

wdi ag

## Die unsichtbaren Feinde der Taktgenauigkeit

Die Auswirkungen von Phasenrauschen und Jitter auf elektronische Systeme und Messmethoden.

### CMOS 2.0: Die Revolution

CMOS 2.0 bietet höhere Flexibilität in der System-Optimierung und integriert Heterogenität in SoCs.

### Geschwindigkeit mit COM-HPC 1.2

Die neueste Revision der PICMG stellt einen kleinen, leichten Mini-Formfaktor mit Leistungsstärke vor.

### Richtige Balance in der Lieferkette

Unternehmen müssen ihre Lieferketten neu aufstellen, um sich regional und global behaupten zu können.

Neues Design  
Gleicher Schwerpunkt

**DigiKey**

Einzelheiten  
auf der  
Innenseite.

## TITELSTORY

## Auswahl des richtigen Taktgebers

Phasenrauschen und Jitter können die Leistung von Anwendungen wie drahtloser Kommunikation, Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung und Radarsystemen erheblich beeinträchtigen. Diese Phänomene führen zu Fehlern, mindern die Qualität des Signals und limitieren die erreichbaren Datenraten sowie Übertragungreichweiten. Um den negativen Auswirkungen von Phasenrauschen und Jitter entgegenzuwirken, sind präzise und zuverlässige Taktgeber unerlässlich. Sie liefern stabile Referenzfrequenzen, ermöglichen eine exakte Frequenzabstimmung und zeichnen sich durch minimale Phasenrauscheigenschaften aus, um Synchronisationsfehler zu minimieren und die Integrität des Signals zu gewährleisten.

## PHASENRAUSCHEN UND JITTER

# Die unsichtbaren Feinde der Taktgenauigkeit

In diesem Beitrag werden wir uns eingehend mit zwei entscheidenden Faktoren befassen, welche die Leistung moderner elektronischer Systeme maßgeblich beeinflussen: Phasenrauschen und Jitter.

Die Kommunikation über große Entfernungen und die Datenübertragung werden immer einfacher und schneller. Um mit dieser dynamischen Entwicklung mithalten zu können, müssen wir unsere elektronischen Systeme stetig verbessern. Schnellere Internet- und Mobilfunkverbindungen sind gefragter denn je und stellen hohe Anforderungen an die entsprechenden Endgeräte. Quarzoszillatoren spielen dabei als Herzstück vieler elektronischer Geräte eine entscheidende Rolle, indem sie mit präzisen Frequenzen den Herzschlag des Systems bereitstellen, der für die Abstimmung und Steuerung aller Prozesse erforderlich ist.

Wenn wir die Toleranzgrenzen von Quarzoszillatoren ausloten, stoßen wir auf zwei verschiedene, aber miteinander verbundene Phänomene: Phasenrauschen und Jitter. Beide sind von entscheidender Bedeutung für die Leistung elektronischer Systeme. Ihre Relevanz hängt dabei von der jeweiligen Methode der Datenübertragung ab. Während Hf-Ingenieure in der Regel das Phasenrauschen im Blick haben, konzentrieren sich Entwickler digitaler Systeme eher auf Jitter.

Sowohl Phasenrauschen als auch Jitter beeinträchtigen die Genauigkeit der Taktgebung und dienen als Indikatoren für die Qualität der Frequenz und die Integrität des Zeitsignals. Sie stehen in direkter Beziehung zueinander und ermöglichen es uns, die zeitliche Instabilität in einem Takt oder Datenstrom auf Systemebene zu beschreiben. Phasenrauschen entsteht durch elektrische Störungen

aufgrund kurzfristiger Phasenfluktuationen in einem Signal, die wiederum durch zeitliche Unregelmäßigkeiten verursacht werden. Jitter beschreibt die Abweichung der Signalimpulse in einem Hochfrequenzsignal, die sich auf die Amplitude, das Phasentiming oder die Breite des Signalimpulses beziehen kann. Phasenrauschen und Jitter sind zwei unterschiedliche Messungen derselben Information über die Taktleistung. Während Phasenrauschen im Frequenzbereich gemessen wird, betrachtet Jitter die Leistung im Zeitbereich. Lassen Sie uns nun die Definition und Messung von Phasenrauschen und Jitter im Zusammenhang mit der Taktgebung in elektronischen Schaltungen genauer betrachten.

## Was ist Phasenrauschen?

Unter Phasenrauschen versteht man die Messung des Rauschspektrums auf beiden Seiten eines Signals, das an die Mittenfrequenz oder den Grundtakt im Frequenzbereich angrenzt. Denken Sie an eine Gruppe von Menschen, die im Gleichschritt gehen, um eine Parade zu bilden. Wenn alle im perfekten Gleichschritt sind, ist die Parade schön synchronisiert und ordentlich. Das Phasenrauschen könnte man nun mit kleinen, zufälligen Schwankungen in den Schritten einiger Teilnehmenden vergleichen, die dazu führen, dass die Parade nicht mehr ganz so ordentlich wirkt. Diese kleinen Schwankungen können dazu führen, dass die synchronisierte Bewegung leicht



Bild: WDI

VERFASST VON  
**Hendrik Nielsen**  
Technical Sales  
Specialist FCP  
WDI

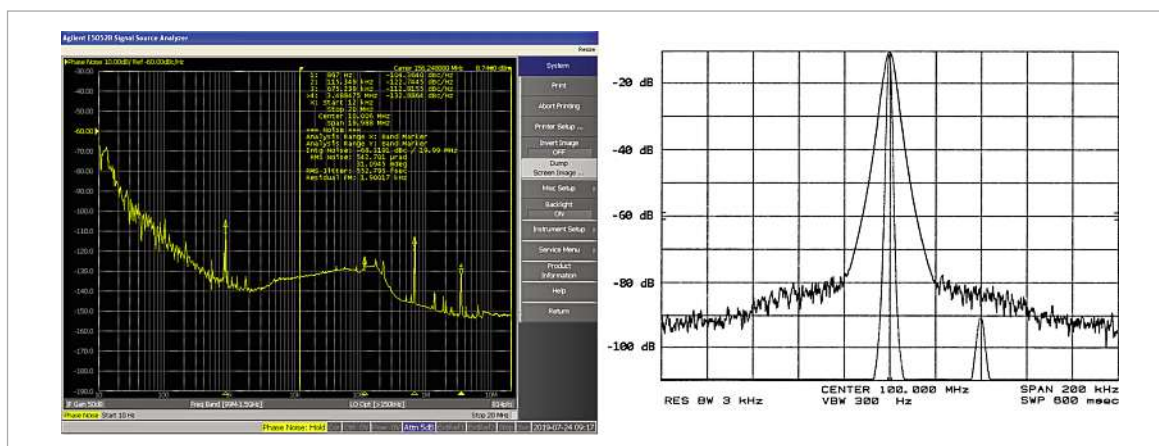


Bild 1: Darstellung des Phasenrauschens auf einem Spektralanalysator und einem Oszilloskopdiagramm.

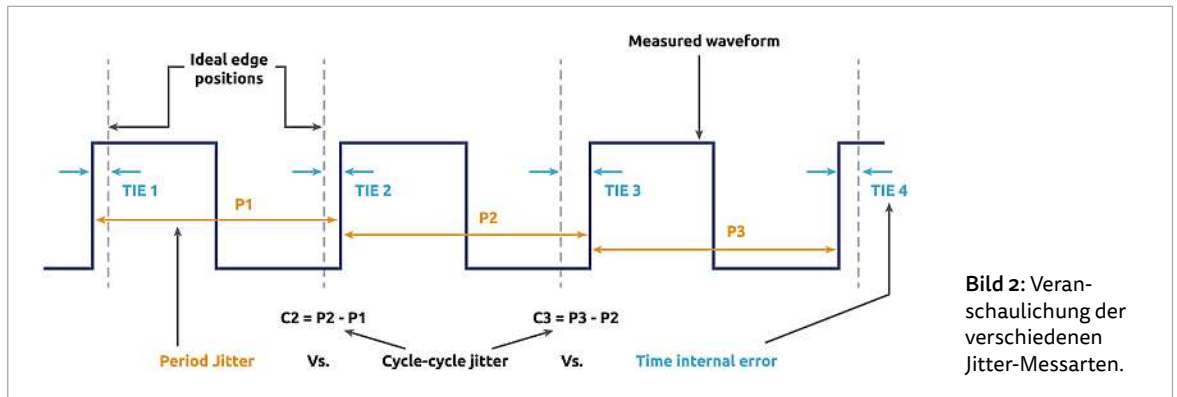


Bild: WDI

gestört wird, ähnlich wie das Phasenrauschen die Präzision eines elektronischen Signals beeinflussen kann. Es ist das Ergebnis von Jitter, der durch zufällige Phasenschwankungen des Signals entsteht. Die Pegel der Signalphase oder -frequenz werden in der Bandbreite der Spektrallinie abgebildet. Je größer die zeitliche Instabilität ist, desto breiter ist die Spektrallinie. Um das Phasenrauschen zu definieren, müssen drei Elemente festgelegt werden:

- **Amplitude des Phasenrauschens:** Die Stärke des Phasenrauschens wird in dB im Vergleich zur Mittenfrequenz angegeben. Zum Beispiel bedeutet  $-50$  dBc, dass das Rauschen 50 Dezibel schwächer ist als die Mittenfrequenz. Diese Messmethode wird verwendet, weil das Rauschen normalerweise mit der Mittenfrequenz variiert. Wenn sich das Rauschen mit der Mittenfrequenz ändert, kann die Spezifikation angeben, dass das Rauschen bei einem bestimmten Mittenfrequenzpegel  $-n$  dBc beträgt.
- **Frequenzversatz (Offset) von der Mittenfrequenz:** Ein wesentlicher Bestandteil der Phasenrauschen-Spezifikation. Dabei handelt es sich um den Abstand von der Mittenfrequenz, bei dem das Phasenrauschen einen bestimmten Pegel erreicht hat. Dies liegt daran, dass der Rauschpegel je nach dem Frequenzversatz von der Mittenfrequenz variiert. In der Regel steigt das Phasenrauschen mit zunehmender Nähe zur Mittenfrequenz viel schneller an und fällt dann ab, bis es schließlich einen Rauschpegel erreicht. Üblicherweise werden Frequenzversätze von 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz usw. angegeben.
- **Die Bandbreite der Messung:** Die Rauschleistung ist proportional zur Bandbreite, weshalb es wichtig ist, die verwendete Bandbreite anzugeben. Je weiter die verwendete Bandbreite ist, desto größer ist der Rauschpegel, der durch den Filter gelangt und gemessen wird. Die Bandbreite von 1 Hz hat sich als am besten geeignet für die Spezifikation des Phasenrauschens erwiesen, da sie es ermöglicht, den Rauschpegel leicht auf andere Bandbreiten zu beziehen. Daher hat sich dieses Format für die Spezifikation des Phasenrauschens nahezu universell durchgesetzt. Spektralanalysatoren können nicht direkt in einer Bandbreite von 1 Hz messen, da dies eine sehr schmale Filterbandbreite erfordern würde. Stattdessen messen sie das Signal in einer breiteren Bandbreite und passen den Pegel mathematisch an den einer 1-Hz-Bandbreite an.

Eine typische Spezifikation für das Phasenrauschen eines Quarzoszillators könnte beispielsweise  $-100$  dBc/Hz

bei einem Offset von 100 kHz lauten. Für eine vollständige Phasenrauschenspezifikation werden mehrere Punkte angegeben, um eine Vorstellung vom Phasenrauschen an verschiedenen Stellen zu geben, üblicherweise an Punkten, die sich um den Faktor zehn unterscheiden: 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz usw.

Phasenrauschen ist ein Phänomen, das in gewissem Maße bei allen Signalen vorhanden ist. Während für die meisten Anwendungen das Ausmaß des Phasenrauschens keine entscheidende Rolle spielt, kann es in anderen, wie beispielsweise in SONET, Hf-Kommunikation und Mobilkommunikation, von entscheidender Bedeutung für den Gesamtbetrieb des Systems sein. Die Reduzierung des Phasenrauschens kann durch die sorgfältige Auswahl des Oszillators und eine präzise Platzierung auf der Leiterplatte erreicht werden. Mit den zunehmenden Anforderungen an Systeme jeglicher Art gewinnt das Phasenrauschen als Parameter zunehmend an Bedeutung.

## Was ist Jitter?

Jitter, einer der kritischsten Aspekte der Taktleistung, bezieht sich auf die Unregelmäßigkeiten in den Perioden eines Signals im Vergleich zu seiner idealen Symmetrie. Stellen Sie sich vor, Sie haben einen Wasserhahn, der normalerweise in regelmäßigen Abständen Tropfen fallen lässt. Nun stellen Sie fest, dass manchmal die Tropfen in unregelmäßigen Abständen kommen oder sogar manchmal in unterschiedlichen Größen fallen. Dieses unregelmäßige Tropfen ist vergleichbar mit dem Jitter in einem elektronischen Signal. Es gibt verschiedene Formen von Jitter: Flanken- oder Phasenjitter, gemessen als Fehler im Zeitintervall, und Period Jitter oder Cycle-to-Cycle Jitter, der die Unterschiede zwischen den Perioden benachbarter Zyklen beschreibt. Jitter kann in zwei Varianten auftreten: Zufälliger Jitter, dessen Spitzenwerte im Laufe der Zeit zunehmen, und deterministischer Jitter, bei dem die Jitterelemente miteinander verbunden sind und nicht mit der Zeit zunehmen. Leider gibt es keinen Industriestandard für die Messung von Jitter. Obwohl es verschiedene anerkannte Methoden gibt, um das Jitter-Niveau in Taktsignalen zu bestimmen, variieren die Ergebnisse je nach verwendetem Testequipment, deren Anschluss und der spezifischen Testbedingungen erheblich. Obwohl die JEDEC-Normen Definitionen und vorgeschlagene Testbedingungen bieten, besteht keine Konsistenz zwischen den Messungen verschiedener Prüfgeräte.

Für Jitter-Tests benötigen Sie in der Regel das zu testende Bauteil, einen Referenzoszillator mit stabilerer Leis-

tung als das zu testende Bauteil und eine saubere Stromversorgung, um genaue und reproduzierbare Tests zu gewährleisten. Diese Tests sollten mit kalibrierten Messgeräten wie einem Oszilloskop, Frequenzzähler oder einem Signalintegritätsanalysator durchgeführt werden.

Messungen von Jitter im Zeitbereich können mit einem Oszilloskop durchgeführt werden, da es eine einfache Darstellung von Wellenformen und Impulsen ermöglicht. Die meisten Anbieter bieten Jitter-Messpakete gegen einen zusätzlichen Aufpreis an. Ein Hochgeschwindigkeits-Oszilloskop (1 GHz+) mit einer hohen Abtastbandbreite (10 GS/s+) sollte ausreichen, um die gewünschten Daten zu erfassen. Dabei ist zu beachten, dass Jitter-Messungen im Zeitbereich, insbesondere Period Jitter und Cycle-to-Cycle Jitter, zufällig sind und als Mittelwert über eine Anzahl von Proben angegeben werden. Die JEDEC-Norm 65 schreibt mindestens 1.000 Proben vor, wobei von den meisten Ingenieuren aber eine Messung über 10.000 Proben bevorzugt wird.

Unter Period Jitter versteht man die Differenz zwischen einer gemessenen Taktperiode und der idealen Periode. Da die Bestimmung einer idealen Periode oft schwierig ist, wird in der Praxis häufig die durchschnittlich beobachtete Periode als Referenz genommen. Dies ist eine gängige Praxis für Hersteller von frequenzgebenden Bauteilen, um genauere Spezifikationen bereitzustellen. Das Standardverfahren zur Messung des Period Jitters besteht darin, die Dauer einer Taktperiode zufällig 10.000 Mal zu messen und die aufgezeichneten Daten zu verwenden, um den Mittelwert, die Standardabweichung und die Peak-to-Peak-Werte zu berechnen. Aufgrund des zufälligen Auftretens des Period Jitters können die Peak-to-Peak-Werte stark variieren, daher ist es möglicherweise erforderlich, den Period Jitter mehrmals zu messen, um einen genauen Durchschnittswert zu erhalten.

Die Messung des Cycle-to-Cycle Jitters erfordert die Messung der Dauer von zwei vollen Taktperioden 10.000 Mal und die Berechnung der Differenz zwischen ihnen. Die aufgezeichneten Daten werden verwendet, um den Mittelwert und die Standardabweichung zu berechnen. Der Spitzenwert ist einfach die größte beobachtete Differenz zwischen den Perioden. Wie bereits erwähnt, können die Peak-to-Peak-Werte beim Bestimmen des Period Jitters stark variieren, weswegen der Cycle-to-Cycle Jitter oft mehrmals erneut getestet wird, um einen Durchschnittswert zu erhalten.

Um den TIE Jitter (Time Intervall Error) von Oszillatoren zu messen, benötigt man ein hochpräzises Oszilloskop mit

einer sehr geringen Jitter-Spezifikation. Das Oszilloskop muss an eine externe Referenzquelle angeschlossen werden, die als genauer Zeitmesser fungiert. Anschließend wird das Signal des Oszillators mit dem Referenzsignal synchronisiert, indem ein Trigger auf eine steigende oder fallende Flanke gelegt wird. Die Messung des TIE-Jitters besteht darin, die Zeitdifferenz zwischen der tatsächlichen und der erwarteten Position jeder Flanke zu erfassen. Diese Differenz stellt den TIE-Wert für jeden Zyklus dar. Der TIE-Jitter wird als maximale Abweichung aller TIE-Werte von null definiert. Zur besseren Verständlichkeit der statistischen Natur des Jitters kann der TIE-Jitter auch in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion oder eines Histogramms dargestellt werden.

## Die richtige Auswahl des Taktgebers

In der Welt der Hochtechnologie können Phasenrauschen und Jitter die Leistung von Anwendungen wie drahtloser Kommunikation, Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung und Radarsystemen erheblich beeinträchtigen. Diese Phänomene führen zu Fehlern, mindern die Qualität des Signals und limitieren die erreichbaren Datenraten sowie Überreichweiten. Um den negativen Auswirkungen von Phasenrauschen und Jitter entgegenzuwirken, sind präzise und zuverlässige Taktgeber unerlässlich. Sie liefern stabile Referenzfrequenzen, ermöglichen eine exakte Frequenzabstimmung und zeichnen sich durch minimale Phasenrauschenscharakteristika aus, um Synchronisationsfehler zu minimieren und die Integrität des Signals zu gewährleisten.

Die Kunst der Systemoptimierung liegt oft in der sorgfältigen Abstimmung zwischen Auswahl und Design der richtigen Frequenzsteuerungskomponenten. Diese Entscheidungen haben einen tiefgreifenden Einfluss auf die erzielbare Leistung in Bezug auf Phasenrauschen und Jitter. Es bedarf einer gewissen Erfahrung und Raffinesse, die Stabilität des Oszillators und die Bandbreite genau abzuwägen. Schließlich offenbart sich, dass in einer Ära, in der die Systemanforderungen nach einem unverfälschten, stabilen Takt verlangen, nur der quartzgesteuerte Oszillator die kritische Jitterleistung erbringen kann, die für viele moderne Anwendungen unerlässlich ist.

Unterstützung bei der Auswahl des, sowohl wirtschaftlich als auch technisch gesehen, idealen Taktgebers für Ihr System bieten die Spezialisten von WDI. Ob Neu-Design oder Re-Design – schon ab dem Design-In sind sie behilflich, zeigen baugleiche Alternativen und „Second Sources“ auf und empfehlen besonders gängige Bauformen und Spezifikationen. Von der Erstmusterung und eventuell notwendigen Schaltungsanalyse, über die Prototypen- und Vorserienbelieferung bis hin zur klassischen Distributionsdienstleistung während der Serienfertigung. Mit dem Quarzfinder bietet WDI dem Anwender ein nützliches Online-Suchwerkzeug um ihn aktiv bei der Auswahl des passenden Quarzes, Resonators, Oszillators oder Real-Time-Clock-Moduls zu unterstützen. Unter [www.quarzfinder.de](http://www.quarzfinder.de) sind mehr als 1.000 Produkte inklusive Datenblätter zu finden. Auf einen Blick erhält der Interessent sämtliche bei WDI erhältlichen Frequenzgeber, aufgelistet nach Spezifikationen. Neben der Möglichkeit, nach vorhandenen Spezifikationen zu filtern, wird die Produktsuche zusätzlich durch die Recherchefunktion „Cross-Reference“ erleichtert. Anhand des Herstellers bzw. Anbieters oder der Produktserie werden alle bei WDI verfügbaren baugleichen Alternativen aufgezeigt. (tk)

**Bild 3:** Beispiel für die Darstellung eines TIE-Histogramms.

