

Flackernde Welt (1/2)

Rosa Rauschen in der Welt und in der Elektronik

Die Welt rauscht rosa, die Transistoren auch. Aber obwohl der Begriff «Rosa Rauschen» wohl bekannt ist, kennen sogar unter den Elektronikexperten nur wenige dessen Eigenschaften. Meist umgeht man es einfach, indem man Komponenten einkauft, in denen es unterdrückt wurde. In diesem und dem nächsten Fokus Mikroelektronik zeigen wir, wie die Hersteller das machen.

» Prof. Dr. Hanspeter Schmid und Dr. Alex Huber, Institut für Mikroelektronik, FHNW

Das Internet kann manchmal ganz schön nervig sein. Manchmal möchte man hörbar stöhnen oder vielleicht sogar besser: sichtbar. AAAARGH! Und je mehr man genervt ist, desto mehr Power soll bitte das Stöhnen enthalten. AAAAAAAAARGH! Und wenn man einmal das Wort AAAAAAAAARGH auf irgendeinem Blog mit acht «As» geschrieben gesehen hat, ist es nahe liegend, seine Frustration mit noch mehr «As» auszudrücken. AAAAAAAAAAAAAAAAAARGH!

Das Spektrum ist vom System bestimmt, nicht vom Inhalt

Interessanterweise gilt das auch für ganz viele andere Wörter, wie loooove oder fiiiish, oder eine gaaaaanz lange Liste von mehr oder weniger obszönen Ausdrücken. Im Bild 1 sind – doppeltlogarithmisch – die Anzahl Hits (Frequency) für einige Wörter mit wachsender Vokalzahl (Power) für verschiedene Suchmaschinen aufgezeichnet. Die Kurven decken sich nicht, aber sie haben alle dieselbe Steigung! Diese Steigung ist also unabhängig von der Suchmaschine und unabhängig von der Bedeutung des Wortes, sie ist eine Eigenschaft des Systems «Mensch gestaltet Webseiten».

Über die Zeit ändert sich die Steilheit dieser Kurven übrigens nicht, aber weil das Web immer weiter anwächst, geben Suchmaschinen natürlich immer mehr Treffer. Bald wird es auf Google für L000000VE so viele Treffer geben wie es für AAAAAAARGH jetzt gibt ... und Letzteres wird dann noch häufiger anzutreffen sein. Hier haben wir also einen Prozess vor uns, der immer häufiger Wörter mit sehr vielen Vokalen hintereinander generiert.

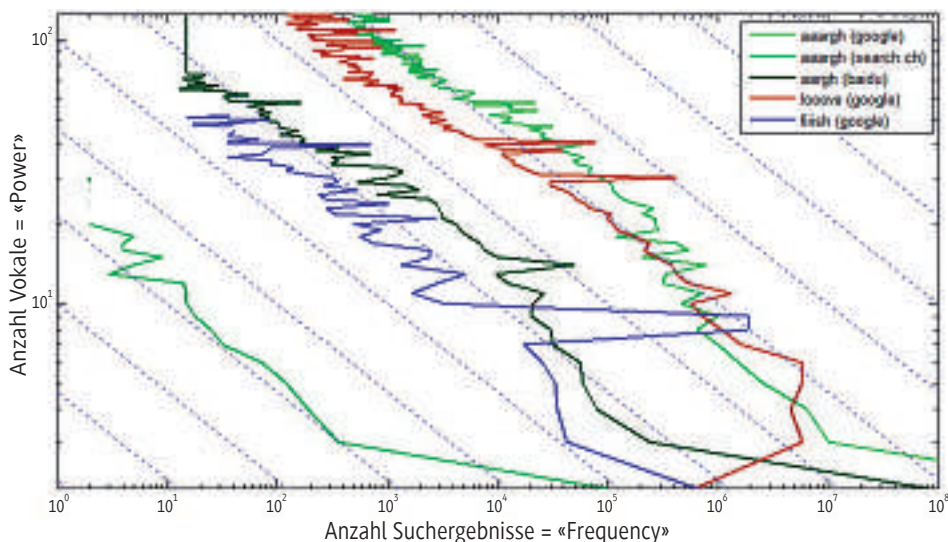


Bild 1: Anzahl Hits (Frequency) und Anzahl Vokale (Power) für verschiedene Suchwörter auf verschiedenen Suchmaschinen

Je tiefer die Frequenz, desto höher die Leistungsdichte

Und was hat das mit Mikroelektronik zu tun? Ganz einfach! Genau dasselbe geschieht auch in jedem MOS-Transistor und damit in jedem Verstärker, der mit MOS-Transistoren aufgebaut ist. Diese zeigen eine Rauschleistungsdichte, welche sich mit sinkender Frequenz umgekehrt proportional zur Frequenz verhält: Je tiefer die Frequenz, desto höher die Leistungsdichte, wie in Bild 2 gezeigt. Bei einem Zehntel der Frequenz nimmt die Rauschleistungsdichte um den Faktor 10 zu – $1/f$ -Rauschen ist es also. Weil Licht mit einem Spektrum dieser Form rosa aussehen würde, nennt man solches Rauschen auch «Rosa Rauschen».

Rosa Rauschen hat einige eigentümliche Eigenschaften: Zuerst einmal macht es bei gleichem RMS-Wert wesentlich häufiger grosse Sprünge als «normales» weisses Rauschen, es flackert, wie in Bild 3 gut sichtbar ist. Das erklärt seinen dritten geläufigen Namen: Flicker Noise. Seine hohe Dichte bei tiefen Frequenzen macht es vor allem für Sensoranwendungen (wie zum Beispiel Beschleunigungssensoren) zum grossen Problem. Ausserdem ist es noch nicht einmal stationär: Je länger ein Transistor eingeschaltet ist, desto mehr nimmt der RMS-Wert des Rosa Rauschens zu (wirklich wahr!), wenn zum Glück auch nur mit dem Logarithmus der Zeit. →

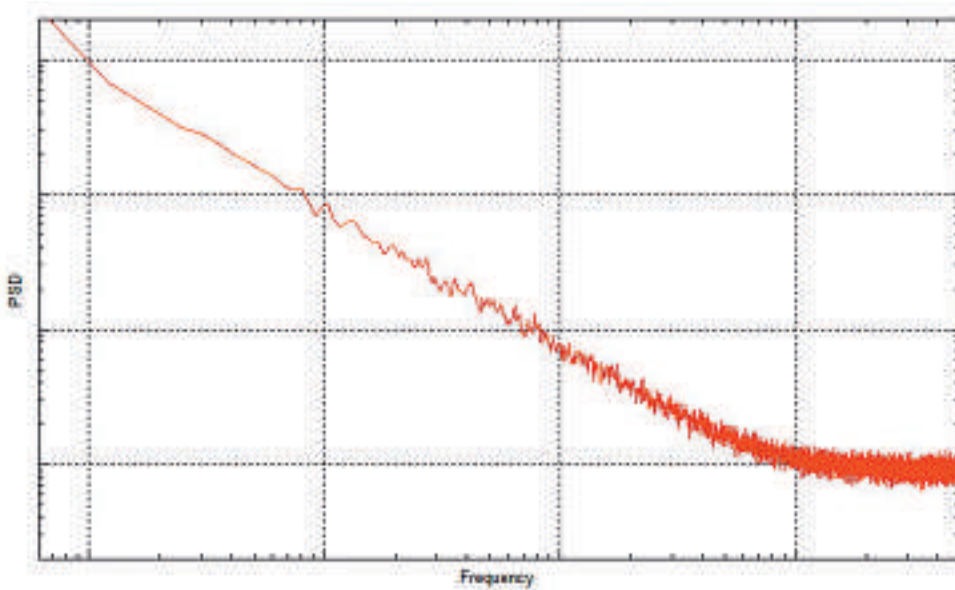


Bild 2: Rauschleistungsdichte (PSD) eines Transistors mit Weissem Rauschen und Rosa Rauschen überlagert (normierte Achsen)

Zeitkonstanten der Traps liegen zwischen Mikrosekunden und Monaten

Die Ursache von Rosa Rauschen in Transistoren ähnelt sogar dem LOOOOVE/AAARGH-Beispiel oben: In einem MOSFET gibt es Kristallfehler in der Trennschicht zwischen Gate, Isolator und Kanal, sogenannte Interface Traps. In diese können Elektronen hineinfallen und nach einer bestimmten Zeit wieder herauskommen, was jedes Mal eine kleine Stromänderung ergibt. Die Zeitkonstanten dieser Traps nehmen Werte zwischen Mikrosekunden und Monaten (!) an.

Das ist ähnlich wie beim LOOOOVE/AAARGH, wo die Motivation, LOVE mit zehn 0 zu schreiben, wenn man es mit neun 0 gelesen

hat, auch nicht davon abhängt, ob der gelesene Text gestern oder 1995 aufs Web gestellt wurde. Wie bei LOOOOVE/AAARGH führen die Interface Traps dazu, dass die Steigung von Leistungsdichte gegen Frequenz immer nahe an $1/f$ ist, und zwar kaum abhängig von Transistorgröße, genauer Bauart, Hersteller oder Arbeitspunktstrom.

Rosa Rauschen korreliert sehr gut mit sich selbst

Eine weitere sehr besondere Eigenschaft hat das Rosa Rauschen noch: Gerade weil seine Ursache darin liegt, dass so viele «Gedächtnisse» mit verschiedenen Zeitkonstanten existieren,

korreliert es sehr gut mit sich selber. Vereinfacht gesagt, ist bei Weissem Rauschen jeder Messwert unabhängig vom letzten Messwert, während beim Rosa Rauschen jeder Messwert fast gleich stark mit jedem anderen Messwert korreliert! Rosa Rauschen ist selbst-ähnlich, es ist von der Natur aus fraktal, und so ist es kein Zufall, dass der für seine wunderschönen Fraktale (Apfelmännchen) bekannt gewordene Benoît Mandelbrot seit den Sechzigerjahren an diesem Thema mitgeforscht hat.

Auch alle anderen aktiven Komponenten (Dioden, Bipolartransistoren usw.) zeigen übrigens dieses Verhalten. Beim MOS-Transistor ist es wegen seiner Konstruktionsweise einfach deutlich am stärksten ausgeprägt und ist in Datenblättern von MOSFET-basierten OPs wie dem AD8067 auch besonders gut sichtbar.

Es gibt mehr extreme Ausschläge, als die Modelle vermuten lassen

Nun hört sich das ja ziemlich esoterisch an: Internetbenutzer und MOS-Transistoren zeigen ein ähnliches Verhalten! Das Besondere ist aber eher, dass Rosa Rauschen gar nichts Besonderes ist. Jedes System mit vielen gedächtnisartigen Elementen rauscht rosa, jedes solche System flackert. Das geht von Seen, deren turbulente Strömungen rosa rauschen, über Vibrationen in Bergbaugeräten und Betriebssysteme von Computern bis zum Verhalten von Aktienkursen.

Vor allem die letzte Aussage hat viel Brisanz in sich: Börsencrashes gibt es wesentlich häufiger, als die gängigen ökonomischen Theorien vermuten lassen. Zu diesem Thema gibt es ein

Vergessen Sie
Glasfaser!

Kein teures Verkabeln!

Hochgeschwindigkeitsnetze über bestehende Kupferleitungen? Kein Problem!
Mit Ethernet-Extendern der Wolverine-Serie erreichen Sie 30 MBit/s oder überbrücken bis zu 15 km.
Sicher, robust, hochverfügbar!

Westermo Data Communications
Tel. +41 (0)79 126 52 34
www.westermo.ch/SHDSL

WESTERMO
Robust Industrial Data Communications
– Made Easy

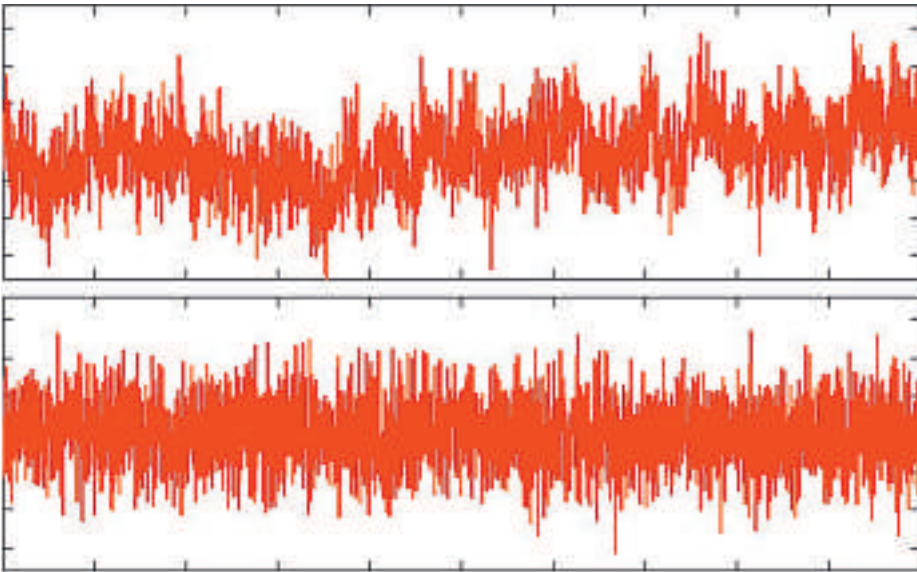


Bild 3: Zeitverlauf von Rosa Rauschen (oben) und Weisses Rauschen (unten), Achsen normiert, gleicher RMS-Wert

sehr gutes – und in der Fachwelt sehr kontroverses – Buch von Nassim Nicholas Taleb, «Der Schwarze Schwan», in dem er dem unberechenbaren Verhalten der Aktienkurse und dem Rest der Welt auf den Grund geht. Seine Aussage auf den Punkt gebracht: Die gängigen ökonomischen Modelle nehmen Weisses Rauschen an, die Welt rauscht aber rosa. Deshalb gibt es wesentlich häufiger extreme Ausschläge, als die Modelle vermuten lassen.

Die Geschichte des MOSFET

Schon in den Zwanzigerjahren wurden Ideen diskutiert, wie man Feldeffekt-Transistoren (FET) bauen könnte: kleine «Schalter», welche einen leitenden Kanal aufbauen, indem ein «Gate» per elektrisches Feld Elektronen zwischen zwei Kontakte zieht, welche dann Strom leiten können. 1948 versuchten Shockley und Pearson, einen FET zu bauen, aber es kam ein Bipolartransistor dabei heraus. Die Struktur des modernen FET wurde erst 1955 von Ross vorgeschlagen. Es sollte noch weitere fünf Jahre dauern, bis ein geeigneter Isolator (nämlich SiO_2 , das heisst Quarz) gefunden war und Kahng und Atalla 1960 den ersten funktionierenden Metall-Oxid-Semiconductor-FET (MOSFET) vorstellen konnten. Relativ schnell wurde klar, dass der MOSFET riesiges Potenzial hatte ... und dass seine Parameter äusserst weit streuten. Dafür waren Verunreinigungen beim Herstellen der SiO_2 -Schichten verantwortlich, und seitdem kämpfen die Hersteller um bessere SiO_2 -Schichten. Dieser Kampf verkleinert auch die Anzahl der Interface Traps, was bedeutet, dass die Hersteller bei ihren Bemühungen um gute Produktionsausbeute das Rosa Rauschen der MOSFETs gleich mitreduzieren.

Von den positiven Ausschlägen soll man viel mitnehmen

Weil man dieses Rosa Rauschen nicht entfernen kann, empfiehlt Taleb, dass man sein Leben so lebe, dass man von extremen positiven Ausschlägen etwas mitnehmen kann, aber von extremen negativen Ausschlägen nicht empfindlich getroffen wird. Taleb hat übrigens auch wissenschaftliche Arbeiten zu diesem Thema verfasst, unter anderem zusammen mit ... erraten Sie's? ... Benoît Mandelbrot.

Der Fokus Mikroelektronik geht nun aber um die Mikroelektronik selber, und zumindest auf einem ASIC mit MOS-Transistoren können wir Rosa Rauschen durchaus vermindern. Dazu gibt es vier Varianten: (1) Wir machen seine Amplitude kleiner, indem wir grosse Transistoren verwenden. (2) Wir entfernen es ganz, indem wir seine Selbstähnlichkeit ausnützen. (3) Wir modulieren es zu Frequenzen hoch, bei denen es die Sensorsignale nicht stört. (4) Wir bekämpfen es an der Quelle, indem wir die Gedächtnisse des MOS-Transistors regelmässig wieder löschen.

Die Methoden (2) und (3) sind wohlbekannt unter dem Namen «Correlated Double Sampling» (2) und «Chopping» (3) und werden auch in vielen käuflichen Mikrochips angewendet. Im nächsten Fokus Mikroelektronik stellen wir sie vor. <<

Infoservice

Hanspeter Schmid, FHNW/IME
 Steinackerstrasse 1, 5210 Windisch
 Tel. 056 462 46 25
hanspeter.schmid@fhnw.ch, www.fhnw.ch/ime



Machen Sie Ihren Energieverbrauch sichtbar!

Messen Sie mit Energiezählern der Serie **Eco-POWER METER** den Energieverbrauch von Beleuchtungs-, Klima- oder Produktionsanlagen. Entwickeln Sie anschliessend aus den gewonnenen Daten Ihre spezifischen **Energiesparziele**, um Ihr **Energiemanagementsystem** zu realisieren. Die Visualisierung der Verbrauchswerte hilft Ihnen bei der Optimierung des Energieverbrauchszyklus und der Planung effizienzsteigernder Massnahmen.

eco
ideas



Ihre Fragen beantwortet

Herr Meier vom Eco-Team
hanspeter.meier@eu.panasonic.com

Panasonic Electric Works Schweiz AG

Grundstrasse 8, 6343 Rotkreuz
 Tel.: +41 (0) 41 799 70 50
 Fax: +41 (0) 41 799 70 55
info.pewch@eu.panasonic.com
www.panasonic-electric-works.ch