

FN-Optiklabor-Lichtquellen-v0.1- 2026-05-17

Forschungsnotiz — Lichtquellen

Autor: Thomas Schüller · forschung@tschueller.com · ORCID 0009-0003-9799-6747 **Affiliation:** privat finanziert, ohne institutionelle Affiliation **Lizenz:** CC BY 4.0 · **Version:** 0.1 · **Datum:** 2026-05-17
Strang: FORSCHUNG / Höhlengleichnis-Optiklabor / 07 Lichtquellen
Werkzeug: LUX · **Dokumenttyp:** Forschungsnotiz (Template v1.0)
Status: abgeschlossener Test mit dokumentierter Bewertung

1. These

Modul 09 (Farbmischung) hat gezeigt, dass Farbe eine Wahrnehmungs-Antwort dreier Zapfentypen ist. Modul 07 nutzt diese Tristimulus-Metrik, um die naheliegende Annahme “jede weiße Lichtquelle ist gleichwertig” zu prüfen. Die Annahme erweist sich als doppelt falsch: **Erstens haben verschiedene weiße Lichtquellen völlig verschiedene Spektren (kontinuierlich beim Schwarzkörper, lückenhaft bei LED und Leuchtstoff), und zweitens geben sie Objektfarben unterschiedlich gut wieder.** Eine Lichtquelle hat zwei unabhängige Eigenschaften: wie sie selbst aussieht (Farbtemperatur) und wie gut sie Objektfarben zeigt (Farbwiedergabeindex CRI). Diese zwei Eigenschaften sind entkoppelt — zwei Quellen können gleich weiß erscheinen und trotzdem Objektfarben völlig verschieden wiedergeben.

2. Annahmen

1. Plancksches Strahlungsgesetz für thermische Strahler (Schwarzkörper).
2. CIE-1931-Standardbeobachter für die Farbwahrnehmung (aus Modul 09).
3. Lambert-Beer-artige Reflexion: Objektfarbe = Quellspektrum × Reflektanz.
4. Idealisierte Emissionsspektren: LED als Pump-Peak + Phosphor-Buckel, Leuchtstoff als Quecksilber-Linien + Phosphor, Natrium als Doppellinie.
5. McCamy-Approximation für korrelierte Farbtemperatur (CCT).
6. Vereinfachter CRI über mittlere Farbverschiebung von acht Testfarben gegen eine Schwarzkörper-Referenz.

3. Mathematisches Modell

M1 — “Weiß = Weiß”: Jede weiße Lichtquelle ist gleichwertig und austauschbar.

M2 — Schwarzkörper (Planck): thermischer Strahler mit Spektrum

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}.$$

Wien'sches Verschiebungsgesetz: Peak bei $\lambda_{\max} = b/T$ mit $b = 2898 \mu\text{m}\cdot\text{K}$. Farbtemperatur T bestimmt die Farbe.

M3 – Linien- und Bandenspektren: LED, Leuchtstoff, Natrium als Summen schmaler Gauß-Banden bzw. Linien plus optionalem Phosphor-Kontinuum. Lückenhafte Spektren, die dennoch weiß wirken können (weil das Auge nur drei Tristimuluswerte registriert, Modul 09).

M4 – Farbwiedergabe (CRI): Objektfarbe unter Quelle S ist $S(\lambda)/R(\lambda)$ für Reflektanz R . Der Farbwiedergabeindex misst die mittlere Farbverschiebung von Testfarben zwischen Quelle und Referenzstrahler:

$$\text{CRI} \approx 100 - k \cdot \Delta_{xy}$$

wobei Δ_{xy} die Chromatizitätsverschiebung pro Testfarbe ist.

Symbol	Bedeutung	Einheit
$B(\lambda, T)$	Planck-Strahldichte	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{m})$
T	Temperatur	K
$\lambda_{\max}$	Peak-Wellenlänge	nm
$S(\lambda)$	Quellspektrum	rel.
$R(\lambda)$	Objekt-Reflektanz	0..1
CCT	korrelierte Farbtemperatur	K
CRI	Farbwiedergabeindex	0..100

4. Parameter

Drei Szenarien:

Szenario	Setup
A Schwarzkörper	Planck bei 2700 K, 5500 K, 6500 K
B drei weiße Quellen	Glühlampe (2700 K Planck), warmweiße LED, Leuchtstoff
C CRI	obige Quellen + Natriumdampf, Referenz 2700-K-Schwarzkörper, 8 Testfarben

Toleranz vorab: $\epsilon = 5\%$ Chromatizitätsdistanz für A/B; für C gilt M1 widerlegt, wenn CRI-Spanne > 20 Punkte.

5. Vorhersage

Szenario	Erwartung
A	2700 K deutlich gelblicher als 6500 K, Distanz $> \epsilon$
B	Alle drei erscheinen weißlich, aber Spektren völlig verschieden (glatt vs. Linien)
C	CRI variiert stark: Glühlampe ≈ 100 , Natrium sehr niedrig

6. Falsifikationskriterium

M1 ("Weiß = Weiß") ist widerlegt, wenn **eines** zutrifft: - Zwei Schwarzkörper verschiedener Temperatur haben Chromatizitätsdistanz $\Delta(\lambda) > \epsilon$ (Farbtemperatur ist real). - Zwei "weiße" Quellen haben stark verschiedene Spektren bei ähnlicher Farbe (Spikiness-Verhältnis $\Delta(\lambda) > 2$). - Der CRI variiert zwischen Quellen um mehr als 20 Punkte (Farbwiedergabe ist quellabhängig).

7. Konkurrenzmodelle

- **K1 — "Weiß = Weiß" (M1):** geprüftes engeres Modell.
- **K2 — Schwarzkörper-Strahler (M2):** Glühlampe, Sonne, Sterne.
- **K3 — Linien-/Bandenstrahler (M3):** LED, Leuchtstoff, Gasentladung.
- **K4 — CRI / Farbwiedergabe (M4):** Qualitätsmetrik.
- **K5 — TM-30 (moderne Farbwiedergabe):** Gamut-Index + Fidelity-Index, löst CRI ab.
- **K6 — Spektral-Rendering:** volle Spektren statt CCT+CRI — für genaue Simulation.
- **K7 — Tageslicht-Modell (CIE D-Serie):** standardisierte Tageslichtspektren, nicht exakt Planck.

8. Versagensbereich

- **Sehr niedrige Temperaturen ($T < 1000$ K):** Strahlung fast vollständig infrarot, kaum sichtbar.
- **Sehr hohe Temperaturen ($T > 20000$ K):** Peak im UV, Farbe sättigt gegen Blau.
- **Nicht-thermische Quellen:** Laser, LED, Gasentladung folgen nicht Planck — CCT ist nur ein Näherungswert ("korrelierte" Farbtemperatur).
- **Metamerie-Versagen:** zwei Quellen mit gleicher CCT können Objektfarben verschieden wiedergeben (genau der CRI-Punkt).
- **Fluoreszierende Objekte:** geben Licht bei anderer Wellenlänge ab — bricht die einfache Reflexionsrechnung.
- **Extrem schmalbandige Quellen (Natrium):** CRI-Konzept stößt an Grenzen, weil fast keine Farbe unterscheidbar ist.

9. Simulation

Numerische Auswertung in `lichtquellen_simulation.py`:

1. Planck-Spektren bei verschiedenen Temperaturen, normiert.
2. Idealisierte LED-, Leuchtstoff-, Natrium-Spektren als Gauß-Summen.
3. Spektrum $\rightarrow$ XYZ $\rightarrow$ sRGB über CIE-1931-CMFs (aus Modul 09).
4. CCT-Schätzung über McCamy-Formel.
5. CRI: acht Testfarben als breite Gauß-Reflektanzen; Objektfarbe unter Quelle vs. Referenz, mittlere Chromatizitätsverschiebung.

Ergebnisse in `lichtquellen_results.json`. Plot als `lichtquellen_szenen.svg` (vier Teilbilder: Schwarzkörper, drei weiße Quellen, Natrium, Wien-Gesetz).

10. Ergebnis

10.1 A Schwarzkörper-Vergleich

Temperatur	Chromatizität	geschätzte	erscheint
------------	---------------	------------	-----------

	xy		CCT
2700 K	(0.459, 0.412)	2726 K	warmgelb
5500 K	(0.330, 0.342)	~5500 K	neutralweiß
6500 K	(0.313, 0.329)	~6500 K	bläulichweiß
Distanz 2700↔6500	0.16 ($\gg \epsilon$)	—	widerlegt

10.2 B drei weiße Quellen

Quelle	Chromatizität xy	CCT	Spikiness
Glühlampe 2700 K	(0.459, 0.412)	2726 K	2.22
warmweiße LED	(0.403, 0.387)	3538 K	1.90
Leuchtstoff	(0.352, 0.398)	4909 K	4.97

Spikiness-Verhältnis $4.97 / 1.90 = 2.6 (> 2) \rightarrow$ **widerlegt**: ähnlich weiß, völlig verschiedene Spektren.

10.3 C Farbwiedergabe CRI

Quelle	CRI (approx.)	max. Farbverschiebung
Glühlampe 2700 K	100 (Referenz)	0.000
warmweiße LED	77.2	0.090
Leuchtstoff	60.0	0.136
Natriumdampf	49.1	0.203

CRI-Spanne $100 - 49 = 51$ Punkte ($\gg 20$) $\rightarrow$ **widerlegt (fundamental)**.

Plot: lichtquellen_szenen.svg.

11. Bewertung

M1 (“Weiß = Weiß”) ist in allen drei Szenarien widerlegt — Szene C liefert die schärfste Widerlegung über die Farbwiedergabe.

Szene A etabliert die Farbtemperatur als reale, messbare Eigenschaft. Ein Schwarzkörper bei 2700 K (Glühlampe) ist deutlich gelblicher als bei 6500 K (bedeckter Himmel) — die Chromatizitätsdistanz von 0,16 ist riesig im Vergleich zur Unterscheidungsschwelle. Die geschätzte CCT trifft die Eingabe fast exakt (2726 K für 2700 K Eingabe), was die McCamy-Formel validiert. Das Wien’sche Verschiebungsgesetz erklärt, warum: bei höherer Temperatur verschiebt sich der spektrale Peak zu kürzeren Wellenlängen (mehr Blau).

Szene B ist der erste überraschende Befund: Glühlampe, warmweiße LED und Leuchtstoff erscheinen alle weißlich, haben aber drastisch verschiedene Spektren. Die Glühlampe ist ein glattes Kontinuum (Spikiness 2.2), die LED hat einen blauen Pump-Peak plus Phosphor-Buckel (Spikiness 1.9), der Leuchtstoff ist voller scharfer Quecksilber-Linien (Spikiness 4.97). Dass sie trotzdem ähnlich weiß aussehen, ist nur möglich, weil das Auge das Spektrum auf drei Tristimuluswerte reduziert (Modul 09) — verschiedene Spektren, ähnliche Farbe (Metamerie).

Szene C ist der praktisch wichtigste Befund: die **Farbwiedergabe** unterscheidet die Quellen dramatisch. Unter der Glühlampe (CRI 100 per Definition) sehen Objektfarben “natürlich” aus, weil ihr glattes Spektrum alle Wellenlängen liefert. Unter Natriumdampf (CRI 49)

sind Objektfarben kaum unterscheidbar — das berüchtigte Orange der älteren Autobahnbeleuchtung, unter der ein rotes und ein grünes Auto gleich grau wirken, weil die Quelle praktisch nur eine Wellenlänge (589 nm) liefert und damit keine Farbinformation. LED (77) und Leuchtstoff (60) liegen dazwischen: brauchbar, aber mit sichtbaren Farbverfälschungen, besonders bei gesättigten Rottönen (bekannte Schwäche früher LED-Beleuchtung).

Die zentrale methodische Lektion: Eine Lichtquelle hat **zwei unabhängige Eigenschaften**. Erstens ihre eigene Farbe (Farbtemperatur, CCT) — wie sie aussieht, wenn man hineinschaut. Zweitens ihre Farbwiedergabe (CRI) — wie gut sie Objektfarben zeigt. Diese zwei sind entkoppelt: eine warmweiße LED (2700 K) und eine Glühlampe (2700 K) haben dieselbe CCT, aber verschiedene CRI. Die Schul-Verwirrung “ist das jetzt warmes oder kaltes Licht?” verfehlt die wichtigere Frage “wie gut zeigt es Farben?”.

Verbindung zu vorhergehenden Modulen: - Modul 09

Farbmischung lieferte die Tristimulus-Metrik, ohne die CCT und CRI nicht definierbar wären. Modul 07 ist die direkte Anwendung. -

Modul 08 Bühnenbeleuchtung nahm einfache RGB-Modellquellen an; Modul 07 zeigt, dass reale Quellen viel kompliziertere Spektren haben — die Bühnenpraxis (CRI von Scheinwerfern) hängt direkt davon ab. - **Modul 05 Linsen (chromatische Aberration)** ist betroffen: eine Quelle mit Linienspektrum (Leuchtstoff) zeigt diskrete Farbsäume, eine mit Kontinuum (Glühlampe) zeigt verschmierte. -

Modul 03 Einfachspalt: das physikalische Spektrum einer Quelle ist objektiv messbar (Spektroskopie); seine Farbe und Farbwiedergabe sind abgeleitete Wahrnehmungsgrößen.

12. Nächster Test

Modul 06 Prismen als nächster Schritt: das Prisma zerlegt genau diese Quellspektren räumlich. Ein Glühlampen-Spektrum zeigt ein kontinuierliches Band, ein Leuchtstoff-Spektrum diskrete Linien, Natrium eine einzige Linie. Prismen-Spektroskopie ist die historische Methode, mit der diese Spektren überhaupt entdeckt wurden (Fraunhofer-Linien). Setzt Modul 05 (Brechung) und Modul 07 (Quellspektren) voraus.

Mögliche Erweiterung Modul 07 v0.2: TM-30-Farbwiedergabe (moderne Ablösung des CRI), Tageslicht-Modell (CIE D-Serie), Sonnenlicht mit Atmosphären-Absorption (warum Sonnenuntergänge rot sind).

Anhang A — Querverweise

- Praxis-Erklärung: PRAXIS-Lichtquellen.md (folgt)
- Begleitpapier: BEGLEITPAPIER-Lichtquellen.md (folgt)
- Werkzeug: LUX.html (folgt) — *lat. lux, das Licht*
- Code: lichtquellen_simulation.py
- Plot: lichtquellen_szenen.svg
- Ergebnisdaten: lichtquellen_results.json
- Vorgänger-Module: Modul 09 Farbmischung (Tristimulus), Modul 08 Bühnenbeleuchtung, Modul 05 Linsen
- Verwandte Module: Modul 06 Prismen (folgt), Modul 03 Einfachspalt (Spektrum)

Anhang B — Externer Bestandscheck

- Wyszecki & Stiles (2000) *Color Science* — Farbtemperatur, CRI.

- **CIE 13.3:1995** *Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties* — offizielle CRI-Definition.
- **CIE 015:2018** *Colorimetry* — CCT, Tageslicht.
- **IES TM-30-20** — moderne Farbwiedergabe-Metrik.
- **Planck (1901)** *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum* — Originalarbeit.
- **PhET “Blackbody Spectrum”** — didaktische Schwarzkörper-Simulation.

Was die Werkstatt-Notiz davon unterscheidet: drei kontrastierende Szenarien im Falsifikationsformat; die zentrale Trennung von Farbtemperatur (Eigenfarbe) und CRI (Farbwiedergabe); echte Planck- und CIE-Numerik; Brücken zu Modul 09, 08, 05, 06.

Anhang C — Quellen

- Wyszecki, G.; Stiles, W. S. (2000). *Color Science*, 2. Aufl. Wiley.
- CIE (1995). *Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources*, CIE 13.3.
- CIE (2018). *Colorimetry*, 4. Aufl. CIE 015:2018.
- IES (2020). *TM-30-20: Method for Evaluating Light Source Color Rendition*.
- Planck, M. (1901). Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum. *Ann. Phys.* 4:553.
- McCamy, C. S. (1992). Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates. *Color Res. Appl.* 17:142.