

# Schneller Frequenzsprung in HF-Abtastdatenwandlern in Prüf- und Messanwendungen

**Chase Wood**

Application Engineer  
High-Speed Data Converters

## Einführung

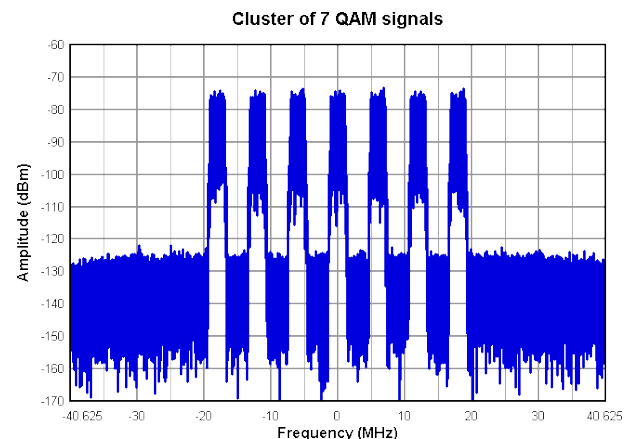
Mit der fortschreitenden Entwicklung von Datenwandlern wird es zur Herausforderung, die Multiband-Anforderungen in Systemen wie softwaredefinierte Funkgeräte, drahtlose Prüfgeräte und Spektralanalysatoren zu erfüllen. Entwickelnde von Systemen bewerten herkömmliche Frequenzsprungverfahren neu, da Geräte immer komplexer werden und schnellere Übergänge zwischen den Frequenzen numerisch gesteuert Oszillatoren (Numerically Controlled Oscillator, NCO) ermöglichen.

In diesem Artikel befasse ich mich mit der Entwicklung von Frequenzsprungverfahren und vergleiche herkömmliche und fortschrittliche Methoden wie GPIO (General Purpose Input/Output) und FRI (Fast Reconfiguration Interface). Diese Fortschritte können Ihnen helfen, Erkenntnisse zum Optimieren von Frequenzsprungverfahren sowohl für Einzel- als auch Multiband-Anwendungen zu gewinnen. Aber um vollständig zu erfassen, wie moderne Systeme die Multiband-Anforderungen erfüllen, ist es wichtig, zunächst die Grundlagen des Frequenzsprungs zu verstehen.

## Was ist das Frequenzsprungverfahren?

In modernen Kommunikationssystemen wie Wi-Fi® 6 und 7 oder QAM-codierten (Quadraturamplitudenmodulation) Signalen ist das Spektrum von Natur aus Multiband, was bedeutet, dass die Hochfrequenzdomäne (HF) aus mehreren

Kanälen innerhalb jedes Frequenzbandes besteht. Beispielsweise arbeiten Wi-Fi 6 und 7 über mehrere Kanäle innerhalb desselben Frequenzbandes, um die Bandbreite und den Datendurchsatz dynamisch zu maximieren, während QAM Daten in verschiedene Phasen-Offsets und Amplitudenebenen innerhalb eines einzelnen Kanals codiert. **Abbildung 1** zeigt ein Beispiel für ein Frequenzband mit 7 QAM-Kanälen.



**Abbildung 1.** Mehrtonsignale in der Frequenzdomäne.

Analog-Digital-Wandler (Analog-to-Digital Converters, ADCs) und Digital-Analog-Wandler (Digital-to-Analog Converters, DACs) mit direkter HF-Abtastung enthalten viele digitale Funktionen. Eine der wichtigsten Funktionen zur direkten HF-Abtastung ist der digitale Abwärtswandler (Digital Downconverter, DDC) in ADCs und der digitale Aufwärtswandler (Digital Upconverter, DUC) in DACs.

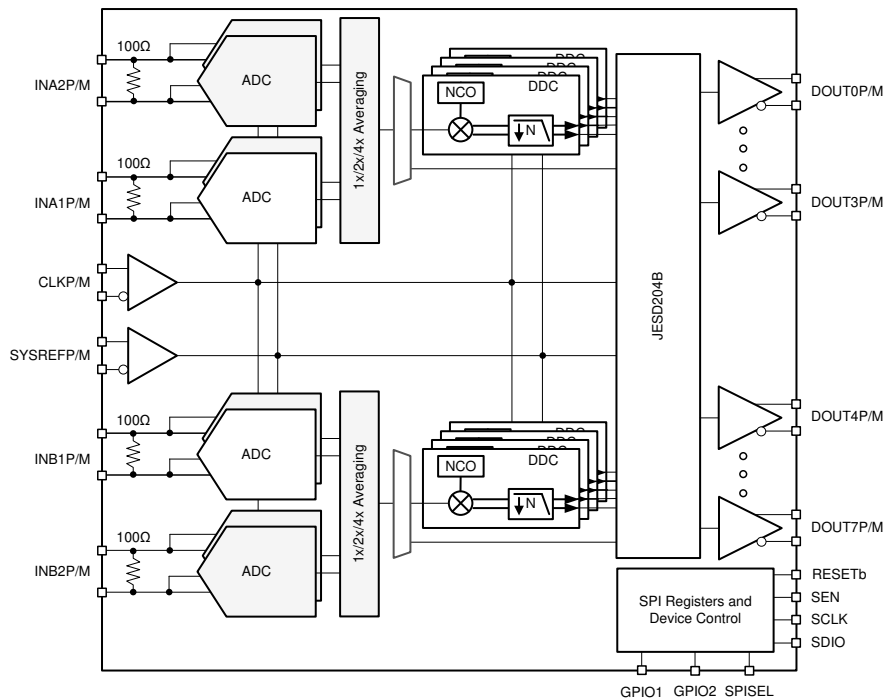
In einem ADC besteht der DDC aus drei Hauptkomponenten: einem NCO, einem digitalen Mischer und einem Dezimationsblock. Der NCO dient als digitales Gegenstück des lokalen Oszillators in herkömmlichen Empfängersignalketten und mischt sich mit dem Eingangssignal, um ein Signal im Basisband (Nyquist-Zone 1) zusammen mit unerwünschten Bildern bereitzustellen. Der Dezimatorblock filtert die Bilder durch einen Dezimationsfilter mit endlicher Impulsantwort (Finite Pulse Response, FIR) heraus und reduziert dann die Signalbandbreite durch Downsampling. Der Dezimatorblock ist das digitale Äquivalent eines Zwischenfrequenzfilters (Intermediate Frequency, IF).

In einem DAC besteht der DUC aus einem Interpolator, einem NCO und einem digitalen Mischer. Im Gegensatz zu einem ADC führt der Interpolator ein Upsampling

des Eingangssignal mit geringerer Bandbreite durch und leitet es dann durch einen FIR-Filter, um Bilder zu unterdrücken. Nach der Interpolatorstufe wird das Ausgangssignal in einen digitalen Mischer eingespeist, der sich mit dem NCO mischen kann, sodass der DAC über einen großen Nyquist-Bereich mit einer niedrigeren Eingangssignalbandbreite arbeiten kann.

Die Anzahl der an einem bestimmten Eingang eines HF-Abtastwandlers aktiven DDCs bestimmt, ob ein Wandler mit einem Einzel- oder Multiband-Ausgang arbeitet. Der Schwerpunkt dieses Artikels liegt auf dem ADC-Aspekt des Frequenzsprungverfahrens.

**Abbildung 2** zeigt ein Beispiel für den DDC des **ADC32RF55** von Texas Instruments (TI), einem ADC mit HF-Abtastung, der in der Lage ist, einen Zweikanal-Vierband-Betrieb bei 3 GSPS zu ermöglichen.



**Abbildung 2.** Funktionsblockschaltbild des ADC32RF55 (vier DDCs pro Kanal).

Das betroffene Frequenzband kann sich häufig ändern: Anstatt eine völlig einzigartige Signalkette für jedes Band zu schalten, kann derselbe HF-Abtastwandler einfach die NCO-Frequenz an das neue Frequenzband

anpassen. Dies ist ein großer Vorteil moderner HF-Abtastwandler. Die Änderung des NCO von einer Frequenz in eine andere Frequenz ist das sogenannte Frequenzsprungverfahren.

Der NCO erzeugt die analoge Frequenz nicht direkt, sondern eine digitale Darstellung der gewünschten Frequenz mit hoher Auflösung. Jeder NCO empfängt ein digitales Wort – in der Regel 48 Bit oder höher –, das in Kombination mit einem NCO-Phasenakkumulator ein für die Stufe der digitalen Mischung geeignetes Signal darstellen kann. Bei der Programmierung eines NCO entspricht die digitale Darstellung der gewünschten IF der programmierten und nicht der tatsächlichen Frequenz. Der NCO-Frequenzbereich zwischen  $-F_s/2$  und  $F_s/2$  wird am häufigsten unterstützt, wobei  $F_s$  die Abtastfrequenz des Wandlers darstellt. Negative Frequenzwörter werden für gerade Nyquist-Zonen verwendet, während positive Frequenzwörter für Signale in ungeraden Nyquist-Zonen verwendet werden.

Um festzustellen, wo eine NCO-Frequenz höherer Ordnung in das Basisband fällt, besteht Ihre erste Aufgabe darin, eine Modulooperation zwischen der beabsichtigten Frequenz und der Abtastfrequenz durchzuführen, um ein Vielfaches von  $F_s$  zu entfernen. Die beabsichtigte NCO-Frequenz liegt jetzt zwischen 0 Hz und der Wandlerabtastfrequenz  $F_s$ .

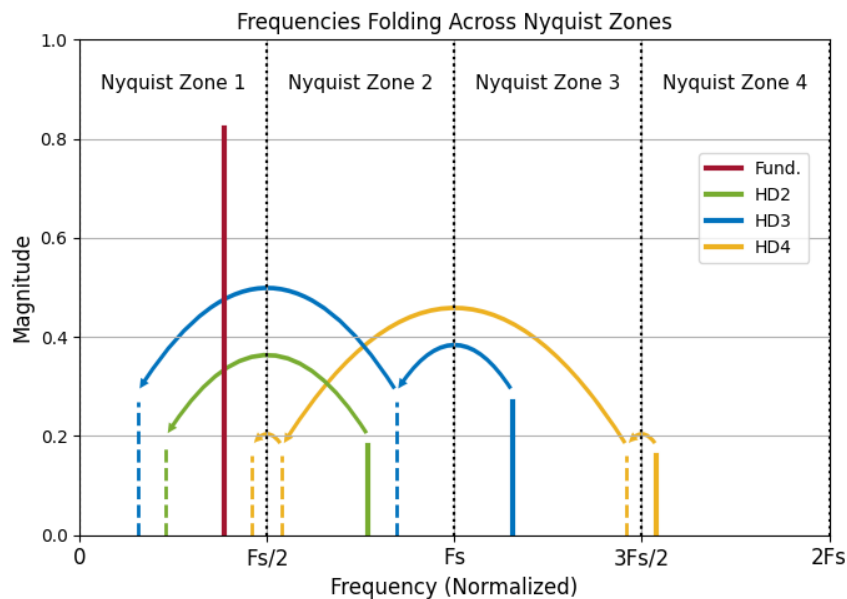
Wenn die NCO-Frequenz kleiner als die Nyquist-Frequenz ( $F_s/2$ ) ist, entspricht die beabsichtigte NCO-Frequenz einer ungeraden Nyquist-Zone, wie in **Gleichung 1** dargestellt:

$$NCO_{\text{word}} = f_{\text{NCO}} \times \frac{2^{48}}{F_s}, \text{ for } 0 \text{ to } F_s/2 \quad (1)$$

Wenn die berechnete NCO-Frequenz über der Nyquist-Frequenz liegt, liegt die Frequenz in einer geraden Nyquist-Zone, wie in **Gleichung 2** dargestellt:

$$NCO_{\text{word}} = (f_{\text{NCO}} + F_s) \times \frac{2^{48}}{F_s}, \text{ for } -F_s/2 \text{ to } 0 \quad (2)$$

**Abbildung 3** zeigt, wie ein Grundsignal (Fundamental Signal, Fund.) und seine Oberschwingungen zweiter, dritter und vierter Ordnung (HD2, HD3 und HD4) in die erste Nyquist-Zone zurückfallen, obwohl die tatsächliche Frequenzkomponente in Nyquist-Zonen höherer Ordnung landet.



**Abbildung 3.** Oberschwingungen, die über Nyquist-Zonen hoher Ordnung in Nyquist-Zone 1 zurückfallen.

Ein Vorteil von ADCs mit HF-Abtastung gegenüber herkömmlichen ADCs besteht darin, dass sich die Hardware nicht ändern muss, um die Frequenzbänder zu schalten. Diese inhärente Flexibilität ermöglicht es ADCs mit HF-Abtastung, sich schnell an neue Frequenzbänder anzupassen, ohne zusätzliche Hardwarekomponenten zu benötigen, was das Systemdesign vereinfacht und die Kosten senkt. Dieser Prozess wird jedoch nicht sofort ausgeführt. In frühen Designs von ADCs mit HF-Abtastung war für jeden NCO und jeden nachfolgenden DDC nur eine einzige NCO-Wortoption verfügbar. Daher erforderte der Sprung auf eine andere Frequenz mehrere Register-Schreibvorgänge.

Das neue NCO-Wort muss über die serielle Peripherieschnittstelle (Serial Peripheral Interface, SPI) geschrieben werden, gefolgt von einem anderen Registerschreibvorgang, um das neue NCO-Wort in den DDC-Block zu schieben, wo es tatsächlich wirksam wird. Mehrere Faktoren beeinflussen die Zeit, die zum Sprung zwischen Frequenzen benötigt wird, einschließlich die Länge des NCO-Wortes und SPI-Transaktionsgeschwindigkeit. Häufig ist die Registergröße von ADCs auf 8 Bit begrenzt, sodass Sie insgesamt sieben Registerschreibvorgänge benötigen, um ein 48-Bit-NCO zu aktualisieren: sechs Registerschreibvorgänge für das NCO-Wort selbst und ein zusätzlicher Registerschreibvorgang zum Aktualisieren des DDC.

Nach Berücksichtigung des Aufwands für jede SPI-Transaktion (in der Regel eine 16-Bit-Adresse für jeden Registerschreibvorgang) verdreifacht sich die Transaktionszeit. Unter Annahme einer Signallrate des seriellen Taktgebers (Serial Clock Signal, SCLK) von 20 MHz berechnet Gleichung 3 die Zeit bis zum Frequenzsprung unter Annahme eines ununterbrochenen Stroms von SPI-Daten:

$$t_{\text{hop}} = \frac{1}{20 \times 10^6 \text{ (Hz)}} \times 7 \text{ (transactions)} \times \frac{24 \text{ (bits)}}{\text{(transaction)}} \quad (3)$$

$$= 8.4 \mu\text{s}$$

## Entwicklung von Frequenzsprungverfahren

HF-Wandler sind jetzt mit mehreren NCO-Wörtern pro DDC konzipiert, was eine Vorprogrammierung von NCO-Wörtern ermöglicht. Dieser innovative Ansatz ermöglicht einen schnelleren Frequenzsprung, indem mehrere Frequenzwerte im Speicher des Wandlers vorgeladen werden. Von diesem Konzept der Speicherung vorberechneter NCO-Wörter stammt das „schnell“ des schnellen Frequenzsprungs.

Abbildung 4 zeigt die 48-Bit-NCO-Registeradressen nach NCO-Index und Wortindex für den ADC32RF55. Obwohl die Adressen für Kanal A und B gleich sind, sind die Frequenzwörter eindeutig, da dieser Baustein Registerzuordnungs-Paging implementiert, das Register, die nicht auf der aktiven Seite enthalten sind, von allen Lese- und Schreibvorgängen maskiert.

Channel A		Channel B	
<b>NCO1</b>	<b>NCO3</b>	<b>NCO1</b>	<b>NCO3</b>
1: 0x100..0x105	1: 0x140..0x145	1: 0x100..0x105	1: 0x140..0x145
2: 0x108..0x10D	2: 0x148..0x14D	2: 0x108..0x10D	2: 0x148..0x14D
3: 0x110..0x115	3: 0x150..0x155	3: 0x110..0x115	3: 0x150..0x155
4: 0x118..0x11D	4: 0x158..0x15D	4: 0x118..0x11D	4: 0x158..0x15D
<b>NCO2</b>	<b>NCO4</b>	<b>NCO2</b>	<b>NCO4</b>
1: 0x120..0x125	1: 0x160..0x165	1: 0x120..0x125	1: 0x160..0x165
2: 0x128..0x12D	2: 0x168..0x16D	2: 0x128..0x12D	2: 0x168..0x16D
3: 0x130..0x135	3: 0x170..0x175	3: 0x130..0x135	3: 0x170..0x175
4: 0x138..0x13D	4: 0x178..0x17D	4: 0x138..0x13D	4: 0x178..0x17D

Abbildung 4. NCO-Wortadressen nach Kanal und NCO-Index des ADC32RF55.

Wie wählen Sie nun nach Programmierung der Wörter ein bestimmtes aus? Um das NCO-Wort zu ändern, muss einfach ein neues NCO-Wort für den DDC ausgewählt werden, das Sie über SPI- oder GPIO-Pins erreichen können. Tabelle 1 zeigt ein Beispiel dafür, wie Sie je nach Anzahl der aktiven Bänder ein einzelnes Wort für den angegebenen DDC im ADC32RF55 auswählen. In einer Standardkonfiguration hat dieser ADC vier eindeutige NCO-Wörter pro DDC. Im Einzelband-Modus können die vier NCO-Wörter des benachbarten DDC jedoch auch den aktiven NCO versorgen, was bedeutet, dass der

DDC jedes Kanals Zugriff auf acht vorprogrammierte NCO-Wörter hat.

Anzahl der Bänder	ADDR	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Einzel	0x3B	0	0	0	0	NCO2 CHA[1:0]	0	NCO1 CHA[1:0]	
	0x41	0	0	0	0	NCO2 CHB[1:0]	0	NCO1 CHB[1:0]	
Doppel	0x3B	0	0	0	0	NCO2 CHA[1:0]		NCO1 CHA[1:0]	
	0x41	0	0	0	0	NCO2 CHB[1:0]		NCO1 CHB[1:0]	
Vierfach	0x3B	NCO4 CHA[1:0]		NCO3 CHA[1:0]		NCO2 CHA[1:0]		NCO1 CHA[1:0]	
	0x41	NCO4 CHB[1:0]		NCO3 CHB[1:0]		NCO2 CHB[1:0]		NCO1 CHB[1:0]	

**Tabelle 1.** NCO-Wortauswahl auf dem ADC32RF55 nach NCO-Index.

Die für die Durchführung eines Frequenzsprungs benötigte Zeit variiert je nach Wandler. In der Regel erfordert die SPI-Methode die Dauer einer einzelnen SPI-Transaktion anstelle von sieben wie in Gleichung 3. Die Geschwindigkeit der SPI-Methode wird weiter durch die maximale Taktrate des SPI und den Aufwand bei der Übertragung serieller Daten begrenzt. Unter der Annahme desselben 20-MHz-SCLK zeigt Gleichung 4 die erforderliche Zeit, bevor der Baustein eine NCO-Wortänderung einleitet:

$$t_{hop} = \frac{1}{20 \times 10^6 \text{ (Hz)}} \times 1 \text{ (transaction)} \times \frac{24 \text{ (bits)}}{\text{(transaction)}} \quad (4)$$

$$= 1.2\mu\text{s}$$

Im Gegensatz dazu kann die GPIO-Methode so schnell sein, wie die GPIO-Eingänge aktualisiert werden können. Sobald die Spannung den oberen oder unteren Schwellenwert überschreitet, beginnt die NCO-Wortänderung.

Bei beiden Methoden wird das interne NCO-Wort sofort aktualisiert, sobald der Baustein die NCO-Wortänderung erhält. Allerdings muss der Dezimationsfilter alle alten Werte bereinigen, sodass es eine zusätzliche Verzögerung gibt, die auf dem Dezimationsfaktor basiert.

Tabelle 2 zeigt die Zeit, die der ADC32RF55 benötigt, um seinen Dezimationsfilter mit Daten vom Mischen mit der neuen NCO-Frequenz zu bereinigen.

Dezimationseinstellung	NCO-Schaltzeit
/4	~250 ns
/8	~350 ns
/16	~600 ns
/32	~1 μs
/64	~2 μs
/128	~4 μs

**Tabelle 2.** Zeiten der Dezimationsfilterbereinigung auf dem ADC32RF55.

Im Allgemeinen ist der GPIO-Ansatz aufgrund des inhärenten parallelen Aspekts einer GPIO-Schnittstelle im Vergleich zu einer seriellen Schnittstelle schneller als ein SPI-Ansatz für das Frequenzsprungverfahren. Es muss jedoch etwas berücksichtigt werden: Im GPIO-Wortauswahlmodus gilt derselbe Wortindex für alle aktiven DDCs. Der Baustein kann Wort 1 auf DDC1 nicht verwenden, während auf DDC2 Wort 3 verwendet wird. Die GPIO-Schnittstelle setzt alle DDCs auf denselben Wortindex.

Eine weitere Methode, FRI, besteht darin, Daten mit einer viel schnelleren Rate über bestimmte Baustein-Pins zu senden als die, die Standard-SPI unterstützt. Einige Bausteine, wie der DAC39RF12 von TI, können die FRI-Kommunikation mit bis zu 200 MHz unterstützen, was Sie für die Auswahl des aktiven NCO-Wortes verwenden können.

### Anwendungen in Prüf- und Messgeräten

Die Unterstützung mehrerer Frequenzbänder ist angesichts der vielfältigen und sich entwickelnden Anforderungen verschiedener Anwendungen für Prüf- und Messgeräte unverzichtbar. Breitband-Prüfgeräte können über mehrere Frequenzbereiche betrieben werden und sind damit ein vielseitiges Tool für umfassende Prüfungen über verschiedene Systeme und Technologien hinweg. Mit dem technologischen Fortschritt und der Einführung neuer Frequenzbänder

werden Geräte, die sich schnell anpassen und zwischen mehreren Bändern wechseln können, immer wichtiger.

In Spektralanalysatoren ermöglichen schnelle Frequenzsprungverfahren schnelle und genaue Messungen, indem Abtastzeiten reduziert werden und die Fähigkeit zur Erkennung transienter Signale verbessert wird. Die schnellen Schaltfähigkeiten fortschrittlicher ADCs mit mehreren NCOs oder schnellen Rekonfigurationsmethoden wie FRI ermöglichen eine effizientere Analyse über große Frequenzbereiche hinweg, wodurch die Gesamtleistung und der Nutzen von Spektralanalysatoren sowohl in Forschungs- als auch in Feldanwendungen verbessert werden.

Bei drahtlosen Prüfgeräten spielen schnelle Frequenzsprungverfahren eine entscheidende Rolle bei der Charakterisierung und Fehlerbehebung von Kommunikationssystemen. Durch die Ermöglichung schneller Übergänge zwischen Frequenzen verbessern diese Techniken die Signaltreue und reduzieren Prüfzyklen. Diese Funktion ist besonders nützlich bei der Beurteilung der Leistung von drahtlosen Bausteinen unter verschiedenen Frequenzbedingungen.

Neben Spektrumanalysatoren und drahtlosen Prüfgeräten bieten schnelle Frequenzsprungverfahren erhebliche Vorteile in vielen anderen Prüf- und Messanwendungen. Universal-Signalanalysatoren und HF-Signalgeneratoren können beispielsweise diese Techniken nutzen, um flexiblere und genauere Prüfungen über mehrere Frequenzbänder hinweg zu ermöglichen. Multiband-Empfänger profitieren auch von der Möglichkeit, schnell zwischen den Bändern zu wechseln, um eine zuverlässige Leistung in dynamischen Prüfumgebungen zu gewährleisten.

## Fazit

Durch die Ermöglichung schneller und präziser Übergänge zwischen Frequenzen bieten schnelle Frequenzsprungverfahren eine höhere Flexibilität, eine verbesserte Genauigkeit und eine bessere Anpassungsfähigkeit an sich entwickelnde technologische Anforderungen. Da die Anforderungen an Prüf- und Messgeräte weiter steigen, sind das Verständnis und die Implementierung von schnellen Frequenzsprungverfahren entscheidend, um die modernste Leistung aufrechtzuerhalten und umfassende Prüfmöglichkeiten zu gewährleisten.

## Verwandte Websites

1. Wood, Chase. 2024. „[ADC Decimation: Addressing High Data-Throughput Challenges](#)“. Embedded Computing Design, 5. Februar 2024.
2. Wood, Chase. 2024. „[ADC Decimation: Unlocking RF Potential with Downconverters](#)“. Embedded Computing Design, 29. Februar 2024.
3. Wood, Chase. 2024. „[ADC Decimation: Analyzing High-Bandwidth Spectrum Clusters](#)“. Embedded Computing Design, 9. Mai 2024.
4. [ADC32RF55 von TI – Datenblatt](#)
5. [DAC39RF12 von TI – Datenblatt](#)

**Wichtiger Hinweis:** Die hier beschriebenen Produkte und Dienstleistungen von Texas Instruments Incorporated und seinen Tochterunternehmen werden unter den Standard-Verkaufsbedingungen von TI verkauft. Den Kunden wird empfohlen, aktuelle und vollständige Informationen zu TI-Produkten und Dienstleistungen einzuholen, bevor sie Bestellungen platzieren. TI übernimmt keine Haftung für Anwendungsunterstützung, Kundenanwendungen oder Produktdesigns, Softwareleistung oder Verletzung von Patenten. Die Veröffentlichung von Informationen über Produkte oder Dienstleistungen anderer Unternehmen bedeutet keine Genehmigung, Garantie oder Empfehlung seitens TI.

All trademarks are the property of their respective owners.

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](http://ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025