

SYNTAGMA FORSCHUNG · FACHBUCHAUSGABE

Messbarkeit

Rahmentheorie der Messkette

Thomas Schüller

ORCID 0009-0003-9799-6747 · FORSCH-PROV0420 · Fachbuchausgabe 1.0 · 14.10.2026

Impressum

Autor	Thomas Schüller, Syntagma Forschung, Wien · ORCID 0009-0003-9799-6747 · forschung@tschueller.com
Kennung	FORSCH-PROV0420
Stand	14.10.2026 · Fachbuchausgabe 1.0
Lizenz	Werkteile CC BY 4.0 (frei auf der Werkseite). Diese Ausgabe – Satz, Zusammenstellung, Anhang S (Syntax-Karte), Anhang L (Lernpfad), Glossar: alle Rechte vorbehalten.
Bezug	syntagma-science.com/werke/messbarkeit/

Die Werkteile bleiben frei zugänglich. Die Fachbuchausgabe bündelt sie mit Syntax-Karte, Lernpfad und Glossar zu einem Lern- und Arbeitsbuch und wird mit jeder neuen Fassung des Werks fortgeschrieben.

Inhalt

- Teil 1: Hauptwerk
- Anhang S · Syntax-Karte
- Anhang L · Lernpfad
- Glossar

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

Anhang S · Syntax-Karte

Die Karte gibt das Werk in der Syntagma-Syntax 1.0 wieder (Spezifikation: syntagma-science.com/syntax/). Stufen G0-G5 beschreiben die Beleglage, T1-T6 die Art der Quelle; jede Hypothese nennt ihre Prüfung, jede Karte ihre Grenzen.

Glied	Stufe	Aussage
F1 Frage		Welche Zustandsinformation ist im Signal unter den gegebenen physikalischen und messtechnischen Bedingungen unterscheidbar?
F2 Frage		Unter welcher Bedingung darf eine physikalische Messkette zu einer Produktform aus Stufenfaktoren zusammengefasst werden?
G1 Gegenstand		Physikalische Messkette vom Ausgangszustand über Feld, Material, Mischung und Messglied bis zur Quantisierung und zum registrierten Ergebnis ebene: statische oder quasistatische Messketten unter Rauschen · ort: Optik, Hochfrequenz, Akustik, Detektortechnik
G2 Gegenstand		Quantenstufe der Messung: Zustände, Messoperatoren und Dekohärenz ebene: Quantenmessung, Qubit unter Dephasierung
B1 Begriff		Beobachtungsäquivalenz := zwei verschiedene Parameterwerte liefern dieselbe Messverteilung fach: statistik · bruecke: wissenschaftsphilosophie=Modellpluralismus (Boltzmanns Bildtheorie)
B2 Begriff		Identifizierbarkeit := kein Paar verschiedener Parameterwerte ist beobachtungsäquivalent fach: statistik · bruecke: regelungstechnik=Beobachtbarkeit nach Kalman und Hermann-Krener
B3 Begriff		Fisher-Information := Maß für die erreichbare Varianz einer Schätzung eines Parameters aus der Messverteilung (Cramér-Rao) fach: statistik · bruecke: metrologie=Unsicherheit vom Typ A an der Cramér-Rao-Grenze (GUM)
B4 Begriff		Arbeitsgröße K := effektives Signal-Rausch-Verhältnis des äquivalenten Gauß-Kanals, der dieselbe Fisher-Information liefert wie die Messkette fach: signaltheorie
B5 Begriff		Logarithmische Sensitivität C := relative Änderung des Signals je relativer Änderung des Zustandsparameters (Elastizität der Vorwärtskette) fach: signaltheorie · bruecke: metrologie=normierter Sensitivitätskoeffizient (GUM)
B6 Begriff		Stufeneffizienz := Verhältnis der Fisher-Information nach einer Stufe zu der vor ihr, zwischen 0 und 1 fach: informationstheorie
B7 Begriff		Separierbarkeit := der Logarithmus der Fisher-Information ist additiv in den Stufenparametern; alle gemischten zweiten Ableitungen verschwinden fach: mathematik
S1 Satz	G5	Beobachtungsäquivalenz schließt eindeutige Rekonstruktion aus; lokale Identifizierbarkeit ist unter schwachen Regularitätsbedingungen äquivalent zur Nichtsingularität der Fisher-Matrix belege: Q2
S2 Satz	G3	Im skalaren Gauß-Kanal gilt exakt $K = \text{SNR} \cdot C^2$; $\log_2(1+K)$ ist dort die Shannon-Kapazität des äquivalenten Kanals belege: Q1
S3 Satz	G3	Satz 1: Auf einem zusammenhängenden Produktgebiet ist die Produktform der Fisher-Information äquivalent zum Verschwinden aller gemischten zweiten Ableitungen ihres Logarithmus belege: Q1
S4 Satz	G3	Stufeneffizienzen sind höchstens 1; das folgt aus der Datenverarbeitungsungleichung für Fisher-Information, die Teleskopdarstellung ist daher für sich ohne Aussagekraft belege: Q3
S5 Satz	G3	Digitalisierung als reine Nachverarbeitung erzeugt keine Zustandsinformation, die nicht im analogen Signal, in Zusatzdaten oder Priors enthalten ist belege: Q3
S6 Satz	G3	Multiplikative Transmission mit einstufigem Rauschen und Poisson-Verdünnung erfüllen das Kriterium exakt, EMCCD bei hoher Verstärkung und Ein-Bit-Quantisierung bei kleinem SNR asymptotisch; mehrstufige Rauscheinkopplung, Nichtlinearität und Sättigung verletzen es

		belege: Q4 Q5 Q6
S7 Satz	G2	Faktorisierbarkeit ist eine Eigenschaft des Arbeitspunkts: im Minimalmodell gilt sie im klar schrot- und im klar leselimitierten Regime und bricht im Übergangsbereich; bei einer Schwelle von 0,05 sind 58 Prozent der betrachteten Parameterfläche separabel belege: Q1
S8 Satz	G3	Im Quantenfall ist Nichtunterscheidbarkeit messungsrelativ: die klassische Fisher-Information einer Messung kann null sein, während die Quanten-Fisher-Information positiv ist belege: Q1 Q7
S9 Satz	G3	Die DQE eines kaskadierten Detektorsystems ist im Allgemeinen keine multiplikative Kaskade von Einzel-DQE belege: Q8
H1 Hypothese	G2	Bei Rauscheinkopplung am Kettenende hängt die Stufeneffizienz von vorgelagerten Stufen ab und ist keine Eigenschaft der Stufe allein belege: Q1 · prüfung: P1
P1 Prüfung		Fällt, wenn eine Stufeneffizienz über Variation vorgelagerter Parameter konstant bleibt, obwohl das Rauschmodell mehrstufige Einkopplung ausweist
H2 Hypothese	G1	Im optischen Spaltversuch weicht die gemischte zweite Differenz der Fisher-Information über Belichtung und Leserauschen im Übergangsbereich signifikant von null ab, in den Asymptoten nicht prüfung: P2
P2 Prüfung		Fällt, wenn die gemischte Differenz im Übergangsbereich nicht von null abweicht oder die Stufeneffizienzen über alle Arbeitspunkte konstant bleiben, obwohl die Photon-Transfer-Kurve mehrstufige Rauscheinkopplung ausweist
H3 Hypothese	G2	Die Produktform der Arbeitsgröße trifft nicht zu, wo das Separierbarkeitskriterium verletzt ist belege: Q1 · prüfung: P3
P3 Prüfung		Fällt, wenn die Produktform in einem System zutrifft, in dem das Kriterium nachweislich verletzt ist
Q1 Quelle	T5	Herleitungen und zehn numerische Minimalmodelle M1-M10 des Werks mit festem Zufallsseed; Rechenskripte im Ablagepaket nachweis: Abschnitte 5 und 14, Anhang C
Q2 Quelle	T2	Rothenberg: Identification in parametric models nachweis: Rothenberg 1971 · ort: https://doi.org/10.2307/1913267
Q3 Quelle	T2	Zamir: Fisher-Informations-Ungleichung über ein Datenverarbeitungsargument nachweis: Zamir 1998 · ort: https://doi.org/10.1109/18.669301
Q4 Quelle	T2	Robbins und Hadwen: Rauschverhalten von EMCCD nachweis: Robbins & Hadwen 2003 · ort: https://doi.org/10.1109/TED.2003.813462
Q5 Quelle	T2	Mezghani, Antreich und Nossek: Ein-Bit-Quantisierung, WSA 2010 nachweis: Mezghani, Antreich & Nossek 2010 · ort: https://doi.org/10.1109/WSA.2010.5456454
Q6 Quelle	T2	Friis: Rauschzahl-Kaskade von Empfängern nachweis: Friis 1944 · ort: https://doi.org/10.1109/JRPROC.1944.232049
Q7 Quelle	T2	Braunstein und Caves: statistische Distanz und Geometrie von Quantenzuständen nachweis: Braunstein & Caves 1994 · ort: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.3439
Q8 Quelle	T2	Cunningham und Shaw: Signal-Rausch-Optimierung medizinischer Bildgebungssysteme nachweis: Cunningham & Shaw 1999 · ort: https://doi.org/10.1364/JOSAA.16.000621
M1 Methode		Etablierte Konzepte aus Wellentheorie, Elektrodynamik, Streutheorie, Signaltheorie, Digitalisierung und Quantenmessung werden entlang einer gemeinsamen Messkette geordnet und stufenweise zerlegt
M2 Methode		Aussagen werden mit numerischen Minimalmodellen (Monte-Carlo gegen analytische Werte) belegt und in Falsifikationsfälle gefasst; ein optischer Spaltversuch ist als Prüfplan beschrieben
X1 Messgröße		Arbeitsgröße K (effektives SNR) einheit: dimensionslos · misst: G1
X2 Messgröße		Stufeneffizienz einer Kettenstufe einheit: dimensionslos (0 bis 1) · misst: G1
L1 Grenze		Keine neue Grundphysik und keine neue Fundamentaltheorie; der Kernsatz ist aus der