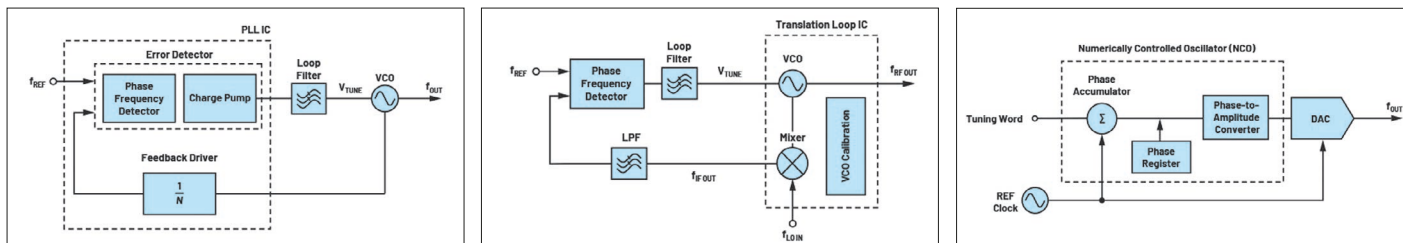


# Das richtige Bauteil zur Frequenzerzeugung auf einfache Weise auswählen

Im folgenden Beitrag geht es um die wichtigsten Arten von Frequenzerzeugungs-Bauteilen, die verschiedene Funktionen in der HF-Signalkette erfüllen.



Vereinfachte Blockschaltungen: PLL (links), Translation Loop (Mitte) und DDS

Die Leistungsmerkmale von Bauteilen zur Frequenzerzeugung richtig zu verstehen, ist Voraussetzung für die Wahl der für einen Anwendungsfall am besten geeigneten Lösung. Dieser kurze Leitfaden hilft HF-Systemingenieuren, das richtige Bauteil zu wählen.

## Wichtige Leistungskriterien

Definieren wir zunächst die Kriterien, die typischerweise zur Charakterisierung der Leistungsdaten von Bauteilen zur Frequenzerzeugung verwendet werden. Die wichtigste Spezifikation, mit der der Auswahlprozess normalerweise beginnt, ist der Ausgangsfrequenzbereich.

Es gibt eine große Vielzahl von Bauteilen, die Frequenzen über das gesamte Spektrum erzeugen und dabei Bereiche unterstützen, die auf einen einzigen Ton beschränkt sind oder mehrere Oktaven umfassen. Bei der Auswahl eines Bauteils entsprechend der Ausgangsfrequenzen ist jedoch zu bedenken, dass die Breitband- und Hochfrequenzfähigkeiten häufig zu Ungunsten anderer grundlegender Eigenschaften wie Frequenzstabilität, spektrale Reinheit des Ausgangs und Schaltgeschwindigkeit gehen. Die Frequenzstabilität ist ein Maß für die kurz- und langfristigen Schwankungen des Ausgangssignals. Die kurzfristige Stabilität bezieht sich auf Schwankungen, die wesentlich kleiner sind als eine vollständige Signalperiode. Diese Schwankungen werden mit den Spezifikationen Phasenjitter und Phasenrauschen ausgedrückt.

Der Phasen-Jitter definiert kleine Schwankungen in der Phase eines Signals im Zeitbereich, während das Phasenrauschen der spektralen Darstellung dieser Schwankungen entspricht, die durch den relativen Rauschleistungspegel in einer Bandbreite von 1 Hz bei verschiedenen Abständen zur Trägerfrequenz beschrieben wird. Falls die Frequenzschwankungen über einen längeren Zeitraum auftreten, spricht man normalerweise von der Langzeitstabilität, wel-

che die Drift der Ausgangsfrequenz (in ppm) aufgrund verschiedener Aspekte wie Temperatur, Lastbedingungen und Alterung beschreibt.

Die spektrale Reinheit ist eine weitere wichtige Spezifikation, die bei der Bauteilauswahl zu berücksichtigen ist. Sie gibt den Störungsgehalt im Ausgangsspektrum eines Bauteils an, der normalerweise durch den Pegel der Oberwellen und Durchgangsanteile relativ zum Pegel der Grundfrequenz quantifiziert wird.

Neben der Stabilität und der spektralen Reinheit des Ausgangssignals ist die Schaltgeschwindigkeit (auch Einschwingzeit oder Sperrzeit genannt) ein weiterer typischer Parameter, der Kompromisse bezüglich anderer Spezifikationen verlangt und bei der Wahl der optimalen Lösung für die Frequenzerzeugung zu berücksichtigen ist. Die Schaltgeschwindigkeit gibt an, wie viel Zeit das Bauteil benötigt, um von einer Frequenz auf eine andere umzuschalten. Diese Anforderung kann je nach Endanwendung stark variieren.

## Die wichtigsten Arten von Bauteilen

Nach dieser Definition der wichtigsten Leistungskriterien für die Charakterisierung von Bauteilen zur Frequenzerzeugung

erfolgt nun ein kurzer Überblick über ihre Haupttypen, die unterschiedliche, mit den Leistungsmerkmalen verbundene Eigenschaften aufweisen. Der Überblick soll letztlich als Leitfaden für die Auswahl des richtigen Bauteiltyps dienen, der die Anforderungen der Zielanwendung erfüllt.

Ein Quarzoszillator (XO) ist ein Bauteil, welches einen piezoelektrischen Resonator (in der Regel ein Quarz (XTAL)) nutzt, um eine feste Ausgangsfrequenz von einigen Kilohertz bis zu mehreren hundert Megahertz zu erzeugen. Bei dem speziellen, spannungsgesteuerten Quarzoszillator (VCXO) lässt sich, um Feineinstellungen zu vorzunehmen, die Ausgangsfrequenz um einen sehr geringen Betrag ändern. Quarzoszillatoren sind elektromechanische Umformer mit extrem hoher Güte (Q), die Werte von 100.000 übersteigen kann. Dies führt zu einer sehr stabilen Ausgangsfrequenz mit sehr geringem Phasenrauschen. Quarzoszillatoren sind hinsichtlich ihrer maximalen Ausgangsfrequenz und Abstimmfähigkeit begrenzt. Allerdings ist dieser Oszillatortyp die perfekte Wahl, wenn anderen Arten von Bauteilen eine präzise Referenz zur Verfügung gestellt werden soll, um wesentlich höhere Frequenzen zu erzeugen.

## Der spannungsgesteuerte Oszillator (VCO)

Der VCO ist ein anderer Bauteiltyp zur Frequenzerzeugung, der auf LC-Resonanzkreisen beruht. Elektrische Schaltungselemente bieten gegenüber Quarzen deutlich niedrigere Gütefaktoren (typischerweise um den Faktor 1.000 weniger), ermöglichen jedoch wesentlich höhere Ausgangsfrequenzen und weite Abstimmbereiche. Der VCO erzeugt ein Ausgangssignal, dessen Frequenz sich durch eine externe Eingangsspannung steuern lässt. Der Kern eines VCO kann verschiedene Resonanzkreise nutzen.

Single-Core-VCOs, die mit Resonatoren mit hoher Güte arbeiten, bieten ein geringes Phasenrauschen über einen begrenzten Frequenzbereich. Für einen niedrigeren Gütefaktor konzipierte Oszillatoren hingegen, adressieren einen Breitbandbetrieb mit mittelmäßigem Rauschverhalten.

Multiband-VCOs, die mit mehreren geschalteten Resonatorschaltungen mit hoher Güte arbeiten, sind eine Kompromisslösung, die einen Breitbandbetrieb und ein geringes Phasenrauschen ermöglicht. Dies geht jedoch auf Kosten einer niedrigeren Abstimmgeschwindigkeit, die durch die für das Umschalten zwischen den verschiedenen Cores erforderliche Zeit begrenzt ist. VCOs sind eine hervorragende Allround-Lösung, liefern aber im Allgemeinen kein stabiles Ausgangssignal. Daher kommen VCOs häufig in Verbindung mit Phasenregelkreisen zum Einsatz, um die Stabilität der Ausgangsfrequenz zu optimieren [1].

## Phasenregelschleife (PLL)

Die PLL ist eine Schaltung, welche die Stabilität einer VCO-Ausgangsfrequenz sicherstellt, und die in vielen Anwendungen zur Frequenzsynthese und Takt-rückgewinnung benötigt wird. Wie das Bild links zeigt, enthält die PLL einen Phasendetektor, der eine durch N geteilte Version der VCO-Frequenz mit der

Referenzfrequenz vergleicht und das Differenzgangsignal zur Anpassung der an die Abstimmleitung des VCO angelegten Gleichstrom-Steuerspannung verwendet. Dies ermöglicht, jegliche Frequenzdrift sofort zu korrigieren und hält somit den stabilen Betrieb des Oszillators aufrecht.

Ein typischer PLL-IC enthält einen Fehlerdetektor (einen Phasenfrequenzdetektor mit Ladungspumpe) und einen Rückkopplungsteiler (gestrichelte Linie). Außerdem sind ein zusätzlicher externer Schleifenfilter, eine präzise Referenzfrequenz und ein VCO erforderlich, um ein vollständiges Rückkopplungssystem für eine stabile Frequenzerzeugung zu erhalten. Die Realisierung dieses Systems lässt sich mit Synthesizer-ICs mit integriertem VCO erheblich vereinfachen [1, 2].

## Synthesizer mit integriertem VCO

Diese Baugruppen enthalten PLL und VCO in einem Gehäuse und benötigen nur eine externe Referenz sowie einen Schleifenfilter, um die gewünschte Funktion zu realisieren.

Der integrierte PLL-Synthesizer ist eine vielseitige Lösung mit einem breiten Spektrum an digitalen Steuerungseinstellungen für eine genaue Frequenzerzeugung. Das PLL-Bauteil kann integrierte Leistungsteiler, Frequenzvervielfacher, Frequenzteiler und Nachlaufilter enthalten, um eine Frequenzabdeckung von bis zu mehreren Oktaven über den Grundtonbereich des integrierten VCO hinaus zu ermöglichen. Die jeweiligen Parameter der genannten Bauteile bestimmen den Ausgangsfrequenzbereich, das Phasenrauschen, den Jitter, die Verriegelungszeit und andere Merkmale, welche die Gesamtleistung der Synthesizerschaltung kennzeichnen [1].

## Die Translation Loop

Dies ist eine andere Art von Synthesizer-Lösung auf Basis des PLL-Konzeptes, die jedoch mit einem anderen Ansatz im-

plementiert wird. Wie das mittlere Bild zeigt, wird hier eine integrierte Abwärtsmischstufe anstelle eines N-Teilers in der Rückkopplungsschleife verwendet, um die Schleifenverstärkung auf 1 zu setzen und das In-Band-Phasenrauschen zu minimieren.

Translation-Loop-ICs (gestrichelte Linie im mittleren Bild) sind für äußerst jitterempfindliche Anwendungen konzipiert und ermöglichen zusammen mit einem externen Phasenfrequenz-Detektor (PFD) und einem Lokaloszillator (LO) eine vollständige Frequenzsyntheselösung mit messtechnischer Leistungsfähigkeit im kompakten Formfaktor [1].

## Direkte digitale Synthese (DDS)

Eine direkte digitale Synthese ist eine Alternative zu integrierten PLL-Synthesizern, die nach einem anderen Konzept realisiert wird. Die grundlegende DDS-Architektur ist im Bild rechts schematisch dargestellt. Ein DDS-Gerät ist ein digital gesteuertes System mit einer hochgenauen Referenzfrequenz, die ein Taktsignal liefert, einem numerisch gesteuerten Oszillator (NCO), der eine digitale Version der Zielwellenform erzeugt, und einem DAC, der den Analogausgang bereitstellt.

DDS-ICs bieten Leistungsmerkmale wie hohe Schaltgeschwindigkeiten, Feinabstimmungsauflösung der Frequenz und Phase sowie geringe Ausgangsverzerrung. Sie eignen sich damit ideal für Anwendungen, bei denen Kriterien wie überlegenes Rauschverhalten und hohe Frequenzflexibilität von größter Bedeutung sind [1, 3].

## Schlussbemerkung

Frequenzerzeugungs-Bauteile kommen in einem breiten Spektrum von Anwendungen zum Einsatz und bieten Funktionen wie Frequenzumwandlung, Wellenformsynthese, Signalmodulation und Taktsignalerzeugung. In diesem Artikel wurde ein kurzer Überblick über die wichtigsten Arten dieser Bauteile gegeben,

die für Endanwendungen mit unterschiedlichen Anforderungen entwickelt wurden. So benötigen Kommunikationssysteme beispielsweise ein geringes In-Band-Rauschen, um eine niedrige Error-Vector-Magnitude (EVM) aufrechtzuerhalten, während Spektrumanalysatoren auf lokale Oszillatoren mit schneller Verriegelungszeit angewiesen sind, um einen schnellen Frequenzdurchlauf zu realisieren. Hochgeschwindigkeitswandler hingegen benötigen ein Taktsignal mit geringem Jitter für ein hohes SNR.

Analog Devices bietet das branchenweit breiteste Portfolio an HF-ICs, die in einer Signalkette nahezu alle Funktionsblöcke abdecken. Produkte von ADI erzielen erstklassige Leistungsdaten und erfüllen die anspruchsvollsten Anforderungen in einer Vielzahl von HF-Anwendungen. Angefangen bei Kommunikations- und Industriesystemen über Test- und Messgeräte bis hin zu Luft- und Raumfahrtssystemen.

## Referenzen

[1] Anton Patyuchenko: „RF Signal Chain Discourse - Part 2: Essential Building Blocks,“ Analog Devices, Inc., July 2021. [Online]. Available: [www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/rf-signal-chain-discourse-part-2-essential-building-blocks.html](http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/rf-signal-chain-discourse-part-2-essential-building-blocks.html) [Accessed 2021]

[2] Collins, Ian; Mailloux, David, „Revolution and Evolution in Frequency Synthesis: How PLL/VCO Technology Has Increased Performance, Decreased Size, and Simplified Design Cycle,“ Analog Devices, Inc., [Online]. Available: [www.analog.com/en/technical-articles/revolution-and-evolution-in-frequency-synthesis.html](http://www.analog.com/en/technical-articles/revolution-and-evolution-in-frequency-synthesis.html). [Accessed 2021]

[3] Jim Surber; Leo McHugh, „Single-Chip Direct Digital Synthesis vs. the Analog PLL,“ Analog Dialogue, Vol. 30, No. 3, 1996 ◀