



Was ist schönes Licht?

Licht im Spannungsfeld zwischen Wahrnehmung, Wirkung und Effizienz

Frank Reifegerste

Was ist schönes Licht?

Keine technisch erfassbare Größe.

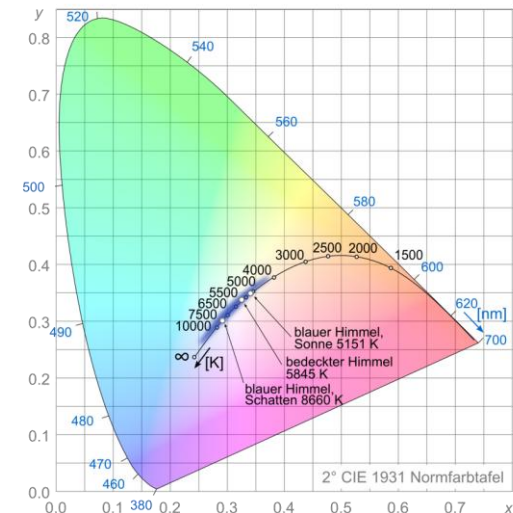
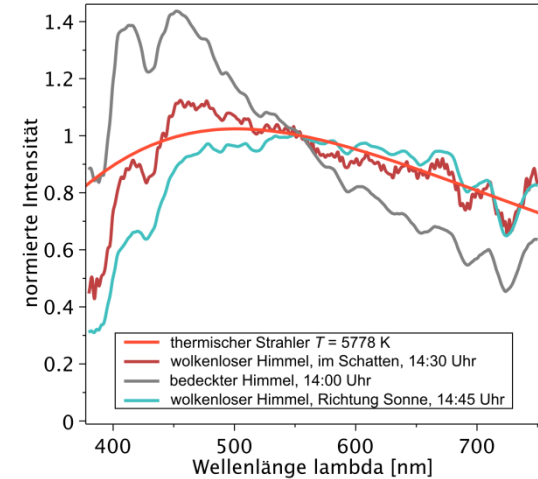
Aspekte

- Objekt, Körperfarbe, Assoziationen
- Empfindungen des Beobachters
- Geometrische Lichtverteilung
- Spektrale Charakteristik des Lichtes

Worin besteht eigentlich das Problem und warum wird es gerade jetzt diskutiert?

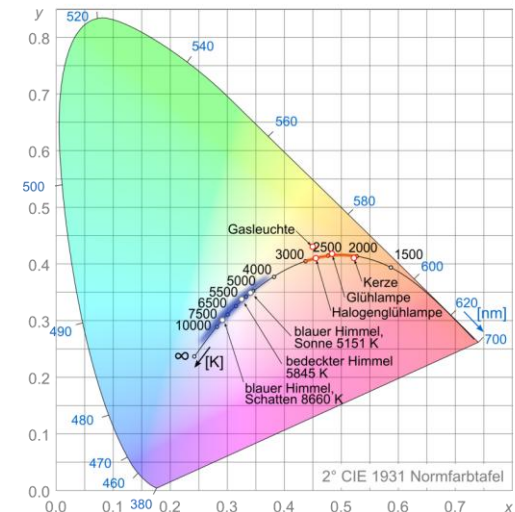
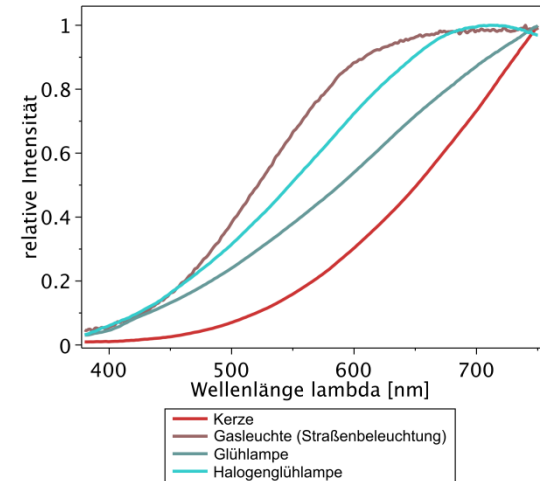
Natürliches Licht

- Sonne: thermischer Strahler
 $T_0 = 5778 \text{ K}$
- Durch Atmosphäre gefiltert
CCT 4000 .. 18000 K
- Farborte leicht oberhalb der Planckkurve
- Menschliches visuelles System ist an diese Spektren evolutionär angepasst
- → Standardisierte Verteilungen
D50, D55, D65, D75
- Durch chromatische Adaption wird Farbkonstanz erreicht



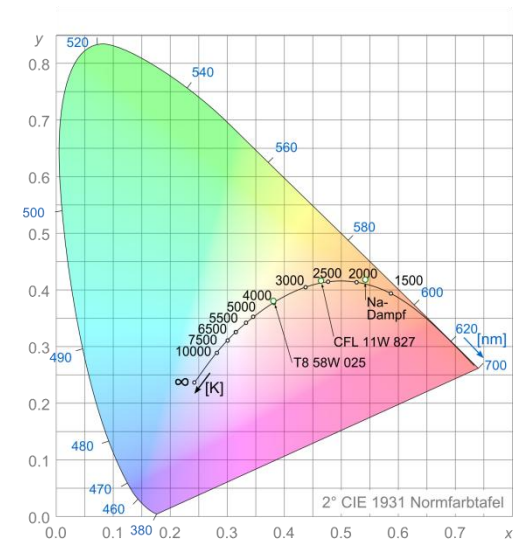
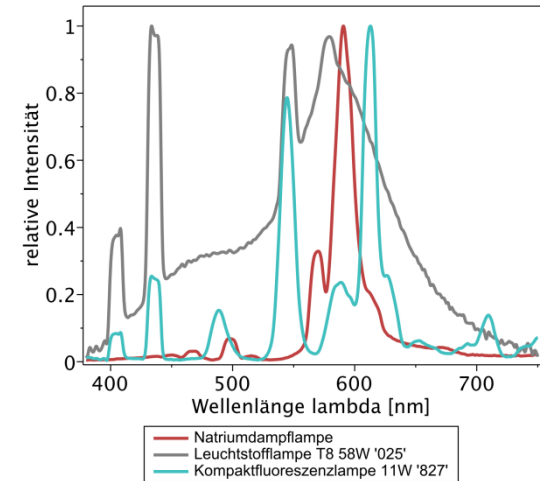
Künstliches Licht - Thermische Strahler

- Offenes Feuer, Holzspäne, Fackeln
- Talglampen 40000 Jahre, Öllampen 6000 Jahre
- Talgkerze 2200 Jahre, Wachskerze 1400 Jahre
- Gaslicht 1785, ab ca. 1820 Verbreitung in der Allgemeinbeleuchtung
- Elektrische Kohlebogenlampen 1802
- Elektrisches Licht 1879 Kohlefaden, Wolframfaden
- Thermische Strahler haben ein gleichmäßiges Spektrum
- CRI Ra definitionsgemäß nahe 100%
- CCT meist 2000 .. 3000 K
- Kulturelle Gewöhnung



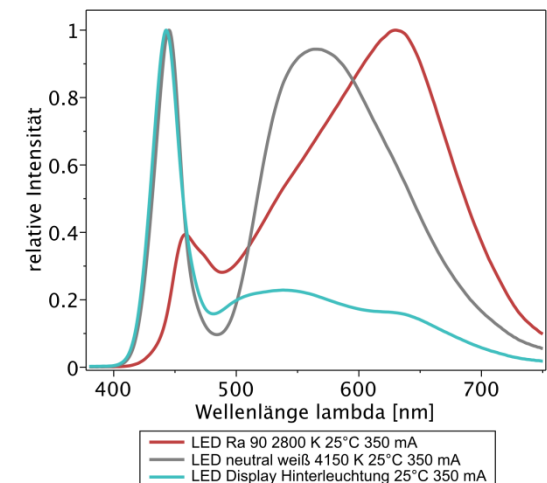
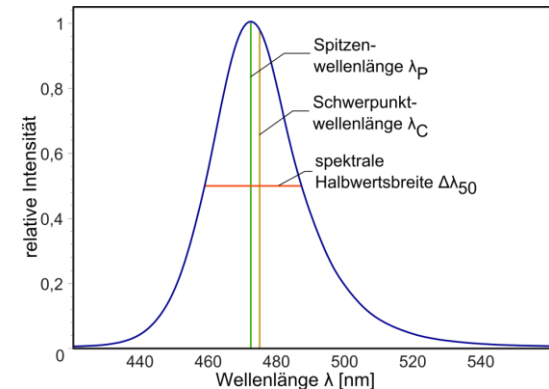
Künstliches Licht - Fluoreszenzlampen

- Gasentladungslampen 1857
- Quecksilberdampf 1892
- Fluoreszenzlampen, Leuchtstoffröhre: Gasentladung + Leuchtstoff 1926
- In Allgemeinbeleuchtung meistverwendetes Leuchtmittel
- Ausgereifte Technik
- Spektrum hat Banden und Lücken
- Verschiedenste Lichtfarben möglich
- Farbwiedergabe \leftrightarrow Wirkungsgrad
- Farbwiedergabe meist mittelmäßig abgestimmt



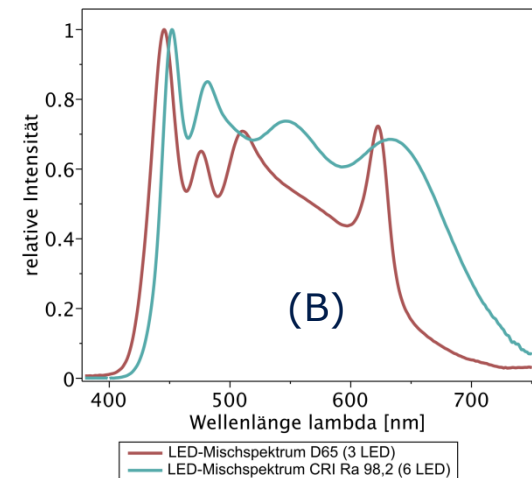
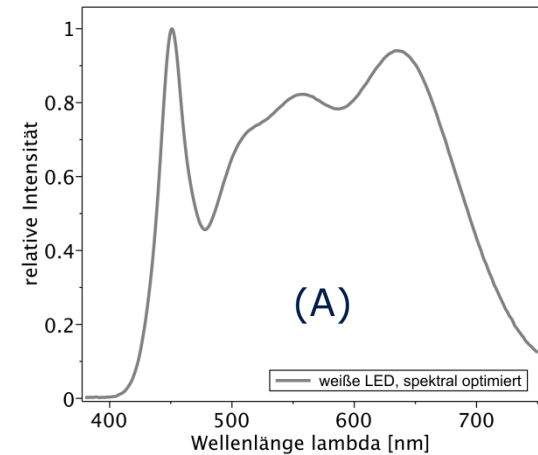
Künstliches Licht - Elektrolumineszenz (LED)

- Elektrolumineszenz an Halbleitern bekannt seit 1902
- kommerzielle LED Bauelemente seit 1968
- schmalbandiges Spektrum
 $\Delta\lambda_{50} = 15 \dots 30 \text{ nm}$
- LED sind gut dimmbar
- In Verbindung mit Leuchtstoff
→ weiße LED seit 1996
- durch Variation des Leuchtstoffes oder durch Mischen des Lichtes unterschiedlicher LED können nahezu beliebige Spektren erzeugt werden
- Herstellerübergreifende spektrale Charakterisierung der Bauelemente noch nicht abgeschlossen



Künstliches Licht - Elektrolumineszenz (LED)

- Elektrolumineszenz an Halbleitern bekannt seit 1902
- kommerzielle LED Bauelemente seit 1968
- schmalbandiges Spektrum
 $\Delta\lambda_{50} = 15 \dots 30 \text{ nm}$
- LED sind gut dimmbar
- In Verbindung mit Leuchtstoff
→ weiße LED seit 1996
- durch Variation des Leuchtstoffes (A) oder durch Mischen des Lichtes (B) unterschiedlicher LED können nahezu beliebige Spektren erzeugt werden
- Herstellerübergreifende spektrale Charakterisierung der Bauelemente noch nicht abgeschlossen



Merkmale zur Beschreibung wünschenswerter spektraler Lichtverteilungen

Wie lassen sich Ziele für den Entwurf spektraler Verteilungen formulieren?

- Gegenwärtig keine allgemein anerkannten Gestaltungsregeln für LED-Spektren verfügbar
- CRI Ra (hoher CRI → natürlichere Farbwiedergabe)
- GAI Gamut Area Index (hoher GAI → gesättigtere / lebhaftere Farben)
GAI > 80 und CRI Ra > 80
- Khan et al: „Farbwiedergabe von konventionellen Halbleiter-Lichtquellen“
CCT 2700-6500 K, CRI Ra > 93, R9 (rot) > 85, R12 (blau) > 85,
Farbdifferenz zum Referenzweiß $\Delta u'v' < 0,002$
- CRI2012 Beseitigung der Schwächen des CRI Ra: Farbdifferenzmodell verbessert, höhere Anzahl an Testfarben, Berücksichtigung der Umgebungseinflüsse, nur empfehlender Charakter
- ΔSDW Parameter zur Beschreibung der spektralen Gleichmäßigkeit

Spektrale Gleichmäßigkeit $\Delta SD / \Delta SDW$

Normierung des eingestellten
 Lichtspektrums auf
 Referenzbeleuchtungsstärke 1000 lx

Spektrum des Referenzstrahlers mit:

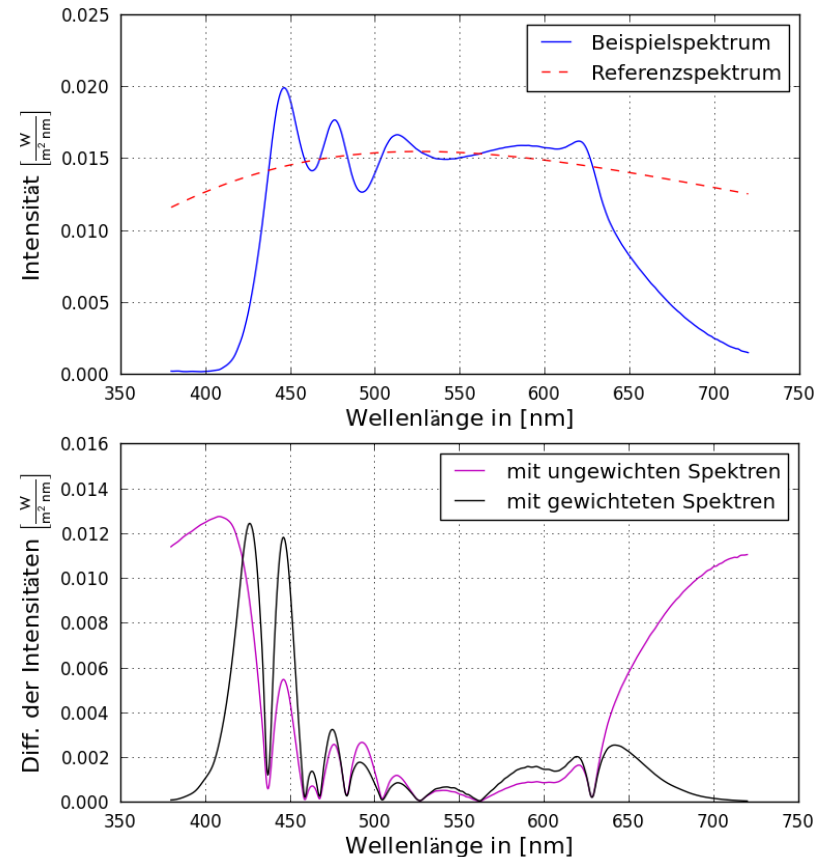
- Gleicher Farbtemperatur CCT
- Gleicher Beleuchtungsstärke

Aufsummieren der Differenz zwischen
den beiden Spektren

$$\Delta SD = \int |I(\lambda) - I_{REF}(\lambda)| d\lambda$$

Beim Parameter ΔSDW wird die
Differenz zusätzlich gewichtet.

Je kleiner $\Delta SD / \Delta SDW$, desto
gleichmäßiger ist das Spektrum





Glühlampe

60 W

- Seit 2011 Herstellungsverbot
- Seit 2012 40 W und 25 W verboten



Halogenglühlampe

53 W \cong 75 W

- ab 2014 Herstellungsverbot





Floureszenzlampe

11 W \triangleq 60 W

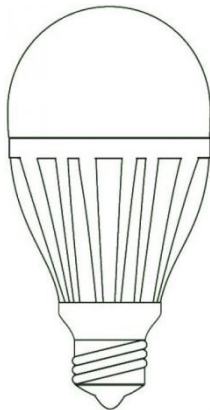
2700 K

Ra > 80

Anlaufzeit: 20 s

A

B



LED-Lampe

9,8 W \triangleq 60 W

2700 K

Ra > 80

806 lm

A++

A+

A

Bewertungskriterien

Quelle	CCT [K]	CRI Ra >93	CRI R9 >85	CRI R12 >85	CRI R14	Δ SDW	GAI >80
Bedeckter Himmel, 14:00 Uhr, Schatten	5976	99,3	97,7	97,9	99,8	0,187	98,2
Blauer Himmel, 14:30, Schatten	8873	99,3	97,8	99,2	99,3	0,211	104,5
Blauer Himmel, 14:45, Sonne	5151	99,4	97,0	98,5	99,7	0,148	89,5
Wolframfaden-Glühlampe	2454	98,5	99,0	95,6	99,7	0,092	37,7
Niedervolt-Halogenglühlampe	2792	98,4	92,9	97,1	99,6	0,062	48,5
Leuchtstoffröhre T8 Typ LT58W 025	3991	69,2	-51,2	56,4	94,1	1,324	64,7
CFL Typ DULUX S 11W 41-827	2689	83,1	-3,2	49,1	67,5	2,978	47,0
Cree_XPEHEW-U1-0000-009E8_25_350	2809	93,3	67,1	82,6	99,6	0,427	51,9
Rebel_LXML-PWW1-0060_25_350	3029	88,7	75,4	72,9	90,1	0,735	73,6
Rebel_LXML-PWN1-0100_25_350	4149	68,0	-24,1	31,2	86,3	1,305	69,7
LED Retrofit E14	2627	81,1	35,1	51,7	90,6	0,630	42,5
LED Retrofix Sygonix 6,3W 3000K E27	2798	82,5	12,7	77,1	97,7	0,733	53,2
LED Straßenbeleuchtung Dresden 2014	2968	74,2	-17,9	56,4	95,8	1,039	57,7
Stanley_GSPW1653-40z	4308	97,8	93,4	80,8	96,9	0,586	85,6
LED-Mischlicht, 3 LED	5496	97,6	96,6	81,1	97,1	0,762	85,3
LED-Mischlicht, 6 LED	7185	98,1	80,0	90,9	98,8	0,924	99,4

- Ziel 1:** Erzielen einer hohen **Farbwiedergabe:**
geringer Unterschied der Farbsinneseindrücke von Objekten
unter Test bzw. Referenzlicht
→ numerische Parameter, vergleichbar, kann optimiert werden

Parameter↑ → 😊

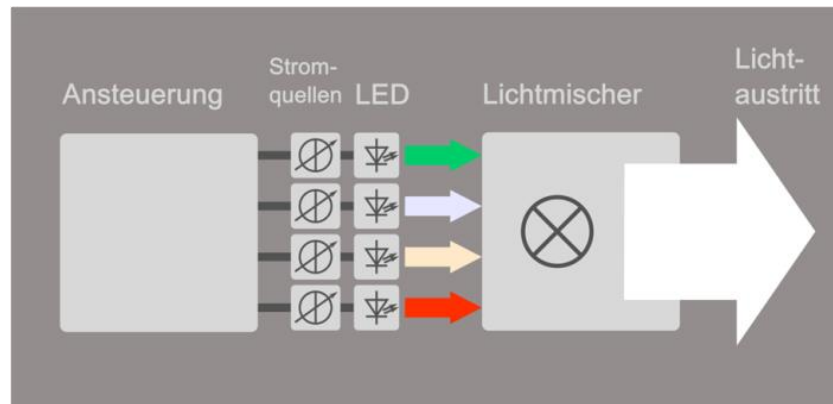
Aber:

CRI $R_a = 94$ → 😐

CRI $R_a = 85$ → 😊

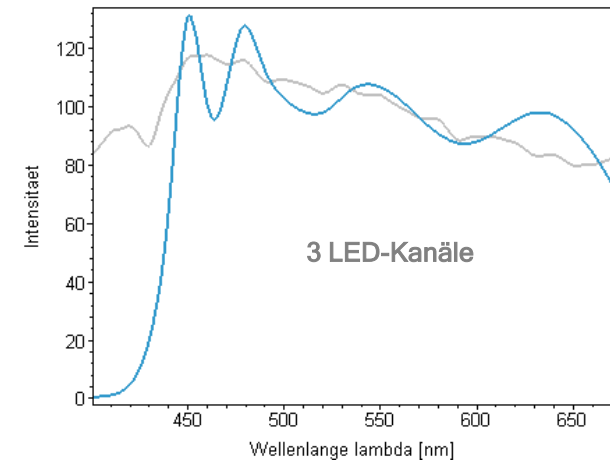
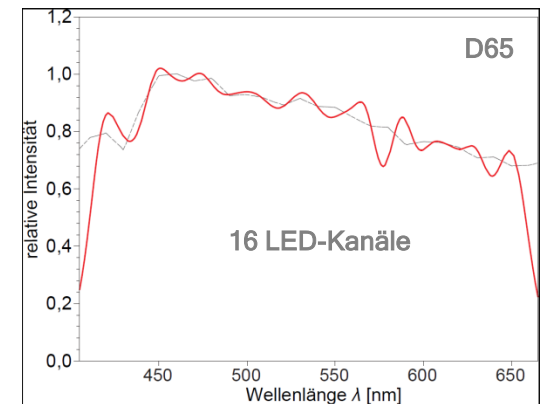
- Ziel 2:** Bestmögliches Aussehen von bekannten Objekten: **Farbpräferenz**
→ Erstellen neuer spektraler Lichtverteilungen möglich
→ Gewinnen neuer Erkenntnisse, wie das Spektrum beschaffen sein muss,
damit Probanden es als ‚schön‘ bezeichnen

Spektral einstellbare LED-Mischlichtquelle



Das Licht ausgewählter spektral unterschiedlicher LED wird optisch gemischt und kann Mischspektrum abgegriffen werden.

Durch Einstellen des LED-Stromes lassen sich die einzelnen spektralen Anteile variieren.



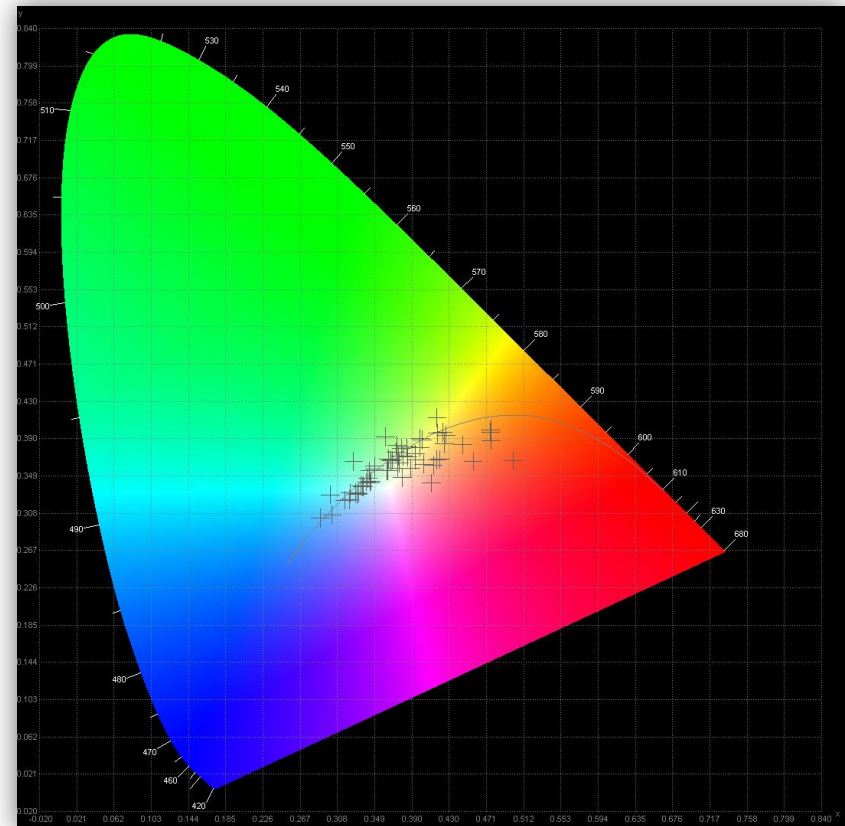
Experimentalanordnung

Ziel: Beantwortung der Fragestellung: Wie sollte das Lichtspektrum zusammengesetzt sein, damit bekannter Objekte „schön“ aussehen?

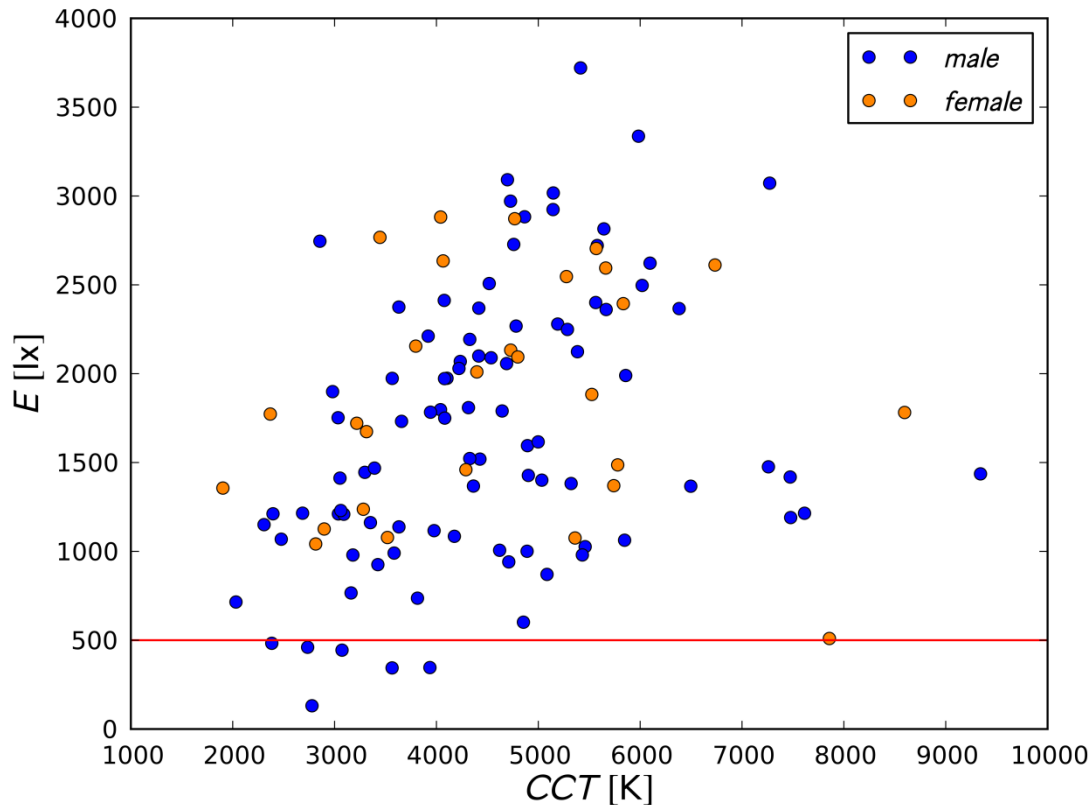


T1 [°C] Intensity

A	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="1334"/>	<input type="text"/>	I_A [mA]
B	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="374"/>	<input type="text"/>	I_B [mA]
C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="330"/>	<input type="text"/>	I_C [mA]
D	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="929"/>	<input type="text"/>	I_D [mA]
E	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="587"/>	<input type="text"/>	I_E [mA]
F	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="100"/>	<input type="text"/>	I_F [mA]



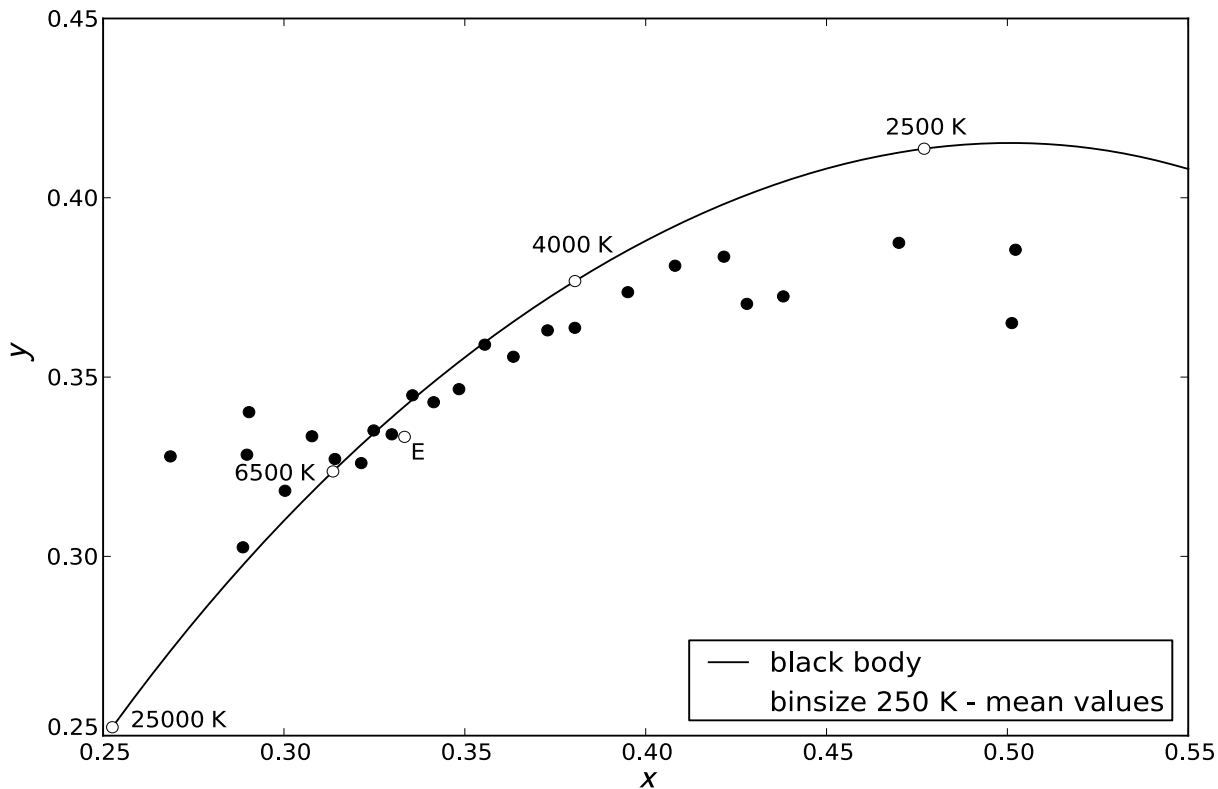
Parameter CCT und Beleuchtungsstärke



Aussagen

- Probanden stellen eine hohe Beleuchtungsstärke ein
- CCT zwischen 1900 und 9400 K
- Aufschlüsselung nach Assoziation Wohnbereich oder Arbeitsbereich möglich
- Arbeitsbereich
CCT zwischen 3000 und 6000 K
CCTmean = 4869 K
- Wohnbereich
CCT zwischen 2000 und 5000 K
CCTmean = 3894 K

Parameter Farbort, 250K Quantile

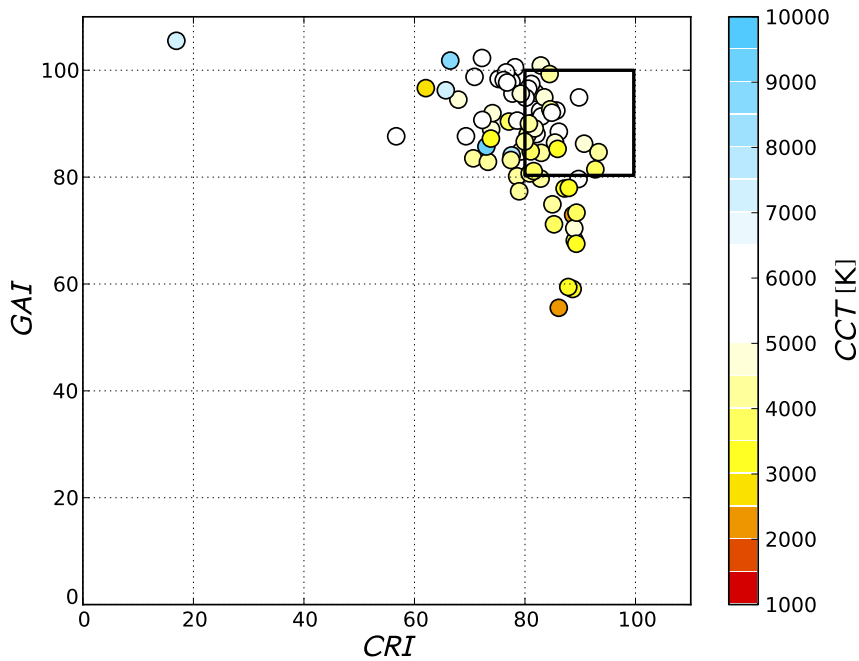


Aussagen

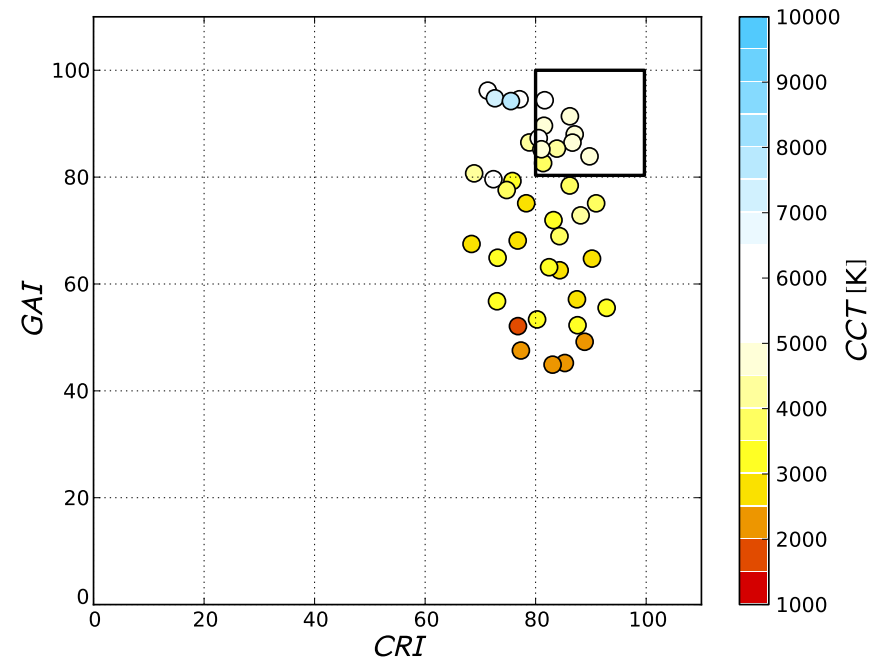
- für CCT < 5000 K Farborte eher unterhalb der Planck-Kurve
- für CCT > 5000 K Farborte eher oberhalb der Planck-Kurve

Parameter CRI, GAI und CCT

Arbeitsbereich: $CCT_{\text{mean}} = 4869 \text{ K}$



Wohnbereich: $CCT_{\text{mean}} = 3894 \text{ K}$



Aussagen

- Arbeitsbereich → eher Spektren mit hohem GAI eingestellt
- Wohnbereich → auch Spektren mit niedrigerem GAI eingestellt
- auch CRI Ra < 90 eingestellt

Zusammenfassung

- Im Massenmarkt angebotene Leuchtmittel haben verglichen mit thermischen Strahlern eine schlechtere Farbwiedergabe und nicht zueinander passende spektrale Verteilungen.
- Die Kennzeichnung mit Lichtstrom, Farbtemperatur und CRI Ra ist ungenügend um herstellerübergreifend Austauschbarkeit zu gewährleisten.
- Der technische Parameter CRI Ra ist nicht ausreichend, die Farbwiedergabe von Quellen mit Peaks zu beschreiben.
- Gegenwärtig sind keine allgemein anerkannten Gestaltungsregeln für LED-Spektren verfügbar.
- Ziel? A) Farbwiedergabe oder B) Farbpräferenz
- Wenn A) Farbwiedergabeindex optimieren.
- Wenn B) Kriterien anwenden + Nutzerbefragung, evtl. Iteration notwendig.

Vielen Dank.