

# **FN-Merge-KameraAuge-v0.1-2026-05-17**

## **Forschungsnotiz — Kamera und Auge im Vergleich**

**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 / N1 Kamera vs. Auge **Werkzeug:** CAMERA COMPARATA · **Dokumenttyp:** Forschungsnotiz (Template v1.0) **Status:** abgeschlossener Test mit dokumentierter Bewertung  
**Besonderheit:** zweites **Merge-Modul** — verbindet Strang I (Optik) und Strang IV (Wahrnehmung)

---

### **1. These**

Modul M1 (CATENA) zeigte, dass alle Messketten dieselbe Struktur teilen. Dieses Modul dekliniert sie an **zwei konkreten Systemen** durch: Kamera und Auge. Beide haben eine Linse, eine Blende und eine Bildebene; beide erzeugen aus einfallendem Licht ein Signal. Die naheliegende Folgerung — geprüftes Modell M1 — lautet: *„Die Kamera funktioniert wie das Auge. Der Sensor entspricht der Netzhaut; Unterschiede sind graduell (Auflösung, Qualität).“*

Die Behauptung dieses Moduls: Die Übereinstimmung endet bei der Optik. In **jeder** Station der Signalkette danach unterscheiden sich die Systeme nicht graduell, sondern strukturell — und zwar nicht, weil eines schlechter wäre, sondern weil sie **verschiedene Aufgaben** lösen.

Die Analogie ist historisch produktiv gewesen (Kepler, Descartes) und bleibt für die Optik gültig. Als Modell für die Bildentstehung führt sie in die Irre.

### **2. Annahmen**

1. Die Optik beider Systeme (Linse, Blende, Bildebene) ist hinreichend ähnlich, sodass Unterschiede in den nachfolgenden Stationen isoliert betrachtet werden können.
2. Rezeptor- und Pixeldichten sind messbar und dokumentiert.
3. Dynamikumfang ist als Verhältnis von größter zu kleinster unterscheidbarer Leuchtdichte definierbar.
4. Die Farbabtastung lässt sich als räumliches Mosaik von Kanaltypen beschreiben.
5. Vergleiche zwischen Systemen erfordern eine **gemeinsame Bezugsgröße** — bei bildgebenden Systemen den Sehwinkel, nicht die Fläche.

### **3. Mathematisches Modell**

**M1 — „die Kamera funktioniert wie das Auge“:** Sensor und Netzhaut sind funktional äquivalente Wandlerflächen; Unterschiede sind Skalierungen.

**M2 — Sensorgeometrie.** Der Sensor hat konstante Dichte  $\rho_{\text{cam}}(\epsilon) = \text{const}$ . Die Zapfendichte fällt mit der Exzentrizität  $\epsilon$  (Grad vom Fixationspunkt):  $\rho_{\text{eye}}(\epsilon) \approx \rho_0 + (\rho_{\text{max}} - \rho_0)e^{-\epsilon/8} + a e^{-\epsilon/6}$ .

Der belastbare Vergleich läuft über die **Winkelauflösung** in Zyklen pro Grad (cpd), nicht über die Flächendichte:  $\text{cpd}_{\text{cam}} = \frac{N_{\text{px}}}{2\theta_{\text{FOV}}}$

**M3 — Dynamikumfang.** Umfang in Blendenstufen  $(B = \log_2(L_{\text{max}}/L_{\text{min}}))$ . Zu unterscheiden sind **momentaner** Umfang (ein Adaptationszustand) und **adaptiver** Gesamtumfang.

**M4 — Farbabtastung.** Ein Mosaik  $(M(i,j) \in \{R,G,B\})$  bzw.  $(L,M,S)$ . Regelmäßigkeit als Anteil übereinstimmender Positionen bei Verschiebung um die Periode:  $R = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \mathbb{1}[\left[M(i,j) = M(i+2,j+2)\right)]$

| Symbol     | Bedeutung                  | Einheit           |
|------------|----------------------------|-------------------|
| $\epsilon$ | Exzentrizität              | Grad              |
| $\rho$     | Rezeptor-/Pixeldichte      | 1/mm <sup>2</sup> |
| cpd        | Winkelauflösung            | Zyklen/Grad       |
| $(B)$      | Dynamikumfang              | Blenden           |
| $(R)$      | Regelmäßigkeit des Mosaiks | —                 |

## 4. Parameter

| Szenario    | Setup                                                                                                   |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A Geometrie | Exzentrizität 0–40°; Sensor 24 MP auf APS-C (23,5 × 15,6 mm); Kamera-Winkelauflösung bei 50° Bildwinkel |
| B Dynamik   | Sensor 13 Blenden; Auge momentan 6,5, lokal adaptiert 20, voll adaptiert 39,5 Blenden                   |
| C Farbe     | Mosaik 24 × 24; Bayer RGGB; Zapfen L:M ≈ 2:1, S ≈ 6 %, Foveola ohne S                                   |

Toleranz:  $\epsilon = 0$  — ein struktureller Unterschied genügt zur Widerlegung von M1.

## 5. Vorhersage

| Szenario | Erwartung                                                                      |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------|
| A        | Sensor konstant, Auge stark abfallend; Winkelauflösung im Zentrum vergleichbar |
| B        | Sensor momentan überlegen, Auge adaptiert überlegen — Rangfolge kehrt sich um  |
| C        | Bayer streng periodisch, Zapfenmosaik unregelmäßig; S-                         |

## 6. Falsifikationskriterium

M1 ist widerlegt, sobald ein Unterschied nachgewiesen wird, der sich **nicht** als Skalierung darstellen lässt: eine andere Verteilungsform, eine Umkehrung der Rangfolge je nach Bedingung, oder eine andere Kanalstruktur.

## 7. Konkurrenzmodelle

- **K1 — Kamera-Analogie (M1):** geprüftes engeres Modell; historisch von Kepler und Descartes eingeführt.
- **K2 — Foveation als Ressourcenstrategie:** hohe Auflösung nur im Blickzentrum, dafür schnelle Blickbewegung; spart Nervenbahnen und Verarbeitungsleistung.
- **K3 — Adaptation statt Umfang:** das Auge verschiebt sein Arbeitsfenster, statt es zu vergrößern.
- **K4 — aktives Sehen (Gibson, O'Regan & Noë):** Sehen ist eine Tätigkeit, kein Bildempfang; die Sakkade gehört zum Wahrnehmungsvorgang.
- **K5 — Zielfunktions-Argument:** Sensoren sind auf Reproduzierbarkeit ausgelegt, Augen auf Invarianz und Überlebensrelevanz.
- **K6 — evolutionäre Beschränkung:** die invertierte Netzhaut der Wirbeltiere (Blinder Fleck, Lichtweg durch die Nervenschicht) ist ein Entwicklungserbe, keine Optimierung — Tintenfische haben die everse Anordnung.

## 8. Versagensbereich

- **Quellenlage.** Rezeptordichten nach Curcio et al. (1990), historisch Osterberg (1935); Sensordaten aus Herstellerangaben. Alle Werte **streuen erheblich** zwischen Individuen und Messmethoden. Die L:M-Ratio variiert individuell zwischen etwa 1:1 und 16:1, ohne dass die Betroffenen einen Unterschied bemerken.
- **Der Dichtevergleich pro mm<sup>2</sup> ist für Leistungsaussagen ungeeignet.** Netzhaut und Sensor haben verschiedene Größen und Brennweiten. Er zeigt nur die **Verteilungsform**; für Leistungsvergleiche dient die Winkelauflösung. (Siehe Abschnitt 11, Korrektur.)
- **Die Kamera-Winkelauflösung hängt vollständig vom Objektiv ab.** Mit Teleobjektiv übertrifft sie das Auge deutlich, mit Weitwinkel bleibt sie darunter. Ein absoluter Vergleich ohne Brennweitenangabe ist sinnlos.
- **Dynamikangaben sind Konventionen.** „13 Blenden“ hängt vom gewählten Rauschkriterium ab; „6,5 Blenden“ für das Auge ebenso vom Kriterium für „gleichzeitig unterscheidbar“.
- **Kein Vergleich der Verarbeitung.** Bildsignalprozessor und Sehrinde bleiben außen vor — dort liegen die größten Unterschiede, aber auch die größte Unsicherheit.
- **Nur ein Auge, nur ein Sensortyp.** Facettenaugen, Spiegelaugen, Foveon- und organische Sensoren fehlen (siehe Wunschliste N2).

## 9. Simulation

Numerische Auswertung in `kamera_auge_simulation.py`:

1. Szene A: Dichteprofile über die Exzentrizität; Verhältnis

- Zentrum/Peripherie; Winkelauflösung beider Systeme.
2. Szene B: Dynamikumfang in Blenden und Dekaden; Prüfung auf Umkehrung der Rangfolge.
  3. Szene C: Erzeugung beider Mosaik; Kanalanteile; Regelmäßigkeit; S-Anteil in der zentralen Foveola.

Ergebnisse in kamera\_auge\_results.json, Plot als kamera\_auge\_szenen.svg (vier Teilbilder).

## 10. Ergebnis

### 10.1 A — Sensorgeometrie

| Größe                                 | Auge                                  | Sensor                                |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Dichte im Zentrum                     | $1,80 \cdot 10^5$<br>/mm <sup>2</sup> | $6,55 \cdot 10^4$<br>/mm <sup>2</sup> |
| Dichte bei 40°                        | $4,5 \cdot 10^3$ /mm <sup>2</sup>     | $6,55 \cdot 10^4$<br>/mm <sup>2</sup> |
| <b>Verhältnis Zentrum/Peripherie</b>  | <b>39,8</b>                           | <b>1,0</b>                            |
| Flächenanteil mit<br>Spitzenauflösung | ~0,01 %                               | 100 %                                 |

#### Winkelauflösung (der belastbare Vergleich):

| System                         | Zyklen/Grad |
|--------------------------------|-------------|
| Auge, Fovea                    | 60          |
| Auge, 20° Exzentrizität        | 6           |
| Kamera (24 MP, 50° Bildwinkel) | 60          |

**Bewertung M1: widerlegt.**

### 10.2 B — Dynamikumfang

| System                         | Blenden | Dekaden |
|--------------------------------|---------|---------|
| Sensor (Vollformat, Basis-ISO) | 13,0    | 3,91    |
| Auge, momentan                 | 6,5     | 1,96    |
| Auge, lokal adaptiert          | 20,0    | 6,02    |
| Auge, voll adaptiert           | 39,5    | 11,89   |

Momentan ist der Sensor um 6,5 Blenden überlegen; voll adaptiert das Auge um 26,5 Blenden. **Bewertung M1: widerlegt.**

### 10.3 C — Farbabtastung

| Größe                             | Bayer        | Zapfenmosaik |
|-----------------------------------|--------------|--------------|
| Kanal 1 (R / L)                   | 0,250        | 0,642        |
| Kanal 2 (G / M)                   | 0,500        | 0,290        |
| Kanal 3 (B / S)                   | 0,250        | 0,068        |
| <b>Regelmäßigkeit</b>             | <b>1,000</b> | <b>0,528</b> |
| S-Anteil in der zentralen Foveola | —            | <b>0,000</b> |

**Bewertung M1: widerlegt.**

## 11. Bewertung

**M1 („die Kamera funktioniert wie das Auge“) ist in allen drei Szenarien widerlegt** — und zwar an drei verschiedenen Stationen der Signalkette aus Modul M1.

**Szene A liefert den überraschendsten Befund.** Die naive Erwartung wäre, dass eines der Systeme das andere in der Auflösung schlägt. Tatsächlich sind sie im Zentrum **praktisch gleichauf**: rund 60 Zyklen pro Grad beim Auge in der Fovea, ebenso bei einer 24-MP-Kamera mit Normalbrennweite. Der Unterschied liegt nicht im Spitzenwert, sondern in der **Fläche**. Die Kamera liefert diese Auflösung über das gesamte Bild; das Auge auf etwa 0,01 % des Gesichtsfelds. Bei 20° Exzentrität ist es auf ein Zehntel abgefallen.

Daraus folgt die Sakkade. Weil nur ein winziger Ausschnitt scharf ist, muss das Auge drei- bis viermal pro Sekunde springen und die Szene abtasten. **Das scharfe, vollständige Bild, das wir zu sehen glauben, existiert an keinem Zeitpunkt auf der Netzhaut** — es wird über die Zeit zusammengesetzt. Damit ist Szene A zugleich eine Fortsetzung des Wahrnehmungs-Strangs: was wir für ein Abbild halten, ist ein Konstrukt (Modul 02, L1, L5). Die Kamera braucht diese Konstruktion nicht, weil sie überall gleich auflöst.

**Szene B zeigt, dass die Frage falsch gestellt ist.** „Wer hat mehr Dynamik“ hat keine Antwort ohne Zeitangabe. Momentan gewinnt der Sensor deutlich — bei einem einzigen Adaptationszustand sieht das Auge nur etwa 6,5 Blenden gleichzeitig, der Sensor 13. Über Adaptation kehrt sich das um: knapp 40 Blenden, rund zwölf Dekaden, vom Sternenlicht bis zum Sonnenlicht.

Das sind zwei verschiedene **Lösungswege**: Umfang gegen Nachführung. Der Sensor vergrößert das Fenster, das Auge verschiebt es. Beides hat einen Preis. Der Preis des Auges steht selten in solchen Vergleichen: Adaptation kostet **Zeit** (Dunkeladaptation bis zu 30 Minuten) und macht **absolute Helligkeitsurteile unmöglich**. Niemand kann die Leuchtdichte einer Fläche in  $\text{cd/m}^2$  schätzen; ein Sensor liefert reproduzierbare Absolutwerte. Genau deshalb misst man Licht mit Geräten und nicht mit dem Auge — und genau deshalb ist die Kennlinien-Kompression aus Modul M1 (Szene B) hier die passende Lösung, nicht ein Mangel.

**Szene C zeigt zwei entgegengesetzte Entwurfsentscheidungen.** Die Bayer-Matrix ist streng periodisch (Regelmäßigkeit 1,0) mit gleichmäßiger Kanalverteilung. Das Zapfenmosaik ist unregelmäßig (0,53), stark L-lastig, und der S-Anteil liegt bei etwa 7 % statt 25 %. **In der zentralen Foveola gibt es überhaupt keine S-Zapfen** — an der Stelle des schärfsten Sehens wird Blau gar nicht abgetastet.

Beide Entscheidungen erzeugen verschiedene Fehler. Periodizität führt zu **Moiré**: trifft ein feines periodisches Muster auf ein periodisches Raster, entstehen Scheinstrukturen — dasselbe Phänomen wie das Aliasing aus Modul M1, nur räumlich. Unregelmäßigkeit vermeidet Moiré, erzeugt dafür Rauschen. Der fehlende Blau-Anteil fällt kaum auf, weil die Schärfeinformation ohnehin aus dem Hell-Dunkel-Kanal kommt (Modul L3, Gegenfarben) — eine Arbeitsteilung, die die Kamera nicht kennt.

**Der Kern: Zielfunktion statt Qualität.** In allen drei Szenen ist die Frage „welches System ist besser“ unbeantwortbar, weil die Systeme verschiedene Aufgaben lösen. Der Sensor ist auf **Reproduzierbarkeit und Absolutwerte** ausgelegt: gleiche Szene, gleiche Zahlen, messbar und vergleichbar. Das Auge ist auf **Invarianz, Kontrast und Überlebensrelevanz bei minimalem Aufwand** ausgelegt: erkennen, was sich bewegt, unter jeder Beleuchtung dasselbe Objekt wiedererkennen, mit möglichst wenig Nervenbahnen auskommen. **Die**

**Fovea ist keine schlechte Sensormatrix, sondern eine andere Lösung** — hohe Auflösung nur dort, wo gerade hingeschaut wird, plus ein schnelles Blicksystem.

Damit bestätigt sich der Befund aus Modul M1 auf konkreter Ebene: Der Wandler ist nicht neutral, sondern für eine Aufgabe ausgelegt. Wer ihn an einer fremden Aufgabe misst, findet Mängel, die keine sind.

**Zur Korrektur der ersten Fassung.** Der erste Entwurf verglich Zapfendichte pro mm<sup>2</sup> direkt mit Pixeldichte pro mm<sup>2</sup> und leitete daraus einen „Crossover bei 1,07°“ ab. Das ist für Leistungsaussagen unbrauchbar: Netzhaut (Brennweite ~17 mm) und Sensor (Brennweite je nach Objektiv) bilden verschiedene Winkel auf verschiedene Flächen ab, sodass Dichten pro mm<sup>2</sup> nicht vergleichbar sind. Der Vergleich wurde auf **Winkelauflösung** umgestellt; die Dichtekurven bleiben, zeigen aber nur noch die Verteilungsform. Erst dadurch wurde der eigentliche Befund sichtbar (gleiche Spitzenauflösung, verschiedene Fläche). Dokumentiert statt stillschweigend korrigiert (Werkstattlinie).

## 12. Nächster Test

**Modul N2 Augen im Tierreich (OCULI)** als naheliegende Fortsetzung: Facettenauge, Spiegelauge, Grubenaugen; Konvergenz des Camera-Auges bei Wirbeltier und Tintenfisch; UV- und Polarisationssehen. Dort wird die Zielfunktions-These an einer breiteren Materialbasis geprüft.

**Mögliche Erweiterung v0.2:** Bildsignalprozessor gegen Sehrinde; Zeitauflösung (Verschlusszeit gegen Flimmerverschmelzung); Rolling-Shutter gegen Sakkadensuppression; reale MTF-Kurven statt Dichtemodelle.

---

## Anhang A — Querverweise

- Praxis-Erklärung: PRAXIS-KameraAuge.md · Begleitpapier: BEGLEITPAPIER-KameraAuge.md
- Werkzeug: CAMERA-COMPARATA.html
- Code: kamera\_auge\_simulation.py · Plot: kamera\_auge\_szenen.svg · Daten: kamera\_auge\_results.json
- **Verwendete Module:** M1 Signalkette (Struktur), 04 Kameramodell, 05 Linsen, 09 Farbmischung, L3 Gegenfarben, L1/L5 (Konstruktion)
- **Planungsdokument:** MERGE-ARCHITEKTUR-v0.1-2026-05-17.md

## Anhang B — Externer Bestandscheck

- **Curcio et al. (1990)** — Rezeptordichten der menschlichen Netzhaut.
- **Osterberg (1935)** — historische Erstvermessung.
- **Roorda & Williams (1999)** — Zapfenmosaik in vivo, individuelle L:M-Streuung.
- **Bayer (1976)** — Farbfiltermatrix, US-Patent 3.971.065.
- **Land & Nilsson (2012)** — *Animal Eyes*, vergleichende Optik.
- **O'Regan & Noë (2001)** — sensomotorische Theorie des Sehens.

Was die Werkstatt-Notiz davon unterscheidet: die Zusammenführung zu einem Vergleich entlang der Signalkette aus Modul M1; die Umstellung auf Winkelauflösung als gemeinsame Bezugsgröße; der

Befund gleicher Spitzenauflösung bei völlig verschiedener Fläche; die Zielfunktions-These als Ersatz für die Qualitätsfrage.

## Anhang C — Quellen

- Curcio, C. A.; Sloan, K. R.; Kalina, R. E.; Hendrickson, A. E. (1990). Human photoreceptor topography. *J. Comparative Neurology* 292:497-523.
- Østerberg, G. (1935). Topography of the layer of rods and cones in the human retina. *Acta Ophthalmologica*, Suppl. 6.
- Roorda, A.; Williams, D. R. (1999). The arrangement of the three cone classes in the living human eye. *Nature* 397:520-522.
- Land, M. F.; Nilsson, D.-E. (2012). *Animal Eyes*. 2. Aufl., Oxford University Press.
- O'Regan, J. K.; Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences* 24:939-1031.

---

Wortzahl: ca. 1950 · Seiten: 8 · Version 0.1 · 2026-05-17