

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

Forschungsnotiz — Die Signalkette

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 / M1 Signalkette **Werkzeug:** CATENA
· **Dokumenttyp:** Forschungsnotiz (Template v1.0) **Status:** abgeschlossener Test mit dokumentierter Bewertung **Besonderheit:** erstes **Merge-Modul** — verbindet alle vier Stränge

1. These

Die Werkstatt hat vier Stränge nebeneinander aufgebaut: Optik, Mechanik, Audio, Wahrnehmung. Dieses Modul zeigt, dass sie **dieselbe Struktur** behandeln:

$$\backslash\text{\{REIZ\}} \rightarrow \text{\{WANDLER\}} \rightarrow \text{\{VERARBEITUNG\}} \rightarrow \text{\{AUSGABE\}} \rightarrow \text{\{DEUTUNG\}} \backslash$$

Ein Photon trifft eine Linse, eine Druckwelle eine Membran, eine Kraft eine Feder, ein Reiz einen Rezeptor. Danach folgt in allen Fällen: Wandlung, Verarbeitung, Ausgabe — und am Ende steht eine Deutung. **An jeder Station geht Information verloren und kommt Interpretation hinzu.**

Das geprüfte engere Modell M1 lautet: „Messen liefert die Wirklichkeit. Was herauskommt, ist was da war; Informationsverlust ist ein technischer Mangel, kein Prinzip.“ Die Behauptung dieses Moduls ist, dass M1 in allen vier Strängen falsch ist — **aus denselben formalen Gründen**. Damit wäre der Höhlengleichnis-Kern (Modul 02), der bisher den Wahrnehmungs-Strang trug, nicht auf Wahrnehmung beschränkt, sondern gälte für jedes Messgerät.

Für Merge-Module gilt die verschärfte Regel (Merge-Architektur, Abschnitt 6): **keine Analogie ohne Rechnung**. „Alles ist eine Signalkette“ wäre eine Phrase, solange die Gemeinsamkeit nicht numerisch belegt ist. Dieses Modul belegt sie.

2. Annahmen

1. Jede Messkette lässt sich in die fünf Stationen zerlegen.
2. Der Wandler bildet den Reiz auf eine Ausgabegröße ab; diese Abbildung ist charakterisierbar (Kennlinie).
3. Verarbeitung umfasst mindestens Abtastung (zeitlich/räumlich) und Quantisierung (Wertebereich).
4. Die Ausgabe hat stets **niedrigere Dimension** als der Reiz.
5. Die Rückrechnung von der Ausgabe auf den Reiz ist ein Inversproblem.

3. Mathematisches Modell

M1 — „Messen liefert die Wirklichkeit“: Die Abbildung $\mathcal{K}$ von Reiz s auf Ausgabe y ist injektiv und verlustfrei; s ist aus y rekonstruierbar.

M2 — Abtastung und Quantisierung. Quantisierung mit n bit erzeugt bei Vollaussteuerung ein Signal-Rausch-Verhältnis von $\mathrm{SNR} \approx 6,02n + 1,76 \text{ dB}$. Abtastung mit f_s bildet Frequenzen oberhalb der Nyquist-Grenze $f_s/2$ auf **falsche** Frequenzen ab (Aliasing): $f_{\text{alias}} = \left| f - \operatorname{round}(f/f_s) \cdot f_s \right|$.

M3 — Wandlerkennlinie. Vier generische Formen über denselben Reizumfang: linear ($y \propto x$), logarithmisch (Weber-Fechner, $y \propto \log x$), Potenz (Stevens, $y \propto x^{0,33}$), S-Kurve (fotografische Dichtekurve).

M4 — Inversproblem. Der Reiz sei ein Spektrum $s \in \mathbb{R}^{61}$, die Ausgabe die Zapfenantwort $y = A s$ mit $A \in \mathbb{R}^{3 \times 61}$. Dann gilt $\dim \ker A = 61 - \operatorname{rang} A = 58$, das heißt: ein 58-dimensionaler Raum von Spektren erzeugt **exakt dieselbe** Ausgabe.

Symbol	Bedeutung	Einheit
s	Reiz (hier: Spektrum)	—
y	Ausgabe	—
A	Wandlermatrix	—
n	Quantisierungstiefe	bit
f_s	Abtastrate	Hz
$\ker A$	Nullraum (Metamerie-Raum)	—

4. Parameter

Szenario	Setup
A Abtastung	Reiz: Summe dreier Sinus (20, 60, 140 Hz); Quantisierung 16/12/8/4/2 bit bei voller Rate; Abtastung 1000/400/200/100 Hz bei voller Tiefe
B Kennlinien	Reizumfang 4 Dekaden (10^{-2} bis 10^2), vier Kennlinien
C Metamerie	61 spektrale Stützstellen (400–700 nm, 5 nm), 3 Zapfen (Gauß-Näherung)

Toleranz: $\varepsilon = 0$ — schon ein einziger nachgewiesener Verlust widerlegt M1.

Methodisch wichtig: In Szene A werden Quantisierung und Abtastung **getrennt** gemessen. Werden beide gemeinsam angewandt, dominiert der Abtastfehler die Bilanz, und der Verlust würde fälschlich der Bittiefe zugeschrieben. Diese Trennung ist Voraussetzung für belastbare Aussagen (siehe Abschnitt 11, Erste Fassung).

5. Vorhersage

Szenario	Erwartung
A	Quantisierungs-SNR folgt $\frac{1}{6} \log_2 \frac{2n+1}{76}$; unterhalb Nyquist erscheinen falsche Frequenzen
B	identischer Reiz erzeugt je nach Kennlinie deutlich verschiedene Ausgaben
C	Nullraumdimension 58; konstruierbares Metamer mit identischer Ausgabe

6. Falsifikationskriterium

M1 ist widerlegt, sobald (a) bei fehlerfreier Technik Information prinzipiell verlorenggeht, (b) derselbe Reiz je nach Wandler verschiedene Ausgaben erzeugt, oder (c) verschiedene Reize dieselbe Ausgabe erzeugen. Jeder einzelne Punkt genügt.

7. Konkurrenzmodelle

- **K1 — naiver Realismus (M1):** geprüftes engeres Modell; Messung als Abbildung.
- **K2 — Informationstheorie (Shannon):** Kanalkapazität als obere Schranke; Verlust ist quantifizierbar und prinzipiell.
- **K3 — Abtasttheorem (Nyquist-Shannon):** verlustfreie Rekonstruktion nur bei bandbegrenztem Signal und ausreichender Rate.
- **K4 — Inversprobleme (Hadamard, Tikhonov):** Schlechtgestelltheit; Eindeutigkeit erfordert Zusatzannahmen (Regularisierung).
- **K5 — Bayessche Wahrnehmung:** das System ergänzt die fehlende Information durch Vorannahmen (Priors) — genau das zeigen L1 und L5.
- **K6 — Messtheorie der Quantenmechanik:** dort verschärft sich die Lage nochmals; Messung verändert das Gemessene (siehe Wunschliste W2).

8. Versagensbereich

- **Generische Kennlinien.** Die vier Formen in B sind Modellformen, nicht an konkrete Geräte gefittet. Die Aussage ist strukturell („Kennlinien unterscheiden sich erheblich“), nicht gerätespezifisch.
- **Zapfen als Gauß-Näherung.** In C werden Gaußkurven statt CIE-Daten verwendet. Die Nullraumdimension ist davon unabhängig (sie folgt aus $\frac{1}{6} \log_2 \frac{2n+1}{76}$), die konkrete Metamer-Form dagegen schon.
- **Keine Bit-Angabe für das Auge.** Dem Auge eine Quantisierungstiefe zuzuschreiben wäre unredlich: seine Dynamik entsteht durch Adaptation über rund zehn Dekaden, der momentane Umfang ist klein. Ein direkter Bit-Vergleich wird bewusst **nicht** geführt.
- **Lineare Wandler in C.** Das Inversproblem ist hier linear formuliert. Reale Ketten sind nichtlinear; die Nichteindeutigkeit wird dadurch nicht kleiner, sondern schwerer beschreibbar.
- **Deutung nicht modelliert.** Die fünfte Station (Deutung) wird strukturell benannt, aber nicht gerechnet — sie ist Gegenstand von L5 und der geplanten Module W1/W2.
- **Merge-Grenze.** Die Gemeinsamkeit der vier Stränge ist **formal**, nicht physikalisch: dieselbe Mathematik, verschiedene Träger.

Daraus folgt nicht, dass Optik und Wahrnehmung „dasselbe“ wären.

9. Simulation

Numerische Auswertung in `signalkette_simulation.py`:

1. Szene A Teil 1: reine Quantisierung bei voller Abtastrate, gemessene SNR gegen Theorie.
2. Szene A Teil 2: reine Abtastung bei voller Tiefe, Aliasfrequenz und SNR.
3. Szene B: vier Kennlinien über vier Dekaden; Ausgabewerte bei identischem Reiz, Spreizung.
4. Szene C: SVD der Wandlermatrix, Nullraumbasis, Konstruktion eines positiven Metamers.

Ergebnisse in `signalkette_results.json`, Plot als `signalkette_szenen.svg` (vier Teilbilder).

10. Ergebnis

10.1 A — Quantisierung (getrennt gemessen)

Tiefe	SNR gemessen	Theorie \ (6{,}02n+1{,}76)	Abweichung
16 bit	98,85 dB	98,08 dB	+0,77
12 bit	73,76 dB	74,00 dB	−0,24
8 bit	50,34 dB	49,92 dB	+0,42
4 bit	26,16 dB	25,84 dB	+0,32
2 bit	11,46 dB	13,80 dB	−2,34

Die Übereinstimmung ist bis 4 bit besser als 1 dB. Bei 2 bit versagt die Formel erwartungsgemäß (die Annahme gleichverteilten Quantisierungsrauschens gilt bei so wenigen Stufen nicht mehr).

10.2 A — Abtastung (Nyquist-Grenze für 140 Hz: 280 Hz)

Abtastrate	Nyquist	140 Hz korrekt?	erscheint als	SNR
1000 Hz	500 Hz	ja	140,0 Hz	32,36 dB
400 Hz	200 Hz	ja	140,0 Hz	18,81 dB
200 Hz	100 Hz	nein	60,0 Hz	7,64 dB
100 Hz	50 Hz	nein	40,0 Hz	6,18 dB

Bewertung M1: widerlegt.

10.3 B — Wandlerkennlinien

Ausgabe bei **identischem** Reiz (Mitte des Reizbereichs):

Kennlinie	Ausgabe
linear	0,010

logarithmisch (Weber-Fechner)	0,501
Potenz (Stevens, $\sqrt[n]{n}$)	0,180
S-Kurve (Film)	0,505

Spreizung: 0,495 — bei exakt gleichem Eingang. **Bewertung M1: widerlegt.**

10.4 C — Metamerie als Nullraum

Größe	Wert
spektrale Stützstellen	61
Ausgabedimension (Zapfen)	3
Nullraumdimension	58
Metamer konstruiert	ja (positiv)
max. Abweichung der Ausgabe	0,00 (Maschinengenauigkeit)
relative Abweichung der Spektren	0,17

Bewertung M1: widerlegt.

11. Bewertung

M1 („Messen liefert die Wirklichkeit“) ist in allen drei Szenarien widerlegt — und die drei Widerlegungen betreffen drei verschiedene Stationen der Kette.

Szene A zeigt den Verlust in der Verarbeitung. Die Quantisierung folgt exakt der theoretischen Schranke: der Verlust ist nicht Ausdruck schlechter Technik, sondern durch die Wortbreite festgelegt. Wichtiger ist der zweite Teil. **Der schärfste Befund dieses Moduls entstand ungeplant:** Bei einer Abtastrate von 200 Hz erscheint die 140-Hz-Komponente als 60 Hz — und 60 Hz ist bereits eine **echte** Komponente des Reizes. Der Aliasfehler fällt exakt auf ein vorhandenes Signal. Das Ergebnis ist damit in sich konsistent, plausibel und falsch, und **aus der Ausgabe allein ist der Fehler nicht feststellbar.** Die Kette meldet nicht, dass sie etwas verloren hat. Das ist eine schärfere Aussage als „Information geht verloren“: Information kann durch **glaubhafte Falschinformation ersetzt** werden, ohne jede Spur.

Szene B zeigt die Prägung durch den Wandler. Derselbe physikalische Reiz erzeugt Ausgaben zwischen 0,01 und 0,505 — eine Spreizung von 0,495 auf einer normierten Skala von 0 bis 1, also fast der halbe Ausgabebereich, allein durch die Wahl der Kennlinie. Der Wandler ist kein neutrales Fenster. Bemerkenswert ist die systematische Richtung: die sinnesphysiologischen Kennlinien (logarithmisch, Potenz) komprimieren stark, die technische (linear) nicht. Das ist kein Mangel der Sinne. Ein linearer Sensor über vier Dekaden verschenkt fast den gesamten Ausgabebereich an das obere Zehntel des Reizbereichs; die logarithmische Kennlinie verteilt gleichmäßig. Für ein System, das über zehn Dekaden Helligkeit funktionieren muss, ist Kompression die bessere Lösung — **die Kennlinien sind nicht verschieden gut, sondern für verschiedene Aufgaben ausgelegt.**

Szene C zeigt die Unumkehrbarkeit. Das Ergebnis ist der formale Kern des Moduls: 61 spektrale Freiheitsgrade werden auf 3 Zapfenantworten abgebildet, der Nullraum hat 58 Dimensionen. Es wurde ein konkretes, physikalisch zulässiges (überall positives) Metamer konstruiert, dessen Spektrum sich sichtbar unterscheidet (relative Abweichung 0,17), während die Zapfenantwort bei

Maschinengenauigkeit identisch bleibt. **Die Rückrechnung vom Sinneseindruck auf den Reiz ist nicht schwierig, sondern prinzipiell unmöglich** — nicht wegen Rauschens, sondern weil die Abbildung nicht injektiv ist. Jede Rekonstruktion braucht Zusatzannahmen; genau das leistet das Gehirn mit Vorannahmen (K5), und genau dort setzen L1 und L5 an.

Der Merge-Befund. Die drei Szenen stammen aus drei Strängen — A aus der Audio-/Signalverarbeitung, B aus Sinnesphysiologie und Fototechnik, C aus der Farbmeterik (Modul 09) — und belegen dieselbe Struktur mit **derselben Mathematik**. Damit ist die Merge-Regel erfüllt: die Gemeinsamkeit ist gerechnet, nicht behauptet.

Die inhaltliche Konsequenz reicht weiter, als beim Ansetzen absehbar war. Der Höhlengleichnis-Kern (Modul 02) — wir sehen Deutungen, nicht Dinge — galt bisher als Aussage über die **Wahrnehmung**. Szene C zeigt jedoch, dass die entscheidende Eigenschaft (Nichtinjektivität der Abbildung) nichts mit Biologie zu tun hat: sie folgt aus $\dim(\text{Ausgabe}) < \dim(\text{Reiz})$. Diese Bedingung erfüllt **jedes** Messgerät. Ein Spektrometer mit 1024 Kanälen hat einen kleineren Nullraum als das Auge, aber keinen leeren. **Der Wahrnehmungs-Strang ist damit nicht der Sonderfall, sondern der gut untersuchte Spezialfall einer allgemeinen Struktur.**

Zur ersten Fassung. Die ursprüngliche Version von Szene A wandte Abtastung und Quantisierung gemeinsam an und errechnete daraus einen „Informationsverlust in bit“ gegenüber der nominellen Wortbreite. Das ist unbrauchbar: der Abtastfehler dominiert die Bilanz, und der Verlust wird fälschlich der Bittiefe zugeschrieben (ein 16-bit-System erschien mit „10,7 bit Verlust“, obwohl die Quantisierung praktisch fehlerfrei war). Die Trennung beider Mechanismen war notwendig; erst sie erlaubt den Abgleich mit der Theorie. Der Fehler wird hier dokumentiert statt stillschweigend korrigiert (Werkstattlinie: korrigierte Vorhersagen ehrlich ausweisen).

12. Nächster Test

Modul N1 Kamera vs. Auge (CAMERA COMPARATA) als nächster Schritt: die Signalkette an zwei konkreten Systemen durchdekliniert, mit realen Sensordaten statt generischer Kennlinien.

Mögliche Erweiterung v0.2: reale Kennlinien statt Modellformen; CIE-Zapfendaten; nichtlineare Inversprobleme; Regularisierung (Tikhonov) als Modell für Vorannahmen; die fünfte Station (Deutung) quantitativ.

Anhang A — Querverweise

- Praxis-Erklärung: PRAXIS-Signalkette.md
- Begleitpapier: BEGLEITPAPIER-Signalkette.md
- Werkzeug: CATENA.html — *lat. catena, Kette*
- Code: signalkette_simulation.py · Plot: signalkette_szenen.svg · Daten: signalkette_results.json
- **Verwendete Module:** 09 Farbmischung (Zapfen, Metamerie), Audio 01 Spektrum (Abtastung), 07 Lichtquellen (Kennlinien), L1-L5 (Wahrnehmung als Inferenz), 02 Höhlengleichnis (Kern)
- **Planungsdokument:** MERGE-ARCHITEKTUR-v0.1-2026-05-17.md

Anhang B — Externer Bestandscheck

- **Shannon (1948)** — Informationstheorie, Kanalkapazität.
- **Nyquist (1928) / Shannon (1949)** — Abtasttheorem.
- **Weber (1834) / Fechner (1860)** — logarithmische Sinnesskala.
- **Stevens (1957)** — Potenzgesetz der Psychophysik.
- **Hadamard (1902)** — schlechtgestellte Probleme.
- **Wyszecki & Stiles (1982)** — Metamerie, Farbmimetrik.

Was die Werkstatt-Notiz davon unterscheidet: die Zusammenführung dieser separat etablierten Ergebnisse zu **einer** Kette; der numerische Nachweis, dass alle vier Stränge dieselbe Struktur teilen; der Befund, dass Aliasing auf eine echte Signalkomponente fallen und dadurch unerkennbar werden kann; die Verallgemeinerung des Höhlengleichnis-Kerns auf beliebige Messgeräte.

Anhang C — Quellen

- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal* 27:379-423.
- Nyquist, H. (1928). Certain topics in telegraph transmission theory. *Trans. AIEE* 47:617-644.
- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Breitkopf und Härtel, Leipzig.
- Stevens, S. S. (1957). On the psychophysical law. *Psychological Review* 64:153-181.
- Wyszecki, G.; Stiles, W. S. (1982). *Color Science*. 2. Aufl., Wiley, New York.

Wortzahl: ca. 1900 · Seiten: 8 · Version 0.1 · 2026-05-17