

■ Auch der beste Oszillator produziert unerwünschte Rausch- und Störsignale – was aber sind die Ursachen?

## Phasenrauschen und Jitter

# Die Hauptursachen für Störungen in Oszillatoren

Ein Oszillator kann noch so gut sein – unabhängig von seiner Qualität enthält das Ausgangssignal unerwünschte Rausch- und Störsignale. Typisch sind z.B. unsaubere Ausgangsfrequenzen sowie harmonische oder subharmonische Störungen. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit den Hauptursachen unerwünschter Störsignale.

Gerd Reinhold\*

Jitter und Phasenrauschen sind keineswegs das Gleiche. So beschreibt Jitter den Rauschanteil eines Oszillators über die Zeitachse, während Phasenrauschen über den Frequenzbereich definiert wird. In RF-Anwendungen spielt das Phasenrauschen eine wesentliche Rolle, während in Digitalsystemen der Jitter-Wert mehr von Bedeutung ist. Folglich wird ein RF-Entwickler einen Wert für das Phasenrauschen festlegen und der Digitaltechniker eher einen Jit-

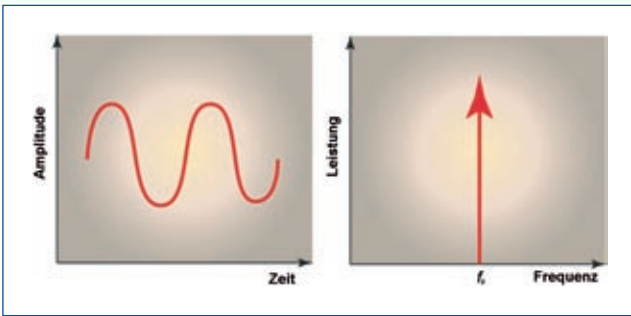
\*Gerd Reinhold ist verantwortlich für das Produktmarketing FCP (Frequency Control Products) bei der WDI AG und seit über 10 Jahren spezialisiert auf Beratung und Design-In-Support im Bereich Quarze & Oszillatoren.

ter-Wert spezifizieren. Es ist allerdings zu beachten, dass Phasenrauschen und Jitter zwei mit einander verbundene Eigenschaften sind, die direkt mit einem rauschenden Oszillator zusammenhängen, und dass mit zunehmendem Phasenrauschen im Oszillator im Allgemeinen auch der Jitter-Effekt zunimmt. Dieser Zustand lässt sich am Besten anhand eines idealen Signals darstellen, das gestört wird, bis das Signal mit dem echten Ausgangssignal eines Oszillators übereinstimmt. Das ideale Signal lässt sich mathematisch wie folgt darstellen:

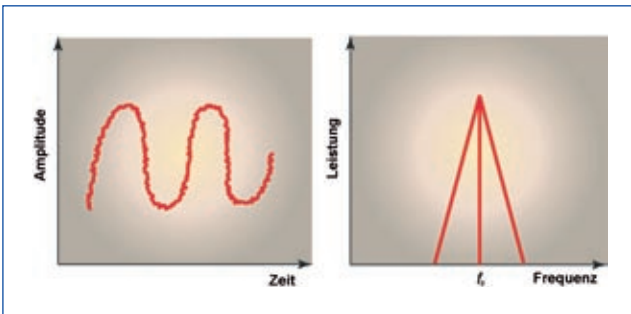
$$V(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

$A_0$  = Nennspitzenspannung,  
 $f_0$  = Nenngrundfrequenz,  $t$  = Zeit

In Bild 1 ist das ideale Signal im Frequenz- und Zeitbereich abgebildet.



■ Bild 1:  
Signal eines idealen Oszillators im Frequenzbereich (links) und im Zeitbereich (rechts)



■ Bild 2:  
Signal eines rauschenden Oszillators im Frequenzbereich (links) und im Zeitbereich (rechts)

Durch das Hinzuziehen von Amplitudenrauschen in diese Gleichung erhalten wir:

$$V(t) = [A_0 + \varepsilon(t)] \sin(2\pi f_0 t) \quad (2)$$

$\varepsilon(t)$  = Zufallsabweichung der Amplitude vom Nenn-„AM-Rauschen“

## Oszillatoren sind in der Regel auf Amplitudenebene gesättigt

Um die Sache noch ein wenig interessanter zu machen, fügen wir eine zufällige Phasenkomponente in Gleichung (2) ein.

Nun erhalten wir:

$$V(t) = [A_0 + \varepsilon(t)] \sin[2\pi f_0 t + \Delta\vartheta(t)] \quad (3)$$

$\Delta\vartheta(t)$  = Zufallsabweichung der Amplitude von dem Nenn-„Phasenrauschen“.

Bild 2 zeigt die neue Darstellung des Zeit- und Frequenzbereichs, Bild 3 eine Vektordarstellung von Gleichung (3).

Es stellt sich heraus, dass Oszillatoren in der Regel auf Amplitudenebene gesättigt sind und wir daher  $\varepsilon(t)$  in Gleichung (3) vernachlässigen können. Somit vereinfachen wir die Gleichung wieder zu:

$$V(t) = [A_0 \sin[2\pi f_0 t + \Delta\vartheta(t)]] \quad (4)$$

Erweitern wir die Gleichung jetzt durch das Hinzufügen einer deterministischen Komponente.

Unsere Gleichung lautet nun:

$$V(t) = [A_0 \sin[2\pi f_0 t + \Delta\vartheta(t) + m_d \sin(2\pi f_d t)]] \quad (5)$$

$m_d$  = Amplitude des deterministischen Signals, das den Träger phasenmoduliert,  $f_d$  = Frequenz des deterministischen Signals

Die Gleichung (5) lässt sich mit gewöhnlicher Trigonometrie nicht vereinfachen.

Allerdings kann sie als eine Reihe aus Sinusfunktionen durch Anwendung von Besselfunktionen der ersten Art ausgedrückt werden. Dies ist jedoch für unsere Zwecke nicht von Bedeutung und würde den Rahmen dieser Übung sprengen. Stellen wir uns nun vor, dass sämtliche Harmonische und gegebenenfalls Subharmonische zum Signal hinzugefügt werden. Die Gleichung wächst dann schnell wie folgt an:

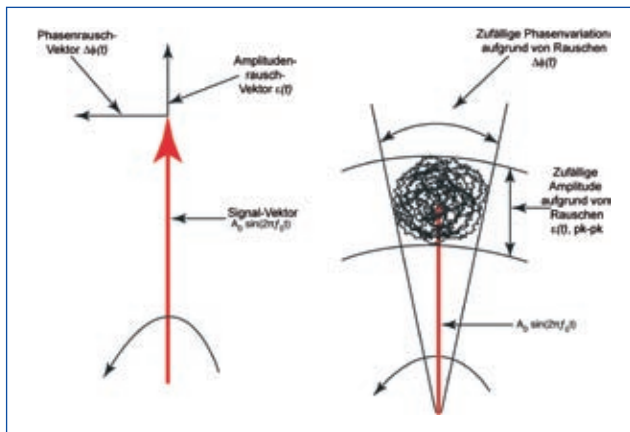
$$\begin{aligned} V(t) = & A_0 \sin[2\pi f_0 t + \Delta\vartheta(t) + m_d \sin(2\pi f_d t)] \\ & + A_1 \sin[2\pi 2f_0 t + \Delta\vartheta(t) + m_d \sin(2\pi f_d t)] \\ & + A_2 \sin[2\pi 3f_0 t + \Delta\vartheta(t) + m_d \sin(2\pi f_d t)] \\ & \dots \\ & + A_N \sin[2\pi N_{th} f_0 t + \Delta\vartheta(t) + m_d \sin(2\pi f_d t)] \\ & + A_{sub} \sin[2\pi (f_0/N) + \Delta\vartheta(t) + m_d \sin(2\pi f_d t)] \end{aligned} \quad (6)$$

## Oszillatoren produzieren sehr komplexe Signale

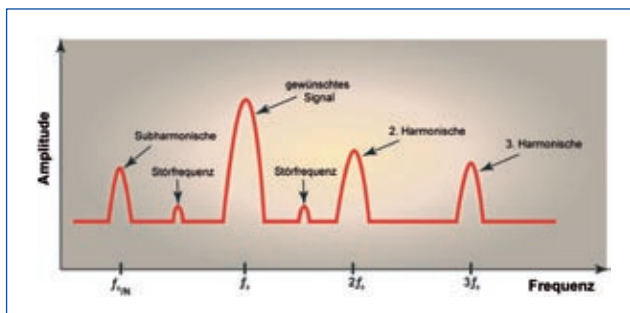
Der letzte Term der Gleichung (6) repräsentiert eine Subharmonie. Die Gleichung kann durch das Hinzufügen von Angaben für Störfrequenzen beliebig erweitert werden. Wir werden jedoch an dieser Stelle aufhören und nun erklären, woher einige der unerwünschten Signale und Rauschgeräusche in einem Oszillator kommen.

Nach Gleichung (6) produziert ein Oszillator ein sehr komplexes Signal mit zufälligen und deterministischen Phasenvariationen, Harmonischen, Subharmonischen etc. – doch woher kommen all diese Signal- und Rauschquellen?

**Bild 3:** Vektordarstellung von Gleichung (3) mit Festwerten des Phasen- und Amplitudenrauschens (links) sowie mit rauschbedingten, zufälligen Variationen von Phase und Amplitude (rechts)



**Bild 4:** Typisches Ausgangsspektrum eines realen Oszillators



Die zufälligen Komponenten werden überwiegend, allerdings nicht ausschließlich, von drei Hauptgeräuschequellen verursacht:

■ **Thermisches Rauschen:** Die kTB-Rauschleistung – verursacht durch die Brownsche Bewegung von Elektronen aufgrund von thermischer Beeinflussung. Die Größe nimmt in Abhängigkeit von Temperatur, Bandbreite und Rauschwiderrstand zu.

■ **Schrotrauschen:** Auch Stromrauschen – verursacht durch diskontinuierlichen Stromfluss über mögliche pn-Übergänge. (sog. potentielle Barrieren).

■ **Funkelrauschen:** Rauschen welches spektral abhängig von  $1/f$  ist und in sämtlichen aktiven Bausteinen vorhanden, sowie in einigen passiven Komponenten, wie Kohlewiderstände.

## Der Q-Wert und das mittenfrequenznahe Phasenrauschen

Das mittenfrequenznahe Phasenrauschen des Oszillators ist direkt proportional zu dem frequenzbestimmenden Resonator Q. Je höher der Q-Wert des Resonators, desto kleiner das mittenfrequenznahe Phasenrauschen. Das Grundrauschen entsteht aus der Mitwirkung aller Einflüsse innerhalb der Oszillator-schaltung (weißes Rauschen).

Die deterministische Komponente kann u. a. vier Ursachen haben (Bild 4):

■ **Spannungsversorgung (Brummstörung):** Im Falle einer unsauberen Spannungsversorgung kann ein Signal mittels dieser Energieversorgung in den Rückkopplungsweg des Oszillators gelangen und möglicherweise die Ausgangs- oder Trägerfrequenz phasenmodulieren.

■ **Störsignale:** Oszillatoren sind mit einem Rückkopplungsweg zur Generierung des gewünschten Ausgangssignals ausgestattet. In der Realität existiert jedoch eine Vielzahl solcher Rückkopplungswege, die Störschwingungen auf

zahlreichen verschiedenen Frequenzen und Amplituden verursachen.

■ **Quarzkristall-Resonanz:** In einem Quarz-Oszillator kann ein nicht genutztes Resonanzsignal des Kristalls quarzgesteuerte Störsignale (Spurious) verursachen. Das stärkste Signal wird beispielsweise als Grundsignal (Fundamental) bezeichnet, hier entstehen ungradzahlige Obertöne (z.B. 3. Oberton, 5. Oberton, 7. Oberton etc.) sowie so genannte Störsignale (Spurious), die in jedem Quarzkristall vorkommen. Ein Oszillator kann einige dieser Signale anregen und damit eine deterministische Komponente bei dem Ausgangssignal verursachen.

■ **Subharmonische:** Eine Subharmonische ist ein ganz-zahliger Teil der Ausgangsfrequenz. Ein Oszillator-Ausgangssignal, abgeleitet von einer niedrigen Frequenzquelle durch eine Art Frequenzvervielfachung, verfügt über mindestens eine Subharmonische. Die Subharmonische trägt direkt zum deterministischen Jitter des Ausgangssignals sowie zur harmonischen Verzerrung bei.

## Nichtlinearitäten als mögliche Ursachen für Harmonische

■ **Harmonische:** Harmonische können durch die Nichtlinearität irgendeines Bausteins innerhalb des Oszillatorschaltkreises generiert werden. Die hauptsächlichsten Ursachen sind jedoch mögliche pn-Übergänge, die das Signal passieren muss. Eine hohe Harmonische, z.B. die elfte Harmonische, kann einen Empfänger desensibilisieren, in dem sie in das IF-Band bzw. Empfangsfrequenzband wechselt. Harmonische Verzerrung kann ein Problem werden, wenn das Ausgangssignal des Oszillators von einem Sinussignal in ein Rechtecksignal konvertiert werden soll.

Die Ausgangssignale eines Oszillators sind nicht perfekt. Die Spezifikation und Validierung der Oszillatorleistung durch den Systementwickler bedarf einer sorgfältigen Prüfung. Zudem kann das System an sich einen Oszillator leicht durch zugeführte oder abgestrahlte Signale stören. Erfahrene RF-Techniker wissen, dass es am Besten ist, von vornherein keine unerwünschten Signale zu generieren oder zu versuchen, diese im Nachhinein herauszufiltern. (tk)

WDI Tel. +49(0)4103 18000

[www.elektronikpraxis.de](http://www.elektronikpraxis.de)

Mehr über Oszillatoren

InfoClick

349149

## Störungsquellen

### Zufällige Rauschquellen

- Thermisches Rauschen
- Schrotrauschen
- Funkelrauschen

### Deterministische Quellen

- Spannungsversorgung (Brummstörung)
- Störsignale
- Quarzkristall-Resonanz
- Subharmonische

### Harmonische Quellen

- Harmonische