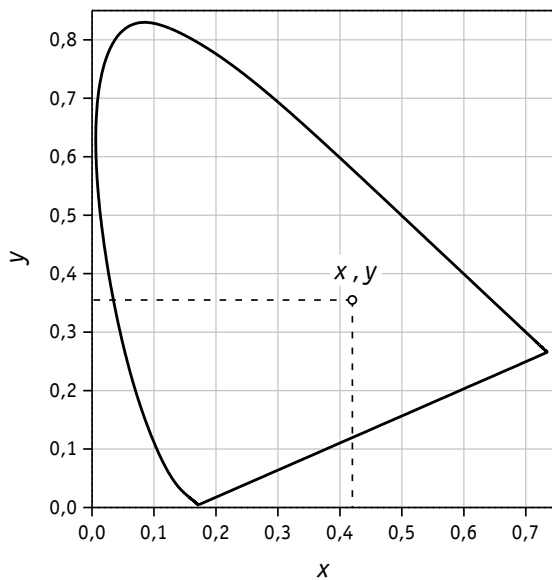


Bild 5 Normfarbtafel zur Darstellung der Farborte

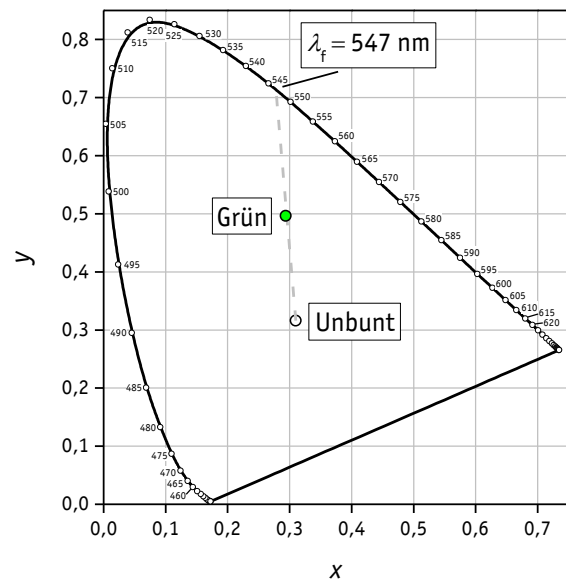


Bild 6 Ermittlung der farbtongleichen Wellenlänge  $\lambda_f$  (bzgl. des Unbuntpunktes)

Jede in der Natur vorkommende Farbe kann in der auf dem Bild 5 geschlossen umrandeten Fläche als ein Punkt dargestellt werden. Die reinen Spektralfarben, das heißt die Farborte monochromatischer Strahlung, findet man auf dem gekrümmten Rand, dem sogenannten Spektralfarbenzug. Der Farbort des Weißnormals hängt vom Spektrum der Lichtquelle ab und liegt für einen ausgeglichenen spektralen Strahlungsfluss, also für  $\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) = \text{konst.}$  („Leistungsgleiches Spektrum“) bei  $x=y=\frac{1}{3}$  im zentralen Bereich der umrandeten Fläche.

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. Wird die Verbindungsgerade zwischen Unbunt und einem betrachteten Farbort  $x, y$  zum gekrümmten Rand verlängert, so kann am Schnittpunkt von Verlängerung und Berandung die zum Farbort  $x, y$  gehörende farbtongleiche Wellenlänge  $\lambda_f$  abgelesen werden (Bild 6).

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.

Für einen beliebigen spektralen Strahlungsfluss erhält man die Koordinaten des Unbuntpunktes, indem in den Beziehungen (2-4) der Normfarbwerte  $\beta(\lambda) \equiv 1$  gesetzt wird.

Die Normfarbwertanteile und ihre Darstellung in der Normfarbtafel ergeben sich unmittelbar aus den Eigenschaften der Rezeptoren im Auge, berücksichtigen aber nicht die weitere Signalverarbeitung im Gehirn. Dabei wird u.a. versucht, der Strahlung der Lichtquelle die Farbe Unbunt zuzuweisen (Weißabgleich). Um dem physiologischen Farb- und Helligkeitsempfinden näher zu kommen, werden deshalb die Normfarbwerte  $X, Y$  und  $Z$  einer Probe im CIE Lab-System folgendermaßen transformiert:

$$X^* = \sqrt[3]{\frac{X}{X_i}} \quad , \quad Y^* = \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_i}} \quad , \quad Z^* = \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_i}} \quad , \quad (2-8)$$

$$a^* = 500(X^* - Y^*) \quad , \quad b^* = 200(Y^* - Z^*) \quad , \quad L^* = 116 Y^* - 16 \quad . \quad (2-9)$$

Die Normfarbwerte  $X_i, Y_i, Z_i$  sind hier diejenigen, die für die betreffende Beleuchtungssituation für das Weißnormal erhalten werden. Im CIE Lab-System charakterisieren die Werte  $a^*$  und  $b^*$  den Farbort.  $L^*$  ist ein Maß für die Helligkeit des Körpers. Im CIE Lab-System liegt folglich der Farbort der beleuchtenden Strahlung immer im Koordinatenursprung. Bei der Aufstellung der angewendeten Transformationen wurden gleichermaßen das physiologische Empfinden für gleichabständige Farborte als auch für gleichabständige Helligkeit berücksichtigt. Insofern ist dieses CIE Lab-Farbsystem dem physiologischen Empfinden des Auges besser angepasst als das CIE-Normvalenzsystem und wird in der Praxis zunehmend öfter angewendet. Die graphische Darstellung wird üblicherweise gemäß Bild 7 vorgenommen.

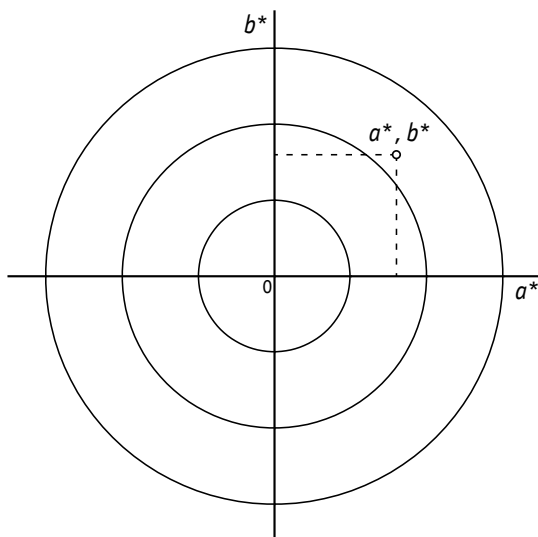


Bild 7 CIE Lab-Darstellung der Farborte

### 3 Versuchsanordnung

Im Versuch werden das Weißnormal beziehungsweise die Proben durch eine in den Messkopf eingebaute Halogenglühlampe bestrahlt. Sie ist so im Messkopf verbaut, dass ihr Licht die Probe unter einem Winkel von  $45^\circ$  gegenüber der Flächennormalen trifft. Das unter  $0^\circ$ , also senkrecht von der Probe zurückgestrahlte Licht wird in eine Glasfaser eingekoppelt und zur Analyse an ein Spektrometer geleitet. In diesem werden die unterschiedlichen Wellenlängenanteile des einfallenden Lichts durch ein Gitter räumlich getrennt und die Teilflüsse der einzelnen Wellenlängenintervalle mittels eines Detektorarrays gemessen. Der gemessene spektrale Strahlungsfluss wird an den angeschlossenen Computer übertragen und steht dort für die weitere Auswertung zur Verfügung.

Auf dem Computer sind auch die spektralen Flüsse für verschiedene Normlichtarten, u.a. des Tageslichts (NL D65) und einer Glühlampe (NL A), sowie die Normspektralwerte des menschlichen Auges gespeichert. Mit ihnen können die Normfarbwerte und weitere farbmtrische Größen für die untersuchten Oberflächen berechnet werden.

#### **4 Aufgaben**

- 4.1 Betrachten Sie das ausliegende Bild unter Beleuchtung mit den drei zur Verfügung stehenden Lichtquellen und beschreiben Sie die Unterschiede in den Farbeindrücken.
- 4.2 Ordnen Sie die auf der vorliegenden Probe befindlichen sechs Farben, das Papier und das Weißnormal nach der von Ihnen empfundenen Helligkeit unter Angabe der im Praktikumslabor vorherrschenden Beleuchtungssituation, also z.B. der Beleuchtung mit Tageslicht, dem Licht der Deckenleuchten (Leuchtstofflampen), dem Licht der LED-Leuchte am Arbeitsplatz oder einer Mischbeleuchtung aus zwei oder mehreren der genannten Lichtquellen. Notieren Sie das Ergebnis.
- 4.3 Messen Sie an den sechs Farbflächen der Probe, an dem unbedruckten Papier und an dem Weißnormal die Remissionsspektren.
- 4.4 Erfassen Sie die Messwerte  $x$ ,  $y$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$  für alle Proben in jeweils einer Tabelle für NL A und einer für NL D65.
- 4.5 Tragen Sie die Farborte aller gemessenen Proben in ein CIELAB-Diagramm und in die Normfarbtafel ein.
- 4.6 Ordnen Sie die untersuchten Flächen nach der objektiv ( für NL A und NL D65 ) gemessenen Helligkeit ( $L^*$ ). Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem von 4.2.
- 4.7 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  $\lambda_f$  für NL A und für NL D65.

#### **5. Fragen**

- 5.1 Skizzieren Sie die relativen spektralen Strahlungsflüsse der Normlichtarten A und D65.
- 5.2 Auf weißes Papier werden die Druckfarben Gelb und Purpur (Magenta) übereinandergedruckt. Erläutern Sie anhand der spektralen Eigenschaften dieser Druckfarben, in welcher Farbe das bedruckte Papier bei Beleuchtung mit Tageslicht dadurch erscheint.
- 5.3 Skizzieren Sie die Normspektralwerte des menschlichen Auges.
- 5.4 Schreiben Sie die Definitionsgleichung des Normfarbwertes  $X$  (des CIE-Normvalenzsystems) auf und erklären Sie die darin vorkommenden Größen.
- 5.5 Erläutern Sie die Konstruktion zur Bestimmung der farbtongleichen Wellenlänge  $\lambda_f$  bei gegebenem Farbort  $(x, y)$ .
- 5.6 Gegeben ist eine Farbe  $F_1$  mit  $X_1 = 54$ ,  $Y_1 = 63$  und  $Z_1 = 18$ . Welche Normfarbwerte  $Y_2$  und  $Z_2$  müsste eine Farbe  $F_2$  mit  $X_2 = 18$  besitzen, um den selben Farbort in der Normfarbtafel einzunehmen?
- 5.7 Welche Bedingungen sind an das Weißnormal zu stellen?
- 5.8 Von welchen Einflussfaktoren ist die wahrgenommene Helligkeit einer Oberfläche abhängig?
- 5.9 Worin unterscheiden sich zwei Farben, die zwar bei unterschiedlichen Farborten in der Normfarbtafel liegen, die aber die selbe farbtongleiche Wellenlänge besitzen?
- 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, 2004
- [ 2 ] Leute, U.: Optik für Medientechniker: Optische Grundlagen der Medientechnik, Carl Hanser Fachbuchverlag, 2011
- [ 3 ] Gall, D.: Grundlagen der Lichttechnik: Kompendium, Pflaum, 2007
- [ 4 ] Richter, M. : Einführung in die Farbmeterik, Walter de Gruyter, 2011