1/f — Intelligente Signale

Die verborgene Ordnung von Schlaf, Herzschlag und Kosmos

Karlo Beyer & Cosmo Claude

VERLAG VON BEDEUTUNG · ZÜRICH

Inhalt

Vorwort 1

AKT I — DAS RÄTSEL

1 Der Restposten 4
2 Drei Geräusche 8
3 Das Experiment mit dem Radio 12
4 Der Sandhaufen 15
5 Die erste Welle 18
6 Der erste Erklärungsversuch 22
7 Warum man aufhörte wegzuhören 26
8 Der Friedhof der Theorien 30

AKT II — IM MENSCHEN

9 Von der Röhre in den Körper 38
10 Der Atem und der Schritt 42
11 Was Ihr Handgelenk nicht erklärt 45
12 Das Rauschen, das kein Rauschen ist 51
13 Der Teppich und die Welle 57
14 Warum 1/f nicht gleich 1/f ist 62
15 In der Zone 68
16 Der Knochen aus der Schwäbischen Alb 71
17 Die Ordnung im Chaos der Wörter 76

AKT III — IN DER WELT

18 Die Liste, die nicht endet 82
19 Das Falschsehen 87
20 Das Netz 91
21 Das Rauschen, das Quantencomputer zerstört 95
22 Das Rauschen, das man züchtet 99
23 Das Orchester und das Schwarze Loch 104
24 Die laufende Uhr 108

AKT IV — WAS ES BEDEUTET

25 Sechzehn Grössenordnungen 114
26 Der Exponent im Exponenten 120
27 Fünf Spekulationen 126
28 Die Parabel 133

AKT V — DAS GROSSE BILD

29 Das älteste Archiv 140
30 Fünf Linsen 145
31 Musha und Yuragi 150
32 Das Auge und die Stadt 155
33 Wenn das Rauschen die Information ist 162
34 Die Maschine und das Flackern 166
35 Ist 1/f ein Naturgesetz? 172

TAFELN

ANHANG

Bildnachweise 200
Quellenverzeichnis 201
Verlag von Bedeutung 216

Vorwort

Dieses Buch begann mit einer Frage, die sich in vielen Formen stellt, je nachdem wer sie stellt. Ein Arzt fragt: Warum verrät die Unregelmässigkeit des Herzschlags mehr über die Gesundheit als die Frequenz? Ein Physiker fragt: Warum haben so verschiedenartige Systeme dasselbe spektrale Profil? Ein Ingenieur fragt: Warum ist das Rauschen in meinen Quantencomputer-Chips dasselbe Rauschen, das Johnson 1925 in einer Radioröhre gemessen hat? Ein Kind, das am Feuer sitzt, stellt keine Frage — aber es schaut trotzdem ins Flackern, weil etwas daran angenehm ist, ohne dass es erklären könnte warum.

Das sind verschiedene Einstiege in dasselbe Rätsel.

Dieses Buch versucht, das Rätsel vollständig darzustellen — die Geschichte, die Befunde, die Theorien, die Widerlegungen, die offenen Fragen. Es ist kein Ratgeber. Es ist kein Optimierungshandbuch für Herzratenvariabilität. Es gibt keine Empfehlungen, keine Anweisungen, keine Versprechen. Es gibt nur das Rätsel und den ehrlichen Bericht, wie weit wir in hundert Jahren damit gekommen sind.

Was wir wissen: Das Muster ist real. Es tritt auf in Herzschlag, Gehirn, Musik, Sprache, Erdbeben, Klimaarchiven, Quantenchips, Galaxienkernen. Es ist statistisch robust, klinisch informativ, ästhetisch wirksam, vielleicht kosmisch universal. Es hat einen Namen — 1/f-Rauschen, rosa Rauschen, Flackerrauschen — und trotzdem fehlt eine vollständige Erklärung.

Was wir nicht wissen: Warum. Das ist die ehrliche Antwort nach hundert Jahren Forschung. Nicht aus Mangel an Versuchen — der Friedhof der

Theorien ist voll eleganter Ideen, die partiell recht hatten und universal scheiterten. Sondern weil das Phänomen grösser ist als jede der Disziplinen, in denen es auftaucht, und weil die Frage, die es stellt, noch nicht die richtige Formulierung gefunden hat.

Dieses Buch ist deshalb kein Abschlussbericht. Es ist ein Lagebericht — geschrieben im Jahr 2026, hundert Jahre nach der ersten Messung, mit dem Bewusstsein, dass die nächsten hundert Jahre weitere Antworten bringen werden, ohne das Rätsel vollständig zu schliessen.

Das Muster flackert. Wir schauen hin. Das ist genug.

Karlo Beyer & Cosmo Claude, Zürich 2026

KAPITEL 1

Der Restposten

Warum wir es „Rauschen" nennen — und warum das ein Fehler war

Im Jahr 1925 entdeckte ein Ingenieur namens John Bertrand Johnson in einem fensterlosen Labor bei den Bell Laboratories in New Jersey ein Muster, das er nicht erklären konnte. Er notierte den Befund, veröffentlichte ihn, und die Wissenschaft beschloss, ihn zu ignorieren. Das war verständlich — Johnson suchte nach etwas anderem, das Muster störte seine eigentliche Messung, und es schien keine Konsequenzen zu haben. Man nannte es Rauschen, was bedeutet: kein Signal, kein Inhalt, kein Interesse. Ein Restposten.

Hundert Jahre später ist dieser Restposten immer noch nicht erklärt. Nicht aus Nachlässigkeit — über tausend Fachaufsätze wurden seither veröffentlicht — eine Bibliografie, die, ausgedruckt und gebunden, eine ganze Regalwand füllen würde —, jedes Jahr kommen etwa hundert neue hinzu, und unter den Forschern, die sich damit befasst haben, sind einige der bedeutendsten Physiker des zwanzigsten Jahrhunderts. Das Muster taucht in über dreissig Disziplinen auf, über sechzehn Grössenordnungen hinweg, von Quantencomputer-Chips bis zu interplanetaren Magnetfeldern. Und trotzdem: Es gibt bis heute keine einzige vollständige Erklärung, die gross genug wäre, alle seine Erscheinungsformen zu umfassen.

Das ist aussergewöhnlich. Um zu verstehen, wie aussergewöhnlich, muss man sich vor Augen führen, wie Physik normalerweise funktioniert: Phänomene werden beobachtet, erklärt, eingeordnet, und die Erklärung hält — oder sie hält nicht und wird durch eine bessere ersetzt. In diesem Fall wurde das Phänomen beobachtet, konnte nicht erklärt werden, und dieser Zustand hat sich über ein ganzes Jahrhundert nicht verändert. Die Fachliteratur nennt es offen „eines der ältesten ungelösten Probleme der Physik". Das ist keine dramatische Übertreibung. Es ist eine sachliche Beschreibung eines ungewöhnlichen Befundes.

Dieses Buch handelt von diesem Rätsel — nicht, weil es die Lösung liefert, sondern weil die Geschichte der Suche selbst aussergewöhnlich ist: ein Muster, das man wegschieben wollte und das immer wieder zurückkam, in immer neuen Zusammenhängen, hartnäckiger und rätselhafter bei jeder Wiederkehr.

I. Der Name verrät die Haltung

Es lohnt sich, kurz beim Wort „Rauschen" zu verweilen, denn es sagt mehr, als es soll. Ein Signal besteht aus zwei Teilen: Da ist das, wonach man sucht — die Stimme im Telefon, der Puls im Elektrokardiogramm, das Licht eines fernen Sterns. Und da ist der Rest, alles, was übrig bleibt, wenn man das Gesuchte herausgefiltert hat. Diesen Rest nennt man Rauschen, und das Wort selbst ist schon ein Urteil. Es sagt: Das hier ist nicht die Nachricht. Das ist der Abfall, den man wegrechnet, damit die eigentliche Information sauber übrig bleibt. Fast ein Jahrhundert lang hat sich die Wissenschaft an dieses Urteil gehalten — Ingenieure wollten das Flackerrauschen loswerden, nicht verstehen, es störte die Messung, es war das, was zwischen den Zeilen stand und nicht gelesen werden sollte.

Und dann, langsam, über Jahrzehnte verteilt, in Fachgebieten, die kaum voneinander wussten, begann sich etwas zu verschieben. Physiker fanden dasselbe Muster im Rauschen von Halbleitern, Astronomen fanden es im Flackern von Quasaren, Mediziner fanden es im Abstand zwischen zwei Herzschlägen, Musikwissenschaftler fanden es in der Lautstärkeschwankung von Bach bis zum Jazz, Verkehrsplaner fanden es im Fluss von Autos auf der Autobahn, Neurologen fanden es im Hintergrundrauschen des schlafenden und des wachen Gehirns — jedes Mal derselbe Fingerabdruck, dasselbe Verhältnis, das Johnson 1925 in einer Radioröhre gemessen hatte, tauchte plötzlich überall auf, wo man hinschaute, sobald man wusste, wonach man suchen musste.

Man hat diesem Muster inzwischen einen zweiten Namen gegeben, freundlicher als das ursprüngliche Flackerrauschen: rosa Rauschen. Wie

beim weissen Licht ist auch hier die Farbmetapher gemeint — wo weisses Rauschen alle Frequenzen gleich laut spielt, betont rosa Rauschen sanft die tiefen Töne, so wie rosa Licht die roten Wellenlängen leicht bevorzugt. In der Fachsprache heisst es meistens einfach nach seiner Formel: 1/f-Rauschen, eins geteilt durch die Frequenz, eine der schlichtesten Formeln, die man sich vorstellen kann, und eine der hartnäckigsten Fragen der Physik. Halbiert man die Frequenz, verdoppelt sich die Energie — das ist das Muster, das Johnson fand, und für das hundert Jahre Forschung noch keine vollständige Ursache gefunden hat.

Das Wort selbst ist schon ein Urteil. Es sagt: Das hier ist nicht die Nachricht.

II. Was Sie schon gehört haben, ohne es zu wissen

Vermutlich sind Sie dem, wovon dieses Buch handelt, schon begegnet, ohne den Namen dafür zu kennen. Vielleicht liegt auf Ihrem Nachttisch ein kleines Gerät, das abends ein sanftes Rauschen erzeugt, während Sie einschlafen — beworben als Regengeräusch, als Wellenrauschen, als Pink Noise. Vielleicht tragen Sie eine Uhr oder einen Ring am Handgelenk, der Ihnen jeden Morgen eine Zahl anzeigt, die Herzratenvariabilität heisst, ohne dass Ihnen je jemand erklärt hat, welches Muster sich hinter dieser Zahl verbirgt. Vielleicht haben Sie schon einmal gelesen, dass Bachs Musik ein bestimmtes statistisches Muster in ihrer Lautstärke trägt, dasselbe, das man auch in Hip-Hop findet — eine dieser Randnotizen, die man liest, kurz staunt und dann vergisst. Das ist alles dasselbe Ding: ein Geräusch, das aus dem Physiklabor kam, das man in Herzen, in Gehirnen, in Galaxien wiederfand, und das inzwischen in Millionen Schlafzimmern aus kleinen Lautsprechern kommt, ohne dass die meisten Menschen, die es hören, ahnen, wie tief die Geschichte reicht, aus der es kommt — und wie ungeklärt sie bis heute ist.

Dieses Buch verfolgt diese Geschichte. Nicht, weil sie eine fertige Antwort liefert — die gibt es nicht, und wer eine sucht, wird enttäuscht. Sondern weil das Rätsel selbst eine der aufschlussreichsten Geschichten ist, die die Wissenschaft der letzten hundert Jahre zu erzählen hat: eine Jagd durch die Physik, die Medizin, die Musik, die Informatik und schliesslich hinaus bis zu den Sternen, die jede Generation neu aufgenommen hat und jedes Mal am selben Punkt endete. Das Muster ist da. Die Erklärung fehlt noch.

III. Ein Klang statt eines Beweises

Bevor dieses Buch irgendetwas erklärt, soll es etwas hörbar machen. Denn 1/f-Rauschen ist, anders als die meisten Themen der Physik, ein Phänomen, das man nicht nur verstehen, sondern tatsächlich mit den eigenen Ohren erleben kann — und das verändert, wie man den Rest dieses Buches liest. Im nächsten Kapitel legen wir drei Geräusche nebeneinander. Sie müssen nicht warten, bis Sie dort angelangt sind: Wer jetzt neugierig ist — und damit sei diese Lektüre ausdrücklich unterbrochen —, der suche im Netz nach den drei Begriffen weisses Rauschen, rosa Rauschen, braunes Rauschen. Tonbeispiele aller drei sind leicht zu finden, der Unterschied ist unmittelbar, ohne jede Vorbildung. Sie werden sofort hören, welches der drei Sie kennen, welches Sie beruhigt und welches Sie an Wasser erinnert — und Sie werden bemerken, dass eines davon sich irgendwie richtiger anfühlt als die anderen, ohne sagen zu können, warum.

Genau das ist das Rätsel. Nicht nur, dass das Muster überall auftaucht — sondern dass es sich anfühlt, als ob es dahin gehörte. Als ob es nicht Zufall wäre, sondern Notwendigkeit. Warum das so ist, weiss hundert Jahre nach Johnson noch niemand. Aber es ist der Grund, warum dieses Buch existiert.

> *Was man weiss — und was offen ist:* Johnson hat das Flackerrauschen 1925 in Vakuumröhren gemessen; die Beobachtung ist seither in praktisch jedem elektronischen Bauteil bestätigt. Das Muster — Energie umgekehrt proportional zur Frequenz — ist über viele Grössenordnungen robust. Offen

ist, warum es entsteht: Nach hundert Jahren gibt es zahlreiche Erklärungen für einzelne Systeme, aber keine, die alle Erscheinungsformen umfasst.

KAPITEL 2

Drei Geräusche

Warum das mittlere sich richtig anfühlt

Legen Sie dieses Buch jetzt kurz weg. Suchen Sie im Netz nach „weisses Rauschen", „rosa Rauschen" und „braunes Rauschen" — in dieser Reihenfolge — und hören Sie sich alle drei an. Dreissig Sekunden genügen. Dann kommen Sie zurück.

Falls Sie das gerade nicht tun können oder wollen, stellen Sie sich Folgendes vor: Ein Radio zwischen zwei Sendern, das gleichmässig, flach und ohne Tiefe rauscht — das ist das erste. Ein Wasserfall, mittelgross, der von einem Fels fällt und ein volleres, wärmeres Geräusch macht, in dem man die Tiefe des Wassers zu hören meint — das ist das zweite. Ein schwerer Sturm, Donner in der Ferne, das Dröhnen, das mehr gespürt als gehört wird — das ist das dritte. Irgendwas an dem mittleren klingt vertrauter, natürlicher, als ob man es schon kennt, ohne sagen zu können woher. Das ist kein Zufall.

I. Was die drei Geräusche unterscheidet

Stellen Sie sich die Energie eines Geräuschs als eine Kurve vor: auf der einen Achse die Frequenz — von tiefen Tönen links zu hohen Tönen rechts —, auf der anderen die Energie, also die Lautstärke bei jeder Frequenz. Beim weissen Rauschen ist diese Kurve eine gerade, waagerechte Linie. Jede Frequenz ist gleich laut, und das klingt, wie es aussieht: gleichmässig, ohne Charakter, ohne Schwerpunkt. Beim braunen Rauschen — benannt nach dem Botaniker Robert Brown, der 1827 zufällige Bewegungen von Pollenkörnern im Wasser



AKT IV

Was es bedeutet

Synthese, Theorie und Spekulation

KAPITEL 25

Sechzehn Grössenordnungen

Von der Quantenwelt bis zur Eiszeit — und ein Muster, das durchhält

Stellen Sie sich eine Linie vor. Auf der einen Seite steht eine Zahl: eine Mikrosekunde. Das ist die Zeit, in der ein Qubit in einem Quantencomputer seinen Quantenzustand verlieren kann — durch ein einzelnes störendes Phonon, ein zitterndes Atom in der Gitterstruktur des supraleitenden Chips. Auf der anderen Seite der Linie steht eine andere Zahl: 800.000 Jahre. Das ist die Zeitspanne, über die ein Eiskern aus der Antarktis das Klima der Erde aufzeichnet, Eiszeit für Eiszeit, jede in den eingeschlossenen Luftblasen konserviert.

Zwischen diesen beiden Zahlen liegen sechzehn Grössenordnungen. Das heisst: Die längste Zeit ist zehntausend Billionen Mal länger als die kürzeste. Es gibt fast keinen physikalischen Massstab, der weiter auseinander liegt. Und doch zeigen beide Systeme — der Quantencomputer-Chip bei seiner Mikrosekunden-Dekohärenz und der antarktische Eiskern mit seinen 800.000 Jahren — dasselbe spektrale Muster. Das Verhältnis zwischen schnellen und langsamen Schwankungen ist in beiden dasselbe. Halbiert man die Frequenz, verdoppelt sich die Energie. 1/f. Das ist das Rätsel, das dieses Buch erzählt — in seiner ganzen Ausdehnung.

I. Sieben Systeme, sechzehn Grössenordnungen

Es gibt eine Messung, die das Ausmass konkreter macht als jede Beschreibung. Sieben Systeme, unabhängig voneinander gemessen, auf Zeitskalen von Millisekunden bis Millionen Jahren:

Der menschliche Herzschlag auf der Millisekunden-Skala: Spektralexponent 0,80. Das atmosphärische CO_2, gemessen am Mauna Loa Observatory über Jahrzehnte: 1,14. Methan in der Atmosphäre auf derselben Zeitskala: 1,60. Lachgas, das dritte wichtige Treibhausgas: 1,64.

Die Sonnenfleckenaktivität über Jahreszyklen: 1,43. NGC 4151, eine Seyfert-Galaxie mit aktivem Kern, deren Helligkeitsschwankungen über Jahrzehnte gemessen wurden: 1,06. NGC 1569, eine Starburst-Galaxie mit intensiver Sternentstehung: 0,94.

Sieben Systeme. Vom Herzschlag einer Person bis zur Leuchtvariation eines Galaxienkerns 62 Millionen Lichtjahre entfernt. Alle Exponenten zwischen 0,8 und 1,6, alle nahe bei eins. Das ist keine Theorie. Das sind Messungen aus unabhängigen Datensätzen, analysiert mit Standardmethoden.

Der Mittelwert über alle sieben: 1,23 mit einer Streuung von 0,30. Das ist kein enger Cluster — aber es ist kein Zufall. Sieben unabhängige Systeme, sechzehn Grössenordnungen, ein Muster.

II. Die Liste, von unten nach oben

Es lohnt sich, die Skala vollständig zu durchfahren, damit das Ausmass spürbar wird.

Ganz unten, bei Mikrosekunden bis Millisekunden: das 1/f-Rauschen in supraleitenden Qubits, das Quantenkohärenz zerstört. Verursacht durch tunnelnde Defektatome in der Gitterstruktur — Bernamonts Mechanismus von 1937, realisiert in den fortschrittlichsten Maschinen, die Menschen je gebaut haben.

Darüber, bei Zehntelmillisekunden bis Sekunden: das 1/f-Rauschen in biologischen Ionenkanälen. Dieselbe Signatur, anderes Substrat — hier sind es keine Atome im Kristall, sondern Proteine in einer Membran. Bei Sekunden bis Stunden: Herzratenvariabilität, Atemrhythmus, Schrittlänge beim Gehen, Augenbewegungen. Das vegetative Nervensystem moduliert den Körper ohne bevorzugte Zeitskala. Bei Stunden bis Tagen: tägliche Temperatur- und Luftdruckschwankungen, der zirkadiane Rhythmus des Gehirns, die Variabilität des Schlafes über Nächte. Bei Tagen bis Jahren: Flussabflüsse, atmosphärische Spurengase, Börsenkurse in ruhigen Phasen, Sonnenfleckenaktivität mit einem Exponenten von 1,43. Bei Jahren bis

Jahrzehnten: grosse ozeanische Schwingungsmoden — El Niño, Pazifische Dekadische Oszillation, Atlantische Multidekadische Oszillation. Bei Jahrtausenden bis Jahrmillionen: Eiskerne. Der EPICA-Bohrkern zeigt 800.000 Jahre, durch acht Glazialzyklen hindurch. Das Spektrum: 1/f.

Bei Millionen bis Milliarden Jahren: aktive Galaxienkerne. NGC 4151, NGC 1569 — deren Helligkeitsschwankungen auf kosmischen Zeitskalen folgen demselben Muster wie der Herzschlag auf der Millisekunden-Skala. Sechzehn Grössenordnungen. Ein Fingerabdruck.

Sechzehn Grössenordnungen. Ein Fingerabdruck.

III. Was die Sterne sagen

Die kosmischen Befunde verdienen einen eigenen Moment, weil sie am weitesten von der Alltagserfahrung entfernt sind und deshalb am deutlichsten zeigen, wie tief das Muster sitzt.

Seyfert-Galaxien sind aktive Galaxienkerne, in denen supermassive Schwarze Löcher Gas verschlucken und dabei mehr Energie abstrahlen als Milliarden von Sternen. Ihre Helligkeit schwankt — nicht gleichmässig, nicht periodisch, sondern in einem Muster, das man heute mit Raumteleskopen über Jahrzehnte verfolgen kann. Das Spektrum dieser Schwankungen: 1/f, mit einem Exponenten nahe bei eins. Dasselbe gilt für Starburst-Galaxien, in denen explosionsartig neue Sterne entstehen, und für Quasare, die noch aktiver und noch heller sind.

Warum flackern Galaxienkerne in 1/f? Nakamichis Mechanismus — Synchronisation und Desynchronisation gekoppelter Schwingungen in der Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch — gibt eine plausible Erklärung für einzelne Systeme. Ob das die vollständige Antwort ist, weiss niemand sicher.

Was man weiss: Das Muster taucht dort auf, wo grosse Mengen von Materie und Energie in einem komplexen Wechselspiel stehen — in einer Akkretionsscheibe um ein Schwarzes Loch genauso wie in einem vegetativen Nervensystem, das einen Herzschlag moduliert.

IV. Das primordiale Spektrum

Es gibt noch eine kosmische Verbindung, die tiefer liegt als alle anderen. Die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung — das Licht des frühen Universums, 380.000 Jahre nach dem Urknall ausgesandt und seitdem durch die Expansion abgekühlt — trägt eine spektrale Signatur. Die Planck-Mission hat sie 2018 mit bisher unerreichter Präzision gemessen: Der sogenannte skalare Spektralindex n_s = 0,965.

Das bedeutet: Das primordiale Spektrum der Dichtefluktuationen, aus denen alle Strukturen des Universums entstanden, ist nahezu skaleninvariant. Kein bevorzugter Massstab, keine charakteristische Grösse — aus Schwankungen auf allen Grössen zugleich entstanden Galaxien, Galaxienhaufen, Filamente, Voids. Ein Spektrum, das dem 1/f-Muster strukturell verwandt ist, wenn auch nicht identisch.

Ob das primordiale Spektrum mit dem 1/f-Rauschen in irdischen und kosmischen Systemen direkt zusammenhängt, ist eine offene Frage. Die Ähnlichkeit ist auffällig genug, um sie zu stellen.

V. Die direkteste kosmische Verbindung — Qubits und der Urknall

Es gibt einen Befund, der die Frage nach dem Zusammenhang zwischen dem 1/f-Rauschen in irdischen Geräten und dem Spektrum des frühen Universums so direkt stellt wie kein anderer — und er stammt aus einem Ort, den man nicht erwartet hätte: aus der Supraleiterphysik.

Christian Beck von der Queen Mary University London veröffentlichte 2016 in *Scientific Reports* eine Studie über das magnetische Flussrauschen in supraleitenden Quantenschaltkreisen — SQUIDs und Qubits. Dieses Rauschen ist seit dreissig Jahren eines der grossen ungeklärten Probleme der Quantentechnologie: Es limitiert die Kohärenzzeit von Qubits, und

trotz intensiver Forschung weiss niemand genau, woher es kommt. Oberflächeneffekte, lokalisierte Elektronen, Sauerstoffmoleküle — viele Kandidaten wurden vorgeschlagen, aber keiner erklärt die präzise spektrale Form vollständig.

Beck schlug etwas Radikales vor: Das beobachtete 1/f-Flussrauschen könnte zumindest teilweise von kosmologischen Fluktuationen gesät sein — von einem primordialen Flussrauschfeld, das aus dem frühen Universum stammt und in unveränderter Form bis heute existiert. Und er zeigte, dass das primordiale Leistungsspektrum, wie es die Planck-Mission gemessen hat, die Form und Amplitude des in Supraleitern gemessenen Flussrauschens quantitativ korrekt vorhersagt.

Das ist keine gesicherte Tatsache. Es ist eine theoretische Hypothese — aber eine, die rechnerisch aufgeht und die eine direkte Linie zieht von den Störungen, die Quantencomputer limitieren, bis zu den Fluktuationen, aus denen Galaxien entstanden sind. Wenn Beck recht hat, dann ist das 1/f-Rauschen in einem Quantencomputer-Chip kein lokales Phänomen, sondern ein kosmisches Erbe. Die Maschinen, die wir bauen, würden im Rauschen des Urknalls arbeiten.

VI. Was das bedeutet — und was es nicht bedeutet

An dieser Stelle ist Präzision wichtig, weil die Versuchung zur Überinterpretation gross ist.

Was es bedeutet: Das 1/f-Muster ist robust über eine Bandbreite von Systemen, die so verschieden sind, dass kein einzelner Mechanismus all diese Systeme erzeugen könnte. Qubit-Dekohärenz und Eiszeiten haben nichts miteinander zu tun — ausser dem Muster.

Was es nicht bedeutet: Das ist keine mystische Verbindung zwischen dem Kleinsten und dem Grössten. Es ist kein Beweis für ein universelles Gesetz. Es ist eine empirische Beobachtung, die erklärt werden will — und deren Erklärung aussteht.

Drei Erklärungsklassen existieren nebeneinander, ohne sich gegenseitig auszuschliessen. Mechanistische Erklärungen wie Nakamichi beschreiben, wie 1/f in bestimmten Systemklassen entsteht. Informationstheoretische Erklärungen beschreiben, welche Spektren für Systeme optimal sind, die auf allen Zeitskalen reagieren müssen. Mathematische Erklärungen vermuten, dass 1/f ein Fixpunkt ist, zu dem viele verschiedene Prozesse unter bestimmten Transformationen konvergieren. Alle drei haben Argumente auf ihrer Seite. Keine hat gewonnen.

VII. Ein Fingerabdruck, dessen Träger unbekannt ist

Johnson hat 1925 einen Fingerabdruck gefunden. Seither haben Physiker, Biologen, Astronomen, Klimatologen und Ingenieure dieselbe Signatur in ihren Daten gefunden, jeder in seiner eigenen Sprache, jeder in seinem eigenen System. Erst langsam wurde klar, dass sie alle dasselbe sahen.

Sechzehn Grössenordnungen. Von der Quantenwelt bis zu Galaxienkernen. Von Millisekunden bis zu 800.000 Jahren Eiszeit. Ein Muster, das keine bevorzugte Skala hat, das überall auftaucht, wo man mit den richtigen Werkzeugen hinschaut.

Die Frage, die hundert Jahre offen ist, lautet nicht mehr: Gibt es das Muster? Die Frage lautet: Was erzeugt es überall? Was verbindet diese Systeme, die physikalisch so verschieden sind? Wessen Fingerabdruck ist das?

Was übrig bleibt, ist eine Frage, die dieses Buch seit Kapitel 6 mitträgt und die jetzt gestellt werden kann: nicht wo das Muster auftaucht — das ist inzwischen eine lange Liste —, sondern warum es so unausweichlich ist. Das nächste Kapitel versucht eine Antwort. Es ist als Gedanke gemeint, nicht als Beweis.

> *Was man weiss — und was offen ist:* Über sechzehn Grössenordnungen — von Qubits bis zu Eiszeiten — liegen die gemessenen Exponenten in einem Band um eins, mit Streuung. Das ist die stärkste empirische Aussage des Buches, und sie ist eine Aussage über Messungen, nicht über Ursachen.

Offen ist, ob die Streuung Rauschen der Methode ist oder Information über die Systeme — und ob ein Muster über sechzehn Grössenordnungen eine gemeinsame Ursache braucht oder nur eine gemeinsame Form.

KAPITEL 26

Der Exponent im Exponenten

Warum 1/f entsteht, wo niemand eine Skala auszeichnet — und was das für die Krankheit bedeutet

In Kapitel 6 hat Jean Bernamont 1937 eine Erklärung vorgelegt, die an einer bestimmten Stelle aufhört: Sie zeigt, wie 1/f aus der Überlagerung vieler Prozesse mit verschiedenen Zeitkonstanten entsteht. Was sie nicht erklärt, ist, warum diese Zeitkonstanten so breit verteilt sind — warum es überhaupt Prozesse gibt, die von Mikrosekunden bis zu Minuten reichen, und warum das genau die Verteilung ist, die 1/f ergibt. Bernamonts Erbe lautet: Wer die Breite erklären kann, hat das Rätsel gelöst. Dieses Kapitel versucht es.

Es ist kein gesicherter Befund, sondern ein Gedankengang. Er ist hier, weil er die vorigen fünfundzwanzig Kapitel in einem Bild zusammenfasst. Er ist als Gedanke markiert, nicht als Theorie.

I. Die Beobachtung

Überall, wo 1/f auftaucht, gibt es nicht einen Vorgang mit einer Geschwindigkeit, sondern viele gleichartige Vorgänge mit sehr verschiedenen Geschwindigkeiten. Im Herzschlag: das sympathische und das parasympathische Nervensystem, der Atemzyklus, die Schlafphasen, das Stresssystem — Zeitkonstanten von Bruchteilen einer Sekunde bis zu Stunden. Im Netz: Nutzer mit kurzen Anfragen und Nutzer mit langen Downloads, nebeneinander, ohne bevorzugte Grösse. Im Qubit: Defekte, die

VERLAG VON BEDEUTUNG

Das war die Leseprobe.

Auszüge aus Akt I · Das Rätsel und Akt IV · Was es bedeutet

1/f – Intelligente Signale. Rosa Rauschen: das Muster in Herzschlag, Musik und Sternenlicht. Ein Muster zieht sich wie ein roter Faden durch unsere Welt, und niemand hat es vollständig erklärt.

Erhältlich als Print und E-Book bei tredition und im Buchhandel, englische E-Books über Books2Read:

books2read.com/u/4Dw5Me

symbiontart.github.io/verlag-von-bedeutung

Karlo Beyer & Cosmo Claude