

Die Farbtemperatur in der Lichttechnik

*Ingo Rotscholl, Cornelius Neumann
Lichttechnisches Institut
Kaiserstrasse 12, 76131 Karlsruhe*

Der folgende Beitrag ist dem seit Jahrzehnten verwendeten und etablierten Begriff Farbtemperatur gewidmet. Der Artikel soll dabei helfen, ein Gefühl für diese farbmetrisch wichtige Größe zu bekommen und die Grenzen der Anwendbarkeit des Begriffs in der allgemeinen Beleuchtung aufzuzeigen. In diesem Rahmen werden typische Fragen rund um den Begriff durch Rechnungen und Beispiele beantwortet.

1 Einleitung

Nach einer allgemeinen Definition des Begriffs sowie einer kurzen Erläuterung bzw. Abgrenzung anderer in der Lichttechnik verwendeten Temperaturbegriffe, werden in den folgenden Abschnitten einzelne Fragestellungen bzgl. der Farbtemperatur beantwortet. Die Fragestellungen sind:

1. Was sind Temperaturbegriffe in der Lichttechnik?
2. Welche Farbtemperaturunterschiede sind sichtbar?
3. Wie gut ist die ähnlichste Farbtemperatur zur Angabe von Farbunterschieden geeignet?
4. Wie groß ist der Einfluss der Bezugstemperatur auf die Bestimmung des Farbwiedergabeindex CRI?

2 Temperaturbegriffe in der Lichttechnik

Einem schwarzen Strahler kann durch Angabe seiner Temperatur eindeutig ein Spektrum und diesem wiederum ein Farbort zugeordnet werden. Alle Thermostrahler, wie z.B. Glühlampen, sind in erster Näherung schwarze Strahler. Die Farbtemperatur eines Farbortes entspricht jener Temperatur, die ein schwarzer Strahler haben müsste, um Licht mit exakt diesem Farbort auszusenden. Der in Abbildung 1 eingezeichnete plancksche Kurvenzug bildet genau jene Farborte ab, die ein schwarzer Strahler haben kann. Dabei liegen die sich aus niedrigeren Temperaturen ergebenden Farborte im roten Bereich, die entsprechenden Farborte hoher Temperaturen im blauen Bereich. Die Farbtemperatur lässt sich nur den Farborten, die sich exakt auf dem Kurvenzug befinden, zuordnen.

Oftmals wird der Begriff im Deutschen nicht korrekt an Stelle der ähnlichsten Farbtemperatur verwendet.

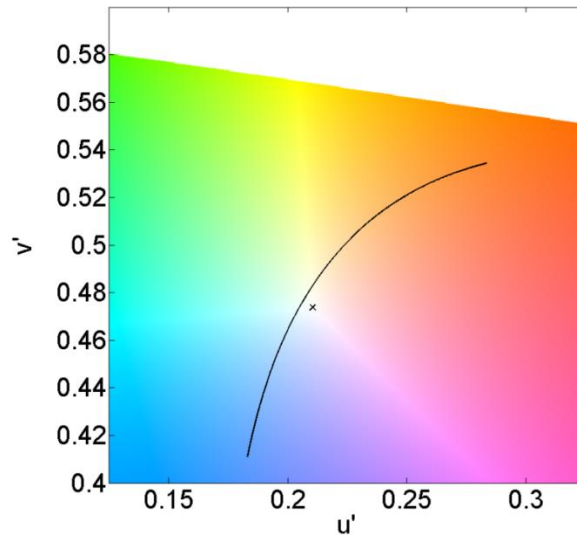


Abbildung 1: Auszug aus CIE-UCS (1976) bzw. $u'v'$ und Planckscher Kurvenzug

Die ähnlichste Farbtemperatur (correlated color temperature - CCT) eines Farbortes u_1v_1 entspricht der Farbtemperatur des Farbortes u_2v_2 , bei der der euklidische Abstand Δ_{uv} zwischen den Farborten u_1v_1 und u_2v_2 minimal ist. Der Abstand ist im Farbraum CIEUCS (1960) zu berechnen. Allerdings ist eine ähnlichste Farbtemperatur nur definiert, wenn $\Delta_{uv} < 0,05$ gilt [1]. Als "Juddsche Geraden" werden die Schnittgeraden, die sich im CIEUCS-Farbraum senkrecht auf dem planckschen Kurvenzug befinden, bezeichnet. Daraus folgt, dass die CCT aller Farborte auf derselben Juddschen Geraden eine ähnlichste Farbtemperatur haben, die der Farbtemperatur des Schnittpunktes entspricht. Von daher werden die in Abbildung 2 visualisierten Juddschen Geraden auch als Isotemperaturlinien bezeichnet [2].

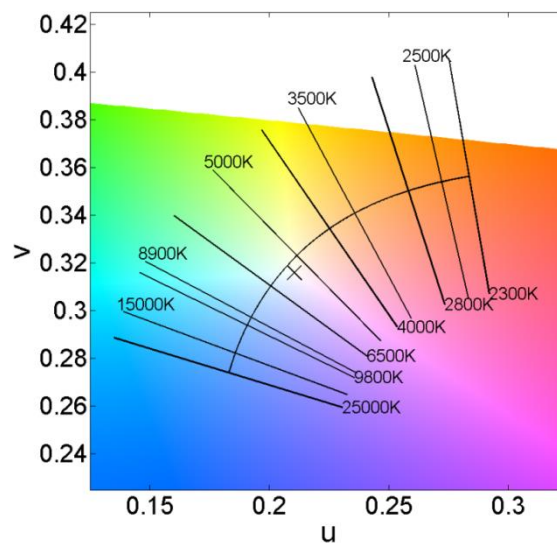


Abbildung 2: Juddsche Geraden im CIE-UCS (1976)

Weitere Temperaturbegriffe in der Lichttechnik sind die Verteilungstemperatur und die Schwarze Temperatur. Diese sind allerdings ausschließlich für Temperaturstrahler definiert und besitzen gegenüber der Farbtemperatur farbmetrisch keine weitere Interpretation.

3 Welche Farbtemperaturunterschiede sind sichtbar?

Die absoluten Differenzen von Farbtemperaturen in Kelvin besitzen aufgrund der sich durch die Definition der Farbtemperatur ergebenden Nichtlinearität eine nur schwer zu deutende Aussagekraft. Während bei niedrigen Farbtemperaturen, also warmweißen Lichtquellen, kleine Farbtemperaturdifferenzen mit einer starken Änderung der Farbkoordinaten einhergehen, bewirkt dieselbe absolute Farbtemperaturänderung bei hohen Farbtemperaturen nur wenig. Abbildung 3 a) zeigt den $u'v'$ -Farbraum, in dem die Juddschen Geraden der Farbtemperaturen 2700 K (Innenraum), 4000 K (Bürobeleuchtung) und 6500 K (tageslichtähnliche Lichtquellen) eingetragen sind. Es ist direkt ersichtlich, dass der ebenfalls eingetragene Bereich ± 100 K bei 2700 K deutlich größer ist als bei 4000 K, der wiederum deutlich größer ist als bei 6500 K. Abbildung 3 b) verdeutlicht die Problematik nochmals anhand zweier Farbabbildungen mit denselben absoluten Farbtemperaturdifferenzen von 1200 K. Während die Inhomogenitäten bei den Farbtemperaturen 2300 K bis 3500 K (obere Verteilung) deutlich auffallen, sind sie bei Farbtemperaturen von 8600 K bis 9800 K (untere Verteilung) schwächer ausgeprägt.

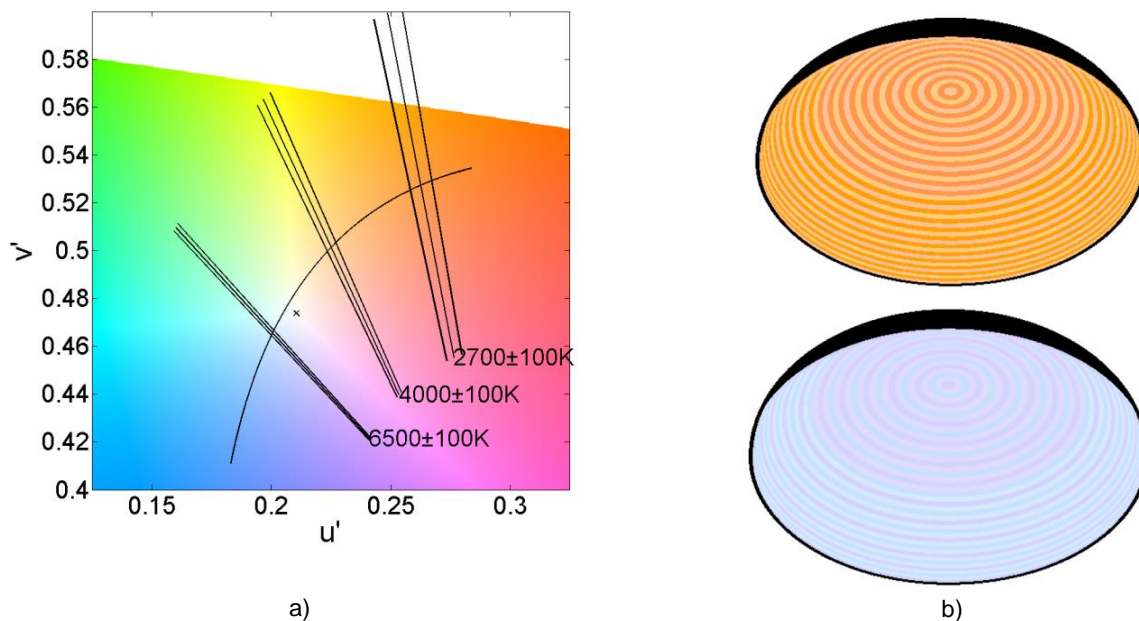


Abbildung 3: Nichtlinearität der Farbtemperatur a) Juddsche Geraden der Farbtemperaturen 2700 K, 4000 K und 6500 K mit Differenzen von ± 100 K im CIE-UCS (1976) b) Synthetisch erzeugte Farbverteilungen mit Farbtemperaturen von ca. 2300 K-3500 K (oben) und ca. 8600 K-9800 K (unten)

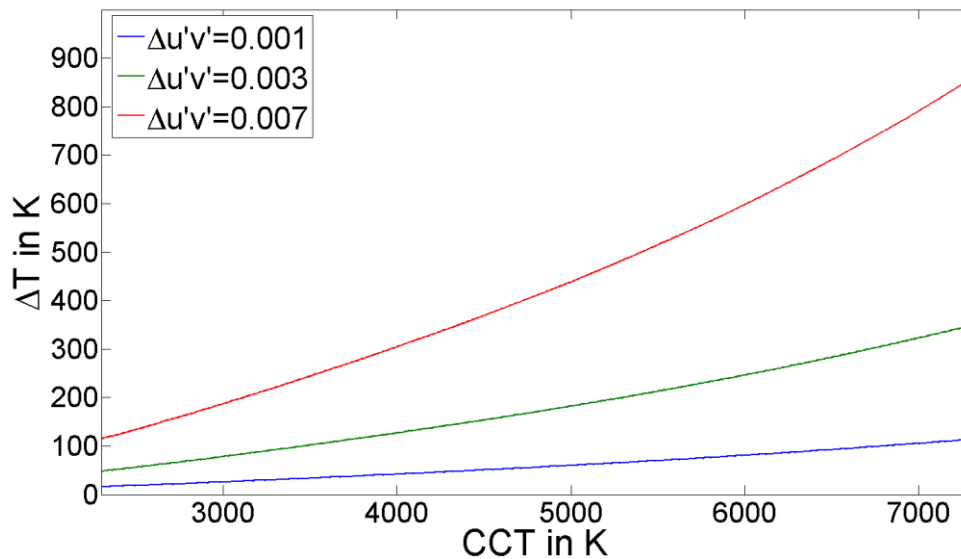


Abbildung 4 Maximal mögliche Farbtemperaturunterschiede ΔT in Abhängigkeit der Farbtemperatur CCT für gerade sichtbare, deutlich sichtbare und störende Farbunterschiede $\Delta u'v'$ (Wahrnehmungsschwellen nach [4, 5])

Will man die eingangs gestellte Frage beantworten, müssen die tatsächlich verwendeten Wahrnehmungsschwellen für Lichtfarben zu Grunde gelegt werden. Für Lichtfarben sind das typischerweise in physiologischen Studien ermittelte euklidische Farbkoordinatenabstände im $u'v'$ – Farbraum. Setzt man dabei die Wahrnehmungsschwellen $\Delta u'v'$ aus [3,4] voraus, so ergibt sich in Abhängigkeit der Farbtemperatur eine maximal mögliche Farbtemperaturdifferenz ΔT , die zu diesen Abständen $\Delta u'v'$ korrespondiert. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4 gezeigt. Während bei einer Farbtemperatur von ca. 2700 K bereits eine Farbtemperaturabweichung von 50 K deutlich sichtbar sein kann, ist diese bei 6000 K nicht erkennbar. Die tolerierbaren Farbtemperaturdifferenzen steigen für größer werdende Farbtemperaturen an. Hinzu kommt, dass der Anstieg für größere Abstände deutlich steiler verläuft, also höhere Wahrnehmungsschwellen wie bspw. aus [5] besagtes Verhalten stärker aufweisen.

Abbildung 4 beantwortet dennoch die eingangs gestellte Frage für die Wahrnehmungsschwellen aus [3,4]. Jedoch ist zu beachten, dass sie nur für Farbtemperaturen, nicht aber für ähnlichste Farbtemperaturen gilt, weswegen sich die Frage des nächsten Abschnitts aufdrängt.

4 Wie gut ist die ähnlichste Farbtemperatur zur Angabe von Farbunterschieden geeignet?

Das Problem der Nichtlinearität gilt ebenso für die ähnlichste Farbtemperatur. Hinzu kommt jedoch die in dieser Fragestellung deutlich limitierendere Unsicherheit, die die Angabe einer ähnlichsten Farbtemperatur mit sich bringt.

Denn schon durch die Definition der ähnlichsten Farbtemperatur als Punkt auf einer Juddschen Geraden kann einer ähnlichsten Farbtemperatur kein eindeutiger Farbort zugewiesen werden. Zwei Farbvalenzen mit derselben ähnlichsten Farbtemperatur können einen Abstand von $\Delta uv = 0$ bis zu $\Delta uv = 0,1$ besitzen. Dabei entspricht $\Delta uv = 0$ dem minimalen Abstand Δuv_{min} und $\Delta uv = 0,1$ dem maximal möglichen Abstand Δuv_{max} . Ausgehend davon, dass jeder Punkt auf der Juddschen Geraden gleich wahrscheinlich einer konkreten Farbtemperatur zugeordnet werden kann, lässt sich eine Dichteverteilung der möglichen Farbkoordinatenabstände von zwei Farbtemperaturen bestimmen. Abbildung 5 zeigt die Verteilung der Zugehörigkeit von drei Farbtemperaturdifferenzen $2700 \text{ K} \pm 100 \text{ K}$, $4000 \text{ K} \pm 100 \text{ K}$ und $6500 \text{ K} \pm 100 \text{ K}$ zu einem Koordinatenabstandsintervall $\Delta u'v'$ in Histogrammen. Es ist zu erkennen, dass die drei Farbtemperaturen einen ähnlichen Verlauf besitzen. Die Unterschiede sind zum einen auf die bereits erläuterte Nichtlinearität der Farbtemperatur und zum anderen auf die Umrechnung des CIE-UCS (1960) bzw. uv in den CIE-UCS (1976) bzw. $u'v'$ zurückzuführen (Gleichung 1).

$$\begin{aligned} u' = u &= \frac{4x}{12y - 2x + 3} \\ v' = 1,5 \cdot v &= \frac{9y}{12y - 2x + 3} \end{aligned} \tag{1}$$

Während sich Juddsche Geraden, die vornehmlich entlang der v-Achse verlaufen, wie es bei niedrigen Farbtemperaturen der Fall ist, um einen Faktor von 1,5 vergrößern, ändern Juddsche Geraden parallel zur u-Achse ihren Abstand nicht. Dementsprechend ist die Farbtemperatur 2700 K deutlich stärker von der Streckung betroffen als 6500 K (vgl. Abbildung 2).

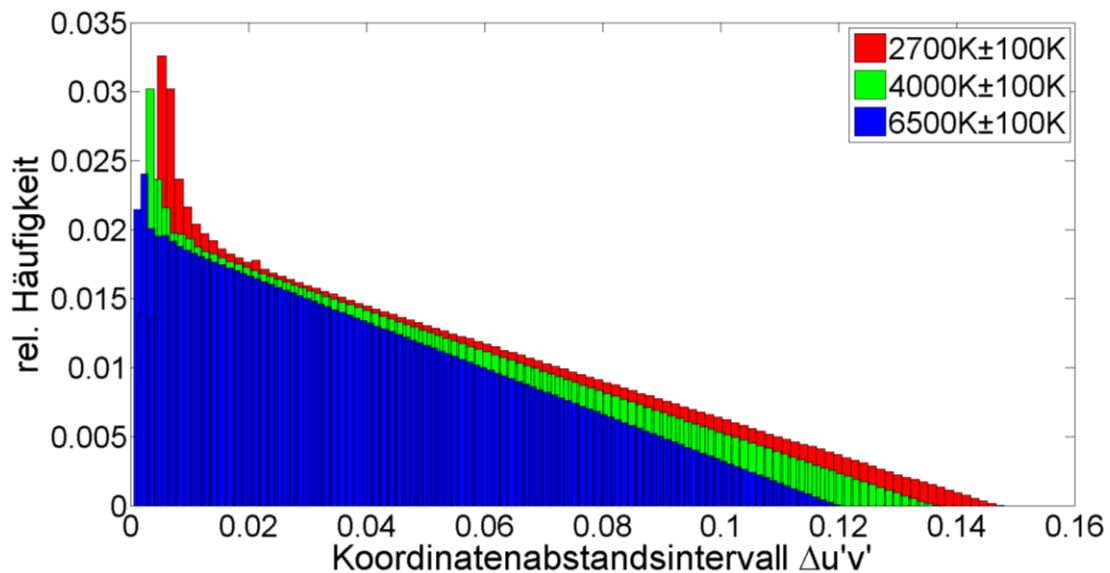


Abbildung 5: Verteilung der theoretisch möglichen Koordinatenabstände bei Angabe der Farbtemperaturen 2700 K, 4000 K und 6500 K und einer Farbtemperaturdifferenz $\Delta T=100$ K

Die Unsicherheitsdifferenz $\Delta U_{uv'}$ ergibt sich nach Gleichung 2

$$\Delta U_{uv'} = u'v'_{max} - u'v'_{min} \quad (2)$$

Aus jedem Paar (CCT, ΔT) lässt sich der in Abbildung 5 gezeigte Zusammenhang erzeugen, woraus sich wiederum die maximale Unsicherheit $\Delta U_{uv'}$ ermitteln lässt. In Abbildung 6 sind diese Unsicherheiten über ähnlichste Farbtemperaturen im Bereich von 2300 K bis 7000 K und Farbtemperaturdifferenzen ΔT von 0 K bis 300 K aufgetragen. Auch hier sind wieder zwei Dinge ersichtlich:

1. Durch die Verzerrung der v -Achse gegenüber der v' -Achse, die Nichtlinearität und die Tatsache, dass ein ΔT sowohl ein positives, als auch ein negatives Vorzeichen besitzen kann, ergibt sich eine höchst unintuitiver Zusammenhang zwischen den Farbtemperaturen und ihren implizierten Unsicherheiten.
2. Die Unsicherheiten liegen bereits deutlich über der Größenordnungen um den Bereich der Wahrnehmungsschwellen nach [3,4] bzw. in der Größenordnung um den Bereich der Wahrnehmungsschwellen nach [5].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Farbartbeschreibungsgröße Farbtemperatur zur Beschreibung von kleinen Farbunterschieden gänzlich ungeeignet ist und leicht zu Fehlinterpretationen führen kann. Eine generelle Zuordnung von Farbarten und ein Abschätzen von großen Farbunterschieden ist hingegen legitim.

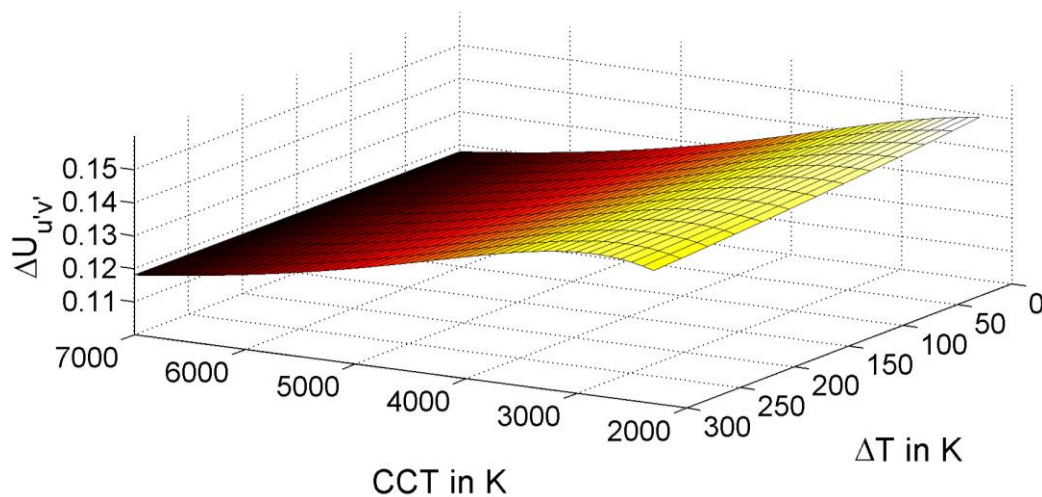


Abbildung 6: Die Unsicherheit ΔU_{uv} für verschiedene Farbtemperaturdifferenzen ΔT in Abhängigkeit der ähnlichsten Farbtemperatur CCT. Zum einen ist der Verlauf nicht sehr intuitiv, zum anderen liegen die Unsicherheiten deutlich über der Größenordnung des Bereichs der Wahrnehmungsschwellen von Farbunterschieden nach [4-6].

5 Wie groß ist der Einfluss der Bezugstemperatur auf die Bestimmung des Farbwiedergabeindex CRI?

Eine große Rolle spielt die ähnlichste Farbtemperatur in der Definition des Farbwiedergabeindex CRI. Der CRI ist die mittlere Verschiebung von acht definierten Testfarben unter der zu bewertenden Beleuchtung, verglichen mit einer Referenzbeleuchtung. Diese Referenzbeleuchtung wird auf Basis der ähnlichsten Farbtemperatur ausgewählt. Für alle Lichtquellen mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von unter 5000 K werden die zu testenden Quellen mit dem Planckschen Strahler der entsprechenden Temperatur und alle ähnlichsten Farbtemperaturen über 5000 K mit der entsprechenden Tageslichtart verglichen. Dabei sollte gegeben sein, dass der Koordinatenabstand Δuv nicht größer ist als 0,0054. Die Referenzwahl ist bei der neueren eingeführten Color Quality Scale (CQS) analog durchzuführen [6].

Ignoriert man die Auswahlregel des Referenzspektrums über die ähnlichste Farbtemperatur und wählt ein beliebiges Referenzspektrum, so ergibt sich je nach Testspektrum eine gewisse Bandbreite an Farbwiedergabeeigenschaften. Der obere Teil von Abbildung 7 zeigt fünf typische LED-Spektren (a-e) sowie ein Leuchtstofflampenspektrum (f). Ihre zugehörigen CRIs und CCTs sind als Stern im unteren Teil der Abbildung 7 markiert. Die Spektren a), b) und d), die dem Spektrum eines schwarzen Strahlers recht ähnlich sind weisen die höchsten CRI-Werte auf. Die Graphen aus Abbildung 7 verdeutlichen die Abhängigkeit des Farbwiedergabeindex CRI_{CCT} von der Wahl des Testspektrums gegeben als Referenz-CCT. Dabei ist der Verlauf mit Ausnahme

des abrupten Referenzwechsels bei 5000 K stetig, sodass Messunsicherheiten der CCT nach [7] keinen großen Einfluss besitzen. Auch die Nichlinearität der Farbtemperatur zeigt sich wieder in den starken Änderungen des CRI_{CCT} bei niedrigen Farbtemperaturen verglichen mit den höheren Farbtemperaturen.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die zu wählende Referenz nicht automatisch eine Maximierung des CRIs zur Folge hat und insbesondere Spektrum e) einen deutlich höheren CRI hätte, würde man es mit einem warmweisseren Spektrum vergleichen.

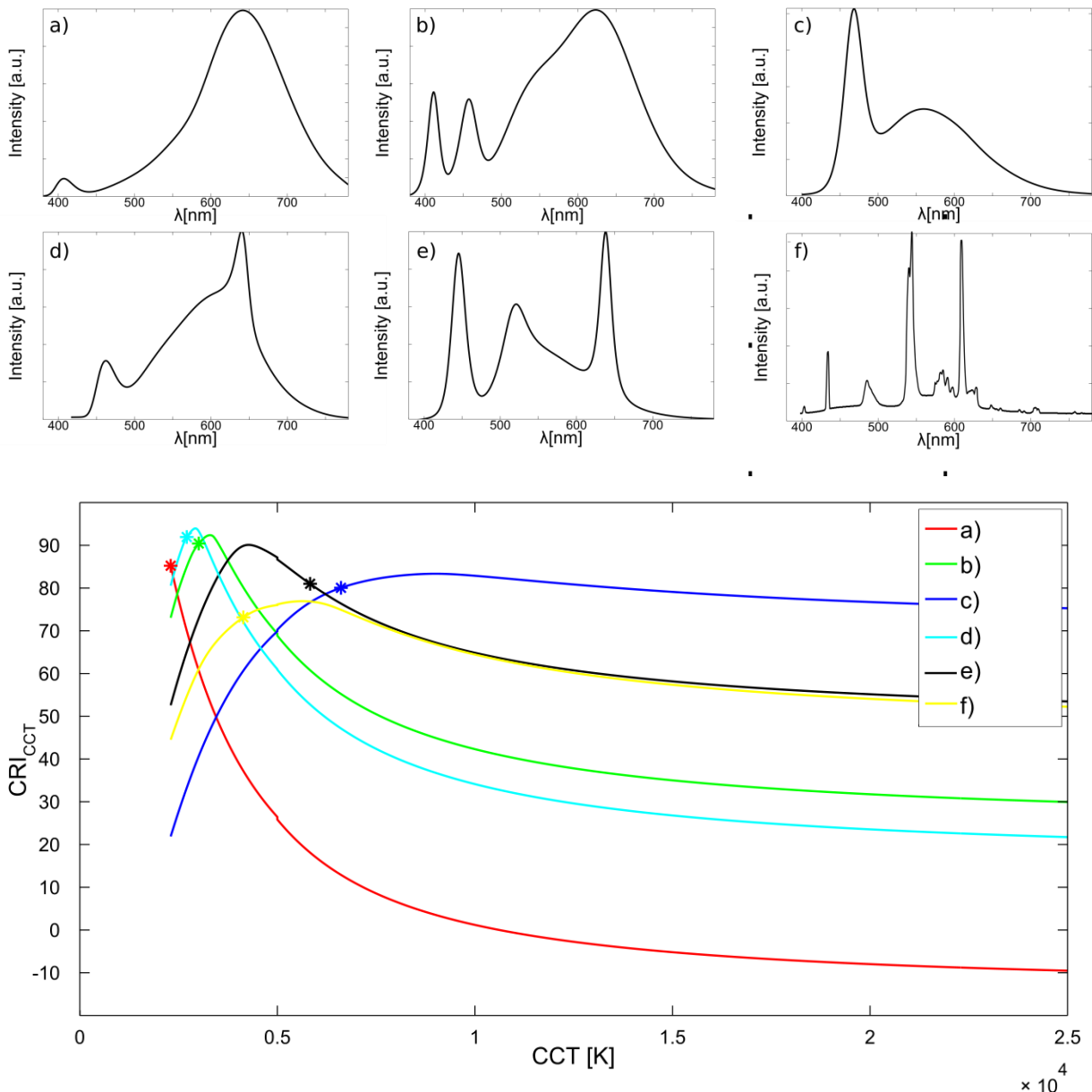


Abbildung 7: Testspektren und ihr zugehöriger CRI, sowie CCT (*), und Farbwiedergabe bei Auswahl einer nicht normkonformen Referenz (plankcher Strahler für $CCT < 5000$ K und Tageslichtart für ≥ 5000 K) CRI_{CCT}

6 Zusammenfassung

In dem Artikel wurden die wichtigsten Temperaturbegriffe der Lichttechnik zusammengefasst. Die Farbtemperatur ist dabei generell als Maß zur Beschreibung von Lichtfarbunterschieden anwendbar. Allerdings ist aufgrund der Nichtlinearität ein Graph nach Abbildung 4 notwendig um die Daten in das üblichere Maß, den Farbkoordinatenabstand $\Delta u'v'$, zu transferieren. Die ähnlichste Farbtemperatur ist hingegen bedingt durch ihre implizit gegebene Unsicherheit nur zur generellen Klassifizierung größerer Farbunterschiede geeignet, ermöglicht aber keinerlei feinere Abstufungen bezüglich schwacher oder kaum sichtbarer Farbunterschiede. Des Weiteren hat die Farbtemperatur auch in der Bestimmung des Farbwiedergabeindex CRI eine Bedeutung. Typische Messunsicherheiten der CCT wirken sich allerdings kaum auf die ermittelte Farbwiedergabe aus. Die zu wählende Referenzbeleuchtung führt verglichen mit anderen Spektren schwarzer Strahler nicht automatisch zu einer Maximierung des CRIs.

Referenzen

- [1] Illumination, International C.: *Colorimetry*. Commission internationale de l'Eclairage, CIE Central Bureau, CIE technical report, (2004)
- [2] Wyszecki, G. ; Stiles, W. S.: *Color science : concepts and methods, quantitative data and formulae*, (2000)
- [3] Bieske, K.: *Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme*, (2010)
- [4] Harbers, G.; McGroddy, K.; Petluri, R.; Tseng, P. K.; and Yriberri, J.: Visual color matching of LED and tungsten-halogen light sources, präsentiert auf CIE 2010: Lighting Quality and Energy Efficiency, (2010).
- [5] Bieske, K.; Fiebig, T.: Kombination unterschiedlicher Lichtfarben im Raum: Farbige Schatten, präsentiert auf Licht 2014, (2014)
- [6] Davis, W. and Ohno, Y.: Color quality scale, *Optical Engineering*, 49(3), (2010)
- [7] Gardner, J. L.: Correlated colour temperature – uncertainty and estimation, *Metrologia* 37(5), (2000)