

Unvermeidbare Störungen

Der Einfluss von Phasenrauschen und Jitter auf die Oszillatorleistung



In einer Ära, in der Kommunikations- und Datenübertragungstechnologien kontinuierlich an Bedeutung gewinnen, ist die Optimierung elektronischer Systeme unerlässlich. Die Anforderungen an moderne elektronische Systeme steigen stetig und setzen hohe Maßstäbe an die Präzision ihrer Komponenten. Quarzoszillatoren spielen dabei eine zentrale Rolle, indem sie als Herzstück der Systeme präzise Frequenzen bereitstellen, die für die exakte Steuerung und Synchronisation aller Prozesse notwendig sind.



Autor:
Hendrik Nielsen
Technical Sales
Specialist FCP
WDI AG
hnielsen@wdi.ag
www.wdi.ag

Doch trotz ihrer Schlüsselrolle sind auch Oszillatoren nicht frei von Störungen. Unerwünschte Rausch- und Störsignale beeinträchtigen nahezu jedes Ausgangssignal eines Oszillators. Diese Störungen können sowohl zufälliger als auch deterministischer Natur sein und betreffen sowohl die Amplitude als auch die Phase des Signals. Besonders relevant für die Leistungsfähigkeit moderner Systeme sind dabei zwei wesentliche Faktoren: Phasenrauschen und Jitter. Diese beiden Phänomene beeinflussen maßgeblich die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Taktgebern.

Phasenrauschen und Jitter

Dies sind zwei unterschiedliche, aber eng miteinander verbundene Phänomene, die die Leistung eines Oszillators beeinflussen. Phasenrauschen beschreibt die Unregelmäßigkeiten im Frequenzbereich eines Signals, die durch elektrische Störungen und kurzfristige Phasenfluktuationen entstehen. Es wird gemessen als das Rauschspektrum auf beiden Seiten der Mittenfrequenz eines Signals und ist entscheidend für die Leistung von Hochfrequenzsystemen, wie etwa bei der draht-

losen Kommunikation und in Radarsystemen. Jitter hingegen bezieht sich auf die zeitlichen Abweichungen in den Perioden eines Signals, die von der idealen Periode abweichen. Diese Abweichungen können in zwei Hauptarten auftreten: zufälliger Jitter, der über die Zeit ansteigt, und deterministischer Jitter, der durch spezifische Störungen verursacht wird.

In digitalen Systemen ist der Jitter-Wert besonders wichtig, da er die Genauigkeit der Taktung und die Integrität der Datenübertragung beeinflusst. Beispielsweise können Unregelmäßigkeiten im Takt zu Fehlern bei der Dateninterpretation führen, was die Leistung des gesamten Systems beeinträchtigen kann. In Hochfrequenzsystemen hingegen liegt der Fokus auf dem Phasenrauschen, das die Signalqualität und die Übertragungreichweite beeinträchtigen kann.

Obwohl Phasenrauschen und Jitter unterschiedliche Messgrößen sind, stehen sie in direkter Beziehung zueinander. Ein hoher Grad an Phasenrauschen führt häufig zu einem erhöhten Jitter-Effekt, da die Unregel-

mäßigkeiten im Frequenzbereich sich direkt auf die zeitliche Stabilität des Signals auswirken. Diese Wechselwirkungen zwischen Phasenrauschen und Jitter verdeutlichen, wie wichtig es ist, beide Phänomene bei der Entwicklung und Optimierung von Oszillatoren zu berücksichtigen. Ein idealer Oszillator würde demnach ein Signal ohne nennenswertes Phasenrauschen und Jitter liefern, wodurch die Gesamtleistung des Systems maximiert werden kann.

Vom perfekten zum realen Signal

Ein ideales Signal kann in seiner einfachsten Form mathematisch als reine Sinuswelle beschrieben werden:

$$V(t) = A_o \sin(2f_o t)$$

A_o = Nennspitzenspannung
 f_o = Nenngrundfrequenz
 t = Zeit

Bild 1 zeigt eine grafische Darstellung dieses idealen Signals sowohl im Frequenzbereich als auch im Zeitbereich. Im Frequenzbereich erscheint das Signal als scharfer Peak bei der Frequenz, während im Zeitbereich eine perfekte Sinuskurve dargestellt wird.

Durch das Hinzufügen von Amplitudenrauschen ergibt sich:

$$V(t) = [A_o + \varepsilon(t)] \sin(2\pi f_o t)$$

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

Bild 2 zeigt die neue Darstellung des Signals mit Amplitudenrauschen sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich. Diese Abbildung veranschaulicht, wie das Rauschen die Signalamplitude beeinflusst und die Spektralanalyse verändert.

Wenn nun zusätzlich eine zufällige Phasenkomponente eingeführt wird, lautet die modifizierte Gleichung:

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

$\Delta\phi(t)$ = Zufallsabweichung der Amplitude von dem Nenn-,Phasenrauschen"

Bild 3 zeigt die Vektordarstellung dieser Gleichung, sowohl mit festen Werten für Phasen- und Amplitudenrauschen als auch mit zufälligen Variationen in Phase und Amplitude. Diese Darstellung verdeutlicht, wie sich die zufälligen Störungen auf das Signal auswirken.

Da Oszillatoren in der Praxis oft auf der Amplitudenebene gesättigt sind, können wir die Amplitudenrauschkomponente in vielen Fällen vernachlässigen. Somit vereinfacht sich die Gleichung zu:

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

Fügen wir dieser Gleichung nun eine deterministische Komponente hinzu, die in Form eines zusätzlichen, gezielt einstellbaren Signals vorliegt, erhalten wir:

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

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

Diese Gleichung kann durch gewöhnliche Trigonometrie nicht weiter vereinfacht werden. Stattdessen wird sie häufig als Reihe von Sinusfunktionen beschrieben, oft durch Anwendung von Besselfunktionen erster Gattung, was jedoch in diesem Zusammenhang nicht weiter vertieft werden muss.

Stellen wir uns nun vor, dass sämtliche Harmonische und gegebenenfalls Subharmonische Frequenzen zu diesem Signal hinzugefügt werden. Die Rechnung erweitert sich schnell und wird komplexer:

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

Der letzte Term in der Gleichung repräsentiert eine Subharmonie. Diese kann durch das Hinzufügen weiterer Störfrequenzen erweitert werden, was die Komplexität der Gleichung weiter erhöht.

Was verursacht die Störungen?

Die letzte Gleichung zeigt, dass ein Oszillator ein Signal produziert, das durch zahlreiche Faktoren beeinflusst wird. Dazu gehören sowohl zufällige als auch deterministische Phasenvariationen sowie verschiedene harmonische und subharmonische Komponenten. Diese unterschiedlichen Einflussfaktoren tragen erheblich zur Komplexität des erzeugten Signals bei. Doch woher kommen all diese Signal- und Rauschquellen in einem Oszillator?

Zufällige Rauschquellen

Die zufälligen Rauschkomponenten eines Oszillators stammen hauptsächlich aus drei wesentlichen Quellen:

- **Thermisches Rauschen**

Auch als kTB-Rauschen bekannt, resultiert dieses Phänomen aus der zufälligen Bewegung von Elektronen aufgrund thermischer Effekte. Es ist temperaturabhängig und nimmt mit steigender Temperatur, Bandbreite und Widerstand zu. Dieses Rauschen ist in jeder elektronischen Komponente vorhanden und kann die Signalqualität beeinträchtigen, insbesondere bei tiefen Frequenzen.

- **Schrottrauschen**

Auch Stromrauschen genannt, entsteht dieses durch diskontinuierlichen Stromfluss, der über pn-Übergänge (potentielle Barrieren) fließt. Dieses Rauschen ist vor allem in Halbleiterbauelementen ausgeprägt und führt zu zufälligen Schwankungen im Stromfluss, die die Präzision eines Oszillators beeinflussen können.

- **Funkelrauschen**

Dieses Rauschen folgt dem 1/f-Gesetz und tritt sowohl in aktiven als auch in einigen passiven Komponenten wie Kohlewiderständen auf. Im Vergleich zu anderen Rauschquellen kann es über einen breiten Frequenzbereich hinweg auftreten und beeinflusst die Signalintegrität durch seine spektrale Verteilung.

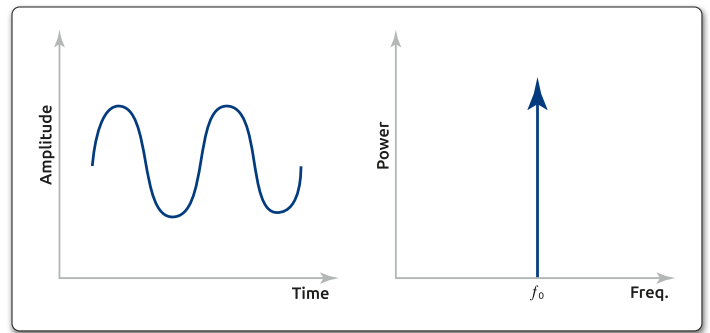


Bild 1: Signal eines idealen Oszillators im Frequenz- und im Zeitbereich

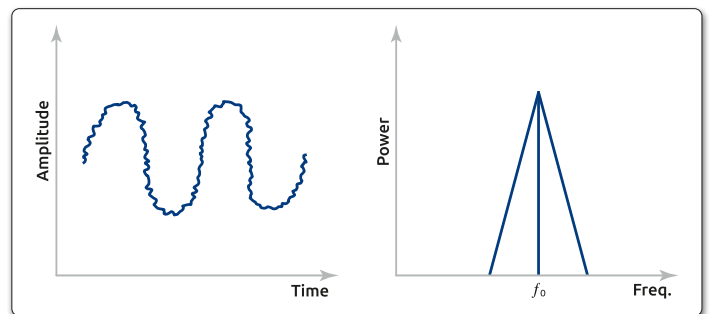


Bild 2: Signal eines rauschenden Oszillators im Frequenz- und im Zeitbereich

Das Phasenrauschen nahe der Mittenfrequenz eines Oszillators ist direkt proportional zur Güte des frequenzbestimmenden Resonators. Ein höherer Q-Wert des Resonators führt zu geringerem Phasenrauschen, da er die Rauschkomponenten minimiert und die Signalstabilität erhöht. Insgesamt setzt sich das Grundrauschen aus der Summe aller Rauschquellen innerhalb der Oszillatorschaltung zusammen und wird als weißes Rauschen bezeichnet. Weißes Rauschen zeichnet sich durch eine gleichmäßige Spektraldichte über einen weiten Frequenzbereich aus.

Deterministische Rauschquellen

Die deterministische Komponente können verschiedene Ursprünge haben:

- **Brummstörungen durch Spannungsversorgung**

Unregelmäßigkeiten in der Spannungsversorgung können zu Störungen im Oszillator führen, indem sie unerwünschte Signale in den Rückkopplungsweg einbringen. Dies kann die Ausgangs- oder Trägerfrequenz beeinträchtigen und zu Phasenmodulationen führen.

- **Störsignale aus dem Rückkopplungsweg**

Während Oszillatoren durch Rückkopplung das gewünschte Ausgangssignal erzeugen, können zusätzliche Rückkopplungswege Störungen verursachen. Diese Störsignale treten auf verschiedenen Frequenzen und mit unterschiedlichen Amplituden auf.

- **Resonanz im Quarzkristall**

In Oszillatoren, die auf Quarzkristallen basieren, können nicht genutzte Resonanzsignale des Kristalls Störsignale (Spurious) erzeugen. Neben dem Hauptsignal, auch Grundsignal (Fundamental) genannt, entstehen dabei ungeradzahlige Obertöne und andere Störsignale, die zur deterministischen Komponente des Ausgangssignals beitragen.

- **Subharmonische Frequenzen**

Subharmonische Frequenzen sind Brüche der Hauptfrequenz und entstehen oft durch Frequenzvervielfachung. Diese Subharmonischen tragen zur deterministischen Jitter-Komponente und zu harmonischen Verzerrungen im Ausgangssignal bei.

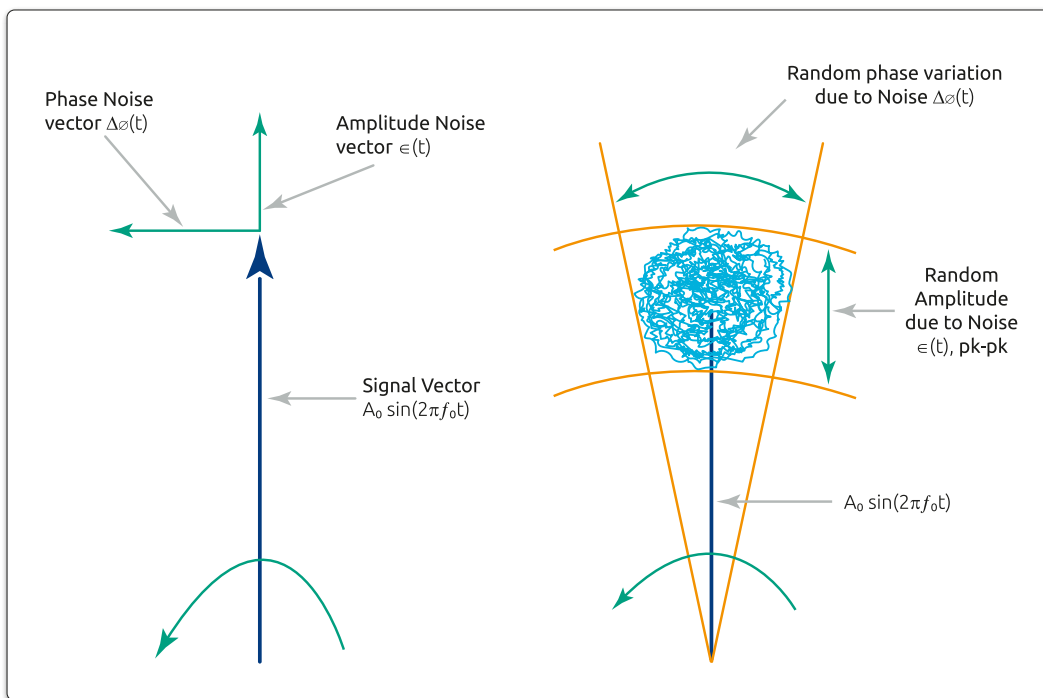


Bild 3: Vektordarstellung des Signals gemäß dritter Gleichung mit Festwerten des Phasen- und Amplitudenrauschens (links) sowie mit rauschbedingten, zufälligen Variationen von Phase und Amplitude (rechts)

• Harmonische Quellen

Harmonische Verzerrungen entstehen typischerweise durch Nichtlinearitäten innerhalb der Schaltung eines Oszillators. Diese Verzerrungen entstehen, wenn das Signal durch Bauteile wie pn-Übergänge fließt, die nicht perfekt linear sind. Solche Nichtlinearitäten erzeugen zusätzliche Frequenzen, die als Harmonische bezeichnet werden.

Ein häufiges Problem tritt auf, wenn hohe Harmonische, wie

etwa die elfte Harmonische, in Frequenzbänder gelangen, die für den Empfänger von Bedeutung sind, wie das Zwischenfrequenzband (IF) oder das Empfangsfrequenzband. Dies kann zu einer Desensibilisierung des Empfängers führen, da diese zusätzlichen Frequenzen die gewünschte Signalinformation überlagern oder stören können.

Ein weiteres Problem entsteht bei der Umwandlung des Ausgangssignals eines Oszillators von einem Sinussignal in

ein Rechtecksignal. Hier können Harmonische Verzerrungen zu unerwünschten Effekten führen, da die Umwandlung zusätzliche harmonische Komponenten einführt, die das Signal verfälschen können.

Auf die richtige Auswahl des Taktgebers kommt es an

Die Ausgangssignale eines Oszillators sind nie völlig ideal oder störungsfrei. Systementwickler müssen daher sorgfältig die Spezifikationen und die Leistung der

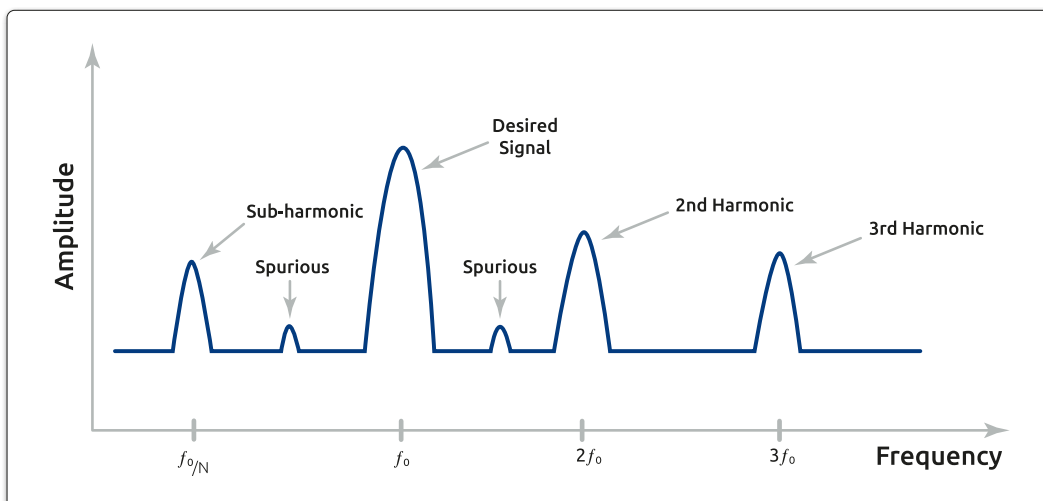


Bild 4: Typisches Ausgangsspektrum eines realen Oszillators

Oszillatoren prüfen, um sicherzustellen, dass sie den Anforderungen des Systems entsprechen. Externe Störungen, sowohl durch zugeführte als auch durch abgestrahlte Signale, können die Performance eines Oszillators beeinträchtigen. Daher ist es entscheidend, unerwünschte Signale zu minimieren oder sie gegebenenfalls nachträglich herauszufiltern. Phasenrauschen und Jitter sind in der Hochtechnologie besonders kritisch, da sie die Leistung in Bereichen wie drahtloser Kommunikation, Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung und Radarsystemen erheblich beeinflussen können. Diese Effekte führen zu Signalfehlern, reduzieren die Übertragungsqualität und begrenzen Datenraten und Reichweiten. Daher sind präzise und zuverlässige Taktgeber unerlässlich, um stabile Referenzfrequenzen bereitzustellen, exakte Frequenzabstimmungen zu ermöglichen und Phasenrauschen zu minimieren.

Die Optimierung eines Systems hängt stark von der richtigen Auswahl und dem Design der Frequenzsteuerungskomponenten ab. Die Wahl der geeigneten Oszillatoren ist entscheidend für die Leistung hinsichtlich Phasenrauschen und Jitter. In Zeiten, in denen Systeme einen stabilen, unverfälschten Takt erfordern, zeigen sich quarzgesteuerte Oszillatoren als besonders leistungsfähig.

Die WDI AG unterstützt Sie umfassend bei der Auswahl des idealen Taktgebers, sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht. Das Quarzfinder-Tool auf www.quarzfinder.de bietet Ihnen Zugang zu über 1000 Produkten inklusive Datenblättern und hilft Ihnen, den passenden Quarz, Resonator, Oszillator oder Echtzeituhr-Modul zu finden. Zudem erleichtert der Cross-Reference-Service die Suche nach baugleichen Alternativen und Ersatzteilen. ◀