

Contents

Ein informationsbasierter Rahmen für physikalische Messbarkeit und Rekonstruierbarkeit	1
0 Was sich gegenüber Version 0.8 geändert hat	2
0.1 Was sich gegenüber Version 0.7 geändert hatte	2
0.2 Was sich gegenüber Version 0.6 geändert hatte	3
0.3 Was sich gegenüber Version 0.5 geändert hatte	3
0.4 Was sich gegenüber Version 0.4 geändert hatte	4
0.5 Was sich gegenüber Version 0.3 geändert hatte	5
0.6 Was sich gegenüber Version 0.2 geändert hatte	6
Abstract	7
1 Einleitung	7
2 Geltungsanspruch	7
3 Messkette	8
4 Zustandsunterscheidbarkeit	8
5 Die Arbeitsgröße K	9
6 Richtung und signierter Fluss	12
7 Auflösung und Wellenvektorübertrag	13
8 Materialantwort und Informationsverlust	13
9 Interferenz, Auslöschung und Stehwelle	13
10 Lineare Überlagerung, lineare Zeitvarianz und nichtlineare Mischung	14
11 Elektromagnetischer Kern	14
12 Digitalisierung	14
13 Quantenmessung	14
14 Numerische Minimalmodelle	14
15 Falsifizierbarkeit	21
16 Wiener Linie und Wissenschaftsphilosophie der Messbarkeit	21
17 Abgrenzung zur Beobachtbarkeitstheorie und zu benachbarten Rahmen	23
18 Realbeispiele	24
19 Versuchsprotokoll: optischer Spaltversuch	24
20 Diskussion	26
21 Grenzen	26
22 Schlussfolgerung	26
Anhang A — Symboltabelle	26
Anhang B — Geltungsbereiche zentraler Formeln	27
Anhang C — Reproduktion	27
Anhang D — Literatur	28
Anhang E — Errata und Fassungsgeschichte	30
Anhang F — Was in der Literatur nicht gefunden wurde	31
Anhang G — Strangzuordnung und Verwertung	32
Anhang H — Veröffentlichungsweg	34
Anhang I — Quellen-Prüfliste	36

Ein informationsbasierter Rahmen für physikalische Messbarkeit und Rekonstruierbarkeit

Version 0.9 · Preprint / Framework Paper · FORSCH-PROV0420 (Nummer provisorisch) · Stand 06.10.2026

Feld	Angabe
Autor	Thomas Schüller (Forscher), ORCID 0009-0003-9799-6747
Autorenmarke	Thomas Schüller · Syntagma Forschung · Wien (kein eigenes Rechtssubjekt)
Affiliation	Unabhängiger Forscher, keine institutionelle Anbindung
Korrespondenz	forschung@tschueller.com
Ablage	forschung.tschueller.com · syntagma-science.com

Feld	Angabe
Finanzierung	selbstfinanziert
Interessenkonflikte	keine
Lizenz	CC BY 4.0
Datenstatus	keine experimentellen Rohdaten; zehn numerische Minimalmodelle reproduzierbar (Abschnitt 14, Anhang C)
Quellenstatus	50 Angaben geprüft (Verlag, Normenregister, Volltext), 12 in Anhang I.2 als offen gekennzeichnet; diese betreffen fast ausschließlich Auflage und ISBN von Lehrbüchern und Erstausgaben
Strang	FORSCHUNG (freier Kanal, Zubringer). Werkzeuge laufen ausschließlich über die Plattform syntagma-science, siehe Anhang G

Diese Fassung beansprucht keine neue Grundphysik. Sie ist ein Ordnungsrahmen für Messbarkeit, Rekonstruierbarkeit und Falsifizierbarkeit physikalischer Messketten.

0 Was sich gegenüber Version 0.8 geändert hat

Am Werk selbst nichts. Kein Ergebnis, kein Beweis, keine Zahl, kein Anhang hat sich geändert. Diese Fassung macht das Bündel um das Werk herum veröffentlichungsfähig; die Nummer wird mitgezogen, damit Werk und Bündel nicht auseinanderlaufen.

Nr.	Änderung	Grund
1	VEROEFFENTLICHUNG.md neu im Hauptordner: der Ablauf in einem Stück — die sieben Entscheidungen, die alles blockieren, die Reihenfolge Plattform → Ablage → Zeitschriften, abhakbare Schritte je Strang	der Ablauf stand bisher verteilt in Übergabe, Betriebshandbuch und Upload-Hinweisen; beim Veröffentlichen braucht man ihn an einer Stelle
2	Landeseite um Rechtliches ergänzt: Impressum, Nutzungsbedingungen, Datenschutz, Lizenzen für Werk und Werkzeug getrennt, Haftungshinweis	ohne diese Angaben ist eine Seite nicht veröffentlichungsfähig
3	Landeseite um den Verbund der Marken ergänzt	wer zitiert, zitiert Syntagma; wer lizenziert, kauft beim zuständigen Strang. Das war nirgends ausgesprochen
4	Zitierweise im Autorenverzeichnis richtiggestellt — sie stand noch auf Version 0.3 — und um Prüfpunkte je Fassung ergänzt	eine veraltete Zitiervorlage erzeugt falsche Zitate, und zwar dauerhaft

Damit ist das Material fertig. Offen sind nur noch die sieben Entscheidungen in **VEROEFFENTLICHUNG.md** Abschnitt 1; sie liegen sämtlich beim Autor und lassen sich aus dem Material nicht ableiten.

0.1 Was sich gegenüber Version 0.7 geändert hatte

Diese Fassung ändert kein Ergebnis und keinen Beweis. Sie zieht die Offenlegungsgrenze ausdrücklich, statt sie vorauszusetzen.

Nr.	Änderung	Grund
1	Anhang G.6 neu: Eigenschutz und Offenlegungsgrenze nach REGEL-PROV0002	das Werk steht neben einem kostenpflichtigen Angebot; wer das nicht ausspricht, lässt die Frage offen, ob hier etwas zurückgehalten wird
2	Für jeden Bestandteil ist benannt , ob er offen ist und warum — einschließlich dessen, was gar nicht erst enthalten ist	Behauptung ohne Beleg wäre Werbung; Beleg ohne Grenze wäre eine Bauanleitung
3	Überprüfbarkeit geht vor Schutz ist als Vorrang festgehalten	ein Rahmen, der sich nicht widerlegen lässt, trägt kein Angebot
4	Die Wahl beim Browser-Werkzeug ist getroffen und begründet : MESSWERK bleibt offen auf der Plattformseite	„im Browser“ und „Rechenkern intern“ schließen einander aus; die Regel verlangt eine bewusste Wahl statt einer stillschweigenden
5	REGEL-PROV0002 liegt als eigene Datei im Bündel, der Übernahmestück deckt jetzt beide Regeln	sie gilt für alle Stränge, nicht nur für dieses Vorhaben

Sachlich unverändert: Messkette, Sätze 1 und 2, Klassifikation A/B/C, Numerik, Versuchsprotokoll, Literatur, Quellen-Prüfliste, Lizenzstufen, Aktiv-Passiv-Zuordnung.

0.2 Was sich gegenüber Version 0.6 geändert hatte

Diese Fassung ändert kein Ergebnis und keinen Beweis. Sie verankert eine strangübergreifende Regel, die bisher nur als Entscheidung bestand.

Nr.	Änderung	Grund
1	Anhang G.5 neu: Aktivfassung und Passivfassung nach REGEL-PROV0001	die Grenze, was auf eine Ablage darf, war bisher für dieses Vorhaben beschrieben, aber nicht als allgemeine Regel gefasst
2	Der Grenzfall Rechenskripte ist entschieden: sie sind Passivfassung und bleiben auf der Ablage	ohne sie wäre der Beitrag nicht nachprüfbar; Nachprüfbarkeit ist der Grund, überhaupt abzulegen
3	Der Unterschied zwischen freiem Nachrechnen und lizenziertem Werkzeug ist in G.5 ausgesprochen statt vorausgesetzt	wer die Zahlen dieses Werks prüfen will, braucht das Werkzeug nicht; das Werkzeug rechnet mit fremden Messketten
4	Die Regel liegt als eigene Datei im Bündel (regelwerk/), dazu ein Übernahmestück für das zentrale Regelwerk	sie gilt für alle Vorhaben, nicht nur für dieses

Sachlich unverändert: Messkette, Sätze 1 und 2, Klassifikation A/B/C, Numerik, Versuchsprotokoll, Literatur, Quellen-Prüfliste, Lizenzstufen.

0.3 Was sich gegenüber Version 0.5 geändert hatte

Diese Fassung ändert kein Ergebnis und keinen Beweis. Sie stellt die Verwertung auf Plattformfokus um.

Nr.	Änderung	Grund
1	Anhang G neu gefasst: syntagma-science ist der Zielort, der freie Forschungs kanal der Zubringer	Werkzeuge laufen ab jetzt ausschließlich über die Plattform; Zenodo trägt kein Werkzeug, auch keine Vorschaufassung
2	Lizenzstufen L0–L3 und sechs Produktklassen nach LIZ-PROV0001 in Anhang G.2 und G.3 aufgenommen	die Zuordnung war bisher nur als vier Leistungsstufen im Angebot beschrieben und nicht im Werk selbst
3	Anhang H umgestellt: Reihenfolge Plattform → Ablage → Zeitschriften	eine Verweisung braucht ein Ziel; die Plattform muss vor der Ablage stehen
4	Zenodo-Bündel eigens aufbereitet (Anhang H.2, Ordner zenodo-upload/)	Arbeitsbündel und Veröffentlichungsbündel sind nicht dasselbe; auf die Ablage gehört nur das Freie
5	Jede Ablage des Preprints trägt den Verweis auf syntagma-science	das Preprint ist Reichweitenkanal, nicht Selbstzweck

Sachlich unverändert: Messkette, Sätze 1 und 2, Klassifikation A/B/C, Numerik, Versuchsprotokoll, Literatur, Quellen-Prüfliste.

0.4 Was sich gegenüber Version 0.4 geändert hatte

Diese Fassung ändert kein Ergebnis und keinen Beweis. Sie arbeitet die Quellenprüfung ein, die in Version 0.4 als einziger offener Arbeitsgang ausgewiesen war.

Nr.	Änderung	Grund
1	ISO 12233:2023 → ISO 12233:2024 in Abschnitt 19.3, Abschnitt 19.6 und Anhang D	die fünfte Ausgabe löst die Ausgabe 2023 ab und führt zugleich einen geänderten Titel: „Digital cameras — Resolution and spatial frequency responses“
2	IEC TR 60825-14:2022 (Ed. 2.0) statt der undatierten Nennung; Stand von IEC 60825-1 Ed. 4 vermerkt	ein undatiertes Normverweis ist in einem Versuchsprotokoll nicht nachvollziehbar
3	Mezghani, Antreich & Nossek (2010): der Konferenzbeitrag WSA 2010, Bremen, 143–150, DOI 10.1109/WSA.2010.5456454 ist jetzt die Primärquelle, arXiv:1010.5532 das Preprint	der Faktor $2/\pi$ in Klasse B stützt sich damit auf die begutachtete Fassung
4	Kalman (1963): Zeitschriftenname auf <i>Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Series A: Control</i> korrigiert	<i>SIAM Journal on Control</i> ist der spätere Name derselben Zeitschrift, 1963 noch nicht geführt
5	Sechs fehlende DOIs ergänzt: Krener & Ide, Galiffi et al., Hansen, Janesick, Stadler, Amari (2016)	in v0.4 ohne Kennung oder nur mit ungeprüfter ISBN
6	Heftangaben bei zehn Einträgen nachgetragen (u. a. Paris, Bellman & Åström, Berreman, Shannon, Landauer, Hempel)	die Seitenangabe allein identifiziert den Jahrgangsband nicht eindeutig

Nr.	Änderung	Grund
7	Anhang D auf eine durchgehend alphabetische Liste umgestellt	die Zweiteilung in „mit DOI geprüft“ und „weitere Quellen“ war nach der Prüfung gegenstandslos
8	Anhang I gegliedert in I.1 geprüft, I.2 weiterhin offen, I.3 was die Prüfung am Werk geändert hat	der Leser soll die verbliebenen Lücken in einem Blick sehen
9	Offene Einträge von 25 auf 12 gesenkt, geprüfte von 23 auf 50; die verbliebenen betreffen fast ausschließlich Auflage und ISBN von Lehrbüchern und Erstausgaben	die inhaltlich tragenden Quellen sind jetzt vollständig nachgewiesen

Was weiterhin aussteht: die Auflagenwahl bei vierzehn Lehrbüchern und drei Erstausgaben, der Ausgabe-stand von JCGM 100/200 und EMVA 1288 sowie das Abrufdatum des SEP-Eintrags. Diese Punkte sind in Anhang I.2 einzeln aufgeführt und vor einer Journalfassung zu schließen.

0.5 Was sich gegenüber Version 0.3 geändert hatte

Nr.	Änderung	Grund
1	Die Lückenbehauptung ist überall an die durchsuchten Literaturstränge gebunden statt absolut formuliert	Redlichkeit: Die Recherche war nicht erschöpfend
2	Klasse C um drei Fälle erweitert: EMCCD bei niedriger Verstärkung , Quantisierung außerhalb der Grenzfälle, allgemein heteroskedastisches Rauschen	Vollständigkeit der Klassifikation
3	Abschnitt 5.5 um Noise Coefficient (Chao, Ward & Ober) und die Stam-Ungleichung ergänzt	zwei weitere benachbarte Begriffe, die abzugrenzen sind
4	Neuer Abschnitt 7.1: Rayleigh und Sparrow als Spezialfälle einer Schwelle für d'	die Fisher-Information ist das schärfere Kriterium; die klassischen Kriterien lassen sich einordnen statt verwerfen
5	Konvention für den Überschussrauschfaktor ausdrücklich festgelegt	Robbins & Hadwen definieren $F_{\text{ENF}} = \sqrt{2}$, andere Arbeiten die quadrierte Größe — ohne Festlegung sind die Faktoren 2 und 1/2 nicht nachvollziehbar
6	Quantengrenzen unter Rauschen (Escher et al.) und Monotonie der Quanten-Fisher-Information unter CPTP-Abbildungen ergänzt	schließt Abschnitt 13 an die Datenverarbeitungsungleichung an
7	Neuer Anhang H: Veröffentlichungsweg mit Zeitschriftenmatrix und der seit 21.01.2026 geänderten arXiv-Endorsement-Regel	war bisher nur in der Übergabe vermerkt

Nr.	Änderung	Grund
8	Neuer Anhang I: Quellen-Prüfliste mit Status je Angabe	trennt geprüfte von ungeprüften Literaturangaben nachvollziehbar
9	Literaturverzeichnis um zwölf Einträge erweitert	Chernoff, Amari (2001), Chao et al., Hyneczek & Nishiwaki, Mortensen et al., Escher et al., Paris, Gan & Law, Aspden et al., Worrall, Earman & Norton, Stadler

0.6 Was sich gegenüber Version 0.2 geändert hatte

Nr.	Änderung	Grund
1	Der Kernsatz ist ausdrücklich als Beobachtungsäquivalenz im Sinne von Rothenberg (1971) ausgewiesen und nicht mehr als eigener Befund gerahmt	Literaturprüfung: Der Satz ist seit 1971 Standard. Der Beitrag liegt in der Übertragung auf physikalische Messketten, nicht in der Aussage
2	Das Separierbarkeitskriterium ist als Satz 1 mit Äquivalenzbeweis formuliert, nicht mehr als Bedingung behauptet	$\partial^2 \log F / \partial p_i \partial p_j = 0$ ist auf zusammenhängendem Produktgebiet äquivalent zur Produktform
3	Neue, schärfere Fassung über Stufeneffizienzen $\eta_k = F_k / F_{k-1}$ (Satz 2)	Die Teleskopdarstellung $F_n = F_0 \prod \eta_k$ ist trivial. Die eigentliche Behauptung ist, dass η_k nur von den Parametern der eigenen Stufe abhängt
4	Klassifikation der Vorwärtsmodelle in drei Klassen mit Belegen und Gegenbeispielen (Abschnitt 5.6)	Die offene Frage aus v0.2 ist damit für die wichtigsten Kanalklassen beantwortet
5	Abgrenzung zur Parameter-Orthogonalität (Cox & Reid 1987) und zur Theorie kaskadierter Detektoren (DQE)	Beide sind die nächstverwandten Literaturstränge; die DQE-Theorie verneint die allgemeine Produktform ausdrücklich
6	Vier neue numerische Minimalmodelle M7–M10 samt Abbildungen 6–9	Stufeneffizienz, Separierbarkeitskarte, Qubit-Dephasierung, Spaltversuch
7	Vollständiges Versuchsprotokoll für den optischen Spaltversuch (Abschnitt 19)	v0.2 nannte den Versuch nur als offenen Punkt
8	Neuer Abschnitt Wiener Linie und Wissenschaftsphilosophie der Messbarkeit (Abschnitt 16)	Mach, Boltzmann, Bridgman, Wiener Kreis, Schrödinger, moderne Messtheorie
9	Neuer Abschnitt Abgrenzung zur Beobachtbarkeitstheorie (Abschnitt 17)	Kalman und Hermann-Krener sind die nächstliegende Konkurrenzformulierung
10	Literatur erweitert und mit DOI belegt; Anhang F nennt, was in der Literatur nicht gefunden wurde	Einordnung des eigenen Beitrags

Abstract

Diese Arbeit formuliert einen informationsbasierten Ordnungsrahmen für physikalische Messbarkeit und Rekonstruierbarkeit. Der Anspruch ist nicht, neue Grundphysik einzuführen, sondern etablierte Konzepte aus Wellentheorie, Elektrodynamik, Streutheorie, Signaltheorie, Digitalisierung und Quantenmessung entlang einer gemeinsamen Messkette zu ordnen:

$$X_0 \rightarrow H_{\text{field}} \rightarrow H_{\text{mat}} \rightarrow H_{\text{mix}} \rightarrow H_{\text{measure}} \rightarrow Q \rightarrow Y.$$

Der Ausgangspunkt ist die Beobachtungsäquivalenz: Gilt $p(Y|\theta_1) = p(Y|\theta_2)$ für $\theta_1 \neq \theta_2$, ist eindeutige Rekonstruktion aus diesem Messkanal ausgeschlossen. Diese Aussage ist nicht neu; sie ist die Definition der Identifizierbarkeit eines parametrischen Modells, und ihre lokale Fassung ist seit Rothenberg (1971) äquivalent zur Regularität der Fisher-Informationsmatrix. Der Beitrag dieser Arbeit liegt in zwei Punkten.

Erstens wird die diagnostische Arbeitsgröße K als effektives Signal-Rausch-Verhältnis definiert und für den skalaren Gauß-Kanal exakt aus der Fisher-Information hergeleitet: mit $K := \theta^2 F(\theta)$ gilt $K = \text{SNR} \cdot C^2$. Zweitens erhält die Produktform

$$K = \text{SNR} \cdot G(|q|a) \cdot D_{\text{mat}} \cdot \gamma \cdot R_{\text{dir}} \cdot C^2$$

ein prüfbares Gültigkeitskriterium: Sie ist auf einem zusammenhängenden Produktgebiet genau dann exakt, wenn $\log F$ additiv separierbar ist. Schärfer formuliert über Stufeneffizienzen $\eta_k = F_k/F_{k-1}$ lautet die Behauptung, dass jede η_k nur von den Parametern ihrer eigenen Stufe abhängt. Für drei Klassen von Vorwärtsmodellen wird das entschieden: multiplikative Transmission mit einstufigem Rauschen und Poisson-Verdünnung erfüllen das Kriterium exakt; EMCCD bei hoher Verstärkung und Ein-Bit-Quantisierung bei kleinem Signal-Rausch-Verhältnis asymptotisch; mehrstufige Rauscheinkopplung, der Übergang zwischen Schrot- und Leserauschen, Nichtlinearität und Sättigung verletzen es.

Zehn numerische Minimalmodelle mit festem Zufallssaat belegen die Aussagen, darunter eine Separierbarkeitsskizze über Signalniveau und Leserauschen und ein vollständig durchgerechneter optischer Spaltversuch. Die wissenschaftliche Belastbarkeit liegt in Falsifikationsbedingungen.

Schlüsselwörter: Messbarkeit; Rekonstruierbarkeit; Identifizierbarkeit; Beobachtungsäquivalenz; Fisher-Information; Separierbarkeit; kaskadierte Systeme; Wellenvektorübertrag; Kohärenz; inverse Probleme; Quantenmessung.

1 Einleitung

Physikalische Messungen werden häufig über einzelne Begriffe beschrieben: Signalstärke, Frequenz, Wellenlänge, Reflexion, Auflösung, Rauschen, Detektion. Diese Begriffe sind notwendig, aber allein nicht ausreichend. Ein starkes Signal kann wenig über den gesuchten Zustand verraten. Ein lokales Nullsignal kann durch destruktive Interferenz entstehen. Ein digital scharfes Ergebnis kann auf grober Quantisierung oder algorithmischen Priors beruhen. Ein reflektiertes Signal kann Energie enthalten, aber Richtungs- und Phaseninformation verloren haben.

Die zentrale Frage lautet daher nicht, ob ein Signal existiert, sondern:

Welche Zustandsinformation ist im Signal unter den gegebenen physikalischen und messtechnischen Bedingungen unterscheidbar?

Der Beitrag ist kein neues Naturgesetz. Er ist ein Rahmenmodell, das bestehende physikalische Beschreibungen entlang der Frage nach Messbarkeit ordnet, und — seit Version 0.2 — die Angabe der Bedingungen, unter denen die dabei benutzte Arbeitsgröße zulässig ist. Version 0.3 beantwortet diese Frage für die wichtigsten Kanalklassen.

2 Geltungsanspruch

Das Modell beansprucht keine neue Grundphysik. Es ersetzt keine Maxwell-Gleichungen, keine Quantenmechanik, keine Streutheorie, keine Fourieroptik, keine Informationstheorie und keine Theorie inverser Probleme. Es ist ein Ordnungsrahmen.

Sein Zweck ist, die Messfrage explizit zu machen:

1. Welcher Zustand soll unterschieden werden?
2. Welche physikalische Vorwärtskette erzeugt das Signal?
3. Welche Faktoren erhalten oder zerstören Zustandsinformation?
4. Welche Zustände bleiben im Messkanal unterscheidbar?
5. Welche Zustände fallen in dieselbe Messverteilung?

Das Modell ist methodisch, nicht fundamentalistisch.

3 Messkette

$$X_0 \rightarrow H_{\text{field}} \rightarrow H_{\text{mat}} \rightarrow H_{\text{mix}} \rightarrow H_{\text{measure}} \rightarrow Q \rightarrow Y. \quad (1)$$



Jede Stufe kann Zustandsinformation erhalten, umformen oder vernichten.
Every stage can preserve, transform or destroy state information.

Messbarkeitskriterium / measurability criterion: $p(Y | \theta_1) \neq p(Y | \theta_2)$
Das Messergebnis ist nicht der Zustand. / The result is not the state.

Figure 1: Abbildung 1: Operatorfolge der Messkette. Das Messergebnis ist nicht der Zustand selbst, sondern das Resultat physikalischer und informationeller Transformationen.

Symbol	Bedeutung
X_0	physikalischer Ausgangszustand
H_{field}	Feld- oder Wellenausbreitung
H_{mat}	Materialantwort: Reflexion, Transmission, Absorption, Streuung, Dispersion
H_{mix}	Mischung, Mehrfachstreuung, Modenkopplung, Nichtlinearität, lineare Zeitvarianz
H_{measure}	Messprozess, Detektorantwort, Messoperator
Q	Quantisierung, Schwelle, Klassifikation, digitale Entscheidung
Y	registriertes Ergebnis

Im linearen Fall gilt $Y = H_{\text{total}}X_0 + N$ mit $H_{\text{total}} = H_m \cdots H_1$ (2). Besitzt H_{total} einen Nullraum, erzeugen verschiedene Zustände dasselbe Signal. Im nichtlinearen Fall gilt $Y = F_m(\dots F_1(X_0)) + N$ (3), und die lokale Sensitivität entscheidet.

4 Zustandsunterscheidbarkeit

Ein Signal enthält Zustandsinformation über θ , wenn

$$p(Y|\theta_1) \neq p(Y|\theta_2) \quad \text{für} \quad \theta_1 \neq \theta_2, \quad (4)$$

und eindeutige Rekonstruktion ist ausgeschlossen, wenn

$$p(Y|\theta_1) = p(Y|\theta_2), \quad \theta_1 \neq \theta_2. \quad (5)$$

Herkunft der Aussage. Gleichung (5) ist die Definition der *Beobachtungsäquivalenz* zweier Parameterwerte; ein Modell heißt identifizierbar, wenn keine zwei verschiedenen Parameterwerte beobachtungsäquivalent sind. Rothenberg (1971) zeigt, dass unter schwachen Regularitätsbedingungen lokale Identifizierbarkeit äquivalent zur Nichtsingularität der Fisher-Informationsmatrix ist. Diese Arbeit übernimmt den Satz und wendet ihn

auf physikalische Vorwärtsketten an. Der Beitrag liegt in der Übertragung und in der Stufenzerlegung, nicht in der Aussage selbst.

Drei Ebenen sind zu trennen:

Ebene	Kriterium	Größe
prinzipielle Messbarkeit	$p(Y \theta_1) \neq p(Y \theta_2)$	Identifizierbarkeit
praktische Rekonstruierbarkeit	Überlapp der Verteilungen	Kullback-Leibler-Divergenz, d'
robuste technische Schätzbarkeit	erreichbare Varianz	Fisher-Information, Cramér-Rao

Im quantenmechanischen Fall tritt an die Stelle der Fisher-Information die Quanten-Fisher-Information; Braunstein und Caves (1994) zeigen, dass die statistische Unterscheidbarkeit benachbarter Zustände eine Riemannsche Metrik auf dem Raum der Dichteoperatoren definiert.

5 Die Arbeitsgröße K

5.1 Definition als effektives SNR

K ist definiert als das **effektive Signal-Rausch-Verhältnis** desjenigen äquivalenten Gauß-Kanals, der dieselbe Fisher-Information über θ liefert wie die betrachtete Messkette.

Damit ist

$$I_{\text{eff}} = \log_2(1 + K) \quad (6)$$

im Ankerfall keine Näherung, sondern exakt die Shannon-Kapazität des äquivalenten Kanals.

5.2 Ankerfall: Herleitung aus der Fisher-Information

Für $Y = s(\theta) + N$, $N \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$, gilt $F(\theta) = (\partial_\theta s)^2 / \sigma^2$ (7). Mit der dimensionslosen Definition $K := \theta^2 F(\theta)$ und

$$SNR := \frac{s^2}{\sigma^2}, \quad C := \frac{\theta}{s} \frac{\partial s}{\partial \theta}$$

folgt exakt

$$K = SNR \cdot C^2. \quad (8)$$

K ist damit die Fisher-Information bezüglich $\ln \theta$, und C ist die logarithmische Sensitivität (Elastizität) der Vorwärtskette. Wirken die weiteren Stufen als amplitudenskalierende Faktoren $g_i \in [0, 1]$ ohne Änderung der Rauschleistung, gilt $SNR_{\text{eff}} = SNR \prod_i g_i^2$ und

$$K = SNR \cdot G(|q|a) \cdot D_{\text{mat}} \cdot \gamma \cdot R_{\text{dir}} \cdot C^2. \quad (9)$$

Faktor	Bedeutung	Wertebereich
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis des Trägers	≥ 0
$G(q a)$	Auflösungs- oder Strukturübertragungsfaktor	$[0, 1]$
D_{mat}	Material- und Ausbreitungsfaktor	$[0, 1]$
γ	Kohärenzfaktor, $\gamma = g^{(1)} $	$[0, 1]$
R_{dir}	Richtungsinformationsfaktor	$[0, 1]$
C	normierte Zustands-Signal-Kopplung	reell

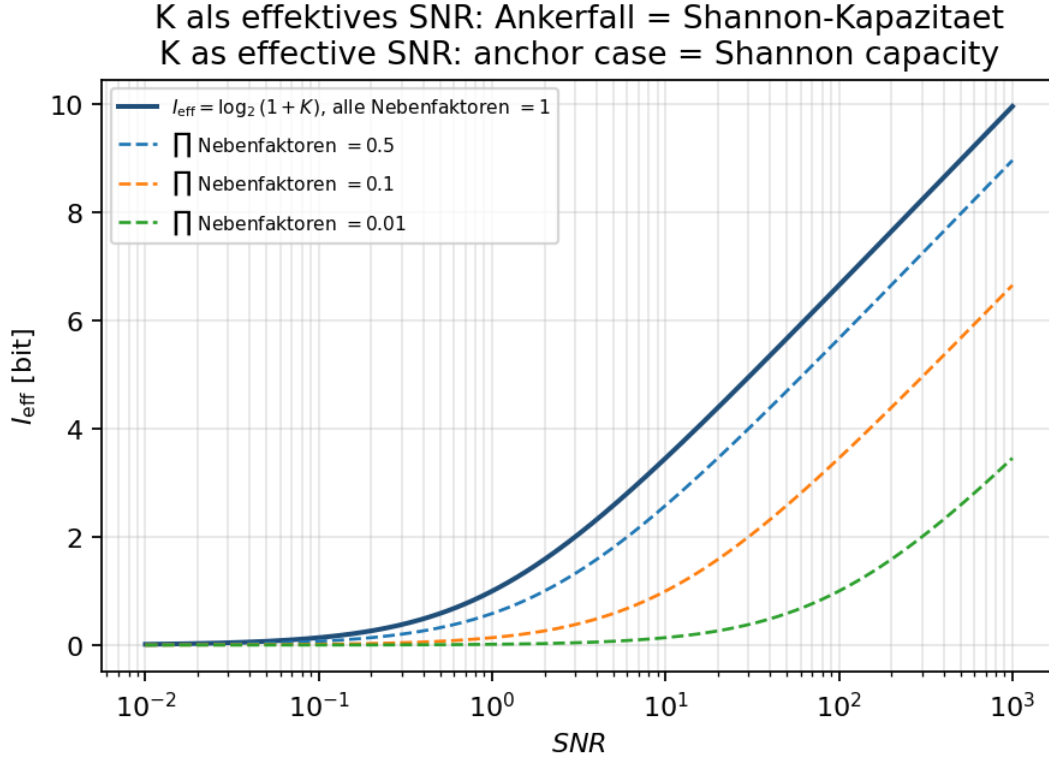


Figure 2: Abbildung 2: K als effektives SNR. Der Ankerfall — alle Nebenfaktoren gleich eins — ist exakt die Shannon-Kapazität des äquivalenten Gauß-Kanals.

5.3 Satz 1 (Separierbarkeit)

Sei $F(\theta; p_1, \dots, p_n)$ auf einem zusammenhängenden Produktgebiet $P_1 \times \dots \times P_n$ positiv und zweimal stetig differenzierbar. Dann sind äquivalent:

1. $F = \prod_{i=1}^n f_i(p_i)$ für geeignete Funktionen $f_i > 0$;
2. $\frac{\partial^2 \log F}{\partial p_i \partial p_j} = 0$ für alle $i \neq j$. (10)

Beweis (Skizze). (1) $\Rightarrow$ (2): $\log F = \sum_i \log f_i(p_i)$, jeder Summand hängt von genau einer Variablen ab, also verschwinden alle gemischten zweiten Ableitungen. (2) $\Rightarrow$ (1): Verschwinden alle gemischten zweiten Ableitungen einer C^2 -Funktion auf einem zusammenhängenden Produktgebiet, so ist $\partial \log F / \partial p_i$ eine Funktion allein von p_i ; Integration liefert $\log F = \sum_i h_i(p_i) + \text{const.}$ $\square$

Das Kriterium ist damit nicht hinreichend oder notwendig, sondern **äquivalent** zur Produktform. Es ist invariant unter koordinatenweisen Reparametrisierungen $p_i \mapsto \varphi_i(p_i)$, nicht aber unter mischenden Transformationen. Ob zu einem gegebenen Modell eine mischende Reparametrisierung existiert, die $\log F$ separabel macht, ist ein Randwertproblem derselben Art wie die Orthogonalisierung bei Cox und Reid (1987); es bleibt offen.

5.4 Satz 2 (Stufenfassung)

Für eine Kette $\theta \rightarrow X_0 \rightarrow X_1 \rightarrow \dots \rightarrow X_n$ mit Fisher-Informationen F_k über θ gilt stets die Teleskopdarstellung

$$F_n = F_0 \prod_{k=1}^n \eta_k, \quad \eta_k := \frac{F_k}{F_{k-1}} \in [0, 1]. \quad (11)$$

Die Beschränkung $\eta_k \leq 1$ folgt aus der Datenverarbeitungsungleichung für Fisher-Information (Zamir 1998). Die Produktdarstellung (11) ist deshalb trivial und für sich genommen ohne Aussagekraft. Die inhaltliche Behauptung des Rahmens lautet:

Die Stufeneffizienz η_k hängt nur von den Parametern p_k der eigenen Stufe ab — nicht von vorgelagerten Parametern $p_{<k}$ und nicht vom Signalniveau.

Erst in dieser Fassung ist die Produktform eine prüfbare physikalische Aussage über die Kanalstruktur. Sie ist äquivalent zu Satz 1, angewandt auf die Parametergruppen der einzelnen Stufen.

5.5 Abgrenzung zu benachbarten Begriffen

Begriff	Objekt	Verhältnis zum Kriterium
Parameter-Orthogonalität (Cox & Reid 1987)	Nebendiagonale $i_{\theta\lambda}$ der Fisher-Matrix zwischen Interessens- und Störparameter	Logisch unabhängig: $F_{\theta\theta}$ kann in p faktorisieren, während $i_{\theta p} \neq 0$ gilt, und umgekehrt. Gemeinsam ist nur die Frage nach einer geeigneten Reparametrisierung
Datenverarbeitungsungleichung (Zamir 1998) Stam-Ungleichung, Kettenregel	F nimmt entlang einer Markov-Kette nicht zu $1/J(X+Y) \geq 1/J(X) + 1/J(Y)$ bzw. additive Zerlegung	Liefert $\eta_k \leq 1$, aber keine Produktregel Additiv, nicht multiplikativ. Die Information addiert sich invers, nicht als Produkt
Noise Coefficient (Chao, Ward & Ober 2012)	Verhältnis der pixelweisen Fisher-Information zum idealen Poisson-Fall	Dem Kriterium am nächsten: ein Wirkungsgrad pro Stufe. Aber signalabhängig definiert und ohne Aussage über die Kaskade — genau die Lücke, die Satz 2 schließt
Rauschzahl-Kaskade (Friis 1944)	$F = F_1 + (F_2 - 1)/G_1 + \dots$	Additiv mit Gewichtung durch die Verstärkung — der Standardfall einer Verletzung
Kaskadierte Detektoren, DQE (Rabbani, Shaw & Van Metter 1987; Cunningham & Shaw 1999)	Signal- und Rauschleistungsdichte je Stufe	Nächstverwandte Kettenzerlegung. Sie arbeitet mit zweiten Momenten statt mit Fisher-Information und hält fest, dass die DQE eines kaskadierten Systems im Allgemeinen keine multiplikative Kaskade von Einzel-DQE ist

5.6 Klassifikation der Vorwärtsmodelle

Klasse	Vorwärtsmodell	Kriterium (10)	Beleg
A — exakt	multiplikative Transmission $s = s_0(\theta) \prod a_i(p_i)$, Rauschen aus genau einer Stufe, σ^2 parameterunabhängig	erfüllt	$\log F = 2 \log \partial_\theta s_0 + \sum 2 \log a_i - \log \sigma^2$
A — exakt	Poisson mit Verdünnung, $\lambda = \lambda_0(\theta) \prod \eta_i$	erfüllt	binomiale Verdünnung erhält die Poisson-Form; $F = (\lambda_0'^2 / \lambda_0) \prod \eta_i$
B — asymptotisch	EMCCD bei hoher Verstärkung	erfüllt mit konstantem Faktor 1/2	Überschussrauschfaktor $\rightarrow \sqrt{2}$ (Robbins & Hadwen 2003)
B — asymptotisch	Ein-Bit-Quantisierung bei kleinem SNR	erfüllt mit Faktor $2/\pi$	Mezghani, Antreich & Nossek (2010), WSA, DOI 10.1109/WSA.2010.5456454

Klasse	Vorwärtsmodell	Kriterium (10)	Beleg
C — verletzt	Rauscheinkopplung an mehreren Stufen, $\sigma^2 = \sum_k \sigma_k^2 \prod_{j>k} a_j^2$	verletzt	Friis-Struktur; Mischterme zwischen a_j und σ_k
C — verletzt	Übergang zwischen Schrot- und Leserauschen, $\sigma^2 = \text{ENF}^2 \lambda + \sigma_r^2$	verletzt im Übergangsbereich	numerisch in Abschnitt 14.7
C — verletzt	Aperturbegrenzung: G und R_{dir} hängen beide von d ab	verletzt	Doppelzählung derselben physikalischen Ressource
C — verletzt	nichtlineare Kennlinie, Sättigung	verletzt; bei Sättigung $F = 0$	$F = h'(s)^2 s'^2 / \sigma^2$ mit $h' \rightarrow 0$
C — verletzt	verstärkungsabhängiges Rauschen $\sigma^2 = \sigma_0^2 (1 + \eta g^2)$	verletzt	numerisch in Abschnitt 14.4
C — verletzt	EMCCD bei niedriger Verstärkung	verletzt	der Überschussrauschfaktor hängt von G ab, das effektive Leserauschen ist σ_r/G ; G wirkt auf Signal- und Rauschterm zugleich
C — verletzt	Quantisierung außerhalb der Grenzfälle, mittleres bis hohes SNR	verletzt	der Verlustfaktor hängt dann vom SNR ab und nicht mehr allein vom Quantisierer
C — verletzt	allgemein heteroskedastisches Rauschen $\sigma^2(s)$	verletzt	Zusatzterm nach Gleichung (12)

Die Einordnung in diese drei Klassen stützt sich auf die durchsuchten Literaturstränge — Datenverarbeitungsgleichung, kaskadierte Systeme, Quantisierung, Detektorrauschen — und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit über alle denkbaren Kanalklassen.

Der allgemeine Grund für Klasse C steht in einer Zeile: Für $Y \sim \mathcal{N}(s(\theta), \sigma^2(\theta))$ gilt

$$F = \frac{(\partial_\theta s)^2}{\sigma^2} + \frac{(\partial_\theta \sigma^2)^2}{2\sigma^4}. \quad (12)$$

Der zweite Term fehlt in $K = \text{SNR} \cdot C^2$. Sobald ein Parameter gleichzeitig auf Signal und Rauschen wirkt, trägt er zu beiden Termen bei, und die Faktoren sind nicht mehr unabhängig kalibrierbar.

Konvention für den Überschussrauschfaktor. Robbins und Hadwen (2003) definieren den Überschussrauschfaktor als Amplitudengröße mit $F_{\text{ENF}} \rightarrow \sqrt{2}$ für hohe Verstärkung; andere Arbeiten, etwa Mortensen et al. (2010), nennen bereits die quadrierte Größe. In dieser Arbeit wird durchgehend die **quadrierte Größe** ENF^2 als Varianzfaktor geführt: Die Varianz wächst um ENF^2 , die Fisher-Information fällt um $1/\text{ENF}^2$. Für den EMCCD bei hoher Verstärkung gilt damit $\text{ENF}^2 \rightarrow 2$ und der Faktor $1/2$ in Klasse B.

6 Richtung und signierter Fluss

Richtung wird relativ zu einer Achse, Apertur, Quelle, einem Detektor oder einer Grenzfläche bestimmt. Für eine Welle mit Wellenvektor k und Beobachtungsachse e :

$$c_e = \frac{k \cdot e}{|k|}. \quad (13)$$

Für zwei gegenläufige Komponenten entlang e ist die signierte Richtungsbilanz

$$\Phi_e = \frac{|A_+|^2 - |A_-|^2}{|A_+|^2 + |A_-|^2}, \quad K_\Phi = K \cdot \Phi_e. \quad (14)$$

Φ_e ist keine neue Größe, sondern der auf die Gesamtleistung normierte Nettofluss. Mit dem Reflexionsfaktor $\Gamma = A_-/A_+$ und dem Stehwellenverhältnis $s = (1 + |\Gamma|)/(1 - |\Gamma|)$ gilt exakt

$$\Phi_e = \frac{1 - |\Gamma|^2}{1 + |\Gamma|^2} = \frac{2s}{1 + s^2}. \quad (15)$$

Damit ist Φ_e eine umskalierte VSWR-Angabe und in jeder HF-Messtechnik direkt messbar (numerisch geprüft in 14.5).

7 Auflösung und Wellenvektorübertrag

$$q = k_{\text{out}} - k_{\text{in}}, \quad |q|a \gtrsim 1, \quad |q| = 2k \sin(\Theta/2). \quad (16)$$

Nahfeldmethoden, strukturierte Beleuchtung, Nichtlinearität, Mehrfachmessungen oder Priors erweitern diese Grenze. Sie sind keine Verletzung des Modells, sondern zusätzliche Informationskanäle, die explizit in die Messkette aufzunehmen sind.

7.1 Rayleigh und Sparrow als Schwellen für d'

Die klassischen Auflösungskriterien von Rayleigh, Sparrow und Abbe sind für inkohärente Punktquellen formuliert und setzen eine feste Schwelle: aufgelöst oder nicht. Die Fisher-Information kennt keine solche Schwelle; sie fällt stetig. Beide Beschreibungen lassen sich zusammenführen, statt eine gegen die andere auszuspielen.

Für zwei Punktquellen im Abstand Δ gilt lokal $d'^2 \approx F(\Delta) \Delta^2$, und d' ist die normierte Trennbarkeit aus der Detektionstheorie. Ein klassisches Kriterium ist dann die Aussage, dass d' einen bestimmten Wert erreicht:

Kriterium	klassische Fassung	Fassung im Rahmen
Rayleigh	erstes Minimum der einen Beugungsfigur fällt auf das Maximum der anderen	d' überschreitet eine von Photonenzahl und Rauschmodell abhängige Schwelle
Sparrow	der Einbruch zwischen den Maxima verschwindet	strengere Schwelle derselben Größe
Abbe	$ q a \gtrsim 1$	$G(q a)$ fällt unter einen Wert, bei dem K unter ein Bit sinkt

Der Gewinn dieser Umformulierung ist praktisch: Die klassischen Kriterien kennen keine Photonenzahl. Sie sagen dasselbe für ein Bild mit zehn und für eines mit zehn Millionen Photonen. Die Fisher-Fassung sagt, wie viele Photonen nötig sind, damit zwei Zustände bei gegebener Apertur unterscheidbar werden — und das ist die Frage, die bei der Auslegung tatsächlich gestellt wird.

8 Materialantwort und Informationsverlust

$R+T+A = 1$ ist eine **Energiebilanz**, keine **Informationsbilanz**. Ein Spiegel erhält gerichtete Information; eine matte Oberfläche kann ähnlich viel Licht zurückwerfen und dabei Richtung und Phase diffus verteilen. D_{mat} beschreibt, wie viel der für die Zustandsfrage nutzbaren Signalstruktur geordnet im Detektor ankommt.

9 Interferenz, Auslöschung und Stehwelle

$$\Psi = \sum_j A_j \exp[i(k_j \cdot x - \omega_j t + \phi_j)], \quad |\Psi|^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\Delta k \cdot x - \Delta \omega t + \Delta \phi). \quad (17)$$

Destruktive Interferenz bedeutet, dass Feldbeiträge am betrachteten Punkt vektoriell zu null addieren. Ein lokales Nullsignal ist kein globaler Abwesenheitsbeweis.

10 Lineare Überlagerung, lineare Zeitvarianz und nichtlineare Mischung

Medienklasse	neue Feldfrequenzen?	Mechanismus
linear, zeitinvariant (LTI)	nein	reine Superposition
linear, zeitvariant (LTV)	ja	parametrische Kopplung an die Zeitmodulation
nichtlinear	ja	Mischprodukte, Intermodulation

Morgenthaler (1958) löst die Maxwell-Gleichungen für Medien mit zeitabhängiger Permittivität und Permeabilität und zeigt, dass die Felder linear bleiben, wenn die Medienparameter nicht auf die Feldstärke reagieren, und dass eine monochromatische Welle dennoch eine Frequenzverschiebung erfährt. Parametrische Verstärker, Modulatoren, geschaltete Plasmen und zeitmodulierte Metamaterialien (Galiffi et al. 2022) gehören in diese Klasse. Mit $Y = \alpha X + \beta X^2 + \gamma_3 X^3 + \dots$ entstehen dagegen Mischprodukte $f_1 \pm f_2$ und Intermodulation $2f_1 - f_2$.

11 Elektromagnetischer Kern

$$\nabla \cdot D = \rho, \quad \nabla \cdot B = 0, \quad \nabla \times E = -\partial_t B, \quad \nabla \times H = J + \partial_t D. \quad (18)$$

Im linearen, isotropen, lokalen Grenzfall gelten $D = \varepsilon E$, $B = \mu H$, $J = \sigma E$. In anisotropen, dispersiven, nichtlinearen oder zeitabhängigen Medien sind ε , μ , σ als Tensoren, Frequenzfunktionen, Faltungskerne oder nichtlineare Antwortfunktionen zu modellieren. In diesem Abschnitt bezeichnet μ ausschließlich die Permeabilität; der Kohärenzfaktor heißt γ .

12 Digitalisierung

Ist Q reine Nachverarbeitung desselben analogen Signals, gilt die Datenverarbeitungsungleichung

$$I(X; Y_{\text{digital}}) \leq I(X; Y_{\text{analog}}). \quad (19)$$

Digitalisierung erzeugt keine physikalische Zustandsinformation, die weder im analogen Signal noch in Zusatzdaten, Priors oder weiteren Messungen enthalten ist.

13 Quantenmessung

$$p(y|\theta) = \text{Tr}(\rho_\theta E_y), \quad E_y \geq 0, \quad \sum_y E_y = I. \quad (20)$$

Die zugehörige Schätzgrenze ist die Quanten-Cramér-Rao-Schranke (Helstrom 1969); die Metrik der Unterscheidbarkeit ist bei Braunstein und Caves (1994) formuliert, mit $F_Q = \max_{\text{POVM}} F_C$. Eine zugängliche Gesamtdarstellung für die Anwendung gibt Paris (2009).

Die Quanten-Fisher-Information ist monoton unter vollständig positiven, spurerhaltenden Abbildungen; das ist die quantenmechanische Fassung der Datenverarbeitungsungleichung aus Abschnitt 12 und zugleich die Grundlage dafür, dass auch im Quantenfall $\eta_k \leq 1$ gilt. Für Schätzgrenzen unter Rauschen gibt es einen allgemeinen Rahmen (Escher, de Matos Filho & Davidovich 2011); unter Dephasierung fällt die erreichbare Skalierung asymptotisch auf $1/\sqrt{N}$ zurück, der Heisenberg-Vorteil geht verloren. Dekohärenz bedeutet, dass Phasenbeziehungen durch Kopplung an Detektor oder Umgebung praktisch unzugänglich werden; man betrachtet dann $\rho_S = \text{Tr}_E(\rho_{SE})$. Alle Purifikationen eines reduzierten Zustands sind durch Unitäre auf dem Hilfssystem verbunden (Hughston, Jozsa & Wootters 1993): Unendlich viele Gesamtzustände liefern dieselbe lokale Statistik. Das ist der quantenmechanische Fall von Gleichung (5).

14 Numerische Minimalmodelle

Zahlen aus `werkzeuge/FORSCH-PROV0420_minimalmodelle_v0.2_2026-08-26_numerik.py` (Seed 20260826, Modelle M1–M6) und `..._v0.3_2026-10-05_numerik.py` (Seed 20261005, Modelle M7–M10). Rohergebnisse: `ergebnisse.json` und `ergebnisse_v0.3.json`.

14.1 M1 — Gauß-Kanal, Fisher-Information, Cramér-Rao

Modell $Y = A\theta + N$, $A = 1,0$, $\sigma = 0,5$, $\theta_0 = 1,0$, $n = 200\,000$.

Größe	Wert	Prüfung
F analytisch	4,000	—
F Monte-Carlo (Score-Varianz)	3,991	Abweichung 0,23 %
Cramér-Rao $1/F$	0,2500	—
empirische Varianz des ML-Schätzers	0,2494	Abweichung 0,23 %
$K = SNR \cdot C^2$	4,000	identisch mit $\theta^2 F$
$I_{\text{eff}} = \log_2(1 + K)$	2,322 bit	Shannon-Anker
F bei Kopplung $C = 0$	0	Gleichung (5)

14.2 M2 — Nullraum und Konditionierungs-Kontinuum

$H = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, $\sigma = 0,1$: Fisher-Eigenwerte $\{0; 100; 200\}$, Nullraumrichtung $(0,707; -0,707; 0)$. Ersetzt man den exakten Nullraum durch einen kleinen Singulärwert ϵ , wächst die Cramér-Rao-Schranke wie $1/\epsilon$ (von 0,1 bei $\epsilon = 1$ auf $\approx 1,0 \cdot 10^5$ bei $\epsilon = 10^{-6}$).

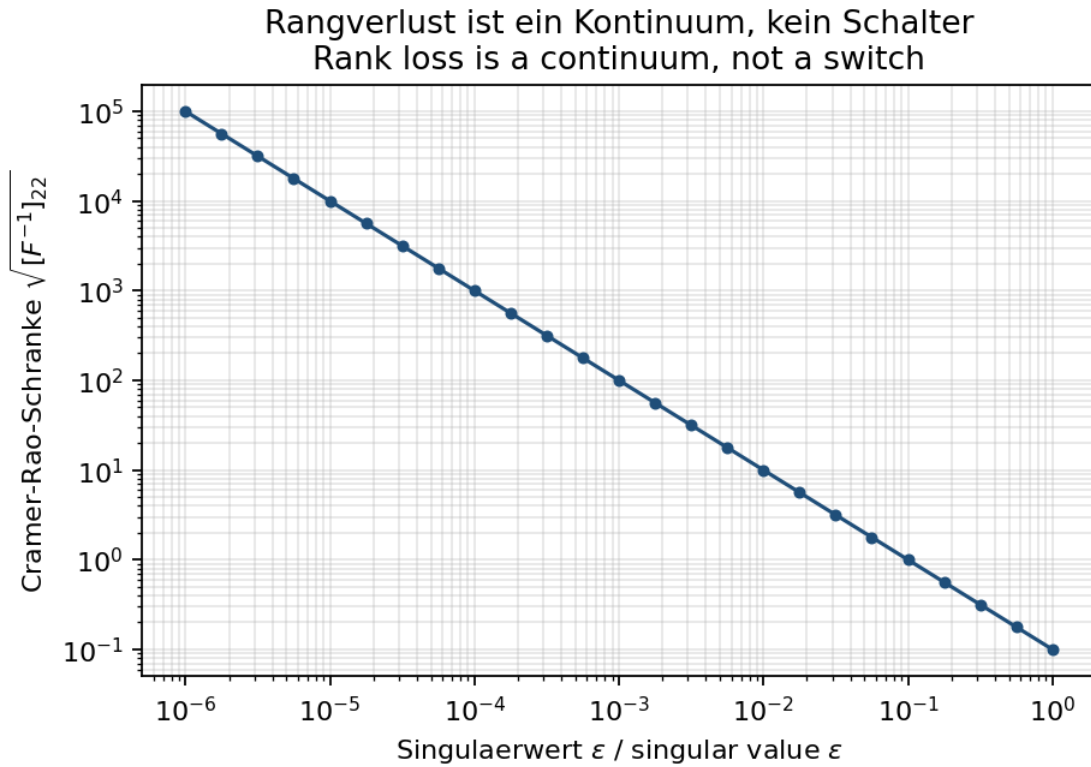


Figure 3: Abbildung 3: Rangverlust ist ein Kontinuum, kein Schalter.

Entscheidend ist das Singulärwertspektrum im Verhältnis zum Rauschniveau — die Picard-Bedingung der Theorie inverser Probleme (Bertero & Boccacci 1998).

14.3 M3 — Zwei-Sensor-Richtungsmodell

$\tau = d \sin \theta / v$, $v = 343$ m/s, $\sigma_\tau = 2$ μ s, $n = 40\,000$ je Punkt.

d [m]	θ [°]	σ_θ Monte-Carlo [°]	σ_θ analytisch [°]	$F(\theta)$
0,00	beliebig	—	—	0
0,05	0	0,787	0,786	$5,31 \cdot 10^3$
0,05	30	0,906	0,908	$3,98 \cdot 10^3$

d [m]	θ [°]	σ_θ Monte-Carlo [°]	σ_θ analytisch [°]	$F(\theta)$
0,05	60	1,590	1,572	$1,33 \cdot 10^3$
0,20	0	0,197	0,197	$8,50 \cdot 10^4$
0,20	30	0,227	0,227	$6,37 \cdot 10^4$
0,20	60	0,395	0,393	$2,12 \cdot 10^4$

Median der relativen Abweichung 0,20 %, Maximum 3,4 %.

14.4 M4 — Bruch der Produktform bei verstärkungsabhängigem Rauschen

$\sigma^2(g) = \sigma_0^2(1 + \eta g^2)$, $\sigma_0 = 0,2$, $\eta = 0,05$. Die wahre Fisher-Information sättigt bei 500, die bei $g_0 = 1$ kalibrierte Produktform wächst wie g^2 .

Verstärkung g	Verhalten	relative Abweichung
0,1 ... 1,71	Produktform brauchbar	< 10 %
10	Produktform überschätzt	436 %

14.5 M5 — Signierte Flussbilanz und Stehwellenverhältnis

Identität (15) geprüft über $|\Gamma| \in [0; 0,999]$; maximale Abweichung $2,2 \cdot 10^{-16}$ (Maschinengenauigkeit).

$ \Gamma $	VSWR s	Φ_e
0,0	1,0	1,000
0,2	1,5	0,923
0,5	3,0	0,600
$\rightarrow 1$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow 0$

14.6 M7 — Stufeneffizienz in der Kaskade

Poisson-Quelle $\theta = 1000$ Photoelektronen, drei Transmissionsstufen mit nominalen $\eta = (0,80; 0,60; 0,50)$, Leserauschen σ_r am Ende der Kette. Gemessen wird $\eta_k^{\text{eff}} = F_k/F_{k-1}$.

σ_r [e ⁻]	η_1^{eff}	η_2^{eff}	η_3^{eff}	maximale Abweichung von der Nominaltransmission
0	0,800	0,600	0,500	0,0005
5	0,795	0,588	0,477	0,023
50	0,679	0,399	0,272	0,228
200	0,643	0,363	0,252	0,249

Das ist Satz 2 in Zahlen. Ohne Leserauschen ist η_k^{eff} exakt die nominale Transmission der eigenen Stufe, die Produktform gilt. Mit Leserauschen hängt η_3 davon ab, wie viel Signal die Stufen 1 und 2 übrig gelassen haben — die Stufeneffizienz ist dann keine Stufeneigenschaft mehr, und die Faktoren sind nicht getrennt kalibrierbar.

14.7 M8 — Separierbarkeitskarte

Gemischte zweite Ableitung $\partial^2 \log F / \partial \ln \lambda \partial \ln \sigma_r$ über Signalniveau und Leserauschen, Gitter 120×120 über $\lambda \in [1; 10^5]$ e⁻ und $\sigma_r \in [0,1; 300]$ e⁻.

λ [e ⁻]	σ_r [e ⁻]	$ \partial^2 \log F $	Regime
10	1,0	0,173	Übergang

λ [e ⁻]	σ_r [e ⁻]	$ \partial^2 \log F $	Regime
10	102	0,002	leselimitiert
962	1,0	0,002	schrotlimitiert
962	9,7	0,163	Übergang
100 000	9,7	0,002	schrotlimitiert
100 000	102	0,178	Übergang

Bei einer Schwelle von 0,05 sind 58 % der betrachteten Parameterfläche separabel. Die Struktur ist aufschlussreich: Separabilität gilt in den beiden asymptotischen Regimen — klar schrotlimitiert oder klar leselimitiert — und bricht im Übergangsbereich $\lambda \approx \sigma_r^2$. Die Produktform ist also kein Entweder-oder, sondern eine Eigenschaft des Arbeitspunkts. Für die Praxis heißt das: Die Faktorisierung ist dort zulässig, wo ein Rauschbeitrag deutlich dominiert.

14.8 M9 — Qubit unter Dephasierung

Zustand $\rho = \frac{1}{2}(I + r(\cos \varphi \sigma_x + \sin \varphi \sigma_y))$ mit $r = e^{-\Gamma t}$, $\Gamma = 1$.

Größe	Wert
$F_Q(\varphi)$	$r^2 = e^{-2\Gamma t}$
$F_Q(\omega)$ bei $\varphi = \omega t$	$t^2 e^{-2\Gamma t}$
optimale Einzelzeit bei fester Gesamtzeit, theoretisch	$t^* = 1/(2\Gamma) = 0,500$
dieselbe Größe, numerisch	0,500
F_Q bei t^*	0,3679
F_C einer projektiven Messung mit $\varphi - \alpha = 90^\circ$	0,3679 (erreicht F_Q bis auf Gitterauflösung $4 \cdot 10^{-6}$)
F_C bei $\varphi - \alpha = 0^\circ$	0

Zwei Lehren für den Rahmen. Erstens ist Nichtunterscheidbarkeit im Quantenfall **messungsrelativ**: Bei $\varphi - \alpha = 0$ ist $F_C = 0$, obwohl $F_Q > 0$ — die Information ist im Zustand vorhanden und im gewählten Kanal nicht zugänglich. Zweitens zeigt $\log F_Q(\omega) = 2 \log t - 2\Gamma t$ mit $\partial^2/\partial t \partial \Gamma = -2 \neq 0$, dass das Separierbarkeitskriterium in den Parametern (t, Γ) verletzt, in $(t, D = e^{-\Gamma t})$ dagegen erfüllt ist. Die Zulässigkeit der Produktform hängt an der Wahl der Parametrisierung.

14.9 M10 — Spaltversuch, vollständig durchgerechnet

Einzelspalt, $a_0 = 150 \mu\text{m}$, $\lambda = 650 \text{ nm}$, $L = 1,00 \text{ m}$, Pixel $1,55 \mu\text{m}$, 4096 Pixel, Leserauschen 3 e^- , Konversion $1 \text{ e}^-/\text{ADU}$, Spitzensignal 4000 e^- , Pixelintegration mit 16 Stützstellen.

Größe	Wert
Fraunhofer-Kennzahl $a^2/(\lambda L)$	0,035 (Bedingung erfüllt)
Ort von $ q a = 1$	0,690 mm
erstes Minimum	4,333 mm
Fisher-Information $F(a)$	$7,86 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-2}$
Cramér-Rao-Schranke σ_a	35,7 nm
Monte-Carlo-Standardabweichung des ML-Schätzers ($n = 2000$)	35,2 nm
Cramér-Rao-Effizienz	1,03

Die Spaltbreite ist bei diesem Aufbau auf etwa 36 nm genau schätzbar, also auf $2,4 \cdot 10^{-4}$ ihres Werts. Das ist der entscheidende Punkt für das Versuchsprogramm: Die Messgenauigkeit ist nicht durch die Pixelgröße begrenzt, sondern durch Photonenstatistik und Modelltreue.

Zur empirischen Prüfung des Separierbarkeitskriteriums dient die Abhängigkeit von Belichtung und Leserauschen:

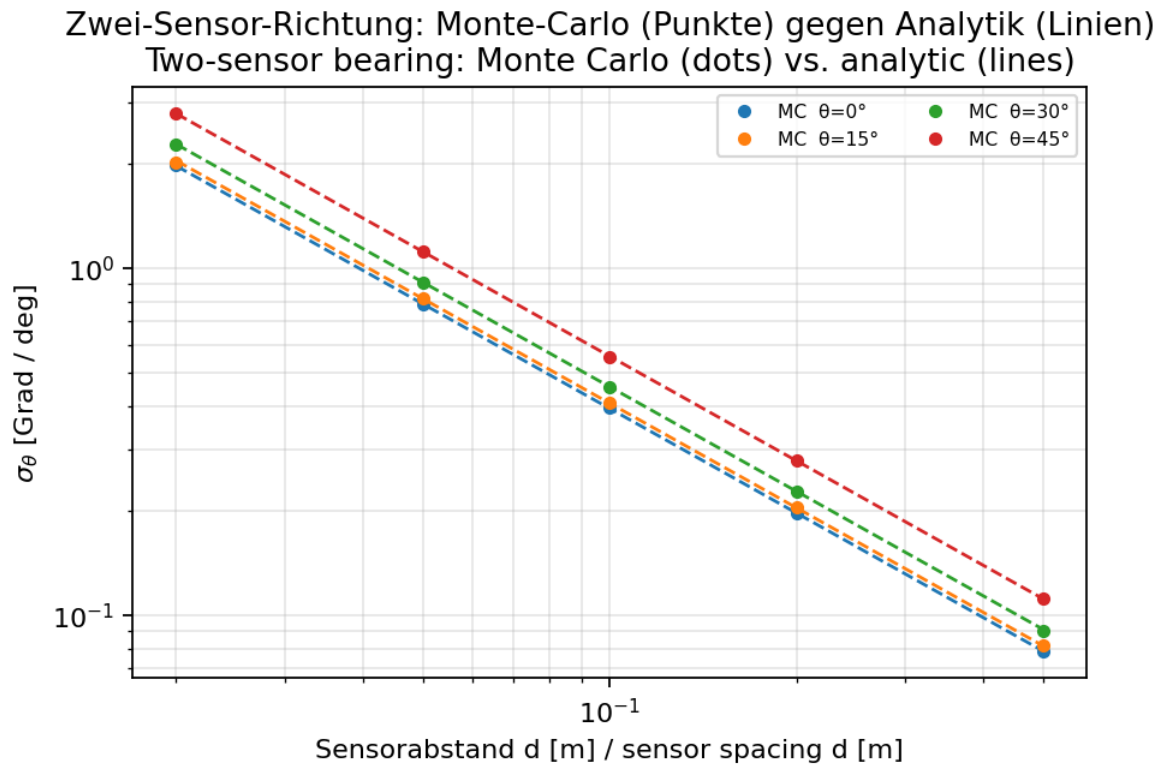


Figure 4: Abbildung 4: Zwei-Sensor-Richtung; $d = 0$ liefert keine Richtungsinformation.

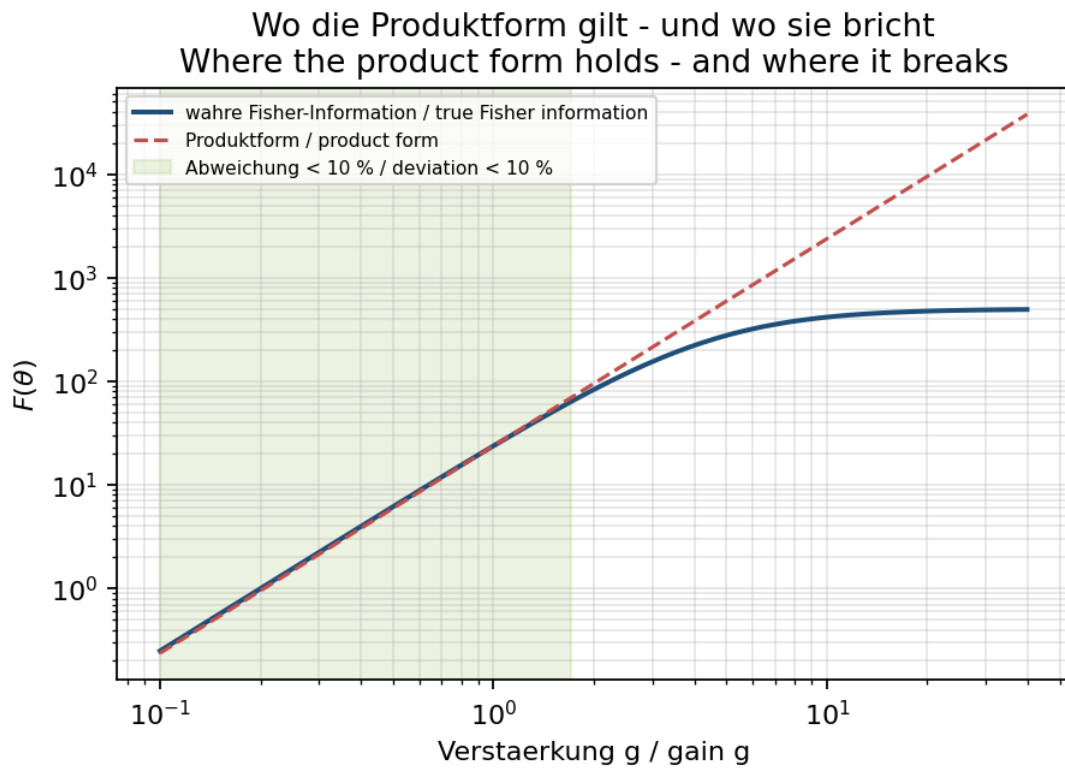


Figure 5: Abbildung 5: Gültigkeitsbereich der Produktform.

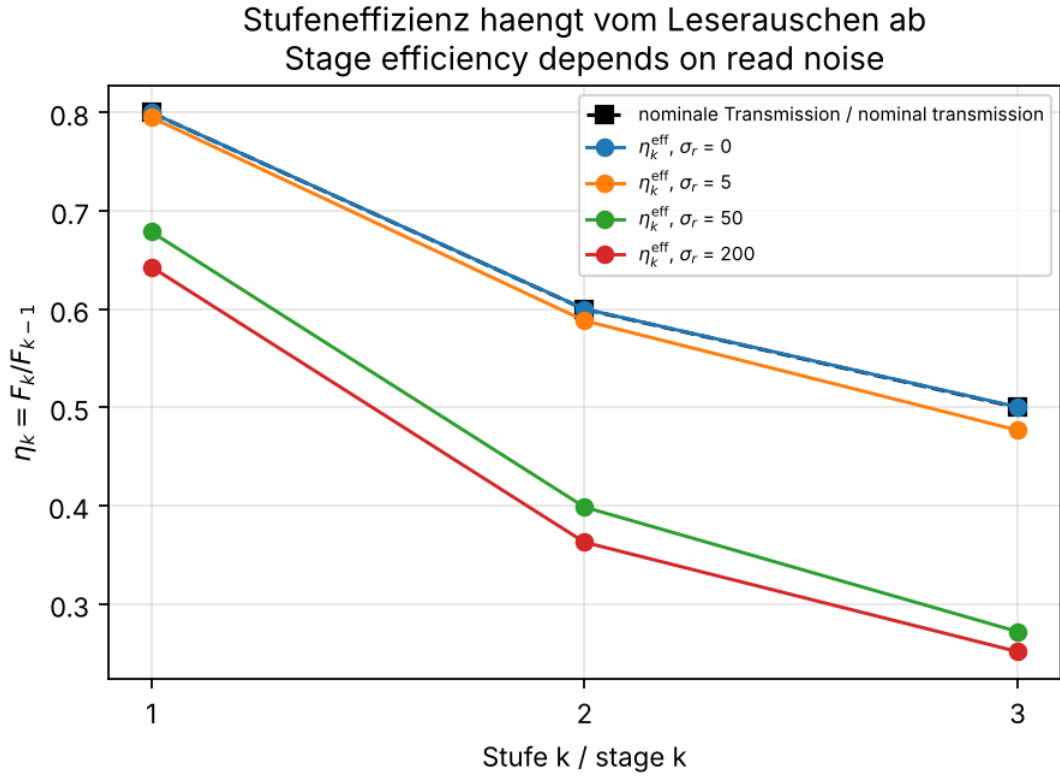


Figure 6: Abbildung 6: Die Stufeneffizienz ist keine Eigenschaft der Stufe allein, sobald Rauschen am Ketteneingange eingekoppelt wird.

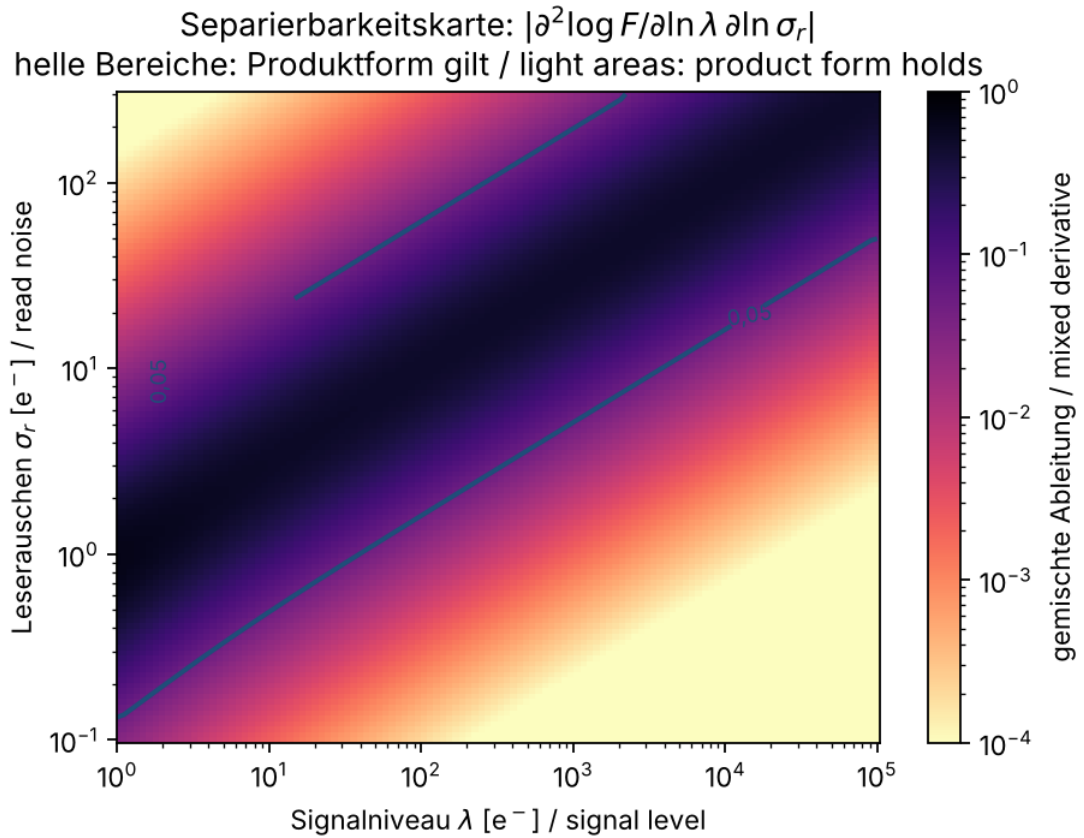


Figure 7: Abbildung 7: Separierbarkeitskarte. In den hellen Bereichen ist die Produktform zulässig, im dunklen Diagonalband nicht.

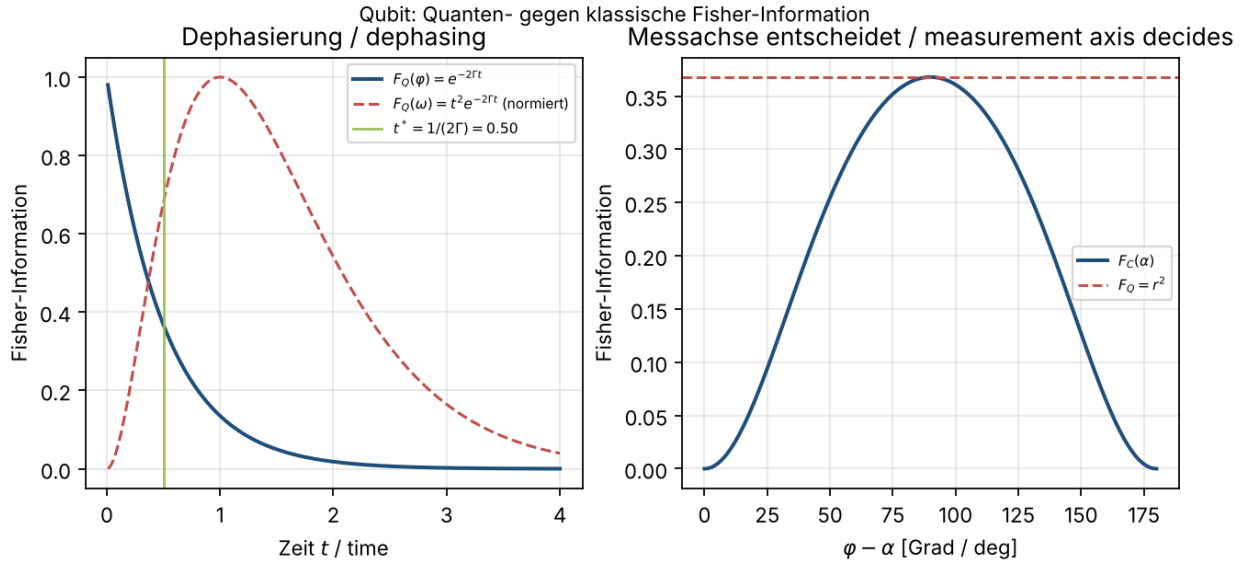


Figure 8: Abbildung 8: Quanten- gegen klassische Fisher-Information. Die Messachse entscheidet, ob die erreichbare Information ausgeschöpft wird.

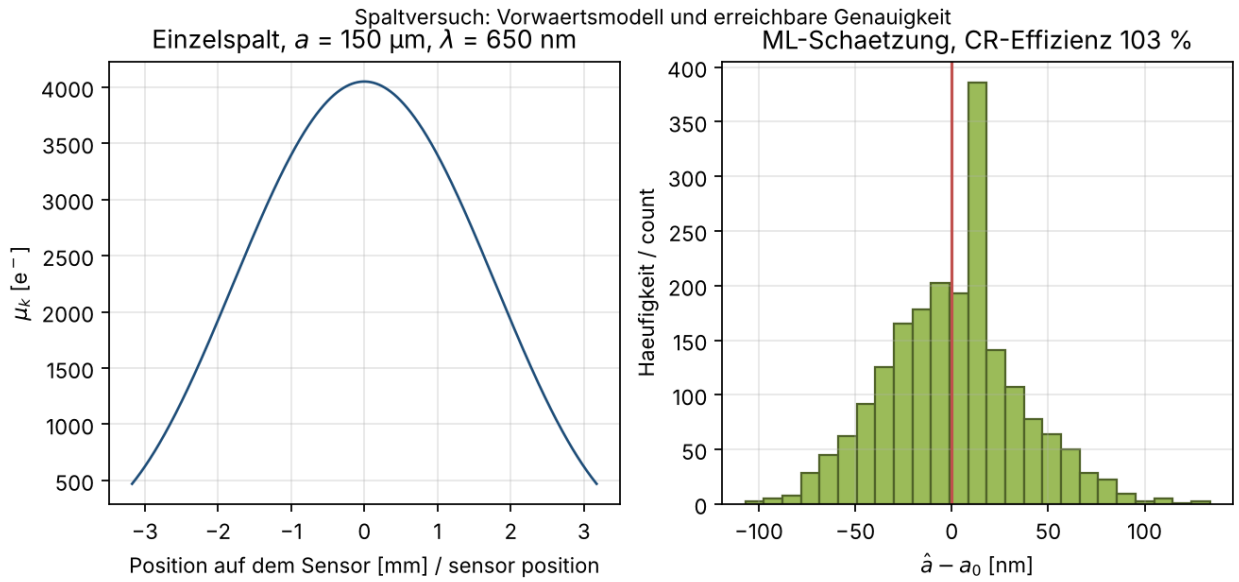


Figure 9: Abbildung 9: Vorwärtsmodell des Spaltversuchs und erreichbare Genauigkeit der Spaltbreitenschätzung.

Belichtung (Skalenfaktor)	$F(a)$ bei $\sigma_r = 1$	bei $\sigma_r = 3$	bei $\sigma_r = 10$	bei $\sigma_r = 30$
0,1	$7,89 \cdot 10^{13}$	$7,29 \cdot 10^{13}$	$4,12 \cdot 10^{13}$	$9,35 \cdot 10^{12}$
1,0	$7,92 \cdot 10^{14}$	$7,86 \cdot 10^{14}$	$7,20 \cdot 10^{14}$	$4,31 \cdot 10^{14}$
10	$7,93 \cdot 10^{15}$	$7,92 \cdot 10^{15}$	$7,85 \cdot 10^{15}$	$7,26 \cdot 10^{15}$

Bei hoher Belichtung ist F praktisch proportional zur Belichtung und vom Leserauschen unabhängig — die Produktform gilt. Bei niedriger Belichtung koppeln beide Parameter: Der Abfall von $\sigma_r = 1$ auf 30 beträgt dort Faktor 8,4, bei zehnfacher Belichtung nur noch Faktor 1,09. Genau diese gemischte Abhängigkeit ist im Labor messbar und ist der Prüfplan aus Abschnitt 19.

15 Falsifizierbarkeit

Nr.	Falsifikationsfall	Status v0.3
1	Strukturinformation bei $ q a \ll 1$ ohne Nahfeld, Nichtlinearität, Priors, Mehrfachmessung oder Superresolution-Mechanismus	unverändert
2	Richtungsrekonstruktion aus einem Signal mit $p(Y k_1) = p(Y k_2)$ ohne zusätzlichen Messkanal	numerisch belegt in 14.3
3	Neue Feldfrequenzen in einem nachweislich linearen und zeitinvarianten Medium ohne nichtlineare Detektion	LTV-Medien ausgenommen (Abschnitt 10)
4	Stabile Interferenz bei tatsächlich fehlender Kohärenz	unverändert
5	Rekonstruktion verlorener analoger Information aus reiner Quantisierung ohne Zusatzinformation	unverändert
6	Energie- oder Informationsbilanz, die nicht durch Reflexion, Transmission, Absorption, Streuung, Frequenzumwandlung oder interne Freiheitsgrade geschlossen werden kann	unverändert
7	Produktform (9) trifft in einem System zu, in dem Kriterium (10) nachweislich verletzt ist	prüfbar nach 14.7 und Abschnitt 19
8	Neu: Eine Stufeneffizienz η_k bleibt über Variation vorgelagerter Parameter konstant, obwohl das Rauschmodell mehrstufige Einkopplung ausweist	würde Satz 2 widerlegen

16 Wiener Linie und Wissenschaftsphilosophie der Messbarkeit

Der Rahmen steht in einer Traditionslinie, die in Wien beginnt und über den Operationalismus zur modernen modellbasierten Messtheorie führt. Diese Einordnung ist keine Verzierung: Sie entscheidet darüber, welchen Anspruch das Kriterium erheben darf.

Position	Kernthese	Standardkritik	Was davon trägt
Mach (<i>Analyse der Empfindungen</i> 1886; Denkökonomie)	Physikalische Begriffe sind ökonomische Zusammenfassungen von Elementen; Atome sind entbehrlich	Planck 1908/09; die spätere Bestätigung des Atomismus durch Perrin und Einstein	Denkökonomie als minimale Parametrisierung — aber keine Beschränkung auf Beobachtbares, denn θ darf theoretisch sein Nichtidentifizierbarkeit ist genau dieser Modellpluralismus in statistischer Fassung. Boltzmann ist der nächste Ahnherr des Rahmens
Boltzmann (Bildtheorie, <i>Populäre Schriften</i> 1905)	Theorien sind Bilder oder Modelle; mehrere Bilder können dieselben Phänomene darstellen	—	Der Rahmen vermeidet die Falle: θ ist modelltheoretisch definiert, der Messkanal ist nur Prüfinstanz. Der Kernsatz ist ein Ausschlusskriterium , keine Bedeutungsdefinition
Bridgman (<i>The Logic of Modern Physics</i> 1927)	Ein Begriff ist gleichbedeutend mit der zugehörigen Menge von Operationen	Jede neue Messmethode erzeugt einen neuen Begriff; theoretische Begriffe bleiben unerklärt	Tragfähig ist Carnaps Übergang von Verifizierbarkeit zu gradueller Bestätigbarkeit — das Gegenstück zu K als graduiertem Maß. Nicht tragfähig ist ein Sinnkriterium für Sätze
Wiener Kreis: Carnap (<i>Testability and Meaning</i> 1936/37), Neurath, Schlick	Verifikations- beziehungsweise Bestätigbarkeitskriterium der Sinnhaftigkeit	Hempel 1950: zu streng für Allsätze, zu liberal bei Disjunktionen	Information liegt nur im Gesamtzustand vor: Abschnitt 13
Schrödinger (1935)	Verschränkung; der Erwartungskatalog des Teilsystems ist unvollständig	—	Der Rahmen ist eine modellbasierte Theorie: $Y =$ Indikation, $\hat{\theta} =$ Ergebnis, $p(Y \theta) =$ Modell
Tal, <i>Measurement in Science</i> (SEP); modellbasierte Messtheorie	Messung ist Prozess plus Modell; Indikation und Messergebnis sind zu trennen	—	Eindeutigkeitssätze entsprechen den Äquivalenzklassen der Beobachtungsäquivalenz
Repräsentationale Messtheorie (Krantz, Luce, Suppes & Tversky 1971)	Messung als Homomorphismus empirischer in numerische Relationen; Eindeutigkeitssätze	setzt beobachtbare Relationen voraus	
GUM (JCGM 100:2008), VIM	Unsicherheitsfortpflanzung mit Sensitivitätskoeffizienten $c_i = \partial f / \partial x_i$	Linearisierung	C ist ein normierter Sensitivitätskoeffizient; $1/F$ entspricht der Unsicherheit vom Typ A an der Cramér-Rao-Grenze
Unterbestimmtheit (Duhem, Quine 1951); Eichfreiheit	Daten bestimmen Theorien nicht eindeutig; Eichrichtungen sind physikalisch redundant	—	Eichrichtungen sind exakte Nullrichtungen der Fisher-Matrix; die identifizierbare Struktur ist der Quotient

Position des Rahmens. Er ist eine modellbasierte, informationsmetrische Messtheorie. Von Mach übernimmt er die Ökonomie, von Boltzmann den Modellpluralismus, von Carnap die Graduierung. Den Operationalismus vermeidet er, weil er Bedeutung nicht über Operationen definiert, sondern nur ausschließt, was kein Kanal unterscheiden kann. Der klassische Einwand gegen Mach — Atome waren nicht direkt beobachtbar und existieren trotzdem — trifft ihn nicht: Atome waren über geeignete Kanäle, etwa die Brownsche Bewegung, identifizierbar. **Nichtidentifizierbarkeit ist kanalrelativ, nicht absolut.** Dieser Satz ist die philosophische Pointe des Rahmens und zugleich seine Schutzklausel gegen jede positivistische Überdehnung.

17 Abgrenzung zur Beobachtbarkeitstheorie und zu benachbarten Rahmen

Rahmen	Objekt	Stochastisch	Graduiert	Physikalische Kettenzerlegung	Verhältnis
Hadamard, Tikhonov, Bertero & Boccacci	Wohlgestelltheit, Regularisierung	teilweise	über Singulärwerte	nein	Nichtidentifizierbarkeit entspricht dem Kern des Vorwärtsoperators
Identifizierbarkeit (Koopmans; Rothenberg 1971)	Beobachtungsäquivalenz		lokal über die Fisher-Matrix	nein	Liefert den Kernsatz; hier liegt keine Neuheit
Schätztheorie (Kay 1993; Van Trees 1968)	Cramér-Rao, Fisher-Information	ja	ja	nein	liefert $K = \theta^2 F$
Kalman-Beobachtbarkeit	Rang der Beobachtbarkeitsmatrix	nein	binär	nein	im linear-gaußschen Fall ist die Fisher-Information des Anfangszustands die mit R^{-1} gewichtete Beobachtbarkeits-Gramsche; voller Rang $\Leftrightarrow F$ regulär
Hermann & Krener (1977)	lokal schwache Beobachtbarkeit, Rangbedingung für Lie-Ableitungen	nein	binär	nein	differentielle Fassung; Nullrichtungen sind nichtidentifizierbare Richtungen
Empirische Gramsche, Maße der Unbeobachtbarkeit (Krener & Ide 2009)	graduierte Beobachtbarkeit	teilweise	ja	nein	nächste gradierte Konkurrenzformulierung
Strukturelle Identifizierbarkeit (Bellman & Åström 1970)	Parameter aus idealen Daten	nein	binär	nein	Grenzfall $SNR \rightarrow \infty$
Praktische Identifizierbarkeit, Profile Likelihood (Raue et al. 2009)	endliche, verrauschte Daten	ja	ja	nein	methodisch nächstverwandt

Rahmen	Objekt	Stochastisch	Graduiert	Physikalische Kettenzerlegung	Verhältnis
Kaskadierte DQE-Theorie	Signal- und Rauschleistung je Stufe	ja	ja	ja	nächstverwandte Kettenzerlegung; verneint die allgemeine Produktform

Saubere Abgrenzung. Kalman- und Hermann-Krener-Beobachtbarkeit beantworten, ob Zustände aus rauschfreien Ausgangsverläufen eines dynamischen Systems unterscheidbar sind. Der vorliegende Rahmen fragt, wie viel Information über θ jede physikalische Stufe einer statischen oder quasistatischen Messkette unter Rauschen durchlässt, und ob diese Durchlässigkeit stufenweise faktorisierbar ist. Im linear-gaußschen Fall fallen Rangbedingung und Regularität der Fisher-Matrix zusammen; diese Äquivalenz wird hier ausdrücklich als bekannt zitiert und nicht als Ergebnis ausgegeben.

Neu gegenüber allen genannten Rahmen sind drei Punkte: die Zuordnung der Stufen zu physikalischen Teiltheorien, das Kriterium für die Zulässigkeit der Produktform, und die Behandlung der Quantenstufe mit dem Unterschied zwischen POVM-gebundener und erreichbarer Information.

18 Realbeispiele

Beispiel	Lehre für Messbarkeit
Spiegel gegen matte Wand	Reflexionsenergie ist nicht gleich gerichtete Information
klares Glas gegen Milchglas	Transparenz ist nicht gleich Strukturübertragung
Mikrofonarray	Richtung entsteht aus Laufzeit- oder Phasendifferenzen, nicht aus einem lokalen Pegel
Radar (zivil: Navigation, Wetter)	Entfernung, Doppler und Richtung sind verschiedene Informationskanäle
Sonar (zivil: Bathymetrie, Fischerei)	Mehrwege können Information liefern oder Mehrdeutigkeit erzeugen
Wirbelstromprüfung	Ein Defekt wird über veränderte elektromagnetische Rückwirkung rekonstruiert, nicht gesehen
Digitalkamera	Ein Pixelwert ist Ergebnis von Optik, Sensor, Verstärkung, Quantisierung und Verarbeitung; Sättigung erzeugt Informationsverlust
Doppelspalt	Welche-Weg-Information und Interferenzfähigkeit sind über Messoperatoren und Kohärenz zu beschreiben
parametrischer Verstärker	neue Frequenzen ohne Nichtlinearität; Zeitvarianz ist ein eigener Kanal
gekühlte gegen ungekühlte Kamera	derselbe Sensor wechselt zwischen schrot- und leselimitiertem Regime — und damit zwischen separabel und nicht separabel

19 Versuchsprotokoll: optischer Spaltversuch

Das Protokoll ist so angelegt, dass es in einer Werkstatt mit 3D-Druck, Laserdiode und Kamerasensor ohne Laborausstattung durchführbar ist. Es prüft zwei Dinge: den Strukturübertragungsfaktor $G(|q|a)$ und das Separierbarkeitskriterium.

19.1 Aufbau

Komponente	Spezifikation	Begründung
Lichtquelle	Laserdiode 635–650 nm, Klasse 2 (≤ 1 mW)	reicht mit Graufiltern vollständig aus; Klasse 2 hält den Aufwand nach EN 60825-1 gering
Spalte	kommerzieller Spaltsatz oder zwei Rasierklingen auf Mikrometerschlitten, 50–300 μm	FDM- und Resin-Druck liefern unter 100 μm keine definierten Kanten
Abstand	$L = 1,00$ m, gemessen auf ± 2 mm	Fraunhofer-Bedingung $a^2/(\lambda L) \ll 1$, hier 0,035
Sensor	Monochrom-CMOS mit RAW-Ausgabe, Pixel bekannt	Bayer-Matrix halbiert sonst die effektive Abtastung
Tubus und Blenden	3D-Druck, mattschwarz, mehrere Streulichtblenden	Streulicht erzeugt Offset und senkt die Modulation
Graufilter	ND-Reihe	Belichtungsreihe ohne Änderung der Geometrie

19.2 Kalibrierung vor der Messung

1. **Photon-Transfer-Kurve** nach EMVA 1288: Konversionsverstärkung g , Leserauschen σ_r , Linearität und Full Well bestimmen. Ergebnis ist das Rauschmodell $\sigma^2(\mu) = \mu/g + \sigma_r^2$, das jede folgende Fisher-Rechnung trägt.
2. **Linearitätsnachweis**: ausschließlich RAW verwenden; Gammakorrektur und JPEG-Verarbeitung machen aus dem Modell eine nichtlineare Kennlinie und verletzen das Kriterium aus Klasse C.
3. **Pixelmaßstab**: über Datenblatt und zusätzlich über ein Gitter bekannter Konstante prüfen.
4. **Dunkelbilder** bei derselben Temperatur und Belichtungszeit.
5. **MTF des Systems** nach ISO 12233:2024 — ausdrücklich mit **LED-Beleuchtung**, nicht mit dem Laser: Die Norm setzt inkohärente Abbildung voraus, unter kohärenter Beleuchtung gelten andere Grenzfrequenzen und Kanten zeigen Überschwinger.

19.3 Messreihen

Reihe	Variation	Zweck
R1	Spaltbreite a in 6–8 Stufen von 50 bis 300 μm	$G(q a)$ über den Bereich $ q a = 0 \dots 10$
R2	Belichtungszeit in 3 Dekaden bei festem a	Signalniveau λ
R3	Verstärkung beziehungsweise Leserauschen in 3–4 Stufen	σ_r
R4	je Arbeitspunkt 30 Wiederholungen mit Neujustage	Reproduzierbarkeit und empirische Varianz

19.4 Auswertung

1. Vorwärtsmodell $\mu_k(a)$ als Pixelintegral von sinc^2 aufstellen, nicht die Punktformel verwenden.
2. a je Einzelbild per Maximum-Likelihood schätzen; empirische Varianz gegen $1/F(a)$ halten (Cramér-Rao-Effizienz). Die Simulation in 14.9 erwartet $\sigma_a \approx 36$ nm bei $a = 150$ μm .
3. Aus $R2 \times R3$ die Fläche $\log F(\ln \lambda, \ln \sigma_r)$ aufnehmen und die **gemischten zweiten Differenzen** bilden. Erwartung nach 14.7: nahe null im schrot- und im leselimitierten Regime, deutlich von null verschieden im Übergang.
4. Aus R1 den Strukturübertragungsfaktor als Verhältnis von gemessenem zu idealem Kontrast über $|q|a$ auftragen.

19.5 Erwartete Ergebnisse und Falsifikation

Bestätigt wäre der Rahmen, wenn die gemischte Ableitung im Übergangsbereich signifikant von null abweicht und in den Asymptoten nicht. Widerlegt wäre Satz 2, wenn die Stufeneffizienzen über alle Arbeitspunkte konstant blieben, obwohl die Photon-Transfer-Kurve mehrstufige Rauscheinkopplung ausweist.

19.6 Laserschutz

Regelwerk	Inhalt
EN 60825-1:2014 + A11:2021 (IEC 60825-1:2014 Ed. 3.0 + AMD1/AMD2:2017)	Klassifizierung und Grenzwerte zugänglicher Strahlung; Klasse 2 im Sichtbaren bis 1 mW. Eine IEC-Ausgabe 4 ist in Arbeit und noch nicht veröffentlicht
IEC TR 60825-14:2022 (Ed. 2.0)	Leitfaden für Anwender, Gefährdungsbeurteilung
ISO 12233:2024	Auflösung und Ortsfrequenzgang; löst die Ausgabe 2023 ab und trägt einen geänderten Titel
Richtlinie 2006/25/EG, in Österreich VOPST	Expositionsgrenzwerte am Arbeitsplatz
EN 208	Justierbrillen für den sichtbaren Bereich

Wer die Optik eines klassifizierten Lasermoduls verändert oder entfernt, muss neu klassifizieren und gilt im Sinne der Norm als Hersteller. Die genauen Grenzwerte sind der Normtabelle zu entnehmen, nicht Sekundärquellen.

20 Diskussion

Der Nutzen des Rahmens liegt in der systematischen Trennung von Signal, Energie, Information, Richtung, Materialantwort und Entscheidung. Ein helles Bild ist nicht automatisch informationsreich. Ein Nullsignal ist nicht automatisch Abwesenheit. Eine digitale Rekonstruktion ist nicht automatisch physikalisch eindeutig.

Gegenüber Version 0.2 verschiebt sich der Beitrag ein zweites Mal. Dort war K hergeleitet, aber die Gültigkeit der Produktform offen. Hier ist sie für die wichtigsten Kanalklassen entschieden, und das Ergebnis ist unbequemer, als es die Produktform nahelegt: Faktorisierbarkeit ist keine Eigenschaft des Systems, sondern des **Arbeitspunkts**. Dieselbe Kamera ist bei heller Beleuchtung separabel und im Dämmerlicht nicht. Das ist keine Schwäche der Darstellung, sondern eine Aussage über Messketten, und sie ist messbar.

Der mathematische Kern bleibt die Messverteilung $p(Y|\theta)$. K ist ein Diagnosewerkzeug für den Ingenieurgebrauch, nicht der theoretische Kern.

21 Grenzen

Erstens ist dies keine neue Fundamentaltheorie. Zweitens ist der Kernsatz nicht neu, sondern übernommen. Drittens ist K außerhalb des Gauß-Ankerfalls eine Näherung. Viertens ist die Klassifikation in Abschnitt 5.6 nicht erschöpfend; sie deckt die untersuchten Kanalklassen ab. Fünftens garantiert prinzipielle Unterscheidbarkeit keine praktische Rekonstruierbarkeit. Sechstens meint Information hier physikalische Zustandsunterscheidbarkeit, nicht Bedeutung. Siebtens sind alle zehn Minimalmodelle Simulationen mit bekannten Vorwärtsmodellen; der Versuch aus Abschnitt 19 ist geplant, aber nicht durchgeführt. Achtens ist die Literaturrecherche begrenzt: „in der Literatur nicht gefunden“ heißt nicht „existiert nicht“. Neuntens sind nicht alle Literaturangaben am Werk geprüft; Anhang I weist offene Angaben einzeln aus.

22 Schlussfolgerung

Messbarkeit ist unterscheidbare Zustandsabhängigkeit innerhalb einer realen physikalischen Messkette. Der Ausgangspunkt — $p(Y|\theta_1) = p(Y|\theta_2)$ schließt eindeutige Rekonstruktion aus — ist die Beobachtungsäquivalenz der Identifizierbarkeitstheorie und wird hier übernommen, nicht beansprucht. Der eigene Beitrag ist die Stufenzerlegung einer physikalischen Messkette und das Kriterium, das angibt, wann sie multiplikativ zusammengefasst werden darf.

Die kürzeste Fassung: **Messbarkeit ist unterscheidbare Zustandsabhängigkeit — und die Produktform gilt genau so weit, wie ihre Faktoren einander nicht heimlich enthalten. Ob sie das tun, entscheidet der Arbeitspunkt, nicht das Gerät.**

Anhang A — Symboltabelle

Symbol	Bedeutung
X_0, θ, Y	Ausgangszustand, zu schätzender Parameter, Messergebnis
$H_{\text{field}}, H_{\text{mat}}, H_{\text{mix}}, H_{\text{measure}}, Q$	Kettenoperatoren und Entscheidungsstufe
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
q, a	Wellenvektorübertrag, Strukturgröße
$G(q a)$	Strukturübertragungsfaktor
C	normierte Zustands-Signal-Kopplung (Elastizität); geht als C^2 ein
D_{mat}	Material- und Ausbreitungsfaktor
γ	Kohärenzfaktor $ g^{(1)} $ (in v0.1 noch μ)
R_{dir}	Richtungsinformationfaktor
c_e	Richtungskosinus (in v0.1 noch s_e)
Φ_e	signierte Richtungsbilanz (in v0.1 noch S_e)
K, K_{Φ}	effektives SNR $\theta^2 F(\theta)$; signierte Fassung
$F(\theta), F_Q$	Fisher-Information, Quanten-Fisher-Information
η_k	Stufeneffizienz F_k/F_{k-1}
Γ, s	Reflexionsfaktor, Stehwellenverhältnis
ENF	Überschussrauschfaktor. Konvention: hier durchgehend als Varianzfaktor ENF^2 geführt; Robbins & Hadwen (2003) definieren die Amplitudengröße $F_{\text{ENF}} = \sqrt{2}$

Anhang B — Geltungsbereiche zentraler Formeln

Formel	Gültigkeitsbereich	Vorsicht bei
$\lambda = v/f$	harmonische Wellen mit definierter Phasengeschwindigkeit	starke Dispersion
$ k = 2\pi/\lambda$	ebene oder lokal ebene Wellen	stark lokalisierte Felder
$q = k_{\text{out}} - k_{\text{in}}$	Streuung, Reflexion, Beugung mit definierbaren Wellenvektoren	stark diffuse Felder
$ q a \gtrsim 1$	grobe Strukturauflösung	Nahfeld, Superresolution, starke Priors
$R + T + A = 1$	passive lineare Systeme ohne Verstärkung	aktive Medien, Frequenzkonversion, zeitvariante Medien
$I(X; Y_{\text{digital}}) \leq I(X; Y_{\text{analog}})$	reine Nachverarbeitung	Priors, Trainingsdaten, Sensorfusion
$p(y \theta) = \text{Tr}(\rho_{\theta} E_y)$	Standardform der Messwahrscheinlichkeiten	keine vollständige Interpretation des Messproblems
$K = SNR \cdot C^2$	skalarer Gauß-Kanal	jede Kopplung von Signal und Rauschen
$K = \prod \kappa_i$	nur bei erfüllter Separierbarkeit (10); Klasse A exakt, B asymptotisch	Klasse C: mehrstufiges Rauschen, Apertur, Nichtlinearität, Übergangsregime
η_k stufeneigen	Klasse A	sobald Rauschen am Kettenende dominiert (14.6)
$\Phi_e = 2s/(1 + s^2)$	zwei gegenläufige Komponenten entlang einer Achse	Mehrmodenfelder
$F_Q = e^{-2\Gamma t}$	Qubit, reine Dephasierung, Phasenschätzung	zusätzliche Relaxation, Mehrqubit-Systeme

Anhang C — Reproduktion

cd werkzeuge

python3 FORSCH-PROV0420_minimalmodelle_v0.2_2026-08-26_numerik.py

M1-M6, Seed 20260826

python3 FORSCH-PROV0420_minimalmodelle_v0.3_2026-10-05_numerik.py

M7-M10, Seed 20261005

Abhängigkeiten: Python 3, numpy, matplotlib. Die Skripte schreiben `ergebnisse.json` und `ergebnisse_v0.3.json` sowie alle Abbildungen nach `werk/abb/`. Jede Zahl in Abschnitt 14 stammt aus diesen Dateien.

Anhang D — Literatur

Alle Einträge mit Kennung (DOI, ISBN, Fundstellen-Bibcode) wurden für diese Fassung über den Verlag, das Register der registrierenden Agentur oder den Volltextnachweis bestätigt. Einträge ohne Kennung sind Standardlehrbücher, deren Auflage noch festzulegen ist; sie sind in Anhang I als offen geführt.

- Abbe, E. (1873). Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung. *Archiv für mikroskopische Anatomie*, 9(1), 413–468.
- Amari, S. (2001). Information geometry on hierarchy of probability distributions. *IEEE Transactions on Information Theory*, 47(5), 1701–1711. DOI: 10.1109/18.930911
- Amari, S. (2016). *Information Geometry and Its Applications*. Springer, Applied Mathematical Sciences 194. DOI: 10.1007/978-4-431-55978-8
- Aspden, R. S., Padgett, M. J., & Spalding, G. C. (2016). Video recording true single-photon double-slit interference. *American Journal of Physics*, 84(9), 671–677. DOI: 10.1119/1.4955173
- Bellman, R., & Åström, K. J. (1970). On structural identifiability. *Mathematical Biosciences*, 7(3–4), 329–339. DOI: 10.1016/0025-5564(70)90132-X
- Berreman, D. W. (1972). Optics in stratified and anisotropic media: 4×4-matrix formulation. *JOSA*, 62(4), 502–510. DOI: 10.1364/JOSA.62.000502
- Bertero, M., & Boccacci, P. (1998). *Introduction to Inverse Problems in Imaging*. IOP Publishing, Bristol. ISBN 978-0-7503-0435-1.
- Boltzmann, L. (1905). *Populäre Schriften*. Barth, Leipzig. — Bildtheorie; mehrere Modelle für dieselben Phänomene.
- Born, M., & Wolf, E. *Principles of Optics*. Cambridge University Press.
- Boyd, R. W. *Nonlinear Optics*. Academic Press.
- Braunstein, S. L., & Caves, C. M. (1994). Statistical distance and the geometry of quantum states. *Physical Review Letters*, 72(22), 3439–3443. DOI: 10.1103/PhysRevLett.72.3439
- Bridgman, P. W. (1927). *The Logic of Modern Physics*. Macmillan, New York.
- Carnap, R. (1936/37). Testability and meaning. *Philosophy of Science*, 3(4), 419–471; 4(1), 1–40. DOI: 10.1086/286432 und 10.1086/286443
- Chao, J., Ward, E. S., & Ober, R. J. (2012). Fisher information matrix for branching processes with application to electron-multiplying charge-coupled devices. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 23(3), 349–379. DOI: 10.1007/s11045-011-0150-7
- Chernoff, H. (1952). A measure of asymptotic efficiency for tests of a hypothesis based on the sum of observations. *Annals of Mathematical Statistics*, 23(4), 493–507. DOI: 10.1214/aoms/1177729330
- Cover, T. M., & Thomas, J. A. *Elements of Information Theory*. Wiley.
- Cox, D. R., & Reid, N. (1987). Parameter orthogonality and approximate conditional inference. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 49(1), 1–39. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1987.tb01422.x
- Cunningham, I. A., & Shaw, R. (1999). Signal-to-noise optimization of medical imaging systems. *JOSA A*, 16(3), 621–632. DOI: 10.1364/JOSAA.16.000621
- Cunningham, I. A., Westmore, M. S., & Fenster, A. (1994). A spatial-frequency dependent quantum accounting diagram and detective quantum efficiency model. *Medical Physics*, 21(3), 417–427. DOI: 10.1118/1.597401
- Earman, J., & Norton, J. (1987). What price spacetime substantivalism? The hole story. *British Journal for the Philosophy of Science*, 38(4), 515–525. DOI: 10.1093/bjps/38.4.515
- EMVA Standard 1288, Release 4.0 (Module „Linear“ und „General“), European Machine Vision Association.
- Escher, B. M., de Matos Filho, R. L., & Davidovich, L. (2011). General framework for estimating the ultimate precision limit in noisy quantum-enhanced metrology. *Nature Physics*, 7, 406–411. DOI: 10.1038/nphys1958
- Friis, H. T. (1944). Noise figures of radio receivers. *Proceedings of the IRE*, 32(7), 419–422. DOI: 10.1109/JRPROC.1944.232049
- Galiffi, E., Tirole, R., Yin, S., Li, H., Vezzoli, S., Huidobro, P. A., Silveirinha, M. G., Sapienza, R., Alù, A., & Pendry, J. B. (2022). Photonics of time-varying media. *Advanced Photonics*, 4(1), 014002. DOI: 10.1117/1.AP.4.1.014002
- Gan, K. K., & Law, A. T. (2009). Measuring slit width and separation in a diffraction experiment. *European Journal of Physics*, 30(6). DOI: 10.1088/0143-0807/30/6/006

- Goodman, J. W. *Introduction to Fourier Optics*. Roberts & Company / Macmillan Learning.
- Green, D. M., & Swets, J. A. (1966). *Signal Detection Theory and Psychophysics*. Wiley, New York. — Herkunft der Größe d' .
- Hansen, P. C. (1998). *Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems: Numerical Aspects of Linear Inversion*. SIAM, Philadelphia. DOI: 10.1137/1.9780898719697
- Helstrom, C. W. (1969). Quantum detection and estimation theory. *Journal of Statistical Physics*, 1, 231–252. DOI: 10.1007/BF01007479
- Hempel, C. G. (1950). Problems and changes in the empiricist criterion of meaning. *Revue Internationale de Philosophie*, 4(11), 41–63.
- Hermann, R., & Krener, A. J. (1977). Nonlinear controllability and observability. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22(5), 728–740. DOI: 10.1109/TAC.1977.1101601
- Hughston, L. P., Jozsa, R., & Wootters, W. K. (1993). A complete classification of quantum ensembles having a given density matrix. *Physics Letters A*, 183(1), 14–18. DOI: 10.1016/0375-9601(93)90880-9
- Hynecek, J., & Nishiwaki, T. (2003). Excess noise and other important characteristics of low light level imaging using charge multiplying CCDs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 50(1), 239–245. DOI: 10.1109/TED.2002.806962
- ISO 12233:2024, Digital cameras — Resolution and spatial frequency responses. 5. Ausgabe; ersetzt ISO 12233:2023.
- IEC 60825-1:2014 + AMD1:2017 + AMD2:2017 (Ed. 3.0), Safety of laser products — Part 1: Equipment classification and requirements; europäisch als EN 60825-1:2014 + A11:2021. Eine Ausgabe 4 ist in Arbeit (Stand 30.60, Abschluss der Abstimmung 02.10.2026) und zum Zeitpunkt dieser Fassung nicht veröffentlicht.
- IEC TR 60825-14:2022 (Ed. 2.0), Safety of laser products — Part 14: A user's guide.
- Jackson, J. D. *Classical Electrodynamics*. Wiley.
- Janesick, J. R. (2007). *Photon Transfer: $DN \rightarrow \lambda$* . SPIE Press, Bellingham. DOI: 10.1117/3.725073
- JCGM 100:2008 (GUM) und JCGM 200:2012 (VIM). BIPM, Sèvres.
- Kalman, R. E. (1963). Mathematical description of linear dynamical systems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Series A: Control*, 1(2), 152–192. DOI: 10.1137/0301010
- Kay, S. M. (1993). *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Vol. I: Estimation Theory*. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Krantz, D. H., Luce, R. D., Suppes, P., & Tversky, A. (1971). *Foundations of Measurement*, Vol. I. Academic Press, New York.
- Krener, A. J., & Ide, K. (2009). Measures of unobservability. *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control*, 6401–6406. DOI: 10.1109/CDC.2009.5400067
- Kullback, S., & Leibler, R. A. (1951). On information and sufficiency. *Annals of Mathematical Statistics*, 22(1), 79–86. DOI: 10.1214/aoms/1177729694
- Landauer, R. (1991). Information is physical. *Physics Today*, 44(5), 23–29. DOI: 10.1063/1.881299
- Mach, E. (1886). *Beiträge zur Analyse der Empfindungen*. Fischer, Jena.
- Mandel, L., & Wolf, E. *Optical Coherence and Quantum Optics*. Cambridge University Press.
- Mezghani, A., Antreich, F., & Nossek, J. A. (2010). Multiple parameter estimation with quantized channel output. *2010 International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA)*, Bremen, 23.–24.02.2010, 143–150. DOI: 10.1109/WSA.2010.5456454. Preprint: arXiv:1010.5532.
- Morgenthaler, F. R. (1958). Velocity modulation of electromagnetic waves. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 6(2), 167–172. DOI: 10.1109/TMTT.1958.1124533
- Mortensen, K. I., Churchman, L. S., Spudich, J. A., & Flyvbjerg, H. (2010). Optimized localization analysis for single-molecule tracking and super-resolution microscopy. *Nature Methods*, 7(5), 377–381. DOI: 10.1038/nmeth.1447
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press.
- Paris, M. G. A. (2009). Quantum estimation for quantum technology. *International Journal of Quantum Information*, 7(Suppl. 1), 125–137. DOI: 10.1142/S0219749909004839
- Pozar, D. M. *Microwave Engineering*. Wiley. — Reflexionsfaktor und Stehwellenverhältnis.
- Quine, W. V. O. (1951). Two dogmas of empiricism. *Philosophical Review*, 60(1), 20–43. DOI: 10.2307/2181906
- Rabbani, M., Shaw, R., & Van Metter, R. (1987). Detective quantum efficiency of imaging systems with amplifying and scattering mechanisms. *JOSA A*, 4(5), 895–901. DOI: 10.1364/JOSAA.4.000895
- Raue, A., Kreutz, C., Maiwald, T., Bachmann, J., Schilling, M., Klingmüller, U., & Timmer, J. (2009). Structural and practical identifiability analysis of partially observed dynamical models by exploiting the profile likelihood. *Bioinformatics*, 25(15), 1923–1929. DOI: 10.1093/bioinformatics/btp358
- Rayleigh, Lord (1879). Investigations in optics, with special reference to the spectroscope. *Philosophical*

- Magazine*, Series 5, 8(49), 261–274. DOI: 10.1080/14786447908639684
- Robbins, M. S., & Hadwen, B. J. (2003). The noise performance of electron multiplying charge-coupled devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 50(5), 1227–1232. DOI: 10.1109/TED.2003.813462
 - Rothenberg, T. J. (1971). Identification in parametric models. *Econometrica*, 39(3), 577–591. DOI: 10.2307/1913267
 - Schrödinger, E. (1935). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften*, 23(48), 807–812; 23(49), 823–828; 23(50), 844–849. DOI: 10.1007/BF01491891 (Teil I), 10.1007/BF01491914 (Teil II); für Teil III ist kein DOI nachgewiesen
 - Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423; 27(4), 623–656. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x und 10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x
 - Sparrow, C. M. (1916). On spectroscopic resolving power. *Astrophysical Journal*, 44, 76–86. Bibcode 1916ApJ...44...76S.
 - Stadler, F. (2015). *The Vienna Circle: Studies in the Origins, Development, and Influence of Logical Empiricism*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-16561-5
 - Tal, E. Measurement in Science. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
 - Tikhonov, A. N., & Arsenin, V. Y. (1977). *Solutions of Ill-Posed Problems*. Winston/Wiley, Washington.
 - Trimmer, J. D. (1980). The present situation in quantum mechanics: a translation of Schrödinger’s „cat paradox” paper. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 124(5), 323–338. JSTOR 986572 (kein DOI vergeben).
 - Van Trees, H. L. (1968). *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I*. Wiley, New York.
 - Woodward, P. M. (1953). *Probability and Information Theory, with Applications to Radar*. Pergamon, London.
 - Worrall, J. (1989). Structural realism: the best of both worlds? *Dialectica*, 43(1–2), 99–124. DOI: 10.1111/j.1746-8361.1989.tb00933.x
 - Zamir, R. (1998). A proof of the Fisher information inequality via a data processing argument. *IEEE Transactions on Information Theory*, 44(3), 1246–1250. DOI: 10.1109/18.669301
 - Zurek, W. H. (2003). Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. *Reviews of Modern Physics*, 75(3), 715–775. DOI: 10.1103/RevModPhys.75.715

Anhang E — Errata und Fassungsgeschichte

Fassung	Änderung
v0.1 → v0.2	K dimensioniert und hergeleitet; Separierbarkeitskriterium eingeführt; Falsifikationsfall 3 auf LTI verschärft; Notation entkoppelt ($\mu \rightarrow \gamma$, $s_e \rightarrow c_e$, $S_e \rightarrow \Phi_e$, $K_e \rightarrow K_\Phi$); Φ_e mit VSWR identifiziert; Nullraum zum Singulärwert-Kontinuum erweitert; Identifizierbarkeit benannt; sechs numerische Modelle; DOIs ergänzt; Schreibweise Bertero & Boccacci korrigiert; bilingual DE+EN
v0.8 → v0.9	am Werk selbst nichts; Bündel veröffentlichungsfähig gemacht: VEROEFFENTLICHUNG.md als Ablauf in einem Stück, Landeseite um Rechtliches und Verbund ergänzt, Zitierweise im Autorenverzeichnis von Version 0.3 auf den Stand der Fassung gehoben
v0.7 → v0.8	Anhang G.6 neu: Eigenschutz und Offenlegungsgrenze nach REGEL-PROV0002 ; für jeden Bestandteil benannt, ob er offen ist und warum; Überprüfbarkeit geht vor Schutz als Vorrang festgehalten; die Wahl beim Browser-Werkzeug getroffen und begründet

Fassung	Änderung
v0.6 → v0.7	Anhang G.5 neu: Aktivfassung und Passivfassung nach der strangfassenden Regel REGEL-PROV0001; Grenzfall Rechenskripte zugunsten der Nachprüfbarkeit entschieden; der Unterschied zwischen freiem Nachrechnen und lizenziertem Werkzeug ausgesprochen
v0.5 → v0.6	Verwertung auf Plattformfokus umgestellt: Anhang G neu gefasst (syntagma-science als Zielort, freier Kanal als Zubringer), Lizenzstufen L0–L3 und sechs Produktklassen nach LIZ-PROV0001 aufgenommen, Anhang H auf die Reihenfolge Plattform → Ablage → Zeitschriften umgestellt, Zenodo-Bündel eigens aufbereitet; Werkzeuge laufen ausschließlich über die Plattform
v0.4 → v0.5	Quellenprüfung durchgeführt und eingearbeitet (geprüfte Einträge 23 → 50, offene 25 → 12): ISO 12233 auf die Ausgabe 2024 mit geändertem Titel korrigiert; IEC TR 60825-14 auf 2022 (Ed. 2.0) datiert und der Stand von IEC 60825-1 Ed. 4 vermerkt; der Konferenzbeitrag WSA 2010 löst das arXiv-Preprint als Primärquelle für die Ein-Bit-Quantisierung ab; Zeitschriftenname bei Kalman (1963) korrigiert; sechs fehlende DOIs ergänzt; Heftangaben bei zehn Einträgen nachgetragen; Anhang D auf eine durchgehend alphabetische Liste umgestellt; Anhang I in geprüft / offen / was sich geändert hat gegliedert; offene Einträge von 25 auf 13 gesenkt
v0.3 → v0.4	Lückenbehauptung an die durchsuchten Stränge gebunden; Klasse C um drei Fälle erweitert; Noise Coefficient und Stam-Ungleichung abgegrenzt; Abschnitt 7.1 (Rayleigh und Sparrow als d' -Schwellen); Konvention für den Überschussrauschfaktor festgelegt; Quantengrenzen unter Rauschen und Monotonie der QFI ergänzt; Anhang H (Veröffentlichungsweg) und Anhang I (Quellen-Prüfliste) neu; zwölf Literatureinträge ergänzt
v0.2 → v0.3	Kernsatz als Beobachtungsäquivalenz ausgewiesen; Satz 1 mit Beweis; Satz 2 (Stufenfassung); Klassifikation A/B/C; Abgrenzung Cox-Reid und DQE; vier neue Minimalmodelle M7–M10; Versuchsprotokoll; Wiener Linie; Abgrenzung Beobachtbarkeitstheorie; Anhang F und G neu

Anhang F — Was in der Literatur nicht gefunden wurde

Die folgende Liste gehört zur Redlichkeit des Beitrags. Sie nennt, was nach Durchsicht der Stränge Datenverarbeitungsungleichung, kaskadierte Systeme und Detektivquantenausbeute, Quantisierung, Detektorrauschen, Parameter-Orthogonalität, Informationsgeometrie, Beobachtbarkeitstheorie und strukturelle Identifizierbarkeit nicht auffindbar war. Der Umfang der Recherche lag bei rund zwei Dutzend gezielten Suchen; sie war nicht erschöpfend und ersetzt keine systematische Übersichtsarbeit. „**Nicht gefunden**“ heißt nicht „**existiert nicht**“. Jede Aussage dieses Anhangs ist im Text entsprechend relativiert.

Gesucht	Status
Allgemeines Kriterium $\partial^2 \log F / \partial p_i \partial p_j = 0$ für kaskadierte Messketten	nicht gefunden; die DQE-Literatur verneint die allgemeine Produktform ausdrücklich
„Separable“ oder „multiplicative Fisher information“ als benannter Begriff	nicht gefunden
Informationsgeometrie der Modellfamilie über dem Instrumentparameterraum (Faserbündel)	nicht gefunden
Existenzsatz für eine mischende Reparametrisierung, die $\log F$ separabel macht	nicht gefunden
Lehrversuch mit radiometrisch kalibriertem Rohsensor und Schätzung der Cramér-Rao-Effizienz	nicht gefunden
Philosophische Arbeit, die Eichorbits ausdrücklich als Nullraum der Fisher-Metrik fasst	nicht gefunden

Anhang G — Strangzuordnung und Verwertung

Dieses Werk wird plattformzentriert geführt. Die Plattform **syntagma-science** ist die Stelle, an der alles zusammenläuft; der freie Forschungskanal ist der Zubringer, nicht der Zielort.

G.1 Die beiden Stränge

Strang	Inhalt	Lizenz	Ablage	Rolle
syntagma-science (Plattform)	Werkzeugfassung MESSWERK in zwei Editionen, Dokumentation, Schulung, Messketten-Audit, Auslegung	lizenziert, Stufen L0–L3	syntagma-science/ , syntagma- science.com	Zielort. Hier läuft jedes Werkzeug, hier wird gekauft, hier wird eingerichtet
FORSCHUNG / Syntagma Forschung	dieses Preprint, Abbildungen, Rechenskripte, Rohergebnisse	CC BY 4.0, frei	werk/ , zenodo-upload/ , forschung.tschueller.com	Zubringer. Belegt die Methode offen und führt auf die Plattform

Werkzeuge laufen ausschließlich über die Plattform. Auf Zenodo liegt kein Werkzeug, auch keine Vorschau- oder Demonstrationsfassung — dort liegt das Preprint mit Abbildungen, Skripten und Rohergebnissen. Wer rechnen will statt lesen, kommt auf die Plattform.

G.2 Lizenzstufen

Nach dem Lizenz- und Plattformzuschnitt LIZ-PROV0001.

Stufe	Was sie umfasst	Für dieses Werk
L0 — offen	frei lesbar, CC BY 4.0, keine Anmeldung	Preprint in allen vier Formaten, beide Sprachen, neun Abbildungen, beide Rechenskripte, beide Rohergebnisdateien
L1 — lesen	Anmeldung auf der Plattform, Bündelzugang, Fassungsverfolgung	kuratierte Leseansicht des Werks mit Querverweisen auf die Werkzeugmodule
L2 — anwenden	Werkzeugnutzung, Aktualisierung, Support	MESSWERK universal, sechs Rechenmodule, Einzelplatz oder Einbettung
L3 — Einrichtung	Mehrplatz, eigene Kennzeichnung, Schulung, Audit	MESSWERK white-label, Messketten-Audit, Auslegung gegen eine geforderte Genauigkeit

G.3 Produktklassen

Klasse	In diesem Vorhaben besetzt durch	Stufe
Preprint	das vorliegende Werk	L0
Fachbuch	nicht besetzt — eine ausgebaut Monografie ist denkbar, aber nicht begonnen	—
Werkzeug Basis	MESSWERK universal, sechs Module im Browser	L2
Werkzeug Pro	MESSWERK mit eigener Kennzeichnung, Mehrplatz, Datenübernahme aus der Photon-Transfer-Kalibrierung	L3
Kurs	Halbtagsschulung „Messbarkeit statt Signalstärke“	L2/L3
Einrichtungslizenz	HTL, Fachhochschule, Prüflabor: Werkzeug plus Schulung plus Audit	L3

G.4 Was das für die Veröffentlichung heißt

Das freie Preprint ist Veröffentlichungs- und Reichweitenkanal, nicht Selbstzweck: Es belegt die Methode offen, damit die Plattform eine überprüfbare Grundlage hat. Jede Ablage des Preprints trägt den Verweis auf syntagma-science. Beide Stränge werden gepflegt; keiner ersetzt den anderen. Die Kennungen FORSCH-PROV0420 und SYN-PROV0002 sind provisorisch und vor der Veröffentlichung gegen das Register zu prüfen.

G.5 Aktivfassung und Passivfassung

Die Zuordnung folgt der strangübergreifenden Regel **REGEL-PROV0001** (Fassung 1.0 vom 06.10.2026, Wortlaut in **regelwerk/**). Sie gilt für alle Vorhaben, nicht nur für dieses.

Auf die Ablage kommt nur die Passivfassung. Die Aktivfassung läuft ausschließlich über die Plattform.

	Aktivfassung → nur Plattform	Passivfassung → Ablage erlaubt
Kennzeichen	hat eine Bedienoberfläche und rechnet, entscheidet oder erzeugt auf Eingaben hin	wird gelesen, angesehen oder einmal zur Nachprüfung nachgefahren
In diesem Vorhaben	MESSWERK in beiden Editionen, sechs Rechenmodule im Browser	dieses Werk in vier Formaten je Sprache, neun Abbildungen, beide Rechenskripte, beide Rohergebnisdateien

Der Test, in dieser Reihenfolge: Hat es eine Bedienoberfläche, die auf Eingaben hin rechnet? Ja, dann aktiv. Nein, dann: Wird es gelesen, angesehen oder einmal nachgefahren? Ja, dann passiv.

Die Rechenskripte aus Anhang C sind Passivfassung und liegen auf der Ablage. Ein Skript mit festem Seed, das die Zahlen aus Abschnitt 14 neu erzeugt, ist Reproduktionsmaterial und keine Anwendung. Ohne dieses Material wäre der Beitrag nicht nachprüfbar, und Nachprüfbarkeit ist der Grund, überhaupt abzulegen. Wer die Zahlen dieses Werks kontrollieren will, braucht MESSWERK nicht; die Skripte genügen. MESSWERK nimmt das Aufsetzen ab und rechnet mit fremden Messketten statt mit den Beispielen dieses Beitrags — das ist der Unterschied, der die Lizenzpflicht trägt.

Nie auf die Ablage kommen Vorschau-, Demonstrations- und abgespeckte Fassungen des Werkzeugs, der Quelltext des Werkzeugs samt Oberfläche, Angebots- und Preisunterlagen sowie interne Dateien. Entweder das vollständige Werkzeug auf der Plattform oder gar keines.

G.6 Eigenschutz und Offenlegungsgrenze

Die Grenze zwischen dem, was offenliegt, und dem, was beim Autor bleibt, folgt der strangübergreifenden Regel **REGEL-PROV0002** (Fassung 1.0 vom 06.10.2026, Wortlaut in **regelwerk/**). Sie wird hier genannt, weil dieses Werk neben einem kostenpflichtigen Angebot steht und die Frage sonst unausgesprochen bliebe.

Die Grenze läuft am Gegenstand, nicht am Format: Die Methode, die dieses Werk behauptet und belegt, ist öffentlich. Ohne Beleg wäre es keine Forschung, sondern Werbung. Das Produkt, das daneben verkauft wird, ist geschützt.

Gegenstand	Lage	Begründung
Sätze 1 und 2 samt Beweis, Klassifikation A/B/C	offen	das ist die Behauptung; sie ohne Beweis zu veröffentlichen wäre wertlos
Rechenskripte M1–M10 mit festen Seeds	offen	sie erzeugen jede Zahl aus Abschnitt 14 neu; ohne sie ist der Beitrag nicht nachprüfbar
Versuchsprotokoll Abschnitt 19	offen	es beschreibt, wie man die Theorie widerlegt, nicht, wie man das Produkt baut. Es nennt Bauteilklassen, keine Bezugsquellen, und verweist für die Kalibrierung auf die öffentliche Norm EMVA 1288
Eigene Kalibrierdaten, Korrekturtabellen, Bezugsquellen, Artikelnummern	nicht enthalten	statt auf eigene Korrekturtabellen gehören nach REGEL-PROV0002 in jedem Fall nach innen; sie werden hier nicht gebraucht und sind nirgends genannt
Preise, Einstandspreise, Kalkulation	nicht enthalten	die Preishöhen gehören in den Lizenzzuschnitt LIZ-PROV0001 , nicht in ein Preprint

Überprüfbarkeit geht vor Schutz. Wo eine Angabe nötig ist, damit die Behauptung widerlegbar bleibt, wird sie veröffentlicht, auch wenn sie einem Dritten nützt. Ein Rahmen, der sich nicht widerlegen lässt, trägt kein Angebot.

Browser-Werkzeug, bewusst offen. MESSWERK läuft als einzelne HTML-Datei im Browser und liefert damit seinen Rechenkern an jeden aus, der die Seite öffnet. „Im Browser“ und „Kern-Quellcode intern“ schließen einander aus; **REGEL-PROV0002** verlangt deshalb eine bewusste Wahl je Werkzeug. Für MESSWERK ist sie getroffen und in **syntagma-science/ANGEBOT.md** festgehalten: **die universelle Edition bleibt offen auf der Plattformseite.** Die Lizenz trägt dann nicht den Rechenkern, sondern Pflege und Fassungsverfolgung, die eigene Kennzeichnung und den Mehrplatzbetrieb, Schulung, das Messketten-Audit und die Auslegung gegen eine geforderte Genauigkeit. Das ist keine Notlösung, sondern die Entscheidung, den Zulauf höher zu gewichten als den Schutz einiger hundert Zeilen Rechencode, die ohnehin aus diesem Werk herleitbar sind.

Anhang H — Veröffentlichungsweg

H.1 Reihenfolge

Plattform zuerst, Ablage danach, Zeitschriften zuletzt.

Schritt	Was	Warum in dieser Reihenfolge
1	syntagma-science aufsetzen: Werkseite, MESSWERK in der universellen Edition, Dokumentation, Lizenzstufen	die Plattform ist der Zielort; jede spätere Verweisung muss irgendwohin zeigen

Schritt	Was	Warum in dieser Reihenfolge
2	Zenodo-Bündel ablegen (zenodo-upload/), mit DOI, CC BY 4.0, Verweis auf die Plattform in Beschreibung und Werk	sichert Priorität und Zitierbarkeit; führt die Leserschaft weiter
3	Einzelartikel einreichen , jeweils mit Verweis auf die Ablage	Begutachtung dauert; die Priorität ist zu diesem Zeitpunkt schon gesichert

H.2 Das Zenodo-Bündel ist eigens aufbereitet

Das Arbeitsbündel und das Veröffentlichungsbündel sind nicht dasselbe. Der Ordner **zenodo-upload/** enthält genau das, was auf die Ablage gehört, und nichts weiter: Preprint in vier Formaten je Sprache, Abbildungen, Rechengskripte, Rohergebnisse, Lizenz, Metadatensatz, Lies-mich. Nicht enthalten sind Werkzeugfassungen, Angebots- und Preisunterlagen, interne Übergaben und Prüflisten. Die Metadaten des Bündels nennen die Plattform als zugehörige Fundstelle.

H.3 Zeitschriften und Ablagen

Ort	Passung	Anforderungen
syntagma-science.com	der Zielort	eigene Plattform, keine fremden Anforderungen; Lizenzstufen nach Anhang G.2
Zenodo mit ORCID	sofort möglich, nachrangig	kein Endorsement, DOI auf Wunsch; geeignet für die bilinguale Monografie; Beschreibung verweist auf die Plattform
arXiv physics.data-an , Cross-List eess.SP , quant-ph , physics.hist-ph	hoch, aber mit Hürde	Endorsement erforderlich. Seit dem 21.01.2026 wird automatisch nur endorst, wer sowohl eine institutionelle E-Mail-Adresse als auch eine Vorpublikation in derselben Endorsement-Domäne hat. In der Physik ist jede Subject Class eine eigene Domäne. Ohne beides ist ein persönliches Endorsement durch einen etablierten arXiv-Autor derselben Domäne nötig; das Betriebspersonal kann nicht endorsen
<i>Entropy</i>	hoch für den mathematischen Kern	Open Access; nach Annahme fällt eine Bearbeitungsgebühr an (laut Verlagsangabe CHF 2600)
<i>Measurement Science and Technology</i> <i>Metrologia</i>	mittel bis hoch, sobald der Versuch vorliegt mittel	verlangt experimentelle Validierung nur mit klarer Anbindung an GUM und VIM
<i>European Journal of Physics</i> , <i>American Journal of Physics</i>	hoch für den Versuchsteil	Praktikumsbezug; Abschnitt 19 ist dafür bereits passend geschnitten
<i>Synthese, Studies in History and Philosophy of Science</i>	für den philosophischen Teil	verlangt philosophische Eigenständigkeit über die Einordnung hinaus

H.4 Empfohlener Zuschnitt

Ein Vollwerk über Mathematik, Experiment und Wissenschaftsphilosophie findet keine einzelne Zeitschrift. Sinnvoller ist die Aufteilung in drei Einreichungen, mit der bilingualen Monografie als gemeinsamer, frei zugänglicher Ablage:

Artikel	Inhalt	Ziel
1	Satz 1, Satz 2, Klassifikation A/B/C, Modelle M1, M4, M7, M8	<i>Entropy</i> oder eine Correspondence in einer informationstheoretischen Zeitschrift
2	Versuchsprotokoll, Modelle M3 und M10, Photon-Transfer-Kalibrierung	<i>European Journal of Physics</i>
3	Abschnitt 16 und 17, ausgebaut	<i>Synthese</i> oder <i>Studies in History and Philosophy of Science</i>

Anhang I — Quellen-Prüfliste

Spalte „Status“: **geprüft** heißt, die Angabe wurde für diese Fassung am Verlagsnachweis, am Normenregister, am Volltext oder am Eintrag der registrierenden Agentur bestätigt. **offen** heißt, die Angabe ist weiterhin nicht einzeln nachgewiesen und vor einer Journalfassung zu bestätigen. Die Prüfung erfolgte am 06.10.2026.

I.1 Geprüft

Quelle	Kennung	Nachweis
Rothenberg (1971)	DOI 10.2307/1913267	Verlag
Cox & Reid (1987)	DOI 10.1111/j.2517-6161.1987.tb01422.x	Verlag
Zamir (1998)	DOI 10.1109/18.669301	Verlag
Braunstein & Caves (1994)	DOI 10.1103/PhysRevLett.72.3439	Verlag
Helstrom (1969)	DOI 10.1007/BF01007479	Verlag
Kullback & Leibler (1951)	DOI 10.1214/aoms/1177729694	Verlag
Morgenthaler (1958)	DOI 10.1109/TMTT.1958.1124533	Verlag
Friis (1944)	DOI 10.1109/JRPROC.1944.232049	Verlag
Rabbani, Shaw & Van Metter (1987)	DOI 10.1364/JOSAA.4.000895	Verlag
Cunningham, Westmore & Fenster (1994)	DOI 10.1118/1.597401	Verlag
Cunningham & Shaw (1999)	DOI 10.1364/JOSAA.16.000621	Verlag — in v0.4 noch nach Muster gebildet, jetzt bestätigt
Robbins & Hadwen (2003)	DOI 10.1109/TED.2003.813462	Verlag
Hynecek & Nishiwaki (2003)	DOI 10.1109/TED.2002.806962	Verlag
Chao, Ward & Ober (2012)	DOI 10.1007/s11045-011-0150-7	Verlag
Mortensen et al. (2010)	DOI 10.1038/nmeth.1447	Verlag
Escher et al. (2011)	DOI 10.1038/nphys1958	Verlag
Raue et al. (2009)	DOI 10.1093/bioinformatics/btp358	Verlag
Hermann & Krener (1977)	DOI 10.1109/TAC.1977.1101601	Verlag
Krener & Ide (2009)	DOI 10.1109/CDC.2009.5400067	Verlag — in v0.4 als fehlend geführt
Quine (1951)	DOI 10.2307/2181906	Verlag
Zurek (2003)	DOI 10.1103/RevModPhys.75.715	Verlag
Schrödinger (1935), Teil I und II	DOI 10.1007/BF01491891, 10.1007/BF01491914	Verlag
Gan & Law (2009)	DOI 10.1088/0143-0807/30/6/006	Verlag

Quelle	Kennung	Nachweis
Aspden, Padgett & Spalding (2016)	DOI 10.1119/1.4955173	Verlag
Bertero & Boccacci (1998)	ISBN 978-0-7503-0435-1	Verlag (Schreibweise Boccacci)
Chernoff (1952)	DOI 10.1214/aoms/1177729330	Verlag
Amari (2001)	DOI 10.1109/18.930911	Verlag
Amari (2016)	DOI 10.1007/978-4-431-55978-8	Verlag
Paris (2009)	DOI 10.1142/S0219749909004839; Heftangabe 7(Suppl. 1) ergänzt	Verlag
Hughston, Jozsa & Wootters (1993)	DOI 10.1016/0375-9601(93)90880-9	Verlag
Kalman (1963)	DOI 10.1137/0301010; Zeitschriftenname korrigiert auf <i>J. Soc. Ind. Appl. Math., Series A: Control</i>	Verlag
Bellman & Åström (1970)	DOI 10.1016/0025-5564(70)90132-X; Heftangabe 7(3–4) ergänzt	Verlag
Worrall (1989)	DOI 10.1111/j.1746-8361.1989.tb00933.x	Verlag
Earman & Norton (1987)	DOI 10.1093/bjps/38.4.515	Verlag
Carnap (1936/37)	DOI 10.1086/286432 und 10.1086/286443	Verlag
Mezghani, Antreich & Nossek (2010)	DOI 10.1109/WSA.2010.5456454; WSA 2010, Bremen, 143–150	Verlag — der Konferenzbeitrag ist jetzt die Primärquelle, arXiv:1010.5532 das Preprint
Galiffi et al. (2022)	DOI 10.1117/1.AP.4.1.014002	Verlag — in v0.4 ohne DOI
Hansen (1998)	DOI 10.1137/1.9780898719697	Verlag — in v0.4 ohne DOI
Janesick (2007)	DOI 10.1117/3.725073	Verlag — in v0.4 nur ISBN, ungeprüft
Stadler (2015)	DOI 10.1007/978-3-319-16561-5	Verlag — in v0.4 nur ISBN, ungeprüft
Landauer (1991)	DOI 10.1063/1.881299; Heftangabe 44(5)	Verlag
Shannon (1948)	DOI 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x und 10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x; Hefte 27(3) und 27(4)	Verlag
Berreman (1972)	DOI 10.1364/JOSA.62.000502; Heftangabe 62(4)	Verlag
Hempel (1950)	<i>Revue Internationale de Philosophie</i> 4(11), 41–63	Volltextnachweis über die Sammelbesprechung im <i>Journal of Symbolic Logic</i>
Trimmer (1980)	JSTOR 986572	Verlag — es ist kein DOI vergeben
Sparrow (1916)	Bibcode 1916ApJ....44...76S	Volltext im ADS-Archiv
Rayleigh (1879)	DOI 10.1080/14786447908639684	Verlag
ISO 12233:2024	Norm, 5. Ausgabe	ISO-Register — ersetzt ISO 12233:2023 ; zugleich geänderter Titel : „Digital cameras — Resolution and spatial frequency responses” statt „Photography — Electronic still picture imaging — ...”
IEC TR 60825-14:2022 (Ed. 2.0)	Norm	IEC-Register

Quelle	Kennung	Nachweis
IEC 60825-1:2014 Ed. 3.0 + AMD1/AMD2:2017; EN 60825-1:2014 + A11:2021	Norm	IEC-Register — eine Ausgabe 4 steht auf Stand 30.60 (Abstimmungsende 02.10.2026) und ist nicht veröffentlicht

I.2 Weiterhin offen

Quelle	Kennung	Status
Abbe (1873)	<i>Arch. mikrosk. Anat.</i> 9(1), 413–468	offen — Heft- und Seitenangabe aus der Sekundärliteratur; kein DOI nachgewiesen
Schrödinger (1935), Teil III	—	offen — für den dritten Teil ist kein DOI nachgewiesen
Goodman, <i>Introduction to Fourier Optics</i>	Auflage und ISBN	offen — Auflage ist vor der Journalfassung festzulegen
Kay (1993)	ISBN	offen
Green & Swets (1966)	ISBN	offen
Krantz et al. (1971)	ISBN des Nachdrucks	offen
Tikhonov & Arsenin (1977)	ISBN	offen
Born & Wolf; Boyd; Cover & Thomas; Jackson; Mandel & Wolf; Nielsen & Chuang; Pozar; Van Trees; Woodward	Auflage und ISBN	offen — Standardlehrbücher ohne auflagengebundene Textstelle im Beitrag
Boltzmann (1905), Mach (1886), Bridgman (1927)	Erstausgaben	offen — Ausgabe nicht am Exemplar geprüft
JCGM 100:2008, JCGM 200:2012	BIPM	offen — Ausgabestand nicht am Dokument geprüft
EMVA 1288 Release 4.0	Norm	offen — gültige Modulbezeichnung nicht am Normtext geprüft
Tal, <i>Measurement in Science</i> (SEP)	Fassungsdatum	offen — die SEP wird fortlaufend überarbeitet; Abrufdatum ist nachzutragen

I.3 Was die Prüfung am Werk geändert hat

Punkt	v0.4	v0.5
Norm für die MTF-Messung	ISO 12233:2023	ISO 12233:2024 , 5. Ausgabe, mit geändertem Titel
Leitfaden Laserschutz	IEC TR 60825-14 ohne Jahr	IEC TR 60825-14:2022 , Ed. 2.0
Ein-Bit-Quantisierung	arXiv-Preprint als Quelle	Konferenzbeitrag WSA 2010 mit DOI als Primärquelle
Kalman (1963)	<i>SIAM Journal on Control</i>	J. Soc. Ind. Appl. Math., Series A: Control — der heutige Zeitschriftenname ist erst der spätere
offene Einträge	25	12, fast ausschließlich Auflagen- und ISBN-Fragen
geprüfte Einträge	23	50