

Technical White Paper

Messung des Ausgangsrauschens bei extrem rauscharmen LDOs



Haidar Hamoo

ABSTRACT

Dieses technische Whitepaper enthält einen Überblick über die Rauschmessung bei einem Low-Dropout-Regler (LDO). Das Dokument stellt auch eine Lösung zur Messung des Rauschens bei extrem rauscharmen LDOs bereit. Moderne LDOs können einen Ausgangsrauschpegel aufweisen, der deutlich unter der Empfindlichkeit der meisten auf dem Markt erhältlichen Spektralanalysatoren liegt. In diesem Dokument werden die Grundlagen der Rauschmessung von LDOs und Optionen zur Messung extrem rauscharmer LDOs erläutert. Die vorgeschlagene Lösung ist nicht *ausschließlich* auf Rauschmessungen für LDOs beschränkt. Die Option für viele andere Mess- oder Erfassungsanwendungen verwendet werden.

Inhalt

1 Einführung zu LDO-Rauschen und Rauschmessung	2
1.1 LDO-Rauschen und LDO-Rauschdarstellung	2
1.2 Messung von LDO-Rauschen mit einem Spektralanalysator	2
2 Lösung zur Messung eines extrem rauscharmen LDO (Anforderungen an Rauschverstärker)	5
2.1 Schätzung des maximalen Rauschens des Verstärkers	5
2.2 Schätzung der benötigten Verstärkung des Verstärkers	6
2.3 Auswahl der Rückkopplungswiderstandswerte des Verstärkerschaltkreises	6
2.4 Die DC-Sperrfilter für Verstärkereingang/-ausgang	9
2.5 Überprüfung der Verstärkerdesignleistung	10
3 Fazit	12
4 Quellennachweise	12

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1. Typisches Rauschdiagramm für einen LDO	2
Abbildung 1-2. Typisches LDO-Rauschen versus typisches Grundrauschen eines Spektralanalysators	3
Abbildung 1-3. Extrem geringes Rauschen des LDO versus Grundrauschen eines üblichen Spektralanalysators	4
Abbildung 2-1. Der vorgeschlagene Verstärkerschaltkreis	6
Abbildung 2-2. Rauschanalyse für einen nicht invertierenden Operationsverstärker-Baustein	7
Abbildung 2-3. Wärmerauschen für einen Widerstand	8
Abbildung 2-4. Gemessenes Verstärkerrauschen versus simuliertes RTO- und RTI-Rauschen	10
Abbildung 2-5. Gemessenes flaches Rauschen von 10 nV/Hz über eine Bandbreite von 10 Hz bis 10 MHz	11
Abbildung 2-6. Gemessenes flaches Rauschen von 1 nV/Hz über eine Bandbreite von 1 kHz bis 10 MHz	11

Marken

All trademarks are the property of their respective owners.

1 Einführung zu LDO-Rauschen und Rauschmessung

1.1 LDO-Rauschen und LDO-Rauschdarstellung

Rauschen, das in jedem elektrischen System als rein physikalisches Phänomen auftritt, kann als unerwünschtes Spannungs- oder Stromsignal definiert werden, das den Ein- oder Ausgang des Systems stört, verzerrt oder sich mit ihm verbindet. Selbst wenn für alle externen (extrinsischen) Rauschquellen eine Kopplung in ein System verhindert wird (wie die Rauschdefinition nahelegt), erzeugt das System ein internes (intrinsisches) Rauschen. Dieses Eigenrauschen tritt am Systemausgang auf und muss oft berücksichtigt und gemessen werden. Ein einfaches System (Baustein) wie ein LDO erzeugt internes Rauschen, das am Ausgang gemessen werden kann. Das Rauschen eines LDO-Reglers ist eine wichtige Spezifikation im Datenblatt, die in der Regel über eine Frequenzbandbreite von 10 Hz bis 100 kHz (typisch) angegeben wird. Weitere Details zum LDO-Rauschen finden Sie im Abschnitt [Referenzen](#) [1]. Im Datenblatt werden häufig Diagramme verwendet, um das Ausgangsrauschen des LDO anzugeben. [Abbildung 1-1](#) zeigt das Ausgangsrauschen bei einem typischen LDO.

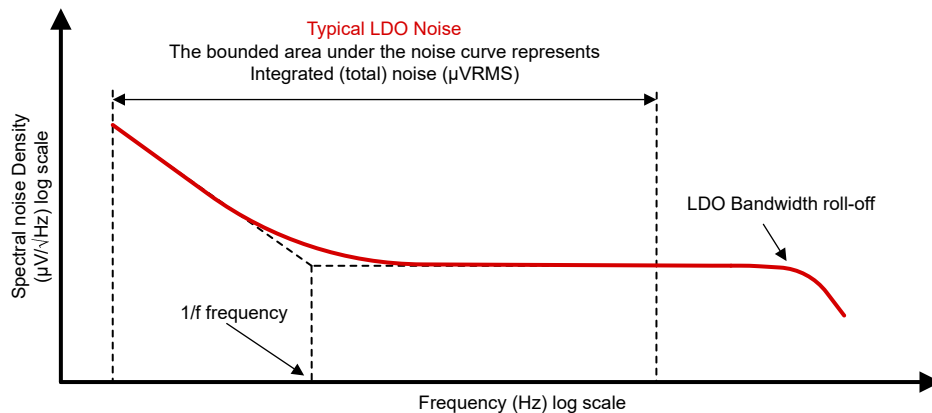


Abbildung 1-1. Typisches Rauschdiagramm für einen LDO

Jeder Punkt auf der Rauschkurve wird als spektrale Rauschdichte des LDO bei dieser Frequenz erkannt. Bei niedriger Frequenz wird das Rauschen des LDO von Flicker-Rauschen dominiert, dann rollt das Rauschen bei der 1/f-Frequenz auf einen niedrigeren Rauschpegel – Wärmerauschen – ab, und anschließend rollt die Kurve des LDO-Rauschens ab, weil die Bandbreite des LDO abrollt. Das Gesamtrauschen, oder RMS, ist eine zusätzliche Kennzahl, die in der Tabelle der elektrischen Merkmale des LDO angegeben wird, zusammen mit der spezifischen Frequenzbandbreite. Dieses RMS-Rauschen ist schlicht die kumulierte, integrierte spektrale Rauschdichte unter der Rauschkurve über eine bestimmte Bandbreite, typischerweise 10 Hz 100 kHz in Einheiten von µVRMS.

1.2 Messung von LDO-Rauschen mit einem Spektralanalysator

In der Regel wird zur Messung des Rauschens eines LDO ein Spektralanalysator verwendet, dessen Frequenzbandbreite breiter als die Bandbreite des LDO ist. Ähnlich wie der LDO hat der Spektralanalysator ein internes Rauschen, das als Grundrauschen (Empfindlichkeit) des Analysators bezeichnet wird. Das Grundrauschen (technisch als „Displayed Average Noise Level“, kurz DANL bezeichnet) des Analysators ist eine wichtige Spezifikation im Datenblatt des Analysators über die Frequenzbandbreite des Analysators. Die Messung und Notation des Grundrauschens des Analysators ist unbedingt vor jeder Lärmmessung durchzuführen, wie im Abschnitt [Referenzen](#) [2] erläutert.

Um das Grundrauschen eines Analysators zu messen, führen Sie einfach Frequenzabtastungen mit der niedrigsten für den Analysator verfügbaren Auflösungsbandbreite (RBW) mit mehreren Durchschnittswerten über die gewünschte Rauschmessbandbreite aus. Die gemessene Rauschkurve (Grundrauschen) ist das geringste Rauschen, das der Analysator über diese Bandbreite auflösen kann. Durch Kenntnis dieses Rauschpegels kann eine Entscheidung hinsichtlich der Verwendung eines solchen Analysators zur Messung des Rauschens des LDO (DUT-Rauschen) getroffen werden.

Um eine Rauschmessgenauigkeit von mehr als 95 % für den Bandbreitenbetrieb des LDO aufrechtzuerhalten, muss die Rauschkurve des LDO 10 dB höher sein als die Grundrauschkurve des Analysators, wie in [Abbildung 1-2](#) gezeigt.

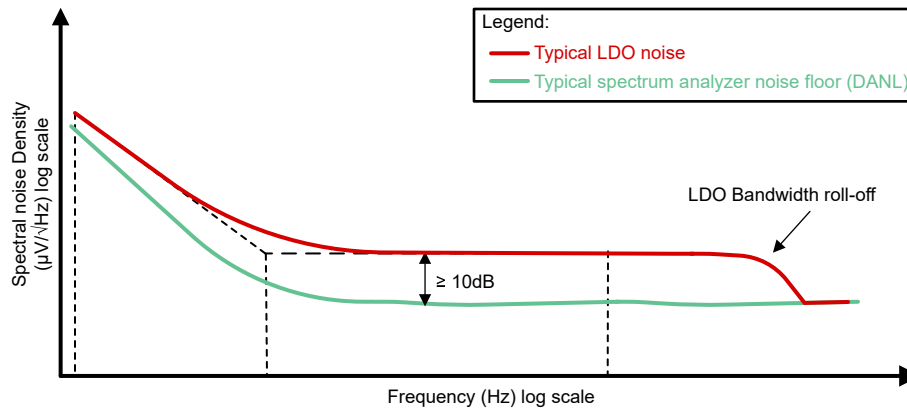


Abbildung 1-2. Typisches LDO-Rauschen versus typisches Grundrauschen eines Spektralanalysators

Diese Verstärkung von 10 dB (oder 3,16 V/V) zwischen Analysator und LDO-Rauschen erreicht die Genauigkeit von 95 %, indem die Kurven als zwei unkorrelierte Rauschquellen kombiniert werden. Wenn eine Quelle (LDO) 3,16 (V/V) höher als die andere Quelle (Analysator) ist, wird das resultierende Gesamtrauschen zu mehr als 95 % von der höheren Quelle dominiert, wie in [Gleichung 1](#) gezeigt:

$$\begin{aligned} \text{Total Noise} &= \sqrt{(3.16)^2 + (1)^2} = 3.31; \\ \text{Measurement Accuracy} &= 100 \% - \frac{(3.31 - 3.16)}{3.31} \times 100 \% = 95.5 \% \end{aligned} \quad (1)$$

Die Wahl einer Genauigkeit von 95 % ist angesichts der zufälligen Eigenschaften von Rauschphänomenen für jede Rauschmessung eines LDO angemessen. Ein Abstand von weniger als 10 dB führt zu einer Messung, die beim Bandbreiten-Abrollen des LDO weniger genau ist, wie in [Abbildung 1-2](#) gut zu erkennen ist. Wenn sich das LDO-Rauschen (rote Kurve) in [Abbildung 1-2](#) dem Grundrauschen des Spektralanalysators (grüne Kurve) nähert, wird die Rauschmessung erheblich vom Rauschen des Spektralanalysators dominiert und dadurch verfälscht. Dieses flache Rauschen ist nicht das Rauschen des LDO, sondern eine Kombination aus LDO- und Analysatorrauschen, das erheblich vom Grundrauschen des Analysators dominiert wird.

Die interne Schaltung des Analysators kann zum gemessenen DUT-Rauschen beitragen, aber das beigetragene Rauschen liegt am oder nahe dem absoluten Minimalwert von Rauschen – 174 dBm/Hz. Dieser extrem niedrige Rauschpegel ist der Wärmerauschpegel (Leistung). Die Rauschpegel des Analysators und des LDO (DUT) werden in den nächsten Abschnitten ausführlich untersucht.

[Abbildung 1-3](#) zeigt die Rauschkurve für einen extrem rauscharmen LDO, der mehr als 10 dB niedriger ist als das Grundrauschen eines üblichen Spektralanalysators. Die Frage lautet also: Wie kann dieser extrem rauscharme LDO gemessen werden?

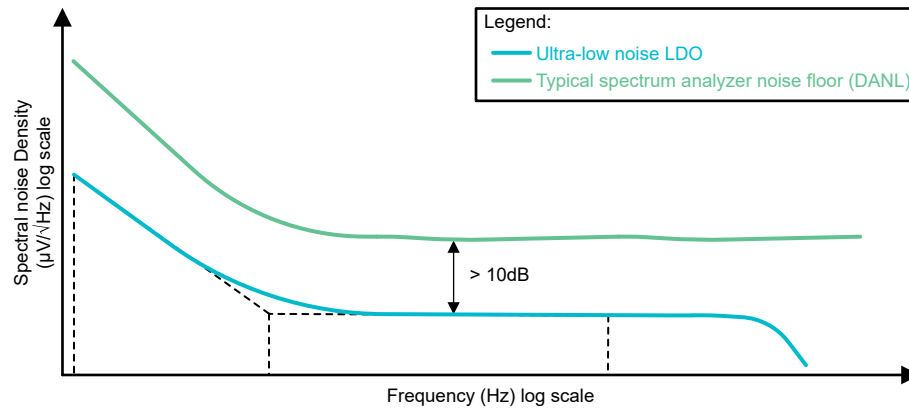


Abbildung 1-3. Extrem geringes Rauschen des LDO versus Grundrauschen eines üblichen Spektralanalysators

Die Lösung ist relativ einfach – ein Verstärker, welcher das Rauschen des LDO auf 10 dB (oder höher) mehr als Grundrauschen des Analysators verstärken kann, um das LDO-Rauschen zu messen. Nur wenige Spektralanalysatoren verfügen über einen integrierten Vorverstärker für diese Arten rauscharmer Signale, aber Vorverstärker werden oft auf eine Verstärkung von weniger als 40 dB begrenzt, und die Bandbreite für diese Vorverstärker beginnt oft bei 1 kHz oder höher.

Aber was ist, wenn eine höhere Verstärkung erforderlich ist und die Messung mit einer niedrigeren Frequenz beginnen muss?

Der nächste Abschnitt behandelt die Designanforderungen für einen Verstärker mit höherer Verstärkung und einer Bandbreite von 10 Hz–10 MHz.

2 Lösung zur Messung eines extrem rauscharmen LDO (Anforderungen an Rauschverstärker)

NOTE

Bevor Sie in die Designdetails des Rauschverstärkers eintauchen, sollten Sie sich die Zeit nehmen, zu bedenken, wie das Rauschen des Verstärkers mit dem Rauschen des LDO und des Analysators zusammenwirkt, wie zuvor besprochen.

Da das Rauschen des Analysators bereits um einen erheblichen Abstand höher ist als das Rauschen des LDO (wie in [Abbildung 1-3](#) gezeigt), kann das Rauschen von LDO und Verstärker ohne Bedenken zuerst betrachtet werden. Sobald das Rauschen des erforderlichen Verstärkers bestimmt ist, können wir als zweites über die erforderliche Verstärkerverstärkung nachdenken.

2.1 Schätzung des maximalen Rauschens des Verstärkers

Der Ausgangspunkt für das Design des Verstärkers ist das Ausgangsrauschen des LDO bzw. DUT. Jüngste Fortschritte in der Halbleiterprozesstechnologie ermöglichen es Texas Instruments, extrem rauscharme LDOs bereitzustellen. Eine spektrale Rauschdichte von 1,3–1,1 nV/Hz bei 1 kHz und 1 nV/Hz (oder niedriger) bei 10 kHz kann durch Untersuchung der Rauschpegel solcher LDOs identifiziert werden. Diese Rauschpegel sind vergleichbar mit den Rauschpegeln, die durch *modernste* Operationsverstärker-Bausteine mit höchster Leistung angeboten werden. Basierend auf diesen Pegeln (unter Verwendung des zuvor erörterten 10-dB-Abstands) ist ein Verstärker mit Eingangsreferenzrauschpegeln von ≈ 350 pV/Hz und 250 pV/Hz bei 1 kHz bzw. 10 kHz erforderlich, wie der Abstand von 10 dB nahelegt. Diese Rauschpegel entsprechen Rauschpegeln für einen Transistor (ohne Berücksichtigung der erforderlichen BW-Messung, die von 10 Hz bis 10 MHz für einen typischen LDO reicht).

Glücklicherweise sind durch Stacking paralleler Operationsverstärkerstufen ähnliche – und möglicherweise niedrigere – Rauschpegel erreichbar, wie im Abschnitt [Referenzen](#) [3] erläutert. Wählen Sie daher einen Operationsverstärker mit dem geringstmöglichen Rauschen, um ein niedrigeres äquivalentes Eingangsspannungs- (EIVN) bzw. äquivalentes Eingangsstromrauschen (EICN) zu erreichen. Der ausgewählte Operationsverstärker muss eine ausreichende Bandbreite haben, um die erforderliche Verstärkung über die Rauschmessbandbreite aufnehmen zu können.

Texas Instruments bietet zahlreiche rauscharme Operationsverstärker an. Dieses Design erfordert das geringstmögliche Rauschen und die größtmögliche Bandbreite, um die Anforderungen des Designs zu erfüllen. Aus diesem Grund ist ein Operationsverstärker mit einem Rauschpegel von 700 pV/Hz bis 950 pV/Hz bei 1 kHz ein guter möglicher Kandidat. Eine weitere erforderliche Eigenschaft des Verstärkerdesigns ist, dass der Operationsverstärker einen sehr niedrigen 1/f-Rauschpegel bei 1 kHz aufweisen muss.

Die Verwendung der Methode mit parallelen Operationsverstärkern (erläutert im Abschnitt [Referenzen](#) [3]) und eines Operationsverstärkers mit ungefähr 800 pV/Hz Rauschen ergeben sich etwa zehn parallele Stufen, wie in [Gleichung 2](#) gezeigt:

$$\text{Number of stages } \left(N \right) = \left(\frac{800 \left(\frac{\text{pV}}{\text{Hz}} \right)}{250 \left(\frac{\text{pV}}{\text{Hz}} \right)} \right)^2 = 10.24 \quad (2)$$

Die Ergebnisse aus Simulation und Prototyping haben gezeigt, dass zehn Stufen einen Abstand von mehr als 10 dB gegen parasitäre und Komponententoleranz aufrechterhalten, ohne das Schaltkreisdesign des Verstärkers erheblich zu komplizieren.

2.2 Schätzung der benötigten Verstärkung des Verstärkers

In diesem Abschnitt wird die erforderliche Verstärkung für das Verstärkerdesign erläutert. Wenn DANL für einen typischen Spektralanalysator (Bandbreite über 1 kHz bis 100 kHz) untersucht wird, liegt ein typisches DANL nahe -120 dBm/Hz (224 nV/Hz), ein Rauschen von 10 dB oder höher führt zu ca. -110 dBm/Hz oder 708 nV/Hz. Mit diesem Pegel erreichen Sie zusammen mit einem Rauschen von ca. 1 nV/Hz für den LDO eine Verstärkung von ca. 708 (V/V).

$$\text{The roughly estimated amplifier gain} = 20 \times \log(708) = 57\text{dB} \quad (3)$$

Dies ist eine grobe Schätzung für den minimalen Verstärkungswert für dieses Design. Dieser minimale Verstärkungswert ist viel höher als die Verstärkung von 40 dB, die nur wenige Analysatoren mit einem Vorverstärker bieten.

Abbildung 2-1 zeigt den vorgeschlagenen Verstärkerschaltkreis.

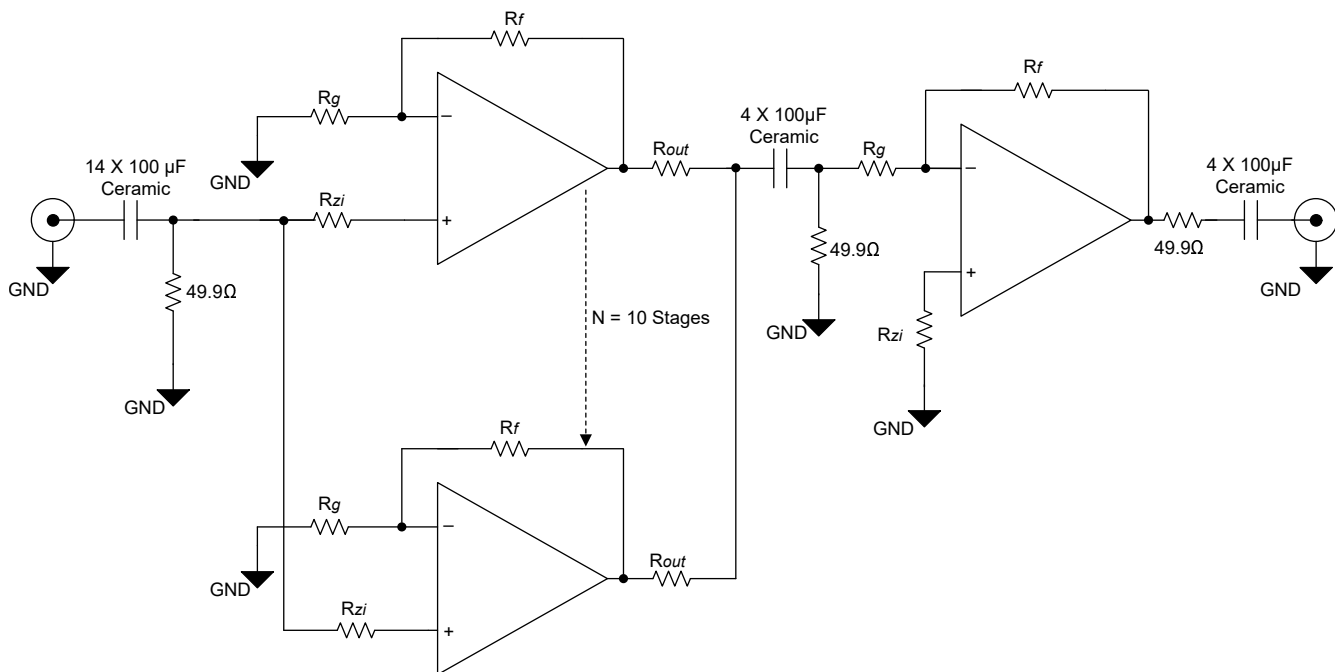


Abbildung 2-1. Der vorgeschlagene Verstärkerschaltkreis

Um eine flache Verstärkungsantwort über die Bandbreitenmessung von 10 Hz bis 10 MHz aufrechtzuerhalten, wird die gesamte erforderliche Verstärkerverstärkung (von etwa 70 dB, angepasst über dem Mindestwert von 57 dB) in zwei Stufen durchgeführt. Die erste Stufe, die sich streng in einer nicht invertierenden Konfiguration befindet, übernimmt den Großteil der Verstärkung, um das Rauschen des LDO (DUT) schnell auf ein höheres Niveau zu steigern. Die zweite Stufe, die eine invertierende Konfiguration hat, dient zur Feinabstimmung der Gesamtverstärkung des Verstärkers.

2.3 Auswahl der Rückkopplungswiderstandswerte des Verstärkerschaltkreises

Der im vorhergehenden Abschnitt erwähnte vorgeschlagene Verstärkerschaltkreis verwendet denselben Operationsverstärker-Baustein in den Serien- und Parallelstufen für Leistung, vereinfachtes Design und geringere Entwicklungskosten. Um die extrem rauscharme Leistung des Operationsverstärkers zu nutzen, müssen sehr niedrige Rückkopplungswiderstandswerte verwendet werden.

Überprüfen Sie die in [Abbildung 2-2](#) für einen nicht invertierenden Operationsverstärker-Baustein gezeigte Rauschanalyse.

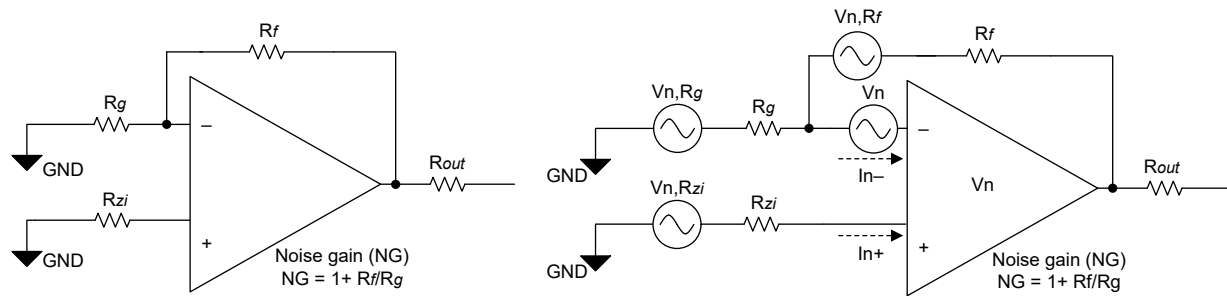


Abbildung 2-2. Rauschanalyse für einen nicht invertierenden Operationsverstärker-Baustein

V_n : steht für das Spannungsrauschen des Operationsverstärkers.

V_n, R_x : das Spannungsrauschen, das von jedem Widerstand im Schaltkreis erzeugt wird. Dieses Spannungsrauschen kann mit [Gleichung 4](#) berechnet werden:

$$V_n, R_x = \sqrt{4KTR} \quad (4)$$

wobei K die Boltzmann-Konstante = $1,380649 \times 10^{-23}$ (1/K°) und T die Temperatur in Kelvin ist.

$I_{n\pm}$: steht für das Wärmerauschen, das von den Strömen des Operationsverstärkers erzeugt wird, die in einem der Eingangswiderstände fließen.

[Gleichung 5](#) kann verwendet werden, um das Rauschen der Eingangsströme des Operationsverstärkers zu berechnen.

$$I_{n\pm} = (I_{n\pm})^2 \times R_x^2 \quad (5)$$

Basierend auf der Berechnung des Rauschens nicht invertierender Operationsverstärker aus Abschnitt [Referenzen](#) [4] erhalten Sie mit [Gleichung 6](#) das eingangsbezogene Rauschen (RTI):

$$\text{Referred to input Noise (RTI)} = \sqrt{(V_n)^2 + 4KTR_{zi} + 4KTR_g \left[\frac{R_f}{R_f + R_g} \right]^2 + (I_{n+} \times R_{zi})^2 + \left(I_{n-} \times \left[\frac{R_g \times R_f}{R_g + R_f} \right] \right)^2 + 4KTR_f \left[\frac{R_f}{R_g + R_f} \right]^2} \quad (6)$$

Wenn ein Diagramm mit dem Widerstand auf der x-Achse und dem Rauschen auf der y-Achse anhand der Wärmerausgleichung für Widerstände ([Gleichung 4](#)) erstellt wird, ergibt sich eine Grafik wie [Abbildung 2-3](#).

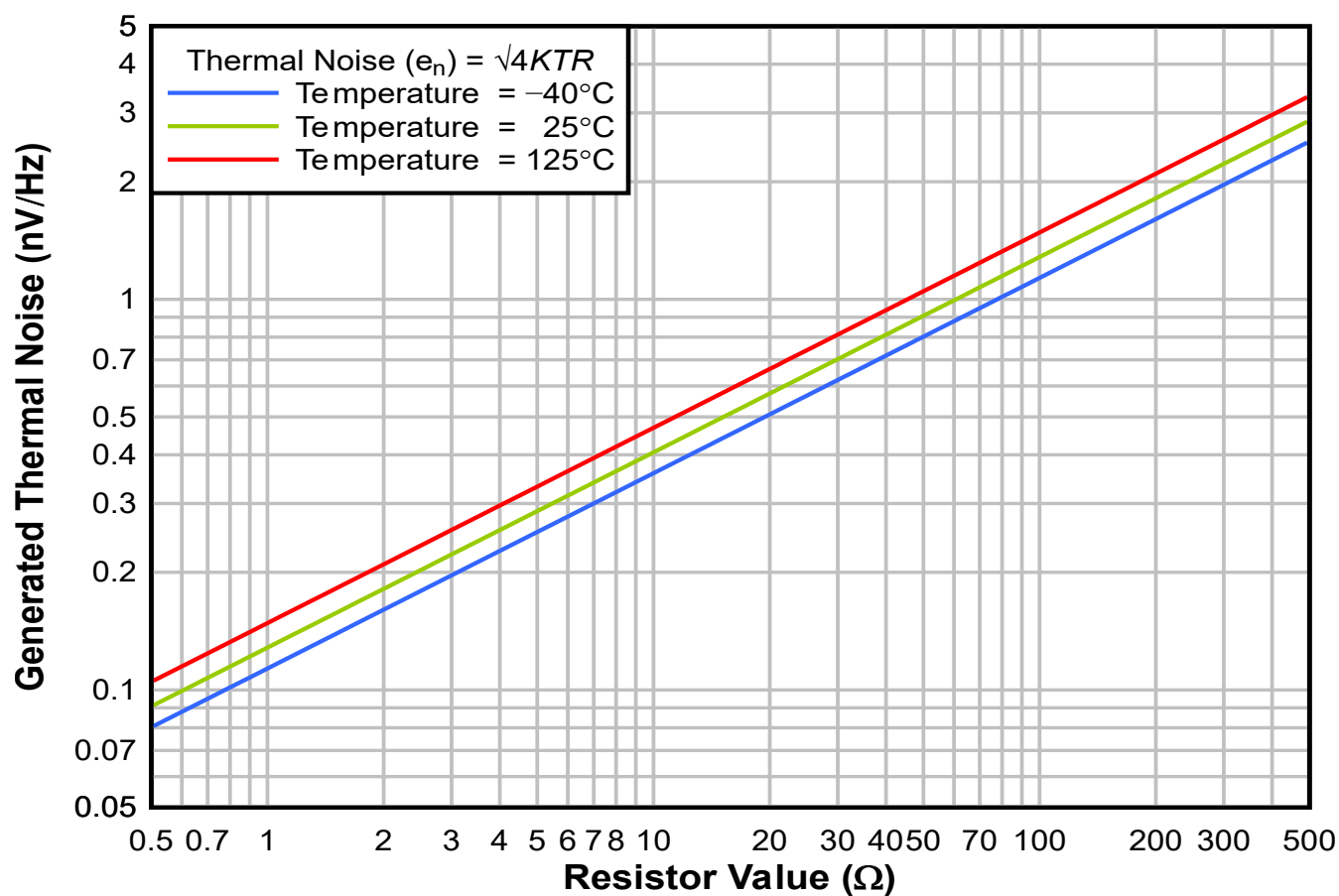


Abbildung 2-3. Wärmerauschen für einen Widerstand

Abbildung 2-3 zeigt, dass ein 50-Ω-Widerstand bei Raumtemperatur ein Wärmerauschen erzeugt, das dem Rauschen eines Operationsverstärkers mit 900 pV/Hz bei 1 kHz entspricht. In diesem Verstärkerdesign ist die Auswahl von sehr niedrigen Werten für die Rückkopplungswiderstände von entscheidender Bedeutung, da das Wärmerauschen dieser Art von Widerständen das Rauschen für den ausgewählten Operationsverstärker überschreiten kann. Prüfen Sie Gleichung 6, um zu sehen, dass die Widerstandswerte von R_{zi} , R_g und R_f zu einem erheblichen Rauschen beitragen können, wenn es sich um große Werte im Vergleich zum Rauschen des Operationsverstärkers handelt. Damit dieses spezielle Design funktioniert, müssen Widerstandswerte ausgewählt werden, die das Rauschen des Operationsverstärkers zur dominierenden Rauschquelle in Gleichung 6 machen. Die Werte R_{zi} und R_g der Widerstände können denselben kleinen Wert haben, um die Eingangsströme des Operationsverstärkers auszugleichen und dadurch eine minimale Ausgangsoffsetspannung beizubehalten. Der R_f -Wert des Widerstands kann relativ groß sein, um die signifikante Verstärkung für die erste Parallelstufe aufzunehmen, da diese Stufe den größten Teil der Gesamtverstärkung des Verstärkerschaltkreises trägt. Dünnschichtwiderstände werden für diesen Verstärkerschaltkreis bevorzugt, da sie eine bessere Stabilität bieten und gleichzeitig ein geringeres Rauschen im Vergleich zu Dickschichtwiderständen beibehalten.

Die Werte der Rückkopplungswiderstände für die zweite Serienstufe sind weniger kritisch, da das verstärkte Signal (Rauschen) bereits stärker ist als das Rauschen des Operationsverstärkers und des Widerstands. Die Gehäusegrößen für alle oben genannten Widerstände müssen möglichst klein gehalten werden, um die parasitäre Kapazität unter ihnen zu reduzieren.

2.4 Die DC-Sperrfilter für Verstärkereingang/-ausgang

Hochpassfilter, die am Eingang des Verstärkers, am Eingang der zweiten Serienstufe und am Eingang des Analysators DC blockieren, werden verwendet, um das Kriechen von DC-Offset in das verstärkte Rauschsignal zu eliminieren. Der Eingangsfilter hat eine Grenzfrequenz von 3 Hz, um bei Bedarf eine ausreichend flache Rauschmessung von einer solchen niedrigen Frequenz zu ermöglichen. Die restlichen Filter verfügen über Grenzfrequenzen von 10 Hz, was durch die Bandbreitenrauschmessung des LDO erforderlich ist.

Für Filter bevorzugt, die DC am Eingang des Verstärkers blockieren, sind Tantalkondensatoren empfehlenswert. Allerdings können auch Keramik Kondensatoren trotz ihrer piezoelektrischen Eigenschaften verwendet werden. In diesem Design werden Keramik Kondensatoren verwendet, da diese Kondensatoren ein neutrales Polaritätsattribut beibehalten und charakteristisch niedrige ESR- und ESL-Werte aufweisen. Dadurch kann der Verstärker sowohl für positive als auch für negative LDOs verwendet werden. Ein vibrationsfreies und HF-störfestes Testgehäuse für den Verstärkerschaltkreis kann die unerwünschte piezoelektrische Beschaffenheit solcher Kondensatoren ausgleichen.

2.5 Überprüfung der Verstärkerdesignleistung

Die Messung des RTO-Rauschens und die anschließende Berechnung des RTI-Rauschens des Verstärkerschaltkreises sind einfach, wenn die Rauschverstärkung bekannt ist. [Abbildung 2-4](#) zeigt das gemessene Verstärkerrauschen versus das simulierte RTO-Rauschen, RTI-Rauschen und das gemessene Grundrauschen des Spektralanalysators HP4395A.

NOTE

Mit dem vorgeschlagenen Verstärkerdesign kann jeder Spektralanalysator verwendet werden, dessen Grundrauschen niedriger ist als das RTO-Rauschen des Verstärkers.

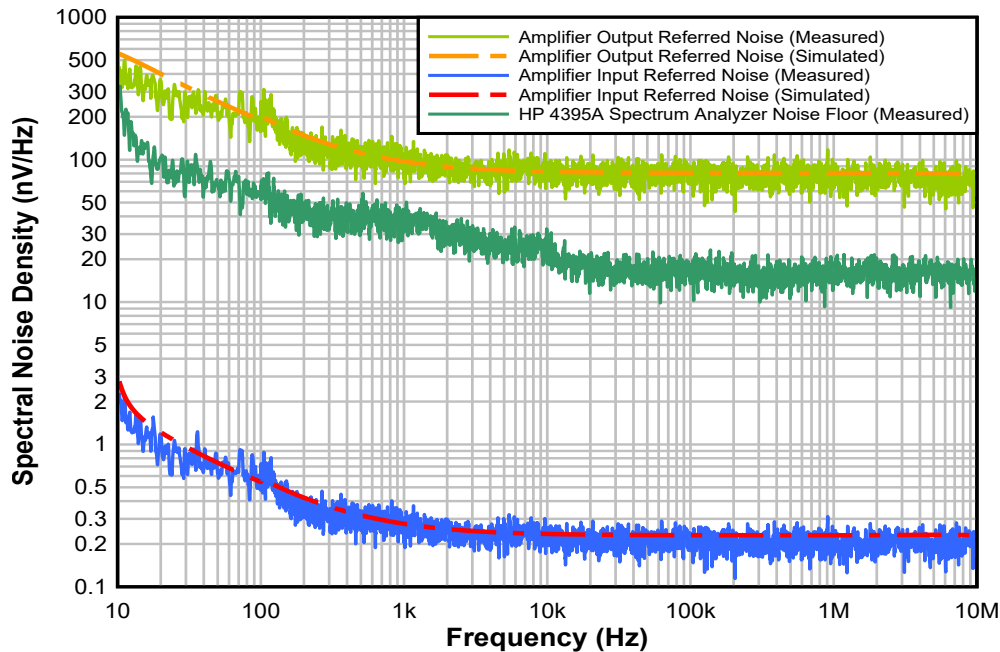


Abbildung 2-4. Gemessenes Verstärkerrauschen versus simuliertes RTO- und RTI-Rauschen

In [Abbildung 2-4](#) entspricht die gemessene RTO-Rauschkurve des Verstärkers sehr genau dem simulierten RTO-Rauschen. Das gemessene RTO-Rauschen des Verstärkers liegt außerdem 10 dB über dem gemessenen Grundrauschen des Spektralanalysators (wie gefordert), wodurch eine Messgenauigkeit von mehr als 95 % erreicht wird.

Desgleichen entspricht die berechnete RTI des Verstärkers, ermittelt durch Teilen des gemessenen RTO-Rauschens durch die Rauschverstärkung, dem simulierten RTI-Rauschen recht genau. Das gemessene RTI-Rauschen des Verstärkers fungiert als neues (verbessertes) Grundrauschen für die LDO-Rauschmessung.

Bevor Sie Rauschmessungen mit dem LDO (DUT) durchführen, empfiehlt TI eine weitere Messung, um die Verstärkerleistung zu bestätigen. Mit einem Generator für flaches weißes Rauschen wie NC6105A wurde ein flaches Rauschen von 10 nV/Hz (– 147 dBm) über eine Bandbreite von 10 Hz bis 10 MHz erzeugt, das dann mit diesem Design gemessen wurde. Dieser sehr niedrige Rauschpegel ist etwas niedriger als das Grundrauschen von HP4395A. [Abbildung 2-5](#) zeigt das gemessene flache Rauschen von 10 nV/Hz.

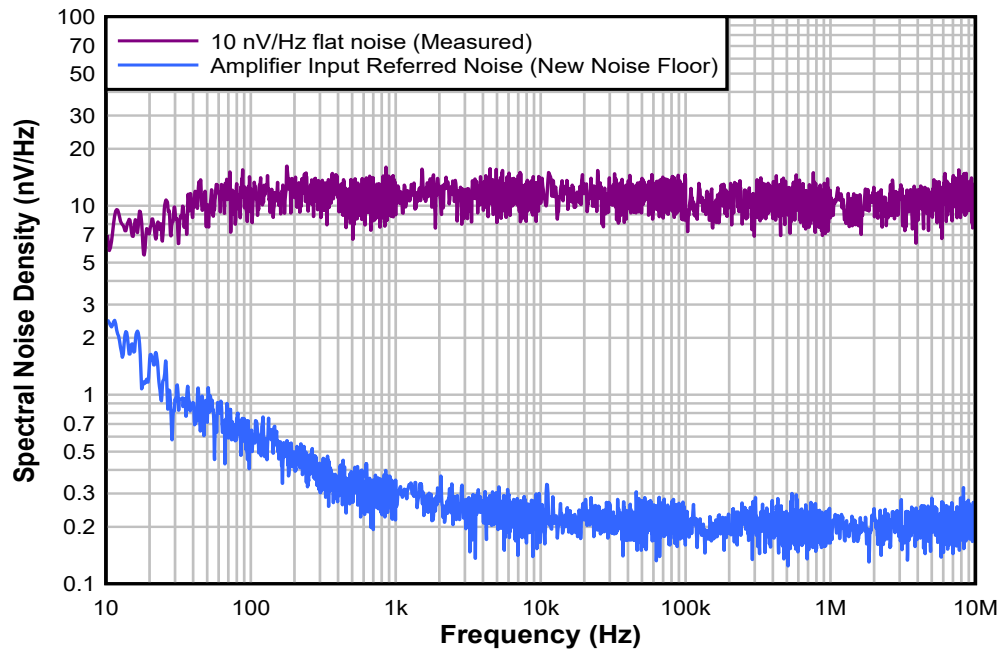


Abbildung 2-5. Gemessenes flaches Rauschen von 10 nV/Hz über eine Bandbreite von 10 Hz bis 10 MHz

Mit diesem Verstärker kann ein geringerer Rauschpegel gemessen werden (bis zu 1 nV/Hz und möglicherweise 0,9 nV/Hz). Das Eingangsrauschen des Verstärkers ist jedoch niedriger als das Rauschen des tatsächlichen Verstärkers (1/f-Rauschen des Operationsverstärkers), unter 1 kHz, wie in [Abbildung 2-6](#) gezeigt.

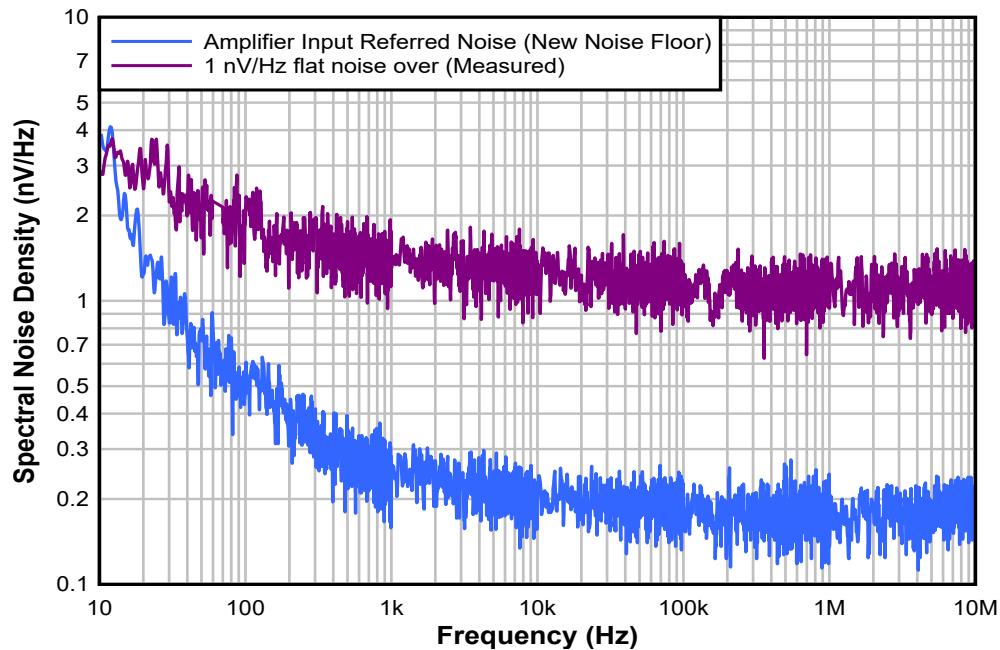


Abbildung 2-6. Gemessenes flaches Rauschen von 1 nV/Hz über eine Bandbreite von 1 kHz bis 10 MHz

3 Fazit

In diesem technischen Whitepaper werden die Grundlagen der Rauschmessung bei LDOs unter Verwendung eines Spektralanalysators behandelt. Das Dokument erläutert zudem die Anforderungen an das Design eines extrem rauscharmen Verstärkerschaltkreises, der zur Messung des Rauschens eines extrem rauscharmen LDO erforderlich ist. Der entwickelte Verstärkerschaltkreis profitiert von der im Abschnitt [Referenzen](#) [3] erörterten Methode mit parallelen Operationsverstärkern, um das eingangsbezogene Rauschen des Verstärkers zu verringern. Diese deutliche Reduzierung des Eingangsrauschens macht dieses Verstärkerdesign zu einem wichtigen Werkzeug zur Verstärkung winziger Signale innerhalb von Bandbreiten von 3 Hz bis 10 MHz. Neben der Verbesserung der Messung des Grundrauschens für jeden Spektralanalysator kann der Verstärkerschaltkreis auch verwendet werden, um die Messung des Grundrauschens bei beliebigen Netzwerkanalysatoren zu verbessern.

Die Verwendung eines Keramikkondensators als Filter für DC-Blockierung ermöglicht es dem Verstärker, Rauschen (winzige Signale) mit positiver oder negativer Offsetspannung zu verarbeiten.

4 Quellennachweise

1. Texas Instruments, [LDO-Rauschen verständlich gemacht](#), Anwendungsbericht.
2. Keysight Technologies, [Understanding Noise and Sensitivity in Spectrum Analyzers](#), Whitepaper, Keysight-Technologies-Website (2000–2025), aufgerufen am 21.10.2025.
3. G. Scandurra, G. Cannatà, G. Giusi and C. Ciofi, 2013. [Configurable Low Noise Amplifier for Voltage Noise Measurements](#), *22nd International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF) 2013*, Montpellier, Frankreich, 2013, S. 1–4, doi: 10.1109/ICNF.2013.6578999.
4. Texas Instruments, [Anwendungsbericht: Rauschanalyse in Operationsverstärkerschaltkreisen](#), Anwendungshinweis.

WICHTIGER HINWEIS UND HAFTUNGSAUSSCHLUSS

TI STELLT TECHNISCHE UND ZUVERLÄSSIGKEITSDATEN (EINSCHLIESSLICH DATENBLÄTTER), DESIGNRESSOURCEN (EINSCHLIESSLICH REFERENZDESIGNS), ANWENDUNGS- ODER ANDERE DESIGNBERATUNG, WEB-TOOLS, SICHERHEITSINFORMATIONEN UND ANDERE RESSOURCEN „WIE BESEHEN“ UND MIT ALLEN FEHLERN ZUR VERFÜGUNG. UND SCHLIESST ALLE AUSDRÜCKLICHEN UND STILLSCHWEIGENDEN GEWÄHRLEISTUNGEN AUS, EINSCHLIESSLICH UND OHNE EINSCHRÄNKUNG ALLER STILLSCHWEIGENDEN GEWÄHRLEISTUNGEN DER MARKTGÄNGIGKEIT, DER EIGNUNG FÜR EINEN BESTIMMTEN ZWECK ODER DER NICHTVERLETZUNG VON RECHTEN

Diese Ressourcen sind für qualifizierte Entwickler gedacht, die mit TI-Produkten entwickeln. Sie allein sind verantwortlich für (1) die Auswahl der geeigneten TI Produkte für Ihre Anwendung, (2) das Design, die Validierung und den Test Ihrer Anwendung und (3) die Sicherstellung, dass Ihre Anwendung die geltenden Normen sowie alle anderen Sicherheits- und sonstigen Anforderungen erfüllt.

Diese Ressourcen können jederzeit und ohne Vorankündigung geändert werden. Sie erhalten von TI die Erlaubnis, diese Ressourcen ausschließlich für die Entwicklung von Anwendungen mit den in der Ressource beschriebenen TI-Produkten zu verwenden. Jede andere Vervielfältigung und Darstellung dieser Ressourcen ist untersagt. Es wird keine Lizenz für andere Rechte am geistigen Eigentum von TI oder an Rechten am geistigen Eigentum Dritter gewährt. TI übernimmt keine Verantwortung für und Sie schützen TI und seine Vertreter gegen Ansprüche, Schäden, Kosten, Verluste und Verbindlichkeiten, die sich aus Ihrer Nutzung dieser Ressourcen ergeben.

Produkte von TI werden gemäß den [Verkaufsbedingungen von TI](#) , den allgemeinen [Qualitätsrichtlinien von TI](#) , oder anderen geltenden Bedingungen, die entweder auf [ti.com](#) verfügbar sind oder in Verbindung mit solchen TI-Produkten bereitgestellt werden. Durch die Bereitstellung dieser Ressourcen durch TI werden die geltenden Garantien oder Gewährleistungsausschlüsse von TI für TI-Produkte weder erweitert noch verändert. Sofern TI ein Produkt nicht ausdrücklich als kundenspezifisch oder nach Kundenwunsch gefertigt bezeichnet, handelt es sich bei TI-Produkten um Standard-, Katalog- und Allzweckgeräten.

TI widerspricht allen zusätzlichen oder abweichenden Bedingungen, die Sie möglicherweise vorschlagen und lehnt sie ab.

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

Letzte Aktualisierung 10/2025

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](#) 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