

Einfluss von Oszillatoren mit extrem niedrigem Phasenrauschen auf die Systemleistung



Für einen Elektroingenieur wäre die ideale Welt eine Welt ohne Rauschen. Was aber ist Rauschen? Was versteht man unter elektrischem Rauschen? Oder – näher am Thema dieser Abhandlung: Was ist Phasenrauschen? Als Techniker wissen wir intuitiv, dass ein niedriger Rauschpegel in einem System besser ist als ein hoher.

*Autoren:
Christian Dunger, Produktmarketing FCP
bei WDI
Ramon M. Cerda, Technischer Direktor
bei Crystek Corporation, USA*

Wir müssen allerdings dieses Rauschen irgendwie quantitativ in Einheiten und Begriffen erfassen, die für uns alle akzeptabel sind – und das werden wir tun. Wir werden auch den Unterschied hinsichtlich der Phasenrauschleistung von Massenprodukten gegenüber preisgünstigen Hochleistungs-Quarzoszillatoren untersuchen. Um ein System zu entwickeln, ist es notwendig, Kosten und Nutzen verschiedener Oszillatoren gegeneinander abzuwägen. Oft unterscheiden sich zwei Wettbewerbssysteme stark in ihrer Leistung, NICHT aber im Preis. Die Phasenrauscheigenschaften eines Oszillators dominieren die gesamte Systemleistung, und Mehrkosten von wenigen Euros für den Oszillator können ein mittelmäßiges System in ein herausragendes verwandeln.

Allerdings kann ein Ingenieur die Leistungsdaten des Oszillators auch leicht zu hoch ansetzen, und deshalb ist es entscheidend,

genau zu verstehen, wie Phasenrauschen (oder Jitter) des Oszillators die Systemleistung einschränkt. Ein Tutorial über Phasenrauschen und Jitter soll helfen, dieses Verständnis zu entwickeln.

Phasenrauschen und Jitter bei Oszillatoren – Tutorial

Unter Phasenrauschen in einem Oszillator versteht man die schnellen, regellosen Schwankungen der Phasenkomponente des Ausgangssignals. Für dieses Signal gilt folgende Gleichung:

$$U(t) = A_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t + \Delta\phi(t))$$

Gleichung 1

Wobei:

A_0 = nominale Spitzenspannung

f_0 = nominale Grundfrequenz

t = Zeit

$\Delta\phi(t)$ = Zufallsabweichung der Phase vom Nominalwert – das „Phasenrauschen“

$\Delta\phi(t)$ (siehe oben) stellt das Phasenrauschen dar, aber A_0 bestimmt den Signal/Rausch-Abstand (Signal to Noise Ratio, SNR). Dies wird in Bild 1 veranschaulicht.

Das Grundrauschen

Rauschsignale sind stochastisch und im weiteren Sinne kann man unter Rauschen jedes unerwünschte Signal verstehen, das das Hauptsignal, das verarbeitet oder generiert werden soll, stört. Es kann alle physikalischen Parameter, wie Spannung, Strom, Phase, Frequenz (oder Zeit) usw. stören. Das Ziel ist daher eine Maximierung des Signals und eine Minimierung des Rauschens, um einen hohen Signal/Rausch-Abstand (SNR) zu erreichen.

Die Rauschstärke wird quantitativ dargestellt als:

$$P_N = k \cdot T \cdot \Delta f = k \cdot T \cdot B$$

Gleichung 2

Wobei:

k = Boltzmann-Konstante ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

T = absolute Temperatur in Kelvin

$\Delta f = B$ ist die Bandbreite, in der die Messung erfolgt, angegeben in Hertz

Liegt kein Signal vor, besteht thermisches Grundrauschen. Dieses Grundrauschen kann in verschiedenen Einheiten dargestellt werden: Watt, V/\sqrt{Hz} , V/\sqrt{Hz} , dBm/Hz, um nur einige zu nennen. Für Oszillatoren empfiehlt es sich, dBm/Hz zu verwenden, um die Rauschdichte zu definieren.

Vor der Bestimmung von dBm/Hz muss zunächst dBm bestimmt werden. dBm bezieht sich auf Dezibel über 1 Milliwatt in einem 50-Ohm-System.

Daraus folgt also: 1 Milliwatt entspricht 0 dBm. Aus Gleichung 2 erhalten wir die Stärke des thermischen Rauschens, und durch Einsetzen der Werte für k und T (290 K) ergibt sich:

$$P_N = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 290 \cdot B = 4 \cdot 10^{-23} \cdot B$$

Gleichung 3

Dabei ist B die Bandbreite, die von Interesse ist und für die wir im Folgenden 1 Hz verwenden, um das Ergebnis zu normieren. Mit dem Wissen, dass 1 dbm = $10 \times \log(P_N/1 \text{ mW})$ ist und unter Verwendung des vorstehenden Ergebnisses erhalten wir:

$$P_N/\text{dBm} = 10 \cdot \log[(4 \cdot 10^{-21}/1 \cdot 10^{-3}) \cdot B] = 10 \cdot \log(-17,4) + \log(B) = -17,4 + \log(B)$$

Gleichung 4

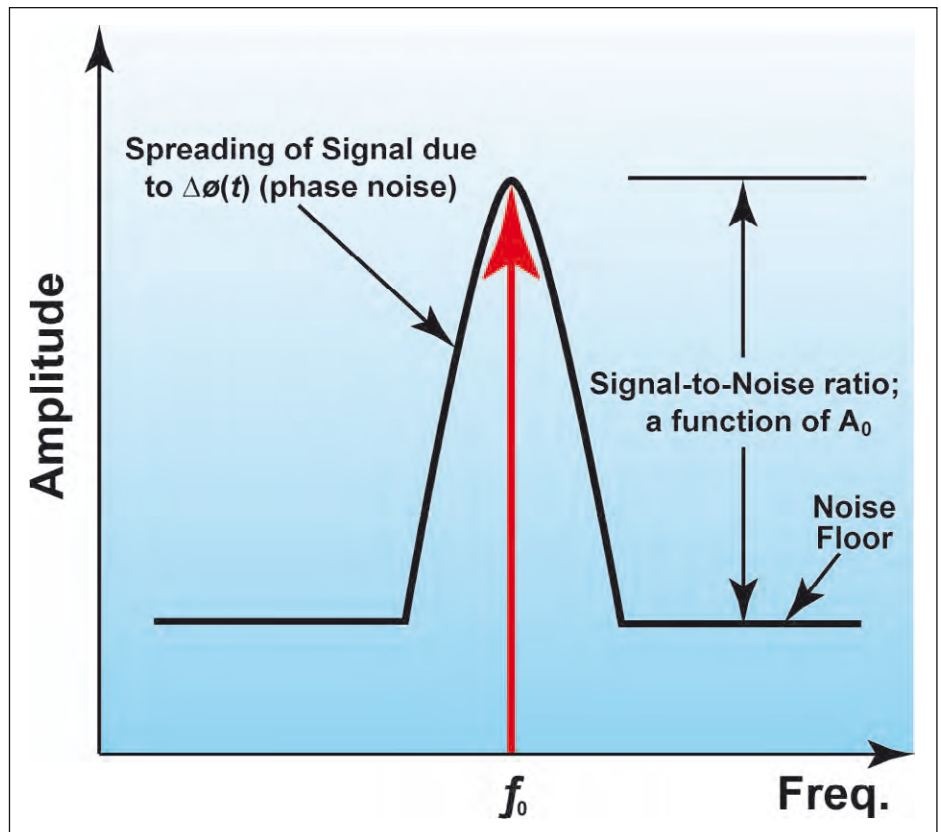


Bild 1: Signal/Rausch-Abstand (SNR)

Bei Festlegung der Bandbreite B auf 1 Hz erhalten wir das Endergebnis in dBm/Hz, und da $\log(1)$ Null ist, ergibt sich ein Wert von -174 dBm/Hz. Dies ist die Leistungsdichte für thermisches Rauschen eines 1 Ω -Widerstands bei 290 °K, gemessen bei einer Bandbreite von 1 Hz. Wenn ein Oszillator eine Ausgangsleistung von 1 mW oder 0 dBm hat, gilt:

$$-174 \text{ dBm/Hz} = -174 \text{ dBc/Hz}$$

Dabei bedeutet dBc Dezibel im Verhältnis zum Trägerpegel (Carrier). Dieses Ergebnis besagt, dass der beste für das Grundrauschen eines 0-dBm-Oszillators erzielbare Wert -174 dBc/Hz bei 290 °K beträgt.

Allgemein kann dBm mit Hilfe der folgenden Gleichung in dBm/Hz umgerechnet werden:

$$P_N/\text{dBm} / \text{Hz} = P_N/\text{dBm} - 10 \cdot \log(B)$$

Gleichung 5

und dBm/Hz in dBm mit der Gleichung:

$$P_N/\text{dBm} = P_N/\text{dBm} / \text{Hz} + 10 \cdot \log(B)$$

Gleichung 6

Beispiel:

Welcher Rauschleistung in dBm/Hz entspricht -50 dBm bei einer Bandbreite von 1 kHz?

Lösung:

$$-50 \text{ dBm/Hz} - \{10 \times \log(1000)\} \text{ dBm/Hz} = -50 \text{ dBm/Hz} - \{10 \times 3\} \text{ dBm/Hz} = -80 \text{ dBm/Hz}$$

Rauscheigenschaften

Rauschen bei einem Träger kann in zwei Kategorien unterteilt werden, regellos oder deterministisch. Regelloses „weißes“ Rauschen erhöht die Bandbreite des Trägers, während deterministisches Rauschen Seitenbänder auf dem Träger ausbildet, wie aus Bild 2 ersichtlich ist.

Durch Addieren der deterministischen Komponente zu Gleichung 1 ergibt sich nun:

$$U(t) = A_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t + \Delta\phi(t)) + m_d \cdot \sin(2\pi \cdot f_d \cdot t)$$

Gleichung 7

Wobei m_d die Amplitude des deterministischen Signals ist, die den Träger phasenmoduliert, und f_d die Frequenz des Steuersignals darstellt.

Rauschen hat eine unendliche Bandbreite. Deshalb gilt: je größer die Bandbreite des Messgeräts, mit der eine Trägerfrequenz mit Rauschen gemessen wird, desto höher das gemessene Rauschen.

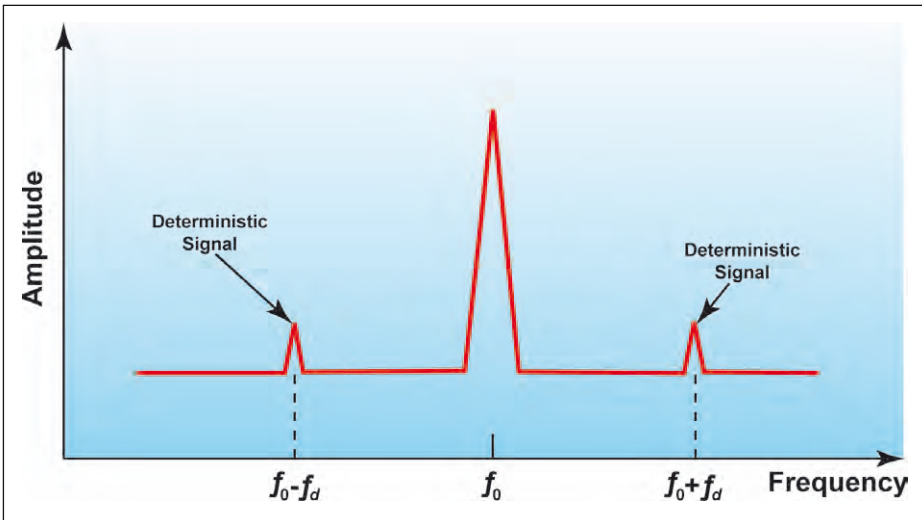


Bild 2: Deterministisches Rauschen bildet Seitenbänder auf dem Träger

Beispiel:

Bei Veränderung der Auflösungsbandbreite (die der physikalischen Bandbreite des IF-Kanals entspricht) auf einem Spektralanalyser ändert sich die Rauschstärke. Daher müssen wir für die Spezifizierung der Spektralreinheit eines Oszillators oder einer Signalquelle eine für alle akzeptable Messbandbreite festlegen.

Die Industrie hat eine Korrelationsbandbreite von 1 Hz für Phasenrauschmessungen festgesetzt, die als normierte Frequenz bezeichnet wird. Es gibt wenige Spektralanalysen mit einer Auflösungsbandbreite BSA von 1 Hz. Ein derartiger Spektralanalyser ist sehr kostspielig. Tatsächlich wird das Messgerät umso teurer, je näher am Träger die Messung stattfinden soll. Ein Spektralanalyser gibt an, wie nahe am Träger die Messung erfolgen kann (bezeichnet als die niedrigste mögliche Auflösungsbandbreite). Oberhalb dieser Maximalfrequenz kann der Messwert mit folgender Gleichung auf 1 Hz normiert werden:

$$P_N/\text{dBm}/\text{Hz} = -P_N/\text{dBc} - 10 \cdot \log(B_{SA})$$

Gleichung 8

Beispiel: Gegeben sei ein Punkt, der bei einem Frequenz-Offset von 10 kHz vom Träger bei -40 dBc liegt. Zusätzlich wird die Auflösungsbandbreite des Messgeräts auf 1 kHz eingestellt. Wie hoch in dBc/Hz ist das Phasenrauschen an diesem Punkt?

Antwort aus Gleichung 8: -70 dBc

Daher beträgt das Phasenrauschen bzw. $L\{10 \text{ kHz}\}$ an diesem Punkt -70 dBc/Hz bei einem Frequenzoffset von 10 kHz.

Da das Rauschspektrum eines Signals um die Trägerfrequenz herum symmetrisch ist, genügt es, eine Seite zu spezifizieren. Dieses

einseitige Spektrum wird als „Single Side Band (SSB)“-Spektrum bezeichnet. Daher kann die Spektralreinheit eines Signals durch das entsprechende SSB-Phasenrauschdiagramm vollständig quantitativ dargestellt werden, wie aus Bild 3 ersichtlich ist.

Diesem SSB-Diagramm wurde das Script $L\{f\}$ zugewiesen, und es ist definiert als die Hälfte der Summe beider Seitenbänder. $L\{f\}$ wird in Dezibeleinheiten unter dem Träger pro Hertz (dBc/Hz) gemessen und definiert sich aus

$$L\{f\} = 10 \cdot \log[(P_{sb}(f_0 + \Delta f, 1\text{Hz})) / P_c]$$

Gleichung 9

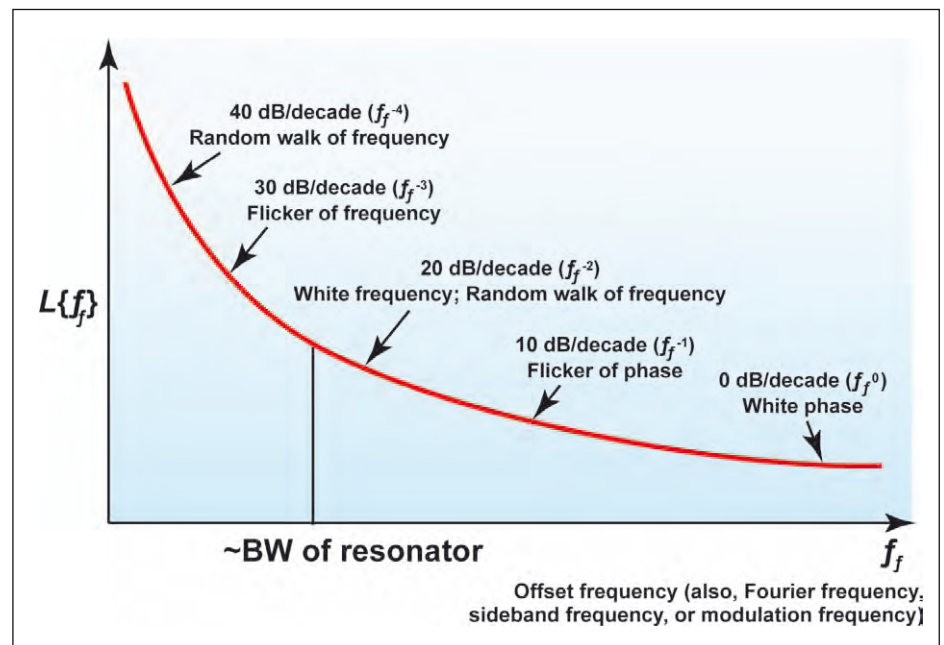


Bild 3: Typisches SSB-Phasenrauschen eines Quarzoszillators vs. Offset vom Träger

Dabei steht PSB ($f_0 + \Delta f$, 1 Hz) für die Signalstärke bei einem Frequenz-Offset von Δf zum Träger bei einer Messbandbreite von 1 Hz.

Nachstehend die drei am meisten verbreiteten Arten, Phasenrauschen zu definieren:

1. Der am häufigsten benutzte Begriff zur Beschreibung der charakteristischen Zufälligkeit der Frequenzstabilität.
2. Die kurzfristige Frequenzinstabilität eines Oszillators im Frequenzbereich.
3. Das Spitzenträgersignal des Rauschens bei einem bestimmten Abstand zum Träger, ausgedrückt in dB unterhalb des Trägers bei einer Bandbreite von 1 Hz (dBc/Hz).

Jitter

Bisher drehte sich die Diskussion um das Rauschen innerhalb des Frequenzbereichs. Die Rauschleistung eines Oszillators im Bereich Zeit nennt man Jitter. Dabei ist zu beachten, dass die Eigenschaften Phasenrauschen und Jitter eines rauschenden Oszillators miteinander in Verbindung stehen; generell gilt: je höher das Phasenrauschen im Oszillator, umso größer auch der Jitter.

Jitter ist eine Abweichung im Nulldurchgang eines Signals oder eine Abweichung in der Periode des Signals. Jitter besteht – wie das Rauschen auch – aus zwei Hauptkomponenten, einer vorhersehbaren und einer zufälligen. Die vorhersehbare Komponente des Jitters wird als deterministischer Jitter bezeichnet. Die Zufallskomponente des Jitters wird als zufälliger Jitter bezeichnet. Zufälliger Jitter hat seine Ursache im

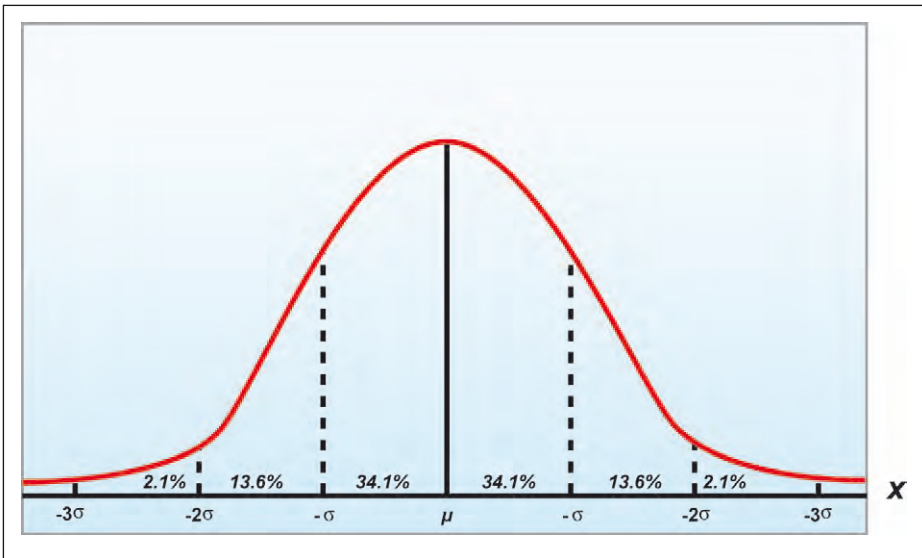


Bild 4: Gauß'sche Verteilung

Beispiele für deterministischen Jitter sind:

1. Periodischer (PJ) oder sinusförmiger Jitter – z.B. durch Stromdurchführung verursacht
2. Symbolübersprechen (inter symbol interference, ISI) – z.B. durch Kanaldispersion des Filters
3. Tastverhältnisverzerrung (duty cycle distortion, DCD) – z.B. durch asymmetrische Anstiegs- und Abfallzeiten
4. Unterschwingung(en) des Oszillators – z.B. durch „Straight-Multiplication-Design“ des Oszillators
5. Unkorrelierter periodischer Jitter – z.B. durch Übersprechen durch andere Signale
6. Korrelierter periodischer Jitter

Gesamtjitter (TJ)

Der Gesamtjitter (TJ) ist die Summe aller unabhängigen Jitterkomponenten.

Gesamtjitter (TJ) = Zufälliger Jitter (RJ) + Deterministischer Jitter (DJ)

Einfluss des Phasenrauschens/ Jitter auf das System

Phasenrauschen oder Jitter eines Oszillators hat einen direkten Einfluss auf die Systemleistung. In einem Hochfrequenz-Kommunikationssystem beeinflusst hohes Phasenrauschen die Kommunikationsdistanz, verursacht Störungen von Nachbaranälen und die Bitfehlerrate steigt, um nur einige zu nennen. Für die heutigen hochentwickelten Hochgeschwindigkeits-A/D-Wandler kann ein sauberes Taktsignal in eine höhere „effektive Anzahl an Bits“ (effective number of bits, ENOB) umgewandelt werden. Die Genauigkeit eines A/D-Wandlers wird durch die Reinheit des verwendeten Taktgebers und dessen Signal/Rausch-Abstand (SNR) ermöglicht. Deshalb ist ein Taktgeber mit sehr

Erläuterung zu Bild 4

Bild 4 veranschaulicht die Gauß'sche Verteilung. Mathematisch stellt sich diese Funktion dar wie folgt:

$$f(x) = (1/\sigma\sqrt{2\pi})e^{-(1/2)(x-\mu)^2/\sigma^2}$$

Die Gauß'sche Verteilung hat folgende Eigenschaften:

- Gauß-Verteilung
- Mittelwert: μ
- Streuung: σ^2
- Standardabweichung: σ

Die Gauß'sche Verteilung wird gemeinhin auch als „Normalverteilung“ bezeichnet; man spricht oft von einer „glockenförmigen Kurve“. Es ist zu beachten, dass innerhalb $\pm 1\sigma$ der Gauß-Verteilungskurve 68,2 % der zufälligen Ereignisse auftreten und dass 99,6 % innerhalb von $\pm 3\sigma$ auftreten.

Warum weist Jitter die Kennlinie einer Gauß'schen Verteilungsfunktion auf?

Die Antwort darauf ist folgende: Zufälliger Jitter ist das Ergebnis einer Anhäufung zufälliger Prozesse wie zum Beispiel thermisches Rauschen, Schrotrauschen, Flicker usw. All diese Geräuschquellen tragen zum Gesamtjitter bei, der am Ausgang eines Oszillators beobachtet wird. Der zentrale Grenzwertsatz sagt aus, dass die Summe vieler voneinander unabhängiger Zufallsereignisse (Funktionen) zu einer Gauß'schen Verteilung konvergiert, wie in Bild 5 dargestellt.

Deterministischer Jitter (DJ)

Deterministischer Jitter (DJ) hat eine nicht-Gauß'sche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (probability density function, PDF) und ist gekennzeichnet durch seine begrenzte Spitze/Spitze-Amplitude. Deterministischer Jitter wird in Zeiteinheiten von Spitze zu Spitze ausgedrückt.

regellosen „weißen“ Phasenrauschen, während deterministischer Jitter vom deterministischen Rauschen kommt.

Zufälliger Jitter (Random Jitter RJ)

Zufälliger Jitter (random jitter, RJ) ist durch eine Gauß'sche Verteilung (Normalverteilung) gekennzeichnet und gilt als unbegrenzt. Daraus folgt, dass er im Allgemeinen die langfristige Gerätestabilität beeinflusst. Da es viel Zeit beansprucht, durch „Peak-to-Peak“-Messungen (Spitze/Spitze) statistisch aussagefähige Ergebnisse zu erzielen, wird zufälliger Jitter normalerweise als Effektivwert gemessen.

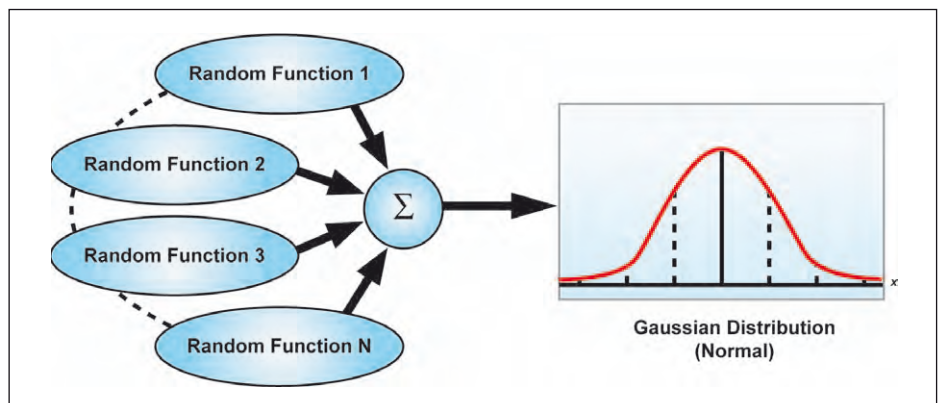


Bild 5: „Central Limit“-Theorie. Die Summe aller von einander unabhängigen Zufallsereignisse (Funktionen) konvergieren zu einer Gauß'schen Verteilung

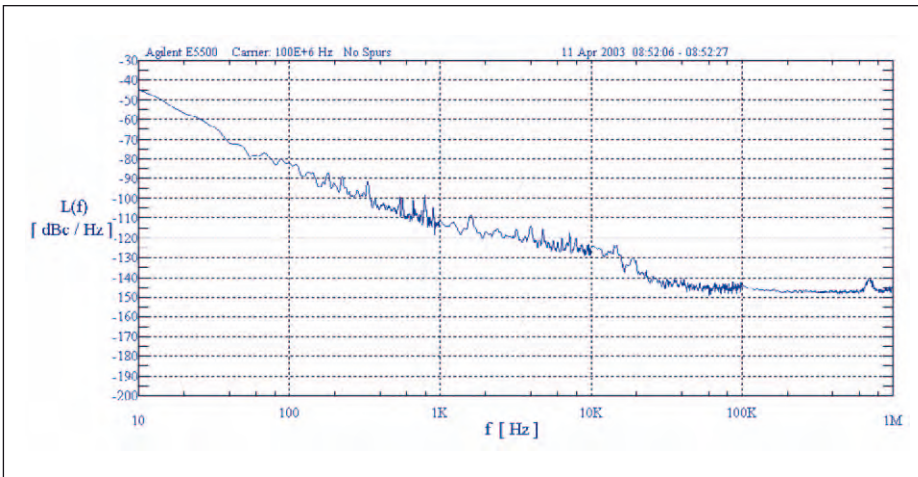


Bild 6: Typisches SSB-Phasenrauschen eines Quarzoszillators aus Massenproduktion

niedrigem Jitter erforderlich, um einen guten Signal/Rausch-Abstand (SNR) zu erhalten.

Bei A/D-Wandlern begrenzt der Jitter den Signal/Rausch-Abstand (SNR) nach der folgenden Gleichung:

$$\text{SNR/dB} = -20 \cdot \log(2\pi \cdot f_0 \cdot t_{j,\text{RMS}})$$

Gleichung 10

Wobei f_0 die jeweilige analoge Eingangsfrequenz ist, $t_{j,\text{RMS}}$ der Effektivwert des Jitters ist.

Wenn wir die Gleichung 10 nach dem Term „Jitter“ auflösen, erhalten wir:

$$t_{j,\text{RMS}} = 10^{-\text{SNR}/20} / 2\pi \cdot f_0$$

Gleichung 11

Beispiel:

Wird bei einem angenommenen Eingangssignal von 80 MHz ein Signal/Rausch-Abstand (SNR) von 75 dB benötigt, dann darf der Taktgeber höchstens einen Jitter von 470 Femtosekunden (fs) haben. Dies

zeigt, dass Jitter der einzige Faktor ist, der die Leistung des Datenwandlers begrenzt.

Wir werden nun die Phasendifferenz zweier Oszillatoren vergleichen, der eine ein Massenprodukt, der andere einer mit extrem niedrigem Phasenrauschen. Dass manche Oszillatoren die Bezeichnung „extrem niedriges Jitter“ tragen, könnte durchaus daran liegen, dass Leistungsdaten beschönigt werden. Nach unserer Meinung ist nur bei einem Grundrauschen von -160 dBc/Hz bei 10 kHz, und niedriger als -130 dBc/Hz bei 1 kHz Offset, die Bezeichnung „Oszillator mit extrem niedrigem Phasenrauschen“ gerechtfertigt. Diese Art von Phasenrauschen wird von vielen OCXOs mit SC-Schnitt-Quarzen und Frequenzen unter 50 MHz mühelos erreicht. Heute kann man einen 5x7 mm-Oszillator aus Massenproduktion mit einer Stabilität von ±50ppm für weniger als \$ 0,80 kaufen. Welche Art von Phasenrauschen zeigt dieser typische Taktgeber aus Massenproduktion?

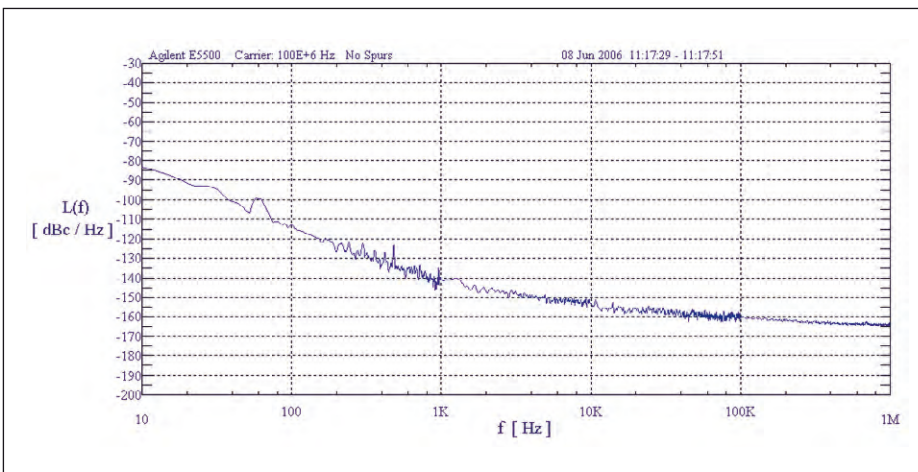


Bild 7: SSB-Phasenrauschen eines echten „ultra-low“-Jitter Quarzoszillators (CRYSTEK CCHD-950)

Die Oszillatoren der Crystek-Reihe CCHD-950 (Taktgeber) und CVHD-950 (VCXO) wurden als kostengünstige Oszillatoren und VCXOs mit niedrigem Jitter ausgelegt. Diese Oszillator-Familie verwendet diskrete Komponenten, um Jitter im „Subpicosekunden“-Bereich zu einem vernünftigen Preis zu realisieren. Bild 6 und 7 stellen tatsächliche SSB-Phasenrauschdiagramme eines Taktgebers aus Massenproduktion und dem CCHD-950 bei 100 MHz dar. Es ist zu beachten, dass es beim Vergleich von Jitter-Spektren unterschiedlicher Oszillatoren nicht ausreicht, lediglich den angegebenen Jitter von 1 ps (12 MHz bis 20 MHz) zu betrachten. Beide Oszillatoren auf den Bildern 6 und 7 erreichen dieses Spektrum, aber der CCHD-950 ist bezüglich Phasenrauschen und Breitband-Jitter dem Massenprodukt deutlich überlegen.

Oszillatortechnik, mit der extrem niedriges Phasenrauschen erreicht werden kann

Ein Oszillator aus Massenproduktion ist nicht mehr als ein ASIC und ein Quarzkristall-Rohling. In den meisten Fällen besitzt er nicht einmal einen inneren Bypass-Kondensator. Der Quarzrohling ist ein im AT-Schnitt hergestellter Streifen mit einem Q von etwa 25 K~45 K. Dieser niedrige Q-Wert begrenzt das sog. „Close-in-Phasenrauschen“. Der ASIC mit all seinen Transistoren begrenzt das Grundrauschen auf etwa -150 dBc/Hz. Andererseits nutzt ein „echter“ Oszillator mit extrem niedrigem Phasenrauschen eine diskrete Hochleistungs-Oszillator-Topologie mit einem Q von über 70 K und weist damit exzellentes „Close-in-Phasenrauschen“ auf. Die diskrete Oszillatortopologie stabilisiert das Signal-Rausch-Verhältnis, wodurch das Grundrauschen niedriger ist als -160 dBc/Hz. Daher wird herausragende Leistung mit Quarzen mit sehr hohem Q-Wert und einer guten, diskreten Topologie erzielt. Dieses niedrigere Phasenrauschen kostet einen Mehrpreis von etwa \$ 10,00. Allerdings ist dies in den meisten Fällen kein hoher Preis angesichts der Verbesserungen, die dadurch erreicht werden können.

Literaturhinweise

Brannon, Brad, „Sampled Systems and the Effects of Clock Phase Noise and Jitter“, Analog Devices App. Note AN-756

Poore, Rick, „Phase Noise and Jitter“, Agilent EEs of EDA, May 2001

Vig, John R. „Quartz Crystal Resonators and Oscillators“