

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

Forschungsnotiz — Bühnenbeleuchtung

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 / 08
Bühnenbeleuchtung **Werkzeug:** SCAENA · **Dokumenttyp:** Forschungsnotiz (Template v1.0) **Status:** abgeschlossener Test mit dokumentierter Bewertung

1. These

Modul 11 (Schattentheater) hat Schatten von Punkt- und ausgedehnten Quellen einzeln betrachtet. Modul 08 nimmt den realistischen Schritt: **Bühnenbeleuchtung kombiniert mehrere positionierte Quellen mit endlicher Ausdehnung und unterschiedlicher Farbe gleichzeitig, und die einfache "Punktquellen-Annahme" der Schulphysik wird in der Realität durch drei verschiedene Effekte gleichzeitig widerlegt** — Halbschatten, Mehrfach-Schatten und additive Farbmischung. Diese Notiz prüft die drei Effekte in drei kontrollierten Szenarien (eine Punktquelle, klassisches 3-Punkt-Licht aus Foto/Film, RGB-Bühnenlicht).

2. Annahmen

1. Strahlenoptik (Beugung vernachlässigbar bei Bühnenmaßstäben — Wellenlänge $\ll$ Quellgröße).
2. Lambert-Kosinus-Gesetz für reflektierende Flächen: Beleuchtungsstärke $\propto \cos(\theta)$ zur Flächennormalen.
3. Inverse-Quadrat-Gesetz: Intensität $\propto 1/r^2$.
4. Inkohärente Lichtquellen (keine Interferenz).
5. Linearer RGB-Farbraum (gerätunabhängig).
6. Verdeckungs-Test: Person blockiert Strahl, wenn Sichtlinie durch ihren Zylinder + Kopfkugel führt.
7. Soft Box als Kreisscheibe senkrecht zur Strahlrichtung; mehrere Sub-Quellen für Halbschatten-Approximation.

3. Mathematisches Modell

M1 — ideale Punktquelle: Eine Quelle, eine harte Schattenkante, keine Halbschatten, keine Farbmischung. Beleuchtungsstärke an Wandpunkt $((x,y,z_W))$ zur Quelle $(\vec{s})$:

$$E(\vec{p}) = \begin{cases} \frac{I_0 \cos\theta}{r^2} & \text{wenn Sichtlinie frei, } r > 0 \\ 0 & \text{wenn Sichtlinie durch Person, } r = 0 \end{cases}$$

mit $r = |\vec{s} - \vec{p}|$ und $\cos\theta = \frac{(\vec{s} - \vec{p}) \cdot \hat{n}_W}{|\vec{s} - \vec{p}|}$.

M2 – ausgedehnte Quelle (Soft Box): Quelle mit endlicher Fläche A_s ergibt Halbschatten-Bereich (Penumbra). Numerisch: N_s Sub-Quellen über die Quelle verteilt, mittlere Sichtbarkeit:

$$v(\vec{p}) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \mathbb{1}[\text{Sichtlinie zu Sub-Quelle } i \text{ frei}].$$

M3 – mehrere Quellen: Lineare Superposition für inkohärentes Licht; mehrere Quellen produzieren mehrere Schatten in unterschiedlichen Richtungen:

$$E_{\text{gesamt}}(\vec{p}) = \sum_{k=1}^{N_q} E_k(\vec{p}).$$

M4 – Farbmischung: Pro RGB-Kanal additiv:

$$E_{\text{RGB}}(\vec{p}) = \sum_k v_k(\vec{p}) \cdot \frac{I_k \cos\theta_k}{r_k^2} \cdot \vec{c}_k.$$

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\vec{p}$	Punkt auf Projektionswand	m
$\vec{s}_k$	Position der k -ten Quelle	m
I_k	Intensität der Quelle	rel.
$\vec{c}_k$	Farbe der Quelle (RGB)	—
A_s	Soft-Box-Größe	m
$v(\vec{p})$	Sichtbarkeit (Halbschatten)	0..1

4. Parameter

Drei Szenarien, Bühnen-Geometrie: Person als Zylinder ($r = 0,25$ m, $h = 1,80$ m) + Kopfkugel ($r = 0,12$ m, Mitte $(y = 1,70$ m) bei $(0, 0, 5)$), Wand bei $(z = 5, 0)$ m, Wandauflösung (100×50) .

Szenario	Quellen
A Punktquelle	1 Quelle $(-2, 3, 1)$ m, $I = 10$, warmweiß
B 3-Punkt-Licht	Key $(-1.5, 2.8, 0.5)$ Soft 0.3 m, $I = 8$; Fill $(1.5, 2.0, 0.8)$ Soft 0.6 m, $I = 3$; Back $(0.5, 3.2, 4.0)$ Punkt, $I = 5$
C RGB	Rot $(-2.5, 2.5, 1.5)$, Grün $(2.5, 2.5, 1.5)$, Blau $(0, 3.5, 1.5)$, jeweils Punkt, $I = 6$

Toleranz vorab: $\epsilon = 5\%$ Kontrastabweichung.
Begründung: Bühnenbeleuchtung ist visuelles Phänomen, $\epsilon = 5\%$ entspricht der Empfindlichkeitsschwelle des kalibrierten Auges für Helligkeitsunterschiede.

5. Vorhersage

Szenario	Erwartung
	M1 gestützt: ein scharfer

A	Schatten, keine Penumbra, eine Farbe
B	M1 widerlegt: drei Schatten, weiche Kanten (Penumbra durch Soft Box), keine Farbmischung
C	M1 widerlegt: drei überlappende farbige Schatten, sichtbare RGB-Mischung in Überlappungszonen

6. Falsifikationskriterium

M1 ist widerlegt, wenn **eines** der folgenden Kriterien erfüllt ist: - Anzahl beobachtete Schatten ≥ 1 (Mehrfach-Quellen) - Penumbra detektiert (Gradient an Schattenkante weich verteilt, nicht stufig) - Farbmischung detektiert (Pixel mit signifikanter Energie in mehr als einem RGB-Kanal)

7. Konkurrenzmodelle

- **K1 — eine Punktquelle (M1):** geprüft engeres Modell.
- **K2 — eine ausgedehnte Quelle (Soft Box):** M2.
- **K3 — Mehrfach-Punktquellen:** M3.
- **K4 — Mehrfach-RGB-Quellen:** M4.
- **K5 — vollständiges Radiosity:** mit Mehrfach-Reflexion zwischen Wänden — gehört in eigenes Modul (Architekturlicht).
- **K6 — Path-Tracing:** Monte-Carlo-Bildsynthese — eigene Klasse (Film-VFX, Architekturvisualisierung).
- **K7 — geometrische Optik mit Brechung:** für transparente Bühnenobjekte (Glasrequisiten) — eigenes Modul.

8. Versagensbereich

- **Sehr nahe Quelle / Person:** Inverse-Quadrat divergiert; numerisch durch $(r^2 + \epsilon)$ stabilisiert.
- **Sehr kleine Apertur:** Beugung wird sichtbar (Modul 03) — bei Bühnenmaßstäben irrelevant.
- **Hochreflektive Bühnenflächen:** Radiosity nötig, hier ignoriert.
- **Volumetrisches Licht** (Nebel, Rauch): Streuung im Luftvolumen, eigenes Thema.
- **Bewegte Person, bewegte Quelle:** Zeitabhängige Komponente; hier statisches Bild.
- **Wellenlängenabhängige Reflexion:** Bühnenkostüme haben farbige Absorption — hier neutral angenommen.

9. Simulation

Numerische Auswertung in `buehnenlicht_simulation.py`:

1. Wandauflösung (100×50) Pixel über $(-3, 3) \times (0, 3)$ m.
2. Pro Pixel: Lambert-Kosinus + Inverse-Quadrat-Gesetz für jede Quelle.
3. Verdeckungs-Test: Schnitt-Test mit Person-Zylinder und Kopfkugel.
4. Soft Box: 16 Sub-Quellen auf Kreisscheibe, mittlere Sichtbarkeit.
5. Reinhard-Tonemapping: $(I \rightarrow I/(1+I))$ für Anzeige.
6. Schattenzählung: zusammenhängende Schatten-Gebiete via `scipy.ndimage.label`, Mindestgröße 30 Pixel.
7. Penumbra-Detektion: Gradientenmagnitude im Bereich 0.03 bis 0.2 als Anteil aller Pixel; $(\geq 2\%)$ = Penumbra detektiert.

8. Farbmischung: Pixel mit allen drei RGB-Kanälen (> 0); mehr als 50 solche Pixel = Mischung detektiert.

Ergebnisse in `buehnenlicht_results.json`. Plots als `buehnenlicht_A_single.svg`, `buehnenlicht_B_3point.svg`, `buehnenlicht_C_RGB.svg`.

10. Ergebnis

Szenario	Quellen	Schatten	Penumbra	Farbmischung	
A	1	1	nein	nein	ges
B	3	3	ja	nein	wid (Pe Qu
C	3	0 (überlappt)	nein	ja	wid (Fa

Kontrastverhältnisse: A: 14.2; B: 8.7; C: 2.03.

11. Bewertung

M1 (ideale Punktquelle) ist in 2 von 3 Szenarien widerlegt — und jeweils auf **verschiedenen Wegen**. Das ist methodisch der wichtigste Befund: dieselbe Hypothese fällt durch **drei separate Falsifikations-Modi**.

Szene A ist der Lehrbuch-Grenzfall. Eine harte Schattenkante, eine Farbe, keine Halbschatten. M1 nahezu exakt gestützt — der Nachweis, dass das Modell nicht generell falsch, sondern nur in der Praxis selten realisiert ist. In der Foto-Praxis entspricht das einem **direkten Blitz ohne Diffusor** oder einem fernen Punktstrahler.

Szene B (3-Punkt-Licht) ist der Standard im Film und Fotostudio: Key + Fill + Back. Drei Schatten in verschiedene Richtungen, der Hauptschatten weich gezeichnet durch Soft-Box-Diffusion. **Penumbra** = numerisch detektierter Halbschatten. Die Beleuchtungsverhältnisse 8:3:5 sind klassische Schauspieler-Beleuchtung (Schlüssel:Aufhellung:Kontur $\approx 3:1:2$ als grobe Faustregel im Lichtaufbau für Porträt).

Szene C (RGB-Bühne) ist moderne Theaterbeleuchtung — drei farbige Scheinwerfer aus verschiedenen Winkeln. Was sichtbar wird: keine getrennten Schatten (sie überlappen so stark, dass jedes Pixel von mindestens einer Quelle erreicht wird), aber **deutliche additive Farbmischung**. Wo alle drei Quellen treffen: Weißmischung. Wo eine fehlt: Komplementärfarbe (rot+grün ohne blau = gelb; rot+blau ohne grün = magenta; grün+blau ohne rot = cyan). Das ist genau das Prinzip additiver Bildschirmtechnik (RGB-Pixel im Monitor), nur dass hier die "Pixel" Quadratmeter groß sind.

Konsequenz für die Schulphysik: Die Vorstellung von "einer Lichtquelle" ist eine starke Idealisierung. In der Praxis (Bühne, Studio, Architektur, Außenwelt mit Sonne + Himmelslicht + Reflexionen) gibt es immer mindestens zwei Quellen, und in den meisten Fällen sind sie unterschiedlich gefärbt. Die "harte Schattenkante" der Punktquellen-Idealisierung ist die seltene Ausnahme, nicht der Normalfall.

Verbindung zu vorhergehenden Modulen: - Modul 11

Schattentheater hat das Konzept "Quellgröße bestimmt Penumbra" einzeln behandelt; Modul 08 setzt es im realistischen Multi-Quellen-

Setup um. - **Modul 05 Linsen (chromatische Aberration)** zeigte, dass Glas verschiedene Wellenlängen unterschiedlich bricht; Modul 08 zeigt, dass Bühnen-Quellen verschiedener Wellenlänge sich auf Flächen additiv überlagern. - **Modul 03 Einfachspalt** zeigte, dass die Punktquellen-Annahme schon innerhalb eines Spalts versagt; Modul 08 zeigt sie auf der makroskopischen Bühne ebenfalls.

12. Nächster Test

Modul 09 Farbmischung als nächster Schritt: additiv (RGB) vs. subtraktiv (CMYK), Metamerie (verschiedene Spektren = gleiche Wahrnehmung), Farbkreis und Komplementärfarben. Setzt Modul 08 voraus.

Modul 07 Lichtquellen als Komplement: was emittieren Halogen, LED, Leuchtstoff, Laser tatsächlich? Spektren, Farbtemperatur, Schwarzkörper-Strahlung.

Mögliche Erweiterung zu Modul 08 v0.2: Rückprojektions-Leinwand statt direkter Wand; volumetrisches Licht (Nebel, Rauch); bewegte Quellen (Verfolger).

Anhang A — Querverweise

- Praxis-Erklärung: PRAXIS-Buehnenbeleuchtung.md (folgt)
- Begleitpapier: BEGLEITPAPIER-Buehnenbeleuchtung.md (folgt)
- Werkzeug: SCAENA.html (folgt) — *lat. scaena, die Bühne*
- Code: buehnenlicht_simulation.py
- Plots: buehnenlicht_A_single.svg, buehnenlicht_B_3point.svg, buehnenlicht_C_RGB.svg
- Ergebnisdaten: buehnenlicht_results.json
- Vorgänger-Module: Modul 11 Schattentheater, Modul 05 Linsen (chromatische Aberration)
- Verwandte Module: Modul 07 Lichtquellen (folgt), Modul 09 Farbmischung (folgt)

Anhang B — Externer Bestandscheck

- **Box (2010)** *Set Lighting Technician's Handbook* — Standardwerk für Filmlicht.
- **Brown (2012)** *Cinematography: Theory and Practice* — 3-Punkt-Licht-Theorie.
- **Pharr, Jakob, Humphreys (2023)** *Physically Based Rendering*, 4. Aufl. — Physikalisch-basiertes Rendering.
- **Cook & Torrance (1982)** *A Reflectance Model for Computer Graphics* — Lambert + Specular.
- **CIE 015:2018 Colorimetry** — Farbmessung und RGB-Standards.
- **Blender Cycles, Maxwell Render** — Path-Tracer mit physikalisch korrektem Licht.

Was die Werkstatt-Notiz davon unterscheidet: drei kontrastierende Szenarien im konsistenten Falsifikationsformat; explizite Verbindung zu Bühnen- und Studio-Praxis; Open-Source-Numerik mit Schattenzählung; Brücken zu Modul 11, 05, 03.

Anhang C — Quellen

- Box, H. C. (2010). *Set Lighting Technician's Handbook*, 4. Aufl. Focal Press.
- Brown, B. (2012). *Cinematography: Theory and Practice*, 2. Aufl.

Focal Press.

- Pharr, M.; Jakob, W.; Humphreys, G. (2023). *Physically Based Rendering*, 4. Aufl. MIT Press.
- Cook, R. L.; Torrance, K. E. (1982). A Reflectance Model for Computer Graphics. *ACM TOG* 1(1):7-24.
- CIE (2018). *Colorimetry*, 4. Aufl. CIE 015:2018.

Wortzahl: ca. 1620 · Seiten: 7 · Version 0.1 · 2026-05-17