

FN-Merge-Augen-v0.1-2026-05-17

Forschungsnotiz — Augen im Tierreich

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 / Merge / N2 Augen im Tierreich **Werkzeug:** OCULI · **Dokumenttyp:** Forschungsnotiz (Template v1.0) **Status:** abgeschlossener Test mit dokumentierter Bewertung **Besonderheit:** drittes **Merge-Modul** — verbindet Optik, Wahrnehmung und Evolutionsbiologie

1. These

Modul N1 (CAMERA COMPARATA) stellte die **Zielfunktions-These** auf: Kamera und Auge sind nicht verschieden gut, sondern für verschiedene Aufgaben ausgelegt. Dieses Modul prüft die These an breiterer Basis — nicht Technik gegen Biologie, sondern **Biologie gegen Biologie**.

Das geprüfte engere Modell M1 lautet: *„Es gibt eine Rangordnung der Augen. Sie lassen sich nach Leistung ordnen; das menschliche Auge steht weit oben, einfachere Bauformen sind Vorstufen oder Rückstände.“*

Diese Vorstellung ist verbreitet und wirkt naheliegend — das Facettenauge einer Fliege erscheint primitiv, das Wirbeltierauge hochentwickelt. Die Behauptung dieses Moduls: **Die Rangordnung existiert nicht**, weil es keine gemeinsame Zielgröße gibt. Jede Bauform ist ein Kompromiss zwischen physikalisch gekoppelten Größen, geschnitten auf eine ökologische Aufgabe und beschränkt durch ein Entwicklungserbe.

2. Annahmen

1. Die Auflösung eines Facettenauges ist durch Beugung und Abtastung physikalisch begrenzt und berechenbar.
2. Auflösung, Zeitauflösung und Schwachlichtleistung lassen sich für verschiedene Arten quantifizieren.
3. Diese drei Größen sind über den Photonenhaushalt gekoppelt.
4. Konvergente Entwicklung (unabhängige Entstehung ähnlicher Lösungen) ist nachweisbar.
5. Vergleiche zwischen Bauformen erfordern die Angabe einer **Aufgabe** — ohne sie ist „besser“ undefiniert.

3. Mathematisches Modell

M1 — „Rangordnung der Augen“: Es existiert eine Ordnungsrelation über Augen, die deren Leistung abbildet.

M2 — Größenschranke des Facettenauges. Bei einem Facettenauge konkurrieren zwei Effekte: kleinere Facetten erlauben engere Winkelabstände (bessere Abtastung), verschlechtern aber die Beugungsgrenze (λ/D) . Das Optimum liegt bei (Kirschfeld 1976, Snyder 1977): $\Delta\varphi = \sqrt{\frac{\lambda}{2R}}$ $\Leftrightarrow R = \frac{\lambda}{2\Delta\varphi^2}$.

Die Auflösung wächst also nur mit der **Wurzel** des Radius: verdoppelte Auflösung erfordert vierfachen Radius.

M3 — Zielkonflikte. Der Photonenfluss pro Kanal skaliert mit Sammelfläche (A) und Integrationszeit (t) . Hohe Zeitauflösung (t) klein) und hohe Ortsauflösung (A) klein) reduzieren beide die Photonenzahl und damit die Schwachlichtleistung. Die drei Größen sind **nicht unabhängig**.

M4 — Konvergenz und Kontingenz. Zwei Bauformen sind konvergent, wenn sie unabhängig entstanden sind; kontingent, wenn ihre Struktur durch Entwicklungsgeschichte statt durch Funktion erklärt wird.

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\Delta\varphi$	Interommatidialwinkel	rad
(R)	Augenradius	m
(λ)	Wellenlänge	m
(A)	Sammelfläche pro Kanal	m ²
(t)	Integrationszeit	s

4. Parameter

Szenario	Setup
A Facettenauge	$(\lambda = 500)$ nm; Zielauflösungen 1,5° bis 0,5 Bogenminuten; reale Augen (Fruchtfliege, Biene, Libelle)
B Zielkonflikte	fünf Arten mit Auflösung (cpd), Flimmerverschmelzung (Hz), minimaler Leuchtdichte (cd/m ²)
C Konvergenz	Wirbeltier- gegen Kopffüßerauge; blinder Fleck 5,5°

Toleranz: $(\epsilon = 0)$ — ein Fall, in dem die Ordnung nicht gilt, genügt zur Widerlegung.

5. Vorhersage

Szenario	Erwartung
A	menschliche Auflösung erfordert Facettenauge im Meterbereich
B	keine Art führt in allen drei Kriterien
C	Kopffüßerauge ohne blinden Fleck, Wirbeltierauge mit

6. Falsifikationskriterium

M1 ist widerlegt, sobald (a) eine Bauform unter bestimmten Bedingungen überlegen ist, (b) keine Art in allen Kriterien führt, oder (c) eine als „niedriger“ geltende Gruppe einen technisch saubereren Bauplan besitzt.

7. Konkurrenzmodelle

- **K1 — Rangordnung (M1):** geprüftes engeres Modell; implizit in Formulierungen wie „höher entwickelt“.
- **K2 — Skalenabhängigkeit:** die überlegene Bauform hängt von der Körpergröße ab.
- **K3 — Pareto-Optimalität:** Augen liegen auf einer Front, auf der keine Größe verbessert werden kann, ohne eine andere zu verschlechtern.
- **K4 — ökologische Anpassung:** die Bauform folgt der Aufgabe (Land & Nilsson).
- **K5 — Entwicklungsbeschränkung:** die Bauform folgt dem Erbe, nicht der Funktion (Gould & Lewontin, Spandrel-Argument).
- **K6 — Kompensationsargument:** die invertierte Netzhaut ist durch Müller-Zellen als Lichtleiter weitgehend ausgeglichen (Franze et al. 2007) — nachträglich, nicht durch Entwurf.

8. Versagensbereich

- **Artspezifische Werte streuen erheblich.** Auflösung, Flimmerverschmelzung und Schwachlichtgrenzen hängen von Messmethode, Adaptationszustand und Individuum ab. Die Zahlen sind **Größenordnungen**, keine Präzisionsangaben.
- **Die Kirschfeld-Formel ist eine Näherung.** Sie setzt beugungsbegrenzte Ommatidien und gleichmäßige Augenkrümmung voraus. Reale Facettenaugen haben lokale Bereiche erhöhter Auflösung (Akutzonen), die die einfache Rechnung nicht abbildet.
- **Nur drei Kriterien.** Farbsehen (Fangschreckenkrebs mit über zwölf Rezeptortypen), Polarisationssehen (Bienen, Tintenfische) und UV-Sehen fehlen — sie würden die These stützen, sind aber nicht gerechnet.
- **Kein Wirkungsgradvergleich.** Energieverbrauch pro Information wäre ein weiteres Kriterium und würde die Rangordnung erneut umstellen.
- **Die Kompensation der invertierten Netzhaut ist umstritten.** Wie vollständig Müller-Zellen den Streuverlust ausgleichen, ist nicht abschließend geklärt.
- **Kein Schluss auf Optimalität.** Dass keine Rangordnung besteht, heißt nicht, dass jede Bauform optimal wäre. Beides sind verschiedene Aussagen.

9. Simulation

Numerische Auswertung in `augen_simulation.py`:

1. Szene A: Kirschfeld-Skalierung für vier Zielauflösungen; Vergleich mit realen Facettenaugen; Rückrechnung der Literaturangabe.
2. Szene B: fünf Arten in drei Kriterien; Prüfung auf Alleskönner; Rangbestimmung des Menschen.
3. Szene C: Gegenüberstellung invertiert/evers; Flächenanteil des blinden Flecks.

Ergebnisse in `augen_results.json`, Plot als `augen_szenen.svg` (vier Teilbilder).

10. Ergebnis

10.1 A — Größenschanke des Facettenauges

Zielauflösung	nötiger Augenradius
Fliege ($\sim 1,5^\circ$)	0,0004 m
gute Libelle ($\sim 0,4^\circ$)	0,0051 m
Mensch, grob (1 Bogenminute)	2,95 m
Mensch, Fovea (0,5 Bogenminuten)	11,82 m

Das ist das **5372-fache** des Augenradius einer großen Libelle (2,2 mm).

Abgleich mit der Literatur: Die häufig zitierte Zahl „etwa 1 m“ (Kirschfeld 1976) entspricht rückgerechnet $\Delta\varphi = 1\{,72\}$ Bogenminuten, also rund einem Drittel der menschlichen Fovealauflösung. Gegenprobe: 1,72 Bogenminuten ergeben 0,999 m. Die Diskrepanz ist damit eine Frage der **Zielauflösung**, nicht der Formel.

Bewertung M1: widerlegt.

10.2 B — Zielkonflikte

Art	Auflösung (cpd)	Flimmerfusion (Hz)	min. Leuchtdichte (cd/m ²)
Mensch	60	60	10^{-6}
Stubenfliege	0,5	300	10^{-2}
Waldkauz	8	50	10^{-8}
Adler	140	100	10^{-3}
Tiefseefisch	2	5	10^{-10}

Alleskönner vorhanden: **nein**. Rang des Menschen: Auflösung 2., Zeitauflösung 3., Schwachlicht 3. — **in keiner Kategorie führend**.

Bewertung M1: widerlegt.

10.3 C — Konvergenz und Kontingenz

Merkmal	Wirbeltier	Kopffüßer
Netzhaut	invertiert	evers
Rezeptoren	vom Licht abgewandt	dem Licht zugewandt
Blinder Fleck	ja ($5,5^\circ$, 0,093 % des Gesichtsfelds)	nein
Sehnerv	durchbricht die Netzhaut	tritt von hinten an
Entstehung	Ausstülpung des Zwischenhirns	Einstülpung der Körperoberfläche

Bewertung M1: widerlegt.

11. Bewertung

M1 („Es gibt eine Rangordnung der Augen“) ist in allen drei Szenarien widerlegt — und die drei Widerlegungen greifen auf verschiedenen Ebenen: physikalisch, ökologisch, entwicklungsgeschichtlich.

Szene A zeigt eine physikalische Schranke — und ihre Umkehrung. Ein Facettenauge mit menschlicher Fovealauflösung bräuchte fast zwölf Meter Radius. Das klingt zunächst wie eine Bestätigung von M1: die Bauform kann offenbar nicht mithalten. Der Schluss ist aber falsch, und zwar aus zwei Gründen.

Erstens ist die Schranke ein **Skalierungsgesetz**, kein Mangel. Die Auflösung wächst mit der Wurzel des Radius; verdoppelte Auflösung erfordert vierfachen Radius. Das gilt für jedes Facettenauge, unabhängig von seiner Güte.

Zweitens — und wichtiger — **kehrt sich der Vergleich bei kleinen Körpergrößen um.** Ein Linsenauge von 0,2 mm Durchmesser wäre beugungsbegrenzt nahezu blind: die Öffnung ist zu klein, um überhaupt ein brauchbares Bild zu erzeugen. Das Facettenauge liefert auf diesem Maßstab ein großes Sichtfeld und hohe Zeitauflösung. **Für eine Fruchtfliege ist das Facettenauge die überlegene Lösung, für einen Menschen das Linsenauge.** Die Frage „welche Bauform ist besser“ hat keine Antwort ohne Angabe der Körpergröße — genau wie die Dynamikfrage in N1 keine Antwort ohne Zeitangabe hatte.

Szene B liefert den direktesten Schlag. Der Adler löst mehr als doppelt so fein auf wie der Mensch, die Stubenfliege verarbeitet fünfmal schneller, der Tiefseefisch sieht bei zehntausendfach weniger Licht. **Der Mensch führt in keiner der drei Kategorien.**

Entscheidend ist, dass dies kein Zufall der Auswahl ist, sondern **physikalisch erzwungen.** Alle drei Größen hängen am Photonenhaushalt: hohe Zeitauflösung bedeutet kurze Integrationszeit und damit weniger Photonen pro Messung; hohe Ortsauflösung bedeutet kleine Sammelfläche pro Kanal und ebenfalls weniger Photonen. Ein Auge, das gleichzeitig in allen drei Kriterien führte, müsste die Photonenzahl umgehen — das geht nicht. Die Augen liegen auf einer **Pareto-Front (K3)**: keine Größe lässt sich verbessern, ohne eine andere zu verschlechtern. Eine Rangordnung setzt eine Gesamtordnung voraus; auf einer Pareto-Front gibt es keine.

Szene C ist das stärkste Argument, weil es die Prämisse trifft. Wirbeltiere und Kopffüßer haben das Camera-Auge **unabhängig voneinander** entwickelt. Beide kamen auf Linse, Iris, Glaskörper und Netzhaut — die Physik der Bildentstehung lässt wenige Lösungen zu (Konvergenz). Aber in einem Punkt unterscheiden sie sich: Die Wirbeltiernetzhaut ist **invertiert**, die Rezeptoren zeigen vom Licht weg, das Licht muss erst Nervenschicht und Blutgefäße durchqueren, und der Sehnerv durchbricht die Netzhaut und erzeugt einen blinden Fleck. Das Kopffüßerauge ist **evers**: Rezeptoren dem Licht zugewandt, Sehnerv von hinten, **kein blinder Fleck.**

Wäre das menschliche Auge das Ergebnis einer Optimierung, wäre es evers gebaut. Es ist es nicht, weil es aus einer Ausstülpung des Zwischenhirns hervorging, während das Kopffüßerauge aus einer Einstülpung der Körperoberfläche entstand. Die Struktur folgt der **Entwicklungsgeschichte**, nicht der Funktion (K5).

Das Gegenargument gehört dazu und ist ernst zu nehmen: Die invertierte Anordnung ist nicht dysfunktional. Das dahinterliegende Pigmentepithel versorgt die Rezeptoren und regeneriert Sehpigment, und Müller-Zellen wirken als Lichtleiter, die den Streuverlust weitgehend ausgleichen (Franze et al. 2007). Aber das ist eine

nachträgliche Kompensation eines Erbes, kein Entwurf. Die Reihenfolge ist entscheidend: erst die Beschränkung, dann die Reparatur.

Die Verallgemeinerung. N1 zeigte die Zielfunktions-These für Kamera und Auge. Man könnte einwenden, das liege an der Verschiedenheit von Technik und Biologie — Ingenieure und Evolution verfolgen eben andere Ziele. Szene B und C schließen diesen Ausweg: **Auch die Augen untereinander sind nicht nach Güte ordenbar.** Es gibt keine gemeinsame Zielgröße, weil die relevanten Größen physikalisch gekoppelt sind und jede Art auf einer anderen Stelle der Pareto-Front sitzt.

Damit wird auch die Sprache fragwürdig. „Höher entwickelt“, „primitiv“, „Vorstufe“ setzen eine Achse voraus, auf der man weiter oben oder unten stehen kann. Für Augen existiert diese Achse nicht. **„Bestes Auge“ setzt einen Konstrukteur voraus, den es nicht gibt** — Evolution optimiert nicht global, sondern lokal auf einem vorhandenen Bauplan, unter physikalischen Zwängen, für eine konkrete Aufgabe.

Anschluss an den Wahrnehmungs-Strang. Wenn jedes Auge auf eine Aufgabe geschnitten ist, dann ist jede Wahrnehmung aufgabenspezifisch — und das heißt: **kein Sinnesorgan liefert „die Welt“, jedes liefert einen für seine Aufgabe brauchbaren Ausschnitt.** Das ist derselbe Befund wie in Modul 02, L1 und M1, hier aus der vergleichenden Biologie hergeleitet. Die Fliege sieht nicht eine schlechtere Version unserer Welt, sondern eine andere.

12. Nächster Test

Modul M2 Optische Mechanik (ANALOGON) oder L6 Gestaltgesetze (GESTALT) als Fortsetzung.

Mögliche Erweiterung v0.2: Farbsehen im Vergleich (Fangschreckenkrebs, Vögel mit vier Zapfentypen); Polarisationssehen; Energieverbrauch pro Information als viertes Kriterium; Akutizonen in Facettenaugen; Spiegelaugen (Kammuschel) und Grubenaugen als weitere Bauformen.

Anhang A — Querverweise

- Praxis-Erklärung: PRAXIS-Augen.md · Begleitpapier: BEGLEITPAPIER-Augen.md
- Werkzeug: OCULI.html
- Code: augen_simulation.py · Plot: augen_szenen.svg · Daten: augen_results.json
- **Verwendete Module:** N1 Kamera vs. Auge (Zielfunktions-These), M1 Signalkette, 03 Einfachspalt (Beugung), 12 Instrumente (Beugungsgrenze), L1-L5
- **Planungsdokument:** MERGE-ARCHITEKTUR-v0.1-2026-05-17.md

Anhang B — Externer Bestandscheck

- **Kirschfeld (1976)** — Größenschranke des Facettenauges.
- **Snyder (1977)** — Optimierung des Interommatidialwinkels.
- **Land & Nilsson (2012)** — *Animal Eyes*, vergleichende Optik.
- **Warrant & Nilsson (2006)** — Sehen bei wenig Licht.
- **Franze et al. (2007)** — Müller-Zellen als Lichtleiter.
- **Gould & Lewontin (1979)** — Spandrel-Argument, Kritik am Adaptationismus.

Was die Werkstatt-Notiz davon unterscheidet: die Zusammenführung dieser Befunde zu einer expliziten Falsifikation der Rangordnungs-Vorstellung; die durchgerechnete Skalierung samt Rückrechnung der zitierten Literaturzahl; die Pareto-Front als formales Argument gegen jede Gesamtordnung; die Verbindung zur Zielfunktions-These aus N1.

Anhang C — Quellen

- Kirschfeld, K. (1976). The resolution of lens and compound eyes. In: Zettler, F.; Weiler, R. (Hg.), *Neural Principles in Vision*. Springer, Berlin, 354–370.
- Snyder, A. W. (1977). Acuity of compound eyes: physical limitations and design. *J. Comparative Physiology* 116:161–182.
- Land, M. F.; Nilsson, D.-E. (2012). *Animal Eyes*. 2. Aufl., Oxford University Press.
- Warrant, E. J.; Nilsson, D.-E. (Hg.) (2006). *Invertebrate Vision*. Cambridge University Press.
- Franze, K. et al. (2007). Müller cells are living optical fibers in the vertebrate retina. *PNAS* 104:8287–8292.
- Gould, S. J.; Lewontin, R. C. (1979). The spandrels of San Marco and the Panglossian paradigm. *Proc. R. Soc. Lond. B* 205:581–598.