

Versuchsanleitung 0 11 : Farbmeterik / Transmission

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 Φ 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 λ transportiert wird (vgl. Bild 1).

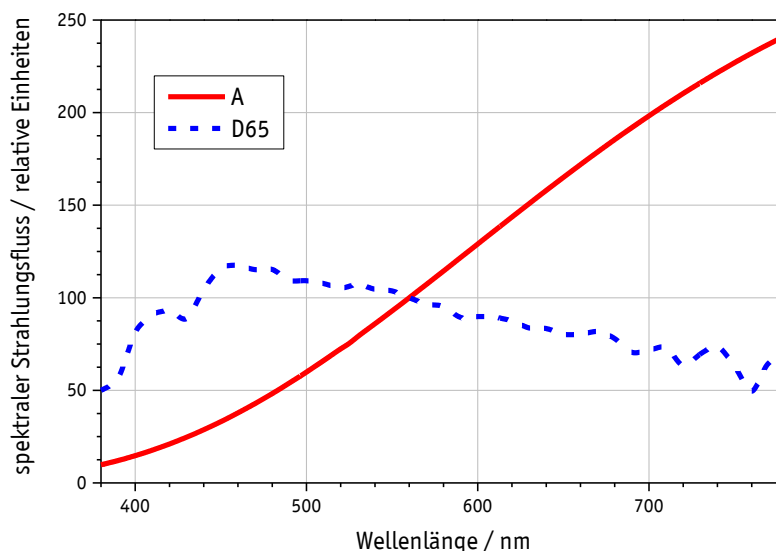


Bild 1 Der spektrale Strahlungsfluss für die Normlichtarten A und D65 in relativen Einheiten

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.

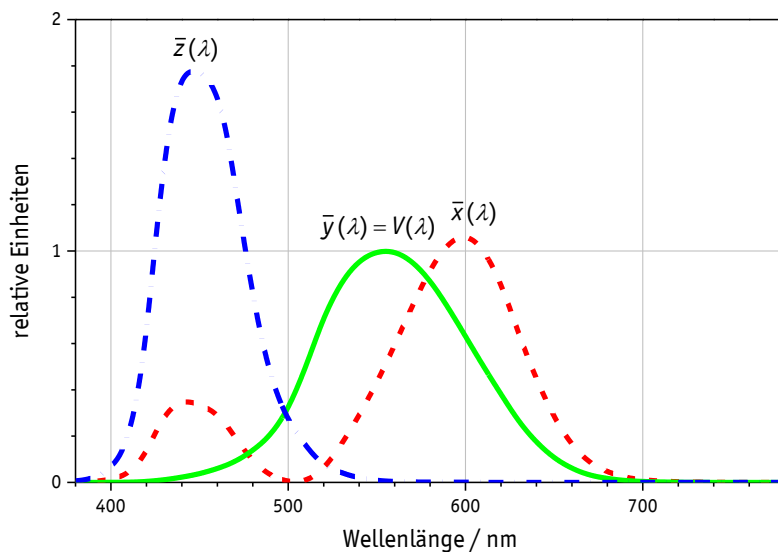


Bild 4 Die Normspektralwerte des Auges

In der Praxis werden verschiedene Systeme eingesetzt, um die Farbwahrnehmung quantitativ zu beschreiben. 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 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:

$$X = \frac{1}{k} \int \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \quad ,$$

$$Y = \frac{1}{k} \int \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad (2-4)$$

$$Z = \frac{1}{k} \int \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \quad .$$

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, einen Helligkeitsbezug zu definieren. Man betrachtet dazu ein Transmissionsnormal, für das bei allen Wellenlängen $\tau(\lambda) = 1$ gilt. Praktisch wird dafür der Leerwert gemessen, d. h. die Probe aus der Halterung entfernt. Für dieses Normal legt man den Helligkeitswert $Y_N = 100$ fest und bezieht alle anderen Helligkeitswerte auf diesen Normalwert Y_N . Es gilt

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

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

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

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

Das Verhältnis τ_V wird als visueller Transmissionsgrad 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

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

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.

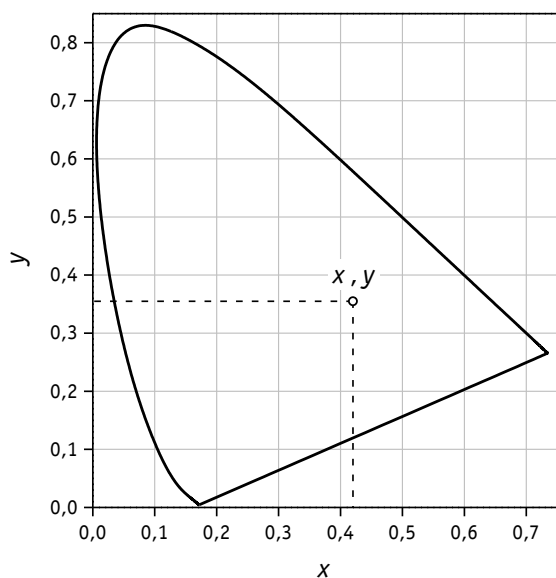


Bild 5 Normfarbtafel zur Darstellung der Farborte

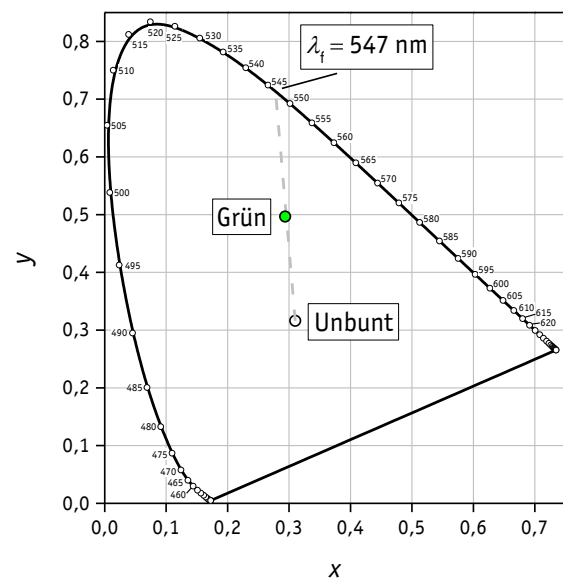


Bild 6 Ermittlung der farbtongleichen Wellenlänge λ_f (bzgl. des Unbuntpunktes)

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 λ_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 $\beta(\lambda) \Rightarrow \tau(\lambda) \equiv 1$ 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 CIELab-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 die Lichtquelle erhalten werden. Im CIELab-System charakterisieren die Werte a^* und b^* den Farbort. L^* ist ein Maß für die Helligkeit der Probe. Im CIELab-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 CIELab-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.

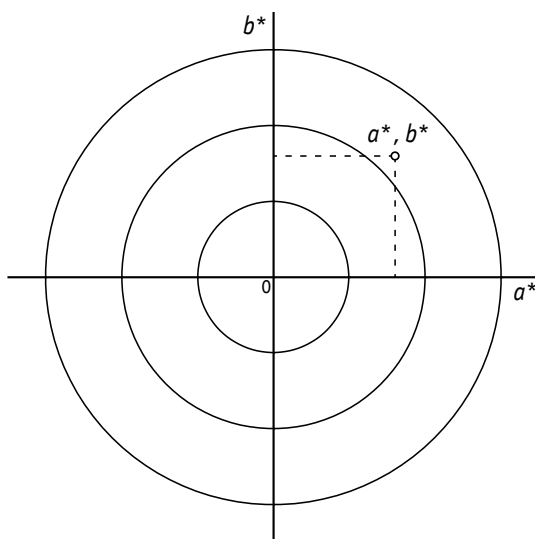


Bild 7 CIELAB-Darstellung der Farborte

3 Versuchsanordnung

Die zu untersuchende Probe wird in einem Transmissionsmessansatz mit dem Licht einer Glühlampe bestrahlt. Das transmittierte Licht gelangt über einen Lichtleiter in das Spektrometer. Dort wird es von einem Beugungsgitter spektral zerlegt und sein Spektrum auf ein Dioden-Array abgebildet. Die Messwerte werden in den PC übernommen und gespeichert. Ein Computerprogramm (z.B. SpecWin) steuert den Messablauf und die Auswertung.

Die gemessenen spektralen Strahlungsflüsse sind (außer von den Probeneigenschaften) natürlich auch von der spektralen Verteilung des Messlichtes, von der spektralen Transmission des Lichtleiters und des Spektrometers sowie von der spektralen Empfindlichkeit der Array-Dioden abhängig. Da diese Größen nicht bekannt sind, wird zunächst ohne Probe ein sogenanntes Basislinienspektrum aufgenommen. Nach der Messung des durch eine Probe transmittierten spektralen Strahlungsflusses wird dieser durch das Basislinienspektrum dividiert und so der

spektrale Transmissionsgrad der Probe erhalten. Er stellt die farbmetrische Materialeigenschaft der Probe dar mit der dann weitere Größen, wie beispielsweise Farb- und Helligkeitswerte, berechnet werden können. Dazu sind in der Auswertesoftware die Verläufe diverser Normlichtarten sowie die Normspektralwerte des menschlichen Auges hinterlegt.

Für bestimmte Fragestellungen können Datenfiles nach einer Konvertierung in einem separaten Auswerteprogramm (z.B. ORIGIN) speziellen Prozeduren (z.B. Addieren, Multiplizieren, Logarithmieren) unterworfen und die Ergebnisse graphisch dargestellt werden.

4 Aufgaben

- 4.1 Messen Sie mit SpecWin zunächst das Basislinienspektrum und anschließend die Transmissionsfunktionen für den Leerwert, für alle drei Farbfilter und für alle drei Zwei-Filter-Kombinationen. Speichern Sie die somit insgesamt sieben Transmissionsfunktionen $\tau(\lambda)$ jeweils unter einem aussagekräftigen Dateinamen ab.
- 4.2 Lassen Sie SpecWin für die in 4.1 gemessenen Transmissionsfunktionen die Normfarbwertanteile sowie die CIELAB-Farbwerte sowohl für NL A als auch für NL D65 berechnen und erfassen Sie diese Werte tabellarisch.
- 4.3 Stellen Sie die Farborte aller Filter, ihrer Kombinationen sowie des Leerwert in einer CIELAB-Graphik und in einer Normfarbtafel dar.
- 4.4 Stellen Sie die subtraktiven Farbveränderungen an allen drei Beispielen jeweils zweier Filter und deren Kombination (also für 'Magenta + Gelb \Rightarrow Rot', für 'Gelb + Cyan \Rightarrow Grün' und für 'Cyan + Magenta \Rightarrow Blau') mittels der Transmissions- und Dichtekurven (mit ORIGIN zu zeichnen bzw. zu berechnen) dar.
- 4.5 Bestimmen Sie graphisch die farbtongleichen Wellenlängen des Cyan-Filters bei NL A und NL D65 .

5 Fragen

- 5.1 Skizzieren Sie die relativen spektralen Strahlungsflüsse der Normlichtarten A und D65 .
- 5.2 Ein Gelbfilter und ein Purpurfilter werden hintereinander angeordnet. Die Kombination wird dann mit Tageslicht durchstrahlt. Erläutern Sie anhand der spektralen Eigenschaften der beiden Filter, in welcher Farbe das transmittierte Licht 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 dabei verwendeten Größen.
- 5.5 Erläutern Sie die Konstruktion zur Bestimmung der farbtongleichen Wellenlänge λ_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 Wo finden sich in der Normfarbtafel typische Farborte der Grundfarben des Dreifarbedrucks (Magenta, Cyan, Gelb) und des Übereinanderdrucks jeweils zweier dieser Grundfarben?
- 5.8 Ein Transmissionsfilter erscheint im Tageslicht magenta. In welche Richtung verschiebt sich seine Farbe, denn es stattdessen mit dem Licht einer Glühlampe durchstrahlt wird?
- 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 Farbmetrik, Walter de Gruyter, 2011