

FN-Wahrnehmung- Helligkeitskontrast-v0.1-2026-05- 17

Forschungsnotiz — Helligkeits- und Farbkontrast

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 / Wahrnehmungslabor / L2 Helligkeitskontrast
Werkzeug: CONTRA · **Dokumenttyp:** Forschungsnotiz (Template v1.0) **Status:** abgeschlossener Test mit dokumentierter Bewertung

1. These

L1 (Geometrische Täuschungen) zeigte, dass das visuelle System Längen nicht objektiv misst. L2 zeigt dasselbe für **Helligkeit** — und liefert erstmals einen konkreten neuronalen Mechanismus. Die naheliegende Annahme, die wahrgenommene Helligkeit eines Flecks hänge nur von seinem eigenen Licht ab, wird dreifach widerlegt: **gleiche physikalische Leuchtdichte wird je nach Kontext systematisch verschieden hell wahrgenommen.** Der Mechanismus ist die **laterale Hemmung** — modellierbar als Difference-of-Gaussians (“Mexican Hat”), die Simultankontrast und Mach-Bänder aus *einem* Prinzip erzeugt — sowie die **Helligkeitskonstanz**, die Schatten “herausrechnet”. Das visuelle System misst keine absolute Leuchtdichte, sondern **Kontraste und Verhältnisse**. Das Modul vertieft Modul 09 (Farbe als Konstruktion) mit einem echten neuronalen Modell und setzt den Wahrnehmungs-Strang fort.

2. Annahmen

1. Die physikalische Leuchtdichte jedes Bildpunktes ist exakt definiert und messbar.
2. Die laterale Hemmung wird als Difference-of-Gaussians (DoG) modelliert — Zentrum erregend (schmal), Umgebung hemmend (breit); ein etabliertes Modell retinaler Ganglienzellen.
3. Die Helligkeitskonstanz wird als Beleuchtungsschätzung modelliert — das System teilt die geschätzte Beleuchtung heraus, um die Reflektanz zu schätzen.
4. Statische, achromatische Reize (Grauwerte); Farbkontrast wird analog erwähnt, aber nicht separat durchgerechnet.
5. Mittlerer Beobachter; die Modelle sind an die Phänomenologie kalibriert, die Mechanismen (DoG, Konstanz) sind neurophysiologisch motiviert.

3. Mathematisches Modell

M1 — “Helligkeit = lokale Leuchtdichte”: Wahrgenommene Helligkeit $\backslash(H(x) = L(x)\backslash)$, die Leuchtdichte am Ort $\backslash(x)\backslash$. Der Kontext spielt keine Rolle.

M2/M3 — laterale Hemmung (DoG): Die neuronale Antwort ist die Faltung der Leuchtdichte mit einem Mexican-Hat-Kernel:

$$\backslash R(x) = L(x) * \backslash \big[G_{\{\sigma_c\}}(x) - w \backslash G_{\{\sigma_s\}}(x) \backslash \big], \backslash$$

mit erregendem Zentrum $\backslash(G_{\{\sigma_c\}})\backslash$ (schmal), hemmender Umgebung $\backslash(G_{\{\sigma_s\}})\backslash$ (breit, $\backslash(\sigma_s > \sigma_c)\backslash$) und Hemmgewicht $\backslash(w)\backslash$. Die wahrgenommene Helligkeit ist $\backslash(H(x) = L(x) + k \backslash R(x)\backslash)$. Dieser eine Mechanismus erzeugt: - **Simultankontrast** (M2): ein Fleck auf hellem Grund wird gehemmt → erscheint dunkler. - **Mach-Bänder** (M3): an Leuchtdichte-Kanten entstehen Über- und Unterschwinger → helle/dunkle Bänder, die physikalisch fehlen.

M4 — Helligkeitskonstanz: Das System schätzt die Beleuchtung $\backslash(I(x))\backslash$ und die Reflektanz $\backslash(\rho(x) = L(x)/I(x)\backslash)$. Wahrgenommen wird die Reflektanz, nicht die Leuchtdichte. Zwei Felder gleicher Leuchtdichte, aber verschieden geschätzter Beleuchtung (z.B. eines im Schatten), erscheinen verschieden hell.

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\backslash(L(x))\backslash$	physikalische Leuchtdichte	—
$\backslash(H(x))\backslash$	wahrgenommene Helligkeit	—
$\backslash(R(x))\backslash$	neuronale Antwort (DoG)	—
$\backslash(\sigma_c, \sigma_s)\backslash$	Zentrum-/Umgebungsbreite	px
$\backslash(w)\backslash$	Hemmgewicht	—
$\backslash(I(x), \rho(x))\backslash$	Beleuchtung, Reflektanz	—

4. Parameter

Drei Szenarien:

Szenario	Setup
A Simultankontrast	Grau 0.5 auf Grund 0.2 und 0.8; DoG $\backslash(\sigma_c=2)\backslash, \backslash(\sigma_s=15)\backslash, \backslash(w=0.95)\backslash$
B Mach-Bänder	Rampe 0.3→0.7; DoG-Antwort
C Checker-Shadow	zwei Felder Leuchtdichte 0.42; Beleuchtung 1.0 vs. 0.6

Toleranz vorab: $\backslash(\varepsilon = 5\%)\backslash$ (Helligkeit), $\backslash(\varepsilon = 2\%)\backslash$ (Mach-Band-Amplitude). Begründung: kleinere Abweichungen liegen an der Wahrnehmungsschwelle.

5. Vorhersage

Szenario	Erwartung
A	gleiche Leuchtdichte, wahrgenommen auf dunkel heller als auf hell
B	glatte Rampe, wahrgenommen mit dunklem und hellem Band an den Knicken
C	gleiche Leuchtdichte, Feld im Schatten heller wahrgenommen

6. Falsifikationskriterium

M1 (“Helligkeit = lokale Leuchtdichte”) ist widerlegt, wenn zwei physikalisch gleiche Leuchtdichten um mehr als ϵ verschieden wahrgenommen werden, oder wenn an einer glatten Rampe Bänder auftreten, die physikalisch fehlen — systematisch und durch Kontext bzw. laterale Wechselwirkung erzeugt.

7. Konkurrenzmodelle

- **K1 — lokale Leuchtdichte (M1):** geprüftes engeres Modell.
- **K2 — laterale Hemmung / DoG (M2/M3):** retinale Kontrastverstärkung.
- **K3 — Helligkeitskonstanz / Anchoring (M4):** Beleuchtungsschätzung, Reflektanz-Wahrnehmung (Gilchrist).
- **K4 — Retinex-Theorie (Land):** das visuelle System berechnet Reflektanz durch Vergleich über Kanten hinweg.
- **K5 — Bayessche Wahrnehmung:** wahrscheinlichste Reflektanz+Beleuchtung gegeben den Reiz (allgemeinster Rahmen).
- **K6 — Gegenfarben / laterale Hemmung im Farbraum:** analog für Farbkontrast (schließt an L3 an).
- **K7 — mehrskalige Filtermodelle (ODOG):** oriented difference-of-Gaussians, erklärt komplexere Helligkeitstäuschungen.

8. Versagensbereich

- **Vereinfachtes DoG-Modell:** ein einzelner Skalen-Filter; reale Wahrnehmung nutzt mehrere Skalen und Orientierungen (ODOG). Komplexe Täuschungen (White-Illusion) braucht mehrskalige Modelle.
- **Achromatisch:** Farbkontrast wird nur erwähnt, nicht durchgerechnet — eigener Mechanismus (Gegenfarben, L3).
- **Kalibrierung der Modellparameter:** k , w , σ sind an die Phänomenologie angepasst; die absoluten Amplituden sind nicht aus der Neurophysiologie abgeleitet.
- **Individuelle/adaptive Effekte:** Helligkeitsadaptation über die Zeit (Hell-Dunkel-Adaptation) ist nicht modelliert.
- **Checker-Shadow-Beleuchtungsschätzung:** die geschätzte Beleuchtung (0.6) ist plausibel gewählt, nicht aus einem vollen Szenenmodell berechnet.
- **High-Level-Einflüsse:** Bekanntheit, Aufmerksamkeit und 3D-Interpretation beeinflussen Helligkeit zusätzlich; hier nicht behandelt.

9. Simulation

Numerische Auswertung in `kontrast_simulation.py`:

1. DoG-Filter (Mexican Hat) als Modell der lateralen Hemmung.
2. Szene A: Leuchtdichteprofil mit gleichem Grau auf zwei Gründen; DoG-Antwort; wahrgenommene Helligkeit beider Quadrate.
3. Szene B: glatte Rampe; DoG-Antwort erzeugt Mach-Bänder; Über-/Unterschwinger gemessen.
4. Szene C: zwei Felder gleicher Leuchtdichte; Helligkeitskonstanz-Modell; geschätzte Reflektanzen.

Ergebnisse in `kontrast_results.json`. Plot als `kontrast_szenen.svg` (vier Teilbilder: Simultankontrast-Profil, Mach-Bänder, Checker-Shadow-Schema, Mexican-Hat-Kernel).

10. Ergebnis

10.1 A Simultankontrast

Größe	Wert
physikalisches Grau (beide)	0.500
physikalisches Verhältnis	1.000
wahrgenommen auf dunklem Grund	0.530
wahrgenommen auf hellem Grund	0.487
wahrgenommenes Verhältnis	1.087
Bewertung M1	widerlegt

10.2 B Mach-Bänder

Größe	Wert
Rampe	0.3 → 0.7 (linear, glatt)
helles Band (Überschwinger)	+0.045
dunkles Band (Unterschwinger)	−0.015
physikalisch	keine Bänder
Bewertung M1	widerlegt

10.3 C Checker-Shadow (Adelson)

Größe	Wert
Leuchtdichte Feld A und B	0.420 (identisch)
physikalisches Verhältnis	1.000
geschätzte Beleuchtung A / B	1.0 / 0.6
geschätzte Reflektanz A / B	0.42 / 0.70
wahrgenommenes Verhältnis	1.667
Bewertung M1	widerlegt

Plot: kontrast_szenen.svg.

11. Bewertung

M1 (“Helligkeit = lokale Leuchtdichte”) ist in allen drei Szenarien widerlegt.

Szene A (Simultankontrast) ist der Grundfall. Ein graues Quadrat mit exakt dem Leuchtdichtewert 0.5 erscheint heller (0.53), wenn es auf dunklem Grund liegt, und dunkler (0.487), wenn es auf hellem Grund liegt — wahrgenommenes Verhältnis 1.087 bei physikalisch identischem Grau. Der Mechanismus ist die laterale Hemmung: die neuronalen Zellen, die das Quadrat repräsentieren, werden von der Aktivität der Nachbarzellen gehemmt. Auf hellem Grund ist diese Hemmung stark (viel Licht ringsum), das Quadrat erscheint dunkler; auf dunklem Grund ist sie schwach, das Quadrat erscheint heller. Das ist kein Fehler, sondern eine sinnvolle Anpassung: das visuelle System verstärkt Kontraste, weil Kanten und Kontraste informativer sind als absolute Helligkeiten (an einer Kante ist ein Objekt zu Ende, ein absoluter Helligkeitswert sagt für sich wenig).

Szene B (Mach-Bänder) demonstriert denselben Mechanismus auf eine verblüffende Weise. Eine physikalisch vollkommen glatte Helligkeitsrampe (linear von 0.3 auf 0.7) wird *nicht* glatt

wahrgenommen: an der Stelle, wo die Rampe beginnt, erscheint ein dunkles Band (Unterschwinger -0.015), an der Stelle, wo sie in das helle Plateau übergeht, ein helles Band (Überschwinger $+0.045$). Diese Bänder — nach Ernst Mach benannt, der sie 1865 beschrieb — existieren physikalisch nicht; sie sind reine Konstruktionen der lateralen Hemmung. Der entscheidende Punkt, und der methodische Kern des Moduls: **Simultankontrast und Mach-Bänder entstehen aus demselben Modell**, dem Difference-of-Gaussians-Filter. Ein Mechanismus, zwei scheinbar verschiedene Phänomene — das ist dieselbe Art von Vereinheitlichung, die in der Mechanik (Resonanz/Schwebung aus einem Modell) und Audio auftrat.

Szene C (Checker-Shadow) ist die berühmteste Helligkeitstäuschung, von Edward Adelson 1995 konstruiert. Zwei Felder eines Schachbretts haben *exakt dieselbe Leuchtdichte* (0.42) — und erscheinen dennoch dramatisch verschieden: das eine als dunkles Feld im Licht, das andere als helles Feld im Schatten. Hier reicht die laterale Hemmung nicht als Erklärung; der Mechanismus ist die **Helligkeitskonstanz**. Das visuelle System weiß (aus dem Schattenwurf des Zylinders), dass ein Bereich im Schatten liegt, also weniger Licht empfängt. Es “rechnet” diese Beleuchtung heraus, um die *Materialhelligkeit* (Reflektanz) zu schätzen — denn die Reflektanz ist die konstante, objektbezogene Eigenschaft, die uns interessiert (ein Blatt Papier bleibt weiß, ob im Sonnenlicht oder im Schatten). Das Feld im Schatten muss, um dieselbe Leuchtdichte wie das beleuchtete zu erzeugen, eine höhere Reflektanz haben (0.70 vs. 0.42) — also erscheint es heller. Die Täuschung ist der Preis für eine normalerweise sehr nützliche Fähigkeit: die Farb- und Helligkeitskonstanz, die uns Objekte unter wechselnder Beleuchtung wiedererkennen lässt.

Die zentrale methodische Lektion: Anders als L1 (wo die Modelle rein phänomenologisch waren) liefert L2 einen **konkreten, neurophysiologisch motivierten Mechanismus** — die laterale Hemmung als Difference-of-Gaussians, das Standardmodell der rezeptiven Felder retinaler Ganglienzellen und einfacher kortikaler Zellen. Dass ein so einfaches Modell (Zentrum minus Umgebung) zwei klassische Täuschungen erzeugt, ist eindrucksvoll. Zugleich zeigt Szene C die Grenze rein lokaler Modelle: Helligkeitskonstanz braucht eine Schätzung der Szenenbeleuchtung, also einen Schritt über die reine Reiz-Verarbeitung hinaus. Das visuelle System ist beides — ein lokaler Kontrastverstärker *und* ein globaler Szenen-Interpret.

Verbindung zu vorhergehenden Modulen: - Modul 09

Farbmischung: dort war Farbe die Konstruktion (Tristimulus); hier ist es Helligkeit, mit einem konkreten neuronalen Mechanismus. Der Farbkontrast (Gegenfarben) ist die direkte Fortsetzung in L3. - **Modul L1 Geometrische Täuschungen:** dieselbe Grundeinsicht (Wahrnehmung $\neq$ physikalischer Reiz), jetzt mit Mechanismus statt nur Phänomenologie. - **Modul 02 Höhlengleichnis:** die Helligkeitskonstanz ist ein schönes Beispiel dafür, dass wir nicht den Reiz (Leuchtdichte) wahrnehmen, sondern eine Rekonstruktion der Welt (Reflektanz).

12. Nächster Test

Modul L3 Nachbilder und Gegenfarben als nächster Schritt: die Gegenfarbentheorie (Hering), negative Farbnachbilder, warum es kein “rötliches Grün” gibt — die Fortsetzung von Modul 09 und der laterale Kontrast im Farbraum. Oder **Modul L5 bistabile Wahrnehmung**.

Mögliche Erweiterung Modul L2 v0.2: mehrskalige Modelle (ODOG) für komplexere Täuschungen (White-Illusion, Hermann-Gitter); Farbkontrast durchgerechnet; Retinex-Theorie; die Rolle von

Anhang A — Querverweise

- Praxis-Erklärung: PRAXIS-Helligkeitskontrast.md (folgt)
- Begleitpapier: BEGLEITPAPIER-Helligkeitskontrast.md (folgt)
- Werkzeug: CONTRA.html (folgt) — *lat. contra, gegen; der Kontrast*
- Code: kontrast_simulation.py
- Plot: kontrast_szenen.svg
- Ergebnisdaten: kontrast_results.json
- Vorgänger-Module: Modul 09 Farbmischung, Modul L1 Geometrische Täuschungen, Modul 02 Höhlengleichnis
- Folge-Module (geplant): L3 Nachbilder/Gegenfarben, L4 Bewegung, L5 Bistabilität, L6 Gestalt

Anhang B — Externer Bestandscheck

- **Mach (1865)** — Beschreibung der Mach-Bänder.
- **Hartline (1938/1949)** — laterale Hemmung im Limulus-Auge (Nobelpreis 1967).
- **Kuffler (1953)** — Zentrum-Umgebung-rezeptive Felder retinaler Ganglienzellen.
- **Land (1977) Retinex** — Reflektanz-Berechnung.
- **Adelson (1995)** — Checker-Shadow-Illusion.
- **Blakeslee & McCourt (1999) ODOG** — mehrskaliges Filtermodell.

Was die Werkstatt-Notiz davon unterscheidet: drei Kontrastphänomene im einheitlichen Falsifikationsformat; das explizite DoG-Modell, das Simultankontrast und Mach-Bänder aus einem Mechanismus erzeugt; die Trennung laterale Hemmung (lokal) vs. Helligkeitskonstanz (global); die Brücken zu Modul 09, L1, 02.

Anhang C — Quellen

- Mach, E. (1865). Über die Wirkung der räumlichen Vertheilung des Lichtreizes auf die Netzhaut. *Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien* 52:303–322.
- Hartline, H. K. (1949). Inhibition of activity of visual receptors by illuminating nearby retinal areas. *Am. J. Physiol.*
- Kuffler, S. W. (1953). Discharge patterns and functional organization of mammalian retina. *J. Neurophysiol.* 16:37–68.
- Land, E. H.; McCann, J. J. (1971). Lightness and retinex theory. *J. Opt. Soc. Am.* 61:1–11.
- Adelson, E. H. (1995). Checkershadow illusion. MIT.
- Blakeslee, B.; McCourt, M. E. (1999). A multiscale spatial filtering account of the White effect. *Vision Research* 39:4361–4377.