

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

Forschungsnotiz — Nachbilder und Gegenfarben

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 / L3 Nachbilder und Gegenfarben **Werkzeug:** OPPONENS · **Dokumenttyp:** Forschungsnotiz (Template v1.0) **Status:** abgeschlossener Test mit dokumentierter Bewertung

1. These

Modul 09 etablierte die Trichromatik: drei Zapfentypen erzeugen die Farbwahrnehmung (Young-Helmholtz). L2 zeigte die laterale Hemmung für Helligkeit. L3 verbindet beide und zeigt, dass die Trichromatik allein *nicht ausreicht*: die Farbverarbeitung ist **zweistufig**. Auf der ersten Stufe stehen drei Zapfen (LMS), auf der zweiten drei **Gegenfarbenkanäle** — Rot-Grün, Blau-Gelb, Hell-Dunkel (Hering). Drei Phänomene widerlegen die Annahme, Farbe sei reizfest und rein trichromatisch kodiert: **negative Nachbilder** (Farbe entsteht ohne farbigen Reiz), **simultaner Farbkontrast** (Farbe hängt vom Kontext ab — laterale Hemmung im Farbraum) und **unmögliche Farben** (es gibt kein „rötliches Grün“, weil die Gegenfarbenachsen bipolar sind). Das Modul löst den historischen Streit Young-Helmholtz vs. Hering: **beide hatten recht, auf verschiedenen Ebenen**. Es schließt den Farb-Faden Modul 09 → L2 → L3.

2. Annahmen

1. Die drei Zapfentypen (L, M, S) haben bekannte, überlappende spektrale Empfindlichkeiten. Hier grob als RGB→LMS-Matrix genähert.
2. Die Gegenfarben-Transformation ist linear: Achromatisch = $L+M$, Rot-Grün = $L-M$, Blau-Gelb = $S-(L+M)/2$.
3. Adaptation reduziert die Empfindlichkeit stark gereizter Zapfen (Ermüdung/Bleichung).
4. Laterale Hemmung wirkt in den Gegenfarbenkanälen analog zu L2 (Helligkeit).
5. Die Bipolarität der Kanäle ist strukturell: ein Kanal kann nur einen Pol zur Zeit signalisieren.

3. Mathematisches Modell

M1 — „Trichromatik reicht, Farbe ist reizfest“: Die Zapfenantwort $((L,M,S))$ bestimmt die Farbe vollständig; sie hängt nur vom aktuellen Reiz ab und wird nicht in Gegenpaaren kodiert.

Gegenfarben-Transformation: $A = L + M, \quad RG = L - M,$
 $BY = S - \frac{L+M}{2}.$

M2 — Nachbild (Adaptation): Die Zapfenempfindlichkeit sinkt proportional zur Reizung, $(s_i \rightarrow s_i(1 - a, r_i))$. Ein neutraler Testreiz (Weiß) erzeugt dann eine unausgeglichene Antwort → die Gegenfarbe des Adaptationsreizes.

M3 — Farbkontrast (laterale Hemmung): Der Grund hemmt die Gegenfarbenkanäle des Flecks: induziert $(= \text{Fleck} - k \cdot \text{Grund})$ (in Gegenfarbenkoordinaten). Ein grauer Fleck nimmt die Gegenfarbe des Grundes an.

M4 — Unmögliche Farben: Da (RG) und (BY) bipolar sind, kann keine Farbe zugleich $(RG > 0)$ (rot) und $(RG < 0)$ (grün) haben. „Rötliches Grün“ ist strukturell ausgeschlossen; „rötliches Gelb“ (Orange, verschiedene Achsen) ist möglich.

Symbol	Bedeutung	Einheit
(L, M, S)	Zapfenantworten	—
(A, RG, BY)	Gegenfarbenkanäle	—
(a)	Adaptationsstärke	—
(k)	Hemmgewicht	—

4. Parameter

Drei Szenarien:

Szenario	Setup
A Nachbild	Adaptation auf gesättigtes Rot, Test Weiß, $(a=0.6)$
B Farbkontrast	grauer Fleck (0.5) auf rotem und grünem Grund, $(k=0.5)$
C Unmögliche Farben	Bipolarität der Gegenfarbenachsen

Toleranz vorab: $(\epsilon = 5\%)$ (Gegenfarbenantwort).

5. Vorhersage

Szenario	Erwartung
A	Rot-Adaptation → grün/cyane Nachbild auf Weiß
B	grauer Fleck auf Rot grünlich, auf Grün rötlich
C	rötliches Grün / bläuliches Gelb unmöglich, Orange/Türkis möglich

6. Falsifikationskriterium

M1 („Farbe ist reizfest und rein trichromatisch“) ist widerlegt, wenn Farbe ohne farbigen Reiz entsteht (Nachbild), wenn ein neutraler Fleck kontextabhängig gefärbt erscheint (Kontrast), oder wenn die wahrnehmbaren/unmöglichen Farben der Gegenfarbenstruktur statt der reinen Trichromatik folgen.

7. Konkurrenzmodelle

- **K1 — reine Trichromatik (M1, Young-Helmholtz):** geprüftes engeres Modell; erklärt die Farbmischung, aber nicht Nachbilder, Kontrast und unmögliche Farben.
- **K2 — Gegenfarbentheorie (Hering):** drei bipolare Kanäle; erklärt genau die Phänomene, die K1 nicht erklärt.
- **K3 — Zwei-Stufen-Theorie (Hurvich & Jameson):** Zapfen und Gegenfarben; die moderne Synthese, die den Streit löst.
- **K4 — laterale Hemmung im Farbraum:** Gegenfarbenkontrast als räumliche Wechselwirkung (verbindet mit L2).
- **K5 — retinale vs. kortikale Verarbeitung:** Gegenfarbenkanäle entstehen bereits in der Netzhaut (Ganglienzellen), werden im Kortex weiterverarbeitet.
- **K6 — Adaptation/Von-Kries-Skalierung:** Modell der Zapfen-Adaptation für Farbkonstanz und Nachbilder.

8. Versagensbereich

- **Grobe RGB→LMS-Matrix:** eine didaktische Näherung, nicht die exakte CIE-Transformation; die Zahlen sind qualitativ, die Richtung robust.
- **Lineare Gegenfarben-Transformation:** reale Gegenfarbenkanäle sind nichtlinear und adaptiv; das Modell ist eine erste Näherung.
- **Adaptation vereinfacht:** die Zapfen-Ermüdung ist als einfacher Faktor modelliert, nicht als zeitaufgelöste Dynamik (Bleichung/Regeneration).
- **Individuelle Unterschiede:** Farbenfehlsichtigkeit (Dichromasie, Anomalien) ändert die Zapfenbasis; hier Normalsichtigkeit angenommen.
- **Unmögliche Farben unter Sonderbedingungen:** mit stabilisierten Netzhautbildern lassen sich „verbotene“ Farben in Experimenten teilweise erzeugen (Crane & Piantanida 1983) — ein Randbereich, den das einfache Modell nicht abdeckt.
- **Höhere Farbkognition:** Farbkategorien, Sprache und Gedächtnis beeinflussen Farbwahrnehmung zusätzlich; hier nicht behandelt.

9. Simulation

Numerische Auswertung in `gegenfarben_simulation.py`:

1. RGB→LMS-Zapfenantworten und Gegenfarben-Transformation.
2. Szene A: Adaptation auf Rot, Test Weiß; Nachbild-Gegenfarbe.
3. Szene B: grauer Fleck auf rotem/grünem Grund; laterale Hemmung in den Gegenfarbenkanälen.
4. Szene C: mögliche vs. unmögliche Farbmischungen aus der Bipolarität.

Ergebnisse in `gegenfarben_results.json`. Plot als `gegenfarben_szenen.svg` (vier Teilbilder: Zapfen-Adaptation, Farbkontrast im Gegenfarbenraum, Gegenfarbenkreis, LMS→Gegenfarben).

10. Ergebnis

10.1 A Negatives Nachbild

Größe	Wert
Adaptationsreiz	gesättigtes Rot

Testreiz	Weiß
Nachbild Rot-Grün-Kanal	−0.338
Nachbildfarbe	grün-blau (cyan)
Bewertung M1	widerlegt

10.2 B Simultaner Farbkontrast

Größe	Wert
grauer Fleck	neutral (0.5)
auf rotem Grund (Rot-Grün)	−0.126 → grünlich
auf grünem Grund (Rot-Grün)	+0.105 → rötlich
Bewertung M1	widerlegt

10.3 C Unmögliche Farben

möglich (verschiedene Achsen)	unmöglich (dieselbe Achse)
Orange (rot+gelb)	rötliches Grün
Türkis (grün+blau)	bläuliches Gelb
Magenta (rot+blau)	—
Bewertung M1	widerlegt

Plot: gegenfarben_szenen.svg.

11. Bewertung

M1 („Farbe ist reizfest und rein trichromatisch“) ist in allen drei Szenarien widerlegt.

Szene A (Nachbild) ist der klassische Beleg für die Gegenfarbentheorie. Starrt man lange auf eine rote Fläche und blickt dann auf Weiß, erscheint ein grün-cyanes Nachbild — die Gegenfarbe. Der Mechanismus: die rot-empfindlichen L-Zapfen ermüden durch die Dauerreizung (ihre Empfindlichkeit sinkt). Blickt man danach auf Weiß, das alle Zapfen gleich reizen würde, antworten die erschöpften L-Zapfen schwächer als die ausgeruhten M- und S-Zapfen. Im Rot-Grün-Gegenfarbenkanal ($RG = L - M$) entsteht dadurch ein Ungleichgewicht zur Grün-Seite (−0.338). Entscheidend für die Widerlegung von M1: **hier entsteht eine Farbwahrnehmung ohne farbigen Reiz** — auf der weißen Wand ist physikalisch kein Grün. Die reine Trichromatik, die Farbe direkt an den Reiz koppelt, kann das nicht erklären; die Adaptation der Zapfen plus die Gegenfarbenstruktur erklärt es exakt.

Szene B (Farbkontrast) ist die direkte Fortsetzung von L2 im Farbraum. Ein neutral grauer Fleck erscheint auf rotem Grund grünlich ($RG -0.126$), auf grünem Grund rötlich ($RG +0.105$). Der Mechanismus ist dieselbe laterale Hemmung wie beim Helligkeits-Simultankontrast (L2), nur jetzt in den Gegenfarbenkanälen: der rote Grund erregt die Rot-Seite des RG-Kanals und hemmt sie beim Fleck, sodass dieser zur Grün-Seite verschoben erscheint. Das ist die schönste Verbindung zwischen L2 und L3: **ein Prinzip (laterale Hemmung), zwei Anwendungen (Helligkeit und Farbe)**. Maler nutzen das seit Jahrhunderten — ein Grau lässt sich durch die farbige Umgebung „einfärben“, ohne es selbst zu ändern (Chevreuls Gesetz des simultanen Kontrasts, das die Gobelin-Manufaktur und später die Pointillisten prägte).

Szene C (Unmögliche Farben) ist der stärkste und subtilste Beleg. Wir können uns Orange (ein „rötliches Gelb“) und Türkis (ein „grünliches Blau“) mühelos vorstellen — aber kein „rötliches Grün“ und kein „bläuliches Gelb“. Warum? Weil Rot und Grün die zwei Pole *desselben* Kanals (RG) sind, ebenso Blau und Gelb (BY). Ein Kanal kann nicht gleichzeitig beide Pole signalisieren — so wie eine Waage nicht gleichzeitig nach links und rechts ausschlagen kann. Farben *verschiedener* Achsen dagegen kombinieren sich frei (Orange = RG+ und BY–, Türkis = RG– und BY+). Das ist eine **Vorhersage, die die reine Trichromatik nicht macht**: aus drei unabhängigen Zapfen folgt kein Verbot bestimmter Farbkombinationen. Erst die Gegenfarbenstruktur erklärt, warum der Farbraum genau so „geformt“ ist, wie wir ihn erleben. Bemerkenswert: unter Laborbedingungen mit stabilisierten Netzhautbildern (Crane & Piantanida 1983) berichteten Versuchspersonen tatsächlich von „verbotenen“ Farben — ein faszinierender Randbereich, der die Regel bestätigt, indem er zeigt, unter welchen Sonderbedingungen sie bricht.

Die zentrale Einsicht — die Zwei-Stufen-Theorie: Modul 09 zeigte die Trichromatik (drei Zapfen), und sie ist richtig — auf der Rezeptorebene. L3 zeigt die Gegenfarben (drei bipolare Kanäle), und sie sind ebenfalls richtig — auf der neuronalen Verarbeitungsebene. Historisch stritten Young-Helmholtz (Dreifarben) und Hering (Gegenfarben) erbittert; die moderne Zwei-Stufen-Theorie (Hurvich & Jameson 1957) löste den Streit: die Zapfen kodieren trichromatisch, dann rechnen die Ganglienzellen die Zapfensignale in Gegenfarbenkanäle um. **Beide Theorien beschreiben dieselbe Verarbeitung an verschiedenen Stationen.** Das ist eine der elegantesten Auflösungen eines wissenschaftlichen Streits — und ein Musterbeispiel dafür, dass scheinbar unvereinbare Modelle verschiedene Ebenen desselben Systems treffen können.

Verbindung zu vorhergehenden Modulen: - Modul 09

Farbmischung: die Trichromatik als erste Stufe; L3 fügt die zweite (Gegenfarben) hinzu. Zusammen bilden sie das vollständige Bild der Farbwahrnehmung. - **Modul L2 Helligkeitskontrast:** die laterale Hemmung, hier auf den Farbraum angewandt. Der Farbkontrast ist der Helligkeitskontrast in Farbe. - **Modul 02 Höhlengleichnis:** Nachbilder zeigen besonders drastisch, dass die Wahrnehmung nicht der Reiz ist — wir sehen Grün, wo physikalisch nur Weiß ist.

12. Nächster Test

Modul L4 Bewegungstäuschungen (Phi-Phänomen, Bewegungsnachbild/Wasserfalltäuschung) als nächster Schritt — die zeitliche Analogie zu den Nachbildern: nach Bewegungsadaptation erscheint Stillstand als Gegenbewegung. Oder **Modul L5 bistabile Wahrnehmung** (Necker-Würfel, Kippbilder).

Mögliche Erweiterung Modul L3 v0.2: exakte CIE-Zapfenempfindlichkeiten und Gegenfarben-Transformation; Farbenfehlsichtigkeit (Dichromasie-Simulation); Farbkonstanz quantitativ (Von-Kries, Retinex); die stabilisierten „verbotenen“ Farben; Chevreuls Gesetz und die Pointillisten.

Anhang A — Querverweise

- Praxis-Erklärung: PRAXIS-Gegenfarben.md (folgt)
- Begleitpapier: BEGLEITPAPIER-Gegenfarben.md (folgt)
- Werkzeug: OPPONENS.html (folgt) — *lat. opponens, der Entgegensetzende*

- Code: gegenfarben_simulation.py
- Plot: gegenfarben_szenen.svg
- Ergebnisdaten: gegenfarben_results.json
- Vorgänger-Module: Modul 09 Farbmischung, Modul L2 Helligkeitskontrast, Modul 02 Höhlengleichnis
- Folge-Module (geplant): L4 Bewegung, L5 Bistabilität, L6 Gestalt

Anhang B — Externer Bestandscheck

- **Hering (1878)** *Zur Lehre vom Lichtsinne* — Gegenfarbentheorie.
- **Hurvich & Jameson (1957)** — quantitative Gegenfarbentheorie, Zwei-Stufen-Modell.
- **De Valois et al. (1966)** — Gegenfarbenzellen im Corpus geniculatum laterale.
- **Chevreul (1839)** — Gesetz des simultanen Farbkontrasts.
- **Crane & Piantanida (1983)** — „verbotene“ Farben mit stabilisierten Bildern.

Was die Werkstatt-Notiz davon unterscheidet: drei Gegenfarben-Phänomene im einheitlichen Falsifikationsformat; die explizite LMS→Gegenfarben-Transformation; die Verbindung von L2 (laterale Hemmung) und Modul 09 (Trichromatik) zur Zwei-Stufen-Theorie; die Brücken zu Modul 09, L2, 02.

Anhang C — Quellen

- Hering, E. (1878). *Zur Lehre vom Lichtsinne*. Carl Gerold's Sohn, Wien.
- Hurvich, L. M.; Jameson, D. (1957). An opponent-process theory of color vision. *Psychological Review* 64:384–404.
- De Valois, R. L.; Abramov, I.; Jacobs, G. H. (1966). Analysis of response patterns of LGN cells. *J. Opt. Soc. Am.* 56:966–977.
- Chevreul, M. E. (1839). *De la loi du contraste simultané des couleurs*. Paris.
- Crane, H. D.; Piantanida, T. P. (1983). On seeing reddish green and yellowish blue. *Science* 221:1078–1080.