

Lichtanalyse in der Beleuchtungstechnik

von Norbert Unzner



Inhaltsverzeichnis:

Teil I

1	<i>Einleitung</i>	3
2	<i>Lichtquellen</i>	3
3	<i>Meßverfahren zur Farbanalyse</i>	4
3.1	<i>Dreibereichsverfahren</i>	4
3.2	<i>Überblick über das Spektralverfahren mit dem Lichtmeßplatz BS-LM-01</i>	5

Teil II

1	<i>Spektralverfahren nach DIN 5033</i>	7
2	<i>Ähnlichste Farbtemperatur</i>	10
3	<i>Farbwiedergabeindizes nach DIN 6169</i>	11

Teil III

	<i>Solarsimulation</i>	13
A	<i>Anhang</i>	15
A1	<i>Literaturverzeichnis</i>	15
A2	<i>Abbildungverzeichnis</i>	15

Teil I

1 Einleitung

In der modernen Beleuchtungstechnik werden, dem Einsatzbereich angepaßt, die unterschiedlichsten Lichtquellen verwendet. Dabei ist die Kenntnis der Eigenschaften des emittierten Lichtes von großer Bedeutung. Speziell handelt es sich um folgende zu bestimmende Größen:

- **Farbort**, d.h. welcher Farbeindruck entsteht bei der Betrachtung der Lichtquelle. Der Farbort stellt dabei einen Punkt innerhalb des sogenannten Farbdreiecks, welches alle für das menschliche Auge sichtbaren Farben enthält, dar.
- **Ähnlichste Farbtemperatur**, kennzeichnet im wesentlichen die Lichtfarbe. Die Angabe des Wertes erfolgt in Kelvin.
- **Farbwiedergabeindizes**, bezeichnen die Farbwiedergabeeigenschaften einer Lichtquelle bei Beleuchtung bestimmter Objekte.
- **Beleuchtungsstärke**
- **Bestrahlungsstärke**

Die genaueste Methode zur Ermittlung dieser gesuchten Parameter ist das Spektralverfahren. Die Grundlagen und Möglichkeiten dieser Methode sollen im folgenden erläutert werden.

2 Lichtquellen

Grundsätzlich sind in der Beleuchtungstechnik zwei Arten von Lichtquellen zu unterscheiden (Beispiele siehe Abb. 1 und Abb. 2):

1. Thermische Strahler
2. Gasentladungslampen



Abb. 1: (linkes Bild) Einseitig gesockelte 1000W Halogenlampe mit ähnlichster Farbtemperatur von ca. 3200K. Die Lichtabgabe wird durch thermische Aufheizung der Glühwendel infolge Stromfluß erzeugt.

Abb. 2: (rechtes Bild) Beidseitig gesockelte 1200W Metaldampfampe mit tageslichtähnlichem Spektrum. Zwischen den Elektroden im zentralen Brennräumchen wird ein Lichtbogen gezündet. Das elektrisch angeregte Plasma bildet die intensive Lichtquelle.

Vertreter des ersten Typs sind die bekannten Glühlampen und Halogenlampen, die nach dem Prinzip der elektrischen Aufheizung eines Glühdrahtes arbeiten. Allerdings wird der größte Teil der aufgewendeten Energie in Wärmestrahlung umgesetzt, so daß die Lichtausbeute dieser Lampen verhältnismäßig gering ist. Ihr Spektrum ist wenig strukturiert und daher lichttechnisch gut analysierbar.

Seit etwa 1936 werden in der Lichttechnik auch Gasentladungslampen eingesetzt, die gegenüber den thermischen Strahlern eine wesentliche höhere Lichtausbeute aufweisen. Zu dieser vielfältigen Gruppe von Lampen gehören z.B. die bekannten Leuchtstoffröhren, Xenon- und Metaldampflampen (Tageslichtlampen, HMI/HQI/HTI etc.).

Im Prinzip besteht eine Gasentladungslampe aus einem geschlossenen Glaskolben, der vorwiegend Quecksilber als Entladungsmedium enthält. Zwischen zwei Elektroden im Glaskolben wird eine Bogenentladung gezündet, die für eine intensive Lichtausstrahlung sorgt. Um eine gewünschte Lichtqualität zu erreichen, werden neben Quecksilber noch eine Reihe weiterer Zusätze (z.B. Halogenide seltener Erdmetalle) verwendet. Durch Variation der Zusatzstoffe ist eine breite Palette verschiedenster Entladungslampen entstanden. Das Beispiel (Abb.4) eines Tageslicht-Brenners (P=18kW) zeigt die charakteristische Struktur des Spektrums. Die Inhaltsstoffe des Brenners sind so gewählt, daß der kontinuierliche Strahlungshintergrund und die überlagerten Spektrallinien einen möglichst tageslichtähnlichen Verlauf zeigen.

3 Meßverfahren zur Farbanalyse

3.1 Dreibereichsverfahren und Spektralverfahren

Von besonderem Interesse sind die farbmetrischen Kenngrößen einer Lichtquelle, die eine Charakterisierung des Lichtes erlauben [1][2]. Nach DIN genormte Größen sind hier der Farbort, die ähnlichste Farbtemperatur und der allgemeine Farbwiedergabeindex. Die gebräuchlichsten Methoden zur Ermittlung dieser Werte sind das Spektralverfahren (siehe „Teil II, 1 Spektralverfahren nach DIN 5033“, Seite 7) sowie das Dreibereichsverfahren.

Das Dreibereichsverfahren arbeitet mit drei unterschiedlichen speziellen Filtern, die möglichst genau die drei Normspektralwertkurven (siehe Abb.3) nachbilden. Damit liefert ein Messgerät, das auf dieser Methode basiert drei analoge Signale, die den Größen X, Y, und Z entsprechen. Daraus kann der Farbort in der DIN 5033 Farbtafel berechnet werden.

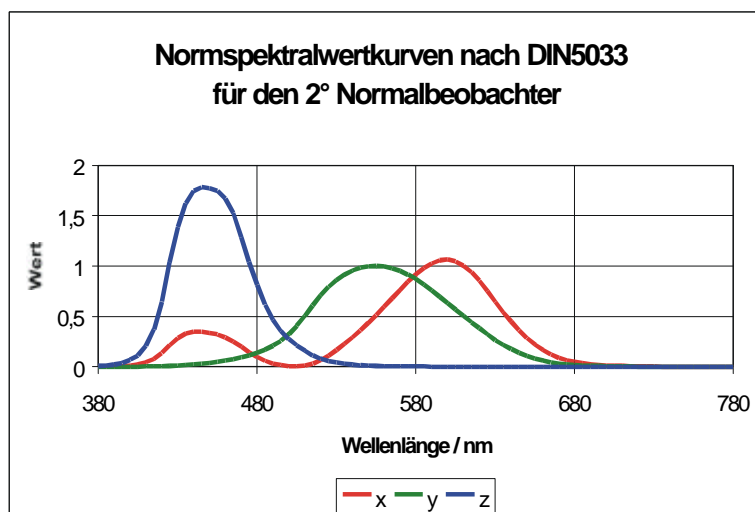


Abb. 3: Normspektralwertkurven nach DIN 5033 für den 2° Normalbeobachter.

Da mit diesem Verfahren keinerlei Aussage über die spektrale Verteilung zu erhalten ist, z.B. also nicht erkannt werden kann, ob und bei welcher Wellenlänge Spektrallinien vorhanden sind, oder ob

in bestimmten Wellenlängenbereichen die Lichtquelle besonders intensiv strahlt, sind z.B. Analysen zur Solarsimulation (siehe „Solarsimulation, Teil III, Seite 13) nicht möglich.

Informationen dieser Art kann das Dreibereichsverfahren nicht vollständig liefern, was die Wichtigkeit der Analyse des Spektrums unterstreicht.

Besonders offensichtlich wird dieser Aspekt beim Phänomen der "bedingt gleichen Farben".

Hierbei handelt es sich um zwei unterschiedliche Farben, die bei Bestrahlung mit einer bestimmten Lichtart exakt den gleichen Farbeindruck hervorrufen, sich aber beim Wechsel der bestrahlenden Lichtart deutlich unterscheiden, obwohl beide Lichtarten den gleichen Farbort haben. Der unterschiedliche Farbeindruck bei gleichem Farbort der Lichtquellen kann mit dem Spektralverfahren sofort durch die Verschiedenheit der Spektren erklärt werden. Das Dreibereichsverfahren hingegen würde hier keinen Aufschluß geben. Auch die Einschränkung auf den sichtbaren Spektralbereich (VIS) beim Dreibereichsverfahren benachteiligt dieses gegenüber dem außerdem noch genaueren Spektralverfahren, das zusätzlich auch Informationen über die angrenzenden ultravioletten (UV) und infraroten (IR) Spektralbereiche liefern kann.

Im praktischen Einsatz hat sich zudem gezeigt, daß - insbesondere bei Entladungslampen - Meßgeräte, die nach dem Dreibereichsverfahren arbeiten, z.T. differierende Ergebnisse anzeigen und damit u.U. nur begrenzt einsetzbar sind.

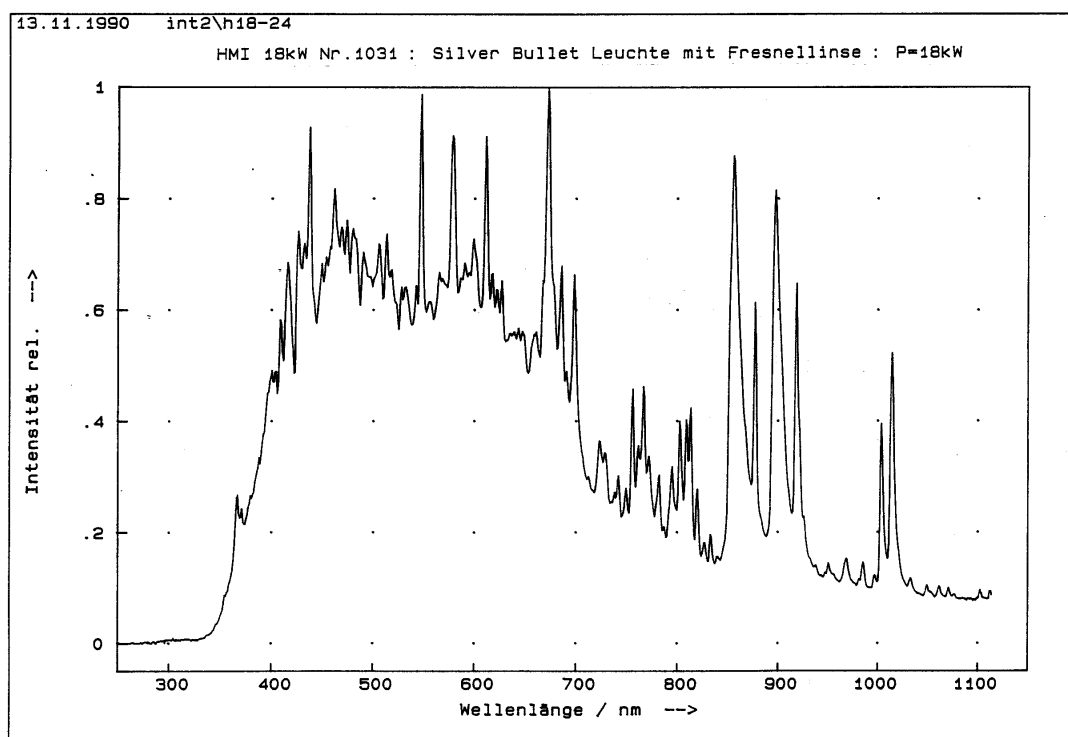


Abb. 4: Am typischen Spektrum einer 18kW Metall dampflampe ist die besonders hohe Lichtemission im sichtbaren Spektralbereich (380nm .. 780nm) erkennbar.

3.2 Überblick über das Spektralverfahren mit dem Lichtmeßplatz BS-LM-01

Gegenüber dem Dreibereichsverfahren ist das Spektralverfahren eine wesentlich exaktere Methode um die Qualität einer Lichtquelle zu bestimmen, da bei diesem Verfahren wird das gesamte Spektrum des Lichts in die Analyse einbezogen wird. Es sind somit auch Aussagen über Strahlungsstärken in bestimmten Wellenlängenbereichen möglich.

Der Spektral-Lichtmeßplatz BS-LM-01 ist ein speziell nach dem Spektralverfahren konzipiertes Lichtanalysesystem, welches umfangreiche Analysen an Lichtquellen erlaubt. Dazu wird die Lichtquelle frei vor dem Lichtmeßkopf aufgebaut und über den steuernden Rechner des Lichtmeßplatzes der Meßvorgang gestartet.

Das in den Lichtmeßkopf einfallende Licht wird einer vollautomatisch ablaufenden Spektralanalyse

unterzogen, deren Ergebnis das Spektrum der Lichtquelle, also die Zusammensetzung des Lichtes bezüglich der einzelnen enthaltenen Lichtfarben ist.

Ohne weitere Lichtmeßung ermittelt nun der Rechner des Lichtmessplatzes die weiteren Größen, die zur Charakterisierung des Lichts herangezogen werden wie Farbort, ähnlichste Farbtemperatur und Farbwiedergabeindizes.

Teil II

1 Spektralverfahren nach DIN 5033

Aus den genannten Gründen wurde ein nach dem Spektralverfahren konzipierter Lichtmeßplatz aufgebaut. Hauptbestandteil der Anlage ist ein PC-gesteuertes Spektrometer, mit dem im gesamten Spektralbereich mit hoher Genauigkeit und Auflösung Spektren beliebiger Lichtquellen (Abb.3) gemessen werden können. Der Öffnungswinkel ist dabei dem genormten "2° Normalbeobachter" angepaßt, der definiert wurde, um Farbverschiebungen, die unter größeren Öffnungswinkeln subjektiv betrachtet auftreten, zu vermeiden. Ist das Spektrum der Lichtquelle aufgenommen, können aus der so gewonnenen Strahlungsfunktion Φ_λ durch Integration von $\lambda=380\text{nm}$ bis $\lambda=780\text{nm}$ im sichtbaren Spektralbereich die Normfarbwerte X , Y und Z (Glg.1) berechnet werden.

$$\text{Glg. 1} \quad X = a \int_k^l \Phi_\lambda \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = a \int_k^l \Phi_\lambda \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = a \int_k^l \Phi_\lambda \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Die wellenlängenabhängigen Funktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ stellen die Normalspektralwertfunktionen des 2° Normalbeobachters nach DIN 5033, Teil 2 (siehe Abb.1) dar. Sie sind in Schritten von 5nm im Bereich von $\lambda = 380\text{nm}$ bis $\lambda = 780\text{nm}$ angegeben. Der konstante Faktor „a“ kann unbestimmt bleiben, da dieser im nächsten Rechenschritt (Glg. 2) eliminiert wird.

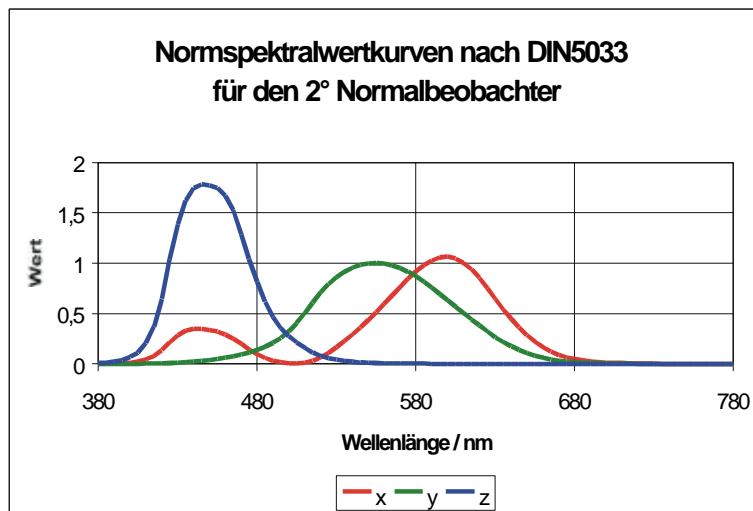


Abb. 1: Normalspektralwertkurven nach DIN 5033 für den 2° Normalbeobachter.

Diese Funktionen beschreiben die Eigenschaften (Empfindlichkeit, Farbempfindung) des menschlichen Auges, die mit Hilfe von Versuchspersonen empirisch ermittelt wurden und nach DIN als Standardwerte zur Verfügung stehen. Die Normierung (Glg. 1) der Normfarbwerte

Glg. 2

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

führt dann direkt zu den bekannten Normfarbwertanteilen x und y , die den Farbort in der DIN-Farbtafel kennzeichnen. Abb.2 zeigt als Beispiel die DIN 5033 Farbtafel. Neben der DIN Farbtafel werden noch zwei weitere Farbtafeln verwendet, die als einfache Transformation aus den (x, y) Werten hervorgehen.

Glg. 3

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}$$

Nach Glg. 3 transformiert erhält man den Farbort (u, v) in der CIE UCS 1960 Farbtafel. Nach Glg.4 transformiert erhält man den Farbort (u', v') in der CIE UCS 1976 Farbtafel. Beide Farbtafeln sollen gegenüber der DIN Farbtafel den empfindungsgemäßen Farbunterschied zweier Farborte besser wiedergeben.

Glg. 4

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

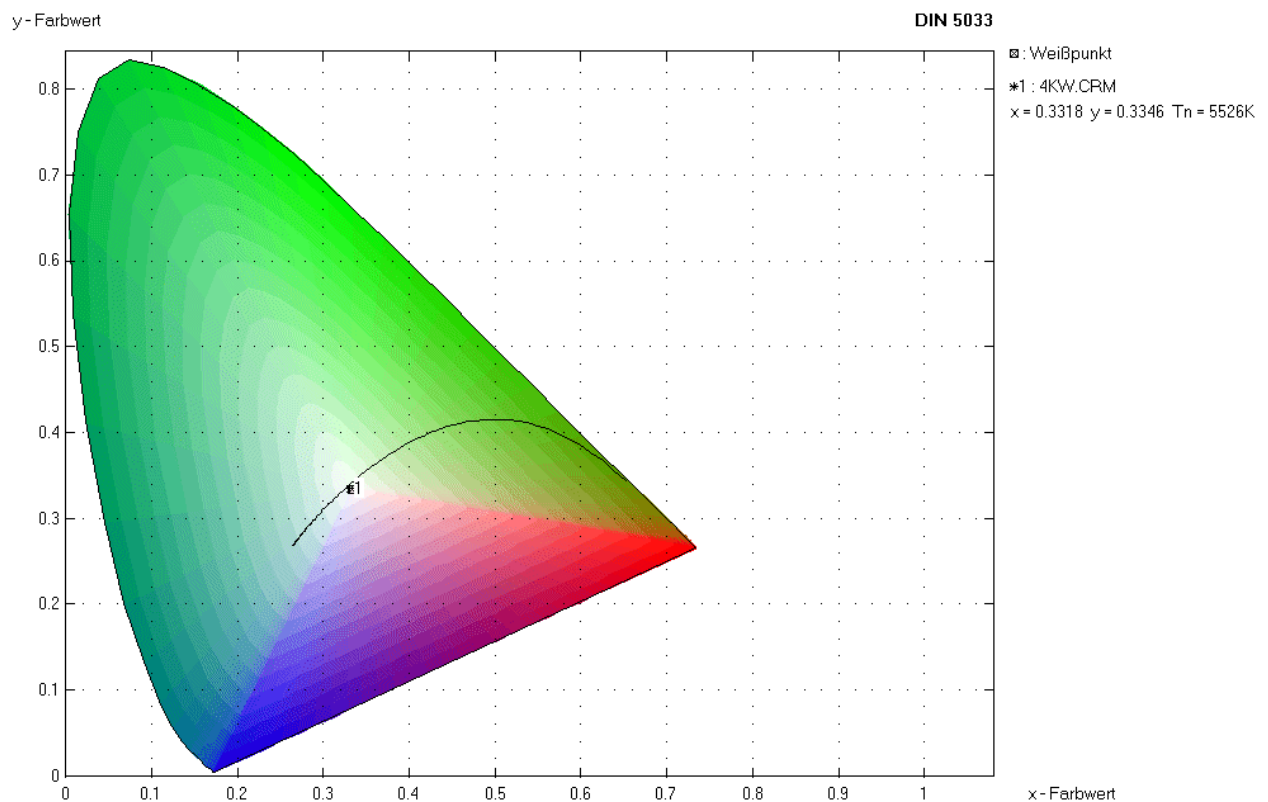


Abb. 2: Farbdreieck nach DIN 5033 mit eingezeichnetem Kurvenzug des Planckschen Strahlers, und dem berechneten Farbort aus einer Spektralanalyse einer 4kW Metalldampfleuchte.

Die Kenntnis der Koordinaten x und y erlaubt z.B. die Überprüfung der Farbort, oder ob der Farbort einer Lichtquelle innerhalb eines Toleranzbereiches im Farbdreieck liegt (Abb.4). Diese Kriterien

sind bei der Entwicklung und Produktion von Lichtquellen sowie bei der Anwendung in der Beleuchtungstechnik (Film, Fernsehen) von großer Bedeutung. Als Beispiel für den Anwendungsbereich sind in Abbildung 4 die gemessenen Dimmkurven einer Tageslichtlampe, eingebaut in eine Leuchte, eingezeichnet.

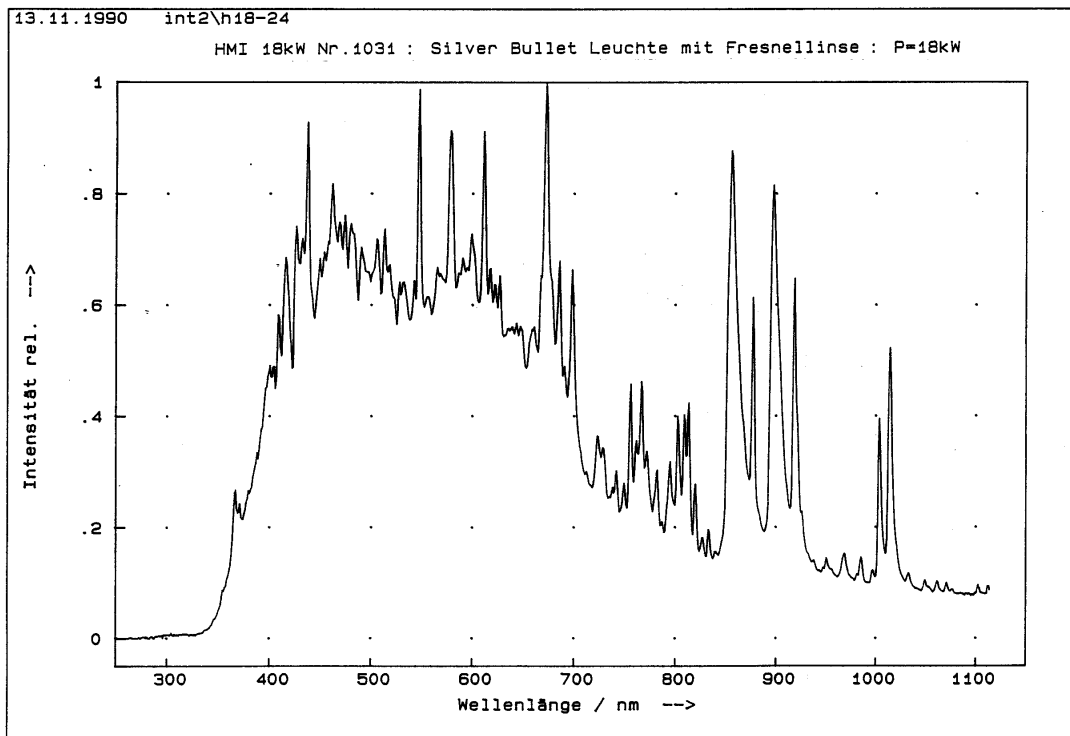


Abb. 3: Am typischen Spektrum einer 18kW Metalldampfampe ist die besonders hohe Lichtemission im sichtbaren Spektralbereich (380nm .. 780nm) erkennbar. Die Farborte mehrerer Messungen sind im Farbdreieck (Abb.4) zu sehen

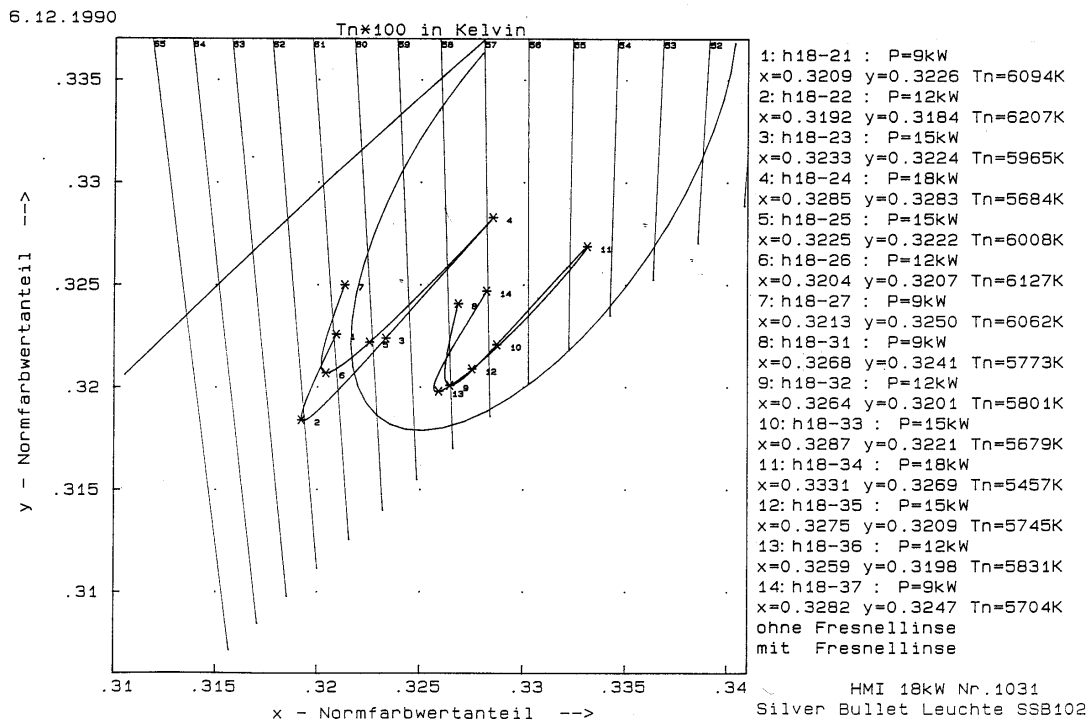


Abb. 4: Ausschnitt der DIN 5033 Farbtabelle mit eingezeichneten Dimmkurven einer 18kW Metalldampfampe bei verschiedenen Leistungen (P=9kW..18kW), eingebaut in eine Leuchte mit Fresnellinse. Gezeigt ist der Betrieb mit Fresnellinse bei geschlossener Leuchte (1..7) und ohne Fresnellinse bei geöffneter Leuchte (8..14). Ebenfalls eingezeichnet sind die Juddschen Geraden, der elliptische Toleranzbereich für Tageslichtlampen und der Kurvenzug, der die Farborte des Planckschen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen verbindet.

Bei geöffnetem Scheinwerfer (ohne Fresnellinse) liegt die Dimmkurve vollständig innerhalb der Toleranzellipse. Bei geschlossener Tür (mit Fresnellinse) verändert die Dimmkurve ihre Lage so, daß sie teilweise außerhalb des Toleranzbereichs liegt, der durch die Ellipse begrenzt wird. Die leicht geneigten vertikalen Linien stellen die, nach dem Physiker D.B. Judd benannten, Juddschen Geraden dar.

Aus Abb.4 ist auch zu erkennen, daß bei Dimmung zwischen 100% und ca. 80% der elektrischen Leistung sogar die Farbtemperatur in begrenztem Umfang korrigiert werden kann. Die links oberhalb der Ellipse gezeichnete Linie kennzeichnet die Farborte des Planckschen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen. Erwartungsgemäß hat die Änderung der elektrischen Betriebswerte des Brenners Einfluß auf das erzeugte Licht, zumindest die Lichtstärke nimmt bei reduzierter elektrischer Leistung ab. Ideal wäre eine Lampe mit konstantem Farbort und damit auch konstanter Farbtemperatur bei z.B. einer Reduktion der Nennleistung von 100% auf 50%. Mit thermischen Strahlern, wie z.B. Halogenlampen, ist dies nicht zu erreichen, weil diese sich fast wie der schwarze Strahler verhalten. Die Dimmkurve des Tageslichtbrenners zeigt hingegen eine relativ geringe Farbortänderung und dokumentiert so die hohe Qualität des erzeugten Lichtes. Neben den genannten farbmtrischen Werten können, aufbauend auf dem Spektralverfahren, weitere wichtige Größen berechnet werden.

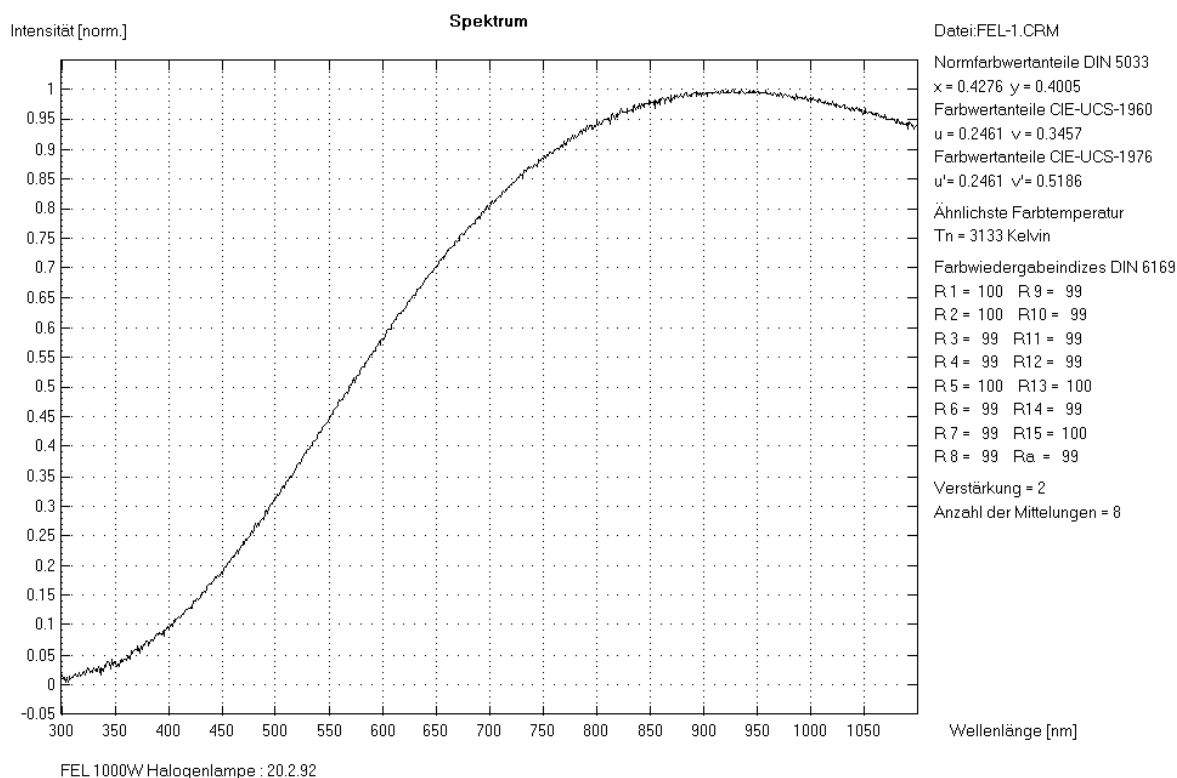


Abb. 5: Spektrum und farbmtrische Größen der in Abbildung 3 gezeigten Halogenlampe. Das Spektrum entspricht weitgehend dem Spektrum des Planckschen Strahlers (Schwarzer Strahler) bei $T=3133K$.

2 Ähnlichste Farbtemperatur

Die ähnlichste Farbtemperatur T_n wird in „K“ (Kelvin) angegeben und ist eine Größe, die eine bestimmte Lichtfarbe kennzeichnet. Der Gültigkeitsbereich ist auf die nähere Umgebung des Kurvenzuges des Planckschen Strahlers begrenzt (siehe Abb.2).

Vereinfacht ausgedrückt ist die ähnlichste Farbtemperatur diejenige Temperatur, die der Plancksche

Strahler besitzt, dessen Lichtfarbe empfindungsgemäß der zu kennzeichnenden Farbe am nächsten kommt. Um die ähnlichste Farbtemperatur einer Lichtquelle zu bestimmen sind folgende Schritte durchzuführen:

- Zuerst ist das relative Spektrum der zu untersuchenden Lichtquelle zu messen.
- Berechnung des Farbortes (x, y) nach DIN 5033
- Transformation des Farbortes (x, y) in die CIE UCS 1960 Farbtabelle (u, v) nach Glg.3.
- Linie der kürzesten Entfernung von (u, v) zum Kurvenzug des Planckschen Strahlers suchen und Schnittpunkt festlegen.
- Die Temperatur des Planckschen Strahlers im Schnittpunkt ist die gesuchte ähnlichste Farbtemperatur.

Diese noch relativ einfache Vorgehensweise wird jedoch durch einige physikalische Gegebenheiten wesentlich erschwert. Da ist zunächst die Strahldichte des Planckschen Strahlers (Glg.5), die eingesetzt in Glg.1 und Glg.2 ein Gleichungssystem ergibt, das sich analytisch nicht mehr nach der Temperatur auflösen läßt. Deshalb wird in der Praxis die sehr genaue Approximation des Kurvenzug des Planckschen Strahlers im CIE UCS 1960 Farbdreieck durch ein Chebyshev Polynom zweiter Ordnung verwendet.

$$\text{Glg. 5} \quad L_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right)^{-1} \right]^{-1}$$

T = Temperatur

λ = Wellenlänge

k_B = Boltzmann Konstante

h = Planck Konstante

c = Lichtgeschwindigkeit

Damit läßt sich ein iteratives Verfahren definieren, das mit Hilfe eines Rechners aus dem bestimmten Farbort der Lichtquelle die ähnlichste Farbtemperatur berechnen kann.

Für sich betrachtet bietet die ähnlichste Farbtemperatur nur wenig Information über das untersuchte Licht, weil die spezifische Lichtart - insbesondere bei Entladungslampen - nicht eindeutig durch sie gekennzeichnet werden kann. Als zusätzliches Merkmal und als Ausscheidungskriterium kann sie jedoch als Vergleichsgröße gute Dienste leisten. Übliche Werte für Glühlampen liegen zwischen 2000K und 3200K (Halogenlampen). Metaldampflampen liefern tageslichtähnliches Licht und weisen eine ähnlichste Farbtemperatur von typisch 5600K auf.

Häufig findet man in der Farbtabelle noch die sogenannten Juddschen Geraden. Diese Linien kennzeichnen Farborte gleicher Farbtemperatur und werden zur grafischen Bestimmung der ähnlichsten Farbtemperatur verwendet (siehe Abb.4).

4 Farbwiedergabeindizes nach DIN 6169

Weitere wichtige farbtechnische Größen sind die Farbwiedergabeindizes nach DIN 6169 [4], die ebenfalls rein rechnerisch ohne weitere Hilfsmittel mit einem Computer-Programm des Lichtmessplatzes ermittelt werden können. Diese Zahlenwerte geben Aufschluß über die Wiedergabe von Farben von Objekten, die mit der zu untersuchenden Lichtart beleuchtet werden.

So lässt sich z.B. angeben, ob eine bei Tageslicht rot erscheinende Oberfläche unter Kunstlichtbestrahlung den gleichen oder einen abweichenden Farbeindruck beim Betrachter erzeugt.

Besonders wichtig ist dieser Aspekt u.a. bei Filmaufnahmen, um bei der Wiedergabe möglichst alle Farbtöne originalgetreu erscheinen zu lassen. Die hier benutzten Farbwiedergabeindizes beziehen sich auf die Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen in der Beleuchtungstechnik und werden nach dem Testfarbenverfahren (DIN 6169, Teil 2) berechnet.

Dieses Verfahren verwendet die genormten spektralen Strahldichtefaktoren der Testfarben 1 bis 14, die als Datensätze vorliegen (DIN 6169, Teil 2). Als Referenzlichtarten werden die „Bezugslichtarten nach DIN 6169“ verwendet, die je nach Temperatur dem Planckschen Strahler oder den verschiedenen Tageslichtphasen entsprechen. Die Berechnung der Farbwiedergabeindizes berücksichtigt normgerecht die Farbwandlung in der CIE-UCS-Farbtabelle 1960.

Zur Berechnung der Differenz ΔE_i zwischen der Farbempfindung einer Testfarbe i bei Beleuchtung mit der zu untersuchenden Lichtart und der Farbempfindung bei Beleuchtung der gleichen Testfarbe i mit der DIN-Bezugslichtart wird die Farbabstandsformel CIE 1964 benutzt.

Der spezielle Farbwiedergabeindex R_i wird dann nach Glg. 6 berechnet:

$$\text{Glg. 6} \quad R_i = 100 - 4,6 \times \Delta E_i \quad i=1..14$$

Der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a ist der arithmetische Mittelwert aus den speziellen Farbwiedergabeindizes R_i für die Testfarben Nr. 1 bis Nr. 8. Wird die Differenz ΔE_i zu Null, ist die Farbwiedergabe optimal und der Farbwiedergabeindex erreicht den Wert 100. Nach unten hin ist R_i nicht begrenzt und kann bei schlechter Farbwiedergabe sogar negative Werte annehmen. Zur Kennzeichnung einer Lichtquelle sollten möglichst alle speziellen Farbwiedergabeindizes angegeben werden, denn R_a allein ist durch die Mittelwertbildung weniger aussagekräftig.

Typische Werte für R_i (bzw. R_a) liegen bei Halogenlampen nahe bei 100, weil als Vergleichslichtart der Plancksche Strahler zugrundegelegt wird. HMI-Lampen erreichen ebenfalls eine hohe Farbwiedergabe mit R_a Werten deutlich über 90.

Schlechtere Farbwiedergabeeigenschaften besitzen die bekannten Leuchtstofflampen mit typisch $R_a = 50$, wobei insbesondere einige R_i Werte noch wesentlich kleiner sind als der Mittelwert R_a .

Der Grund hierfür ist die geringe Lichtemission im langwelligen roten Spektralbereich.

Das vorgestellte Spektralverfahren bietet die Grundlage für eine genaue und umfassende Lichtanalyse, die dem Lampen- bzw. Leuchtenhersteller und dem Anwender wertvolle Aufschlüsse über die Art und Qualität seiner Lichtquellen gibt.

Teil III

Solarsimulation

In Wissenschaft und Technik wird zunehmend gefordert zu prüfende Objekte festgelegten und reproduzierbaren Strahlungsbedingungen auszusetzen um z.B. den Einfluß der natürlichen Sonnenstrahlung zu untersuchen. Die natürliche Sonnenstrahlung direkt zu nutzen ist wegen der unvermeidlichen Schwankungen weniger geeignet.

Künstliche Strahlungsquellen hingegen können die je nach Anwendungsfall unterschiedlichen Voraussetzungen wie etwa

- Simulation einer mittleren Globalstrahlung in Anlehnung an das AM 1,5 Spektrum (Abb.1)
- Bestrahlungsstärke um 1000W/m² einstellbar
- gute Homogenität der Bestrahlungsstärke in der Prüfebene
- zeitliche Stabilität der Bestrahlungsstärke in der Prüfebene
- geringe Strahldivergenz

erfüllen. Werden größere zu bestrahlende Flächen benötigt, so bieten sich als Strahlungsquellen Metalldampflampen an, die als Tageslichtlampen konstruiert strengere Genauigkeitsansprüche auch ohne zusätzliche Filterung erfüllen können.

Eine grundlegende Norm insbesondere für die Prüfung von Solarzellen ist die IEC 82 (CO) 15. Hier wird eine mittlere genormte spektrale Bestrahlungsstärke (AM 1,5) verwendet, die in etwa der Sonnenbestrahlung im Sommer zur Mittagszeit bei wolkenlosem Himmel entspricht. In Abb.1 ist dieses Spektrum zusammen mit den Simulatorklassen A, B und C dargestellt, die je nach Genauigkeitsanspruch Verwendung finden.

Eine Strahlungsquelle erfüllt dann diese Norm, wenn die mittleren Bestrahlungsstärken in den angegebenen Wellenlängenintervallen innerhalb der Toleranzbereiche liegen.

In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die exakten Zahlenwerte nachzulesen.

Intervall der Wellenlänge in μm	Prozentualer Anteil an der gesamten im Intervall 0,4 bis 1,1 μm liegenden Strahlstärke
0,4 .. 0,5	18,5
0,5 .. 0,6	20,1
0,6 .. 0,7	18,3
0,7 .. 0,8	14,8
0,8 .. 0,9	12,2
0,9 .. 1,1	16,1

Tabelle 1: IEC 82 (CO) 15 vorgegebenes Referenzspektrum.

Sonnensimulator-Klasse	A	B	C
Abweichung in Prozent	± 25	± 40	$- 60 + 100$

Tabelle 2: IEC 82 (CO) 15 zulässige Abweichung zum Referenzspektrum (Tabelle 1).

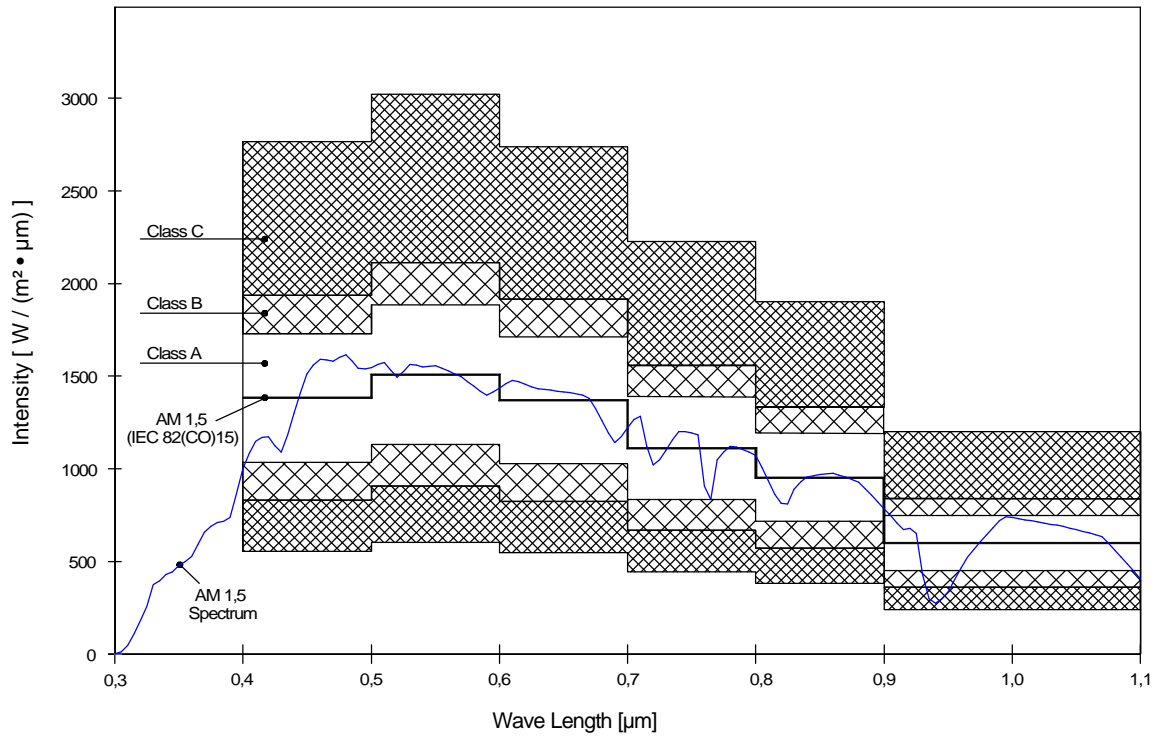


Abb. 1: AM1,5 Spektrum und Bandbreiten der Simulatorklassen in Anlehnung an IEC 82 (CO) 15

A Anhang

A1 Literaturverzeichnis

- [1] Richter, M., Einführung in die Farbmeterik. de Gruyter, Berlin 1981
- [2] Wyszecki, G. u. Stiles, Color Science. Wiley & Sons, New York 1982
- [3] Deutsche Normen, DIN 5033, Farbmessung 1979
- [4] Deutsche Normen, DIN 6169, Farbwiedergabe
- [5] Osram, Technisch-wissenschaftliche Abhandlungen der Osram-Gesellschaft, Band 12, Springer, Berlin 1986

A2 Abbildungsverzeichnis

Teil I

- Abb. 1: (linkes Bild) Einseitig gesockelte 1000W Halogenlampe mit ähnlichster Farbtemperatur von ca. 3200K. Die Lichtabgabe wird durch thermische Aufheizung der Glühwendel infolge Stromfluß erzeugt. _____ 3
- Abb. 2: (rechtes Bild) Beidseitig gesockelte 1200W Metaldampflampe mit tageslichtähnlichem Spektrum. Zwischen den Elektroden im zentralen Brennraum wird ein Lichtbogen gezündet. Das elektrisch angeregte Plasma bildet die intensive Lichtquelle. _____ 3

Teil II

- Abb.1: Normspektralwertkurven nach DIN 5033 für den 2° Normalbeobachter. _____ 7
- Abb. 2: Farbdreieck nach DIN 5033 mit eingezeichnetem Kurvenzug des Planckschen Strahlers, und dem berechneten Farbort aus einer Spektralanalyse einer 4kW Metaldampflampe. _____ 8
- Abb. 3: Am typischen Spektrum einer 18kW Metaldampflampe ist die besonders hohe Lichtemission im sichtbaren Spektralbereich (380nm .. 780nm) erkennbar. Die Farborte mehrerer Messungen sind im Farbdreieck (Abb. 4) zu sehen _____ 9
- Abb. 4: Ausschnitt der DIN 5033 Farbtabelle mit eingezeichneten Dimmkurven einer 18kW Metaldampflampe bei verschiedenen Leistungen ($P=9\text{kW}..18\text{kW}$), eingebaut in eine Leuchte mit Fresnellinse. Gezeigt ist der Betrieb mit Fresnellinse bei geschlossener Leuchte (1..7) und ohne Fresnellinse bei geöffneter Leuchte (8..14). Ebenfalls eingezeichnet sind die Juddschen Geraden, der elliptische Toleranzbereich für Tageslichtlampen und der Kurvenzug, der die Farborte des Planckschen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen verbindet. _____ 9
- Abb. 5: Spektrum und farbmeterische Größen der in Teil I, Abbildung 2 gezeigten Halogenlampe. Das Spektrum entspricht weitgehend dem Spektrum des Planckschen Strahlers (Schwarzer Strahler) bei $T=3133\text{K}$. _ 10

Teil III

- Abb. 1: AM1,5 Spektrum und Bandbreiten der Simulatorklassen in Anlehnung an IEC 82 (CO) 15 _____ 14