

Teil 3: Widerstandsrauschen und Berechnungsbeispiele

Eigenrauschen in Operationsverstärkerschaltungen

Rauschen ist die Ursache für Qualitätsverluste bei Audiosignalen und für Fehler bei Präzisionsmessungen. Für Entwickler von Leiterplatten und elektrischen Systemen ist es hilfreich zu wissen, mit welcher Art Rauschen sie im ungünstigsten Fall bei ihren Schaltungsentwürfen rechnen müssen und welche Verfahren zur Rauschreduzierung oder welche Messmethoden existieren.

Art Kay, Katharina Berberich*

Im zweiten Teil der Artikelreihe haben wir ein Verfahren entwickelt, um die spektrale Dichte des Rauschens, die wir aus einem Produktdatenblatt entnommen haben, in Rauschquellen in einem Operationsverstärkermodell umzurechnen. Der vorliegende Artikel erklärt, wie man mit diesem Modell das Gesamtrauschen am Ausgang einer einfachen Operationsverstärkerschaltung berechnen kann. Das eingangsbezogene Gesamtrauschen (Referred-to-Input, RTI) enthält Rauschen aus dem Spannungs-

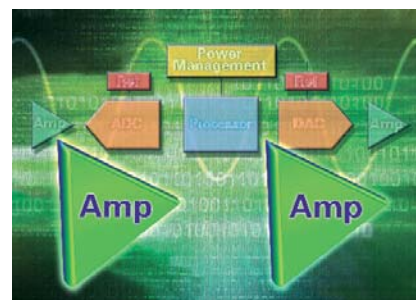
und Stromeigenrauschen des Operationsverstärkers und Widerstandsrauschen. Diese kombinierte Rauschquelle wird mit der „Rauschverstärkung“ des Operationsverstärkers multipliziert. Bild 1 zeigt die unterschiedlichen Rauschquellen, die zusammengefasst und mit der Rauschverstärkung multipliziert werden müssen.

Die Rauschverstärkung ist die Verstärkung, die die Operationsverstärker-Schaltung in Bezug auf das eingangsbezogene Gesamtrauschen „sieht“. In einigen Fällen entspricht diese Verstärkung nicht der Signalverstärkung. In Bild 2 ist ein Beispiel dargestellt, in dem die Signalverstärkung den Wert 1 und die Rauschverstärkung den Wert 2 hat. Die Quelle V_n steht für die Rauschanteile aus mehreren Quellen. Alle Rauschquellen werden in einer gemeinsamen Rauschquelle am nicht invertie-

renden Eingang zusammengefasst. Ziel ist, das ausgangsbezogene Rauschen (Referred-to-Output, RTO) der Operationsverstärkerschaltung zu berechnen.

$$\text{Rauschverstärkung} = \frac{R_f}{R_i} + 1 \quad (1)$$

Im vorherigen Artikel wurde gezeigt, wie man das Eingangsspannungsrauschen



berechnet. Aber wie kann man Stromrauschquellen in eine Spannungsrauschquelle umrechnen? Eine Möglichkeit besteht darin, für jede Stromquelle eine unabhängige Untersuchung durchzuführen und die Ergebnisse mittels Überlagerung zu addieren. Die Ergebnisse der einzelnen Stromquellen müssen quadriert, die Quadrate addiert und aus der Summe muss wieder die Wurzel gezogen werden (geometrische Addition).

Mit den Gleichungen 2 und 3 lässt sich für eine einfache Operationsverstärkerschaltung die Stromrauschquelle in eine äquivalente Spannungsrauschquelle umrechnen. In Bild 3 ist dies grafisch dargestellt.

$$e_{n,i} = i_n \cdot R_{eq} \quad (2)$$

$$R_{eq} = R_i \parallel R_f \quad (3)$$

Außerdem muss man das thermische Spannungsrauschen der Widerstände in der Operationsverstärkerschaltung berücksichtigen. Diese Spannungsquellen lassen sich mit einer Knotenanalyse unabhängig voneinander untersuchen. Die Ergebnisse werden mittels Überlagerung und quadratischer Addition zusammengefasst. Mit den Gleichungen 4 und 5 lassen sich alle thermischen Rauschquellen in einer einzigen eingangsbezogenen Rauschquelle zusammenfassen. Die auf

*Art Kay ist Senior Applications Engineer bei Texas Instruments in Dallas, USA. Katharina Berberich arbeitet als Field Application Engineer, Signal Chain, bei Texas Instruments in Freising.

das Eingangsrauschen bezogene thermische Rauschquelle wird als Ersatzwiderstand ausgedrückt (Bild 4).

$$R_{eq} = R_1 \parallel R_f \quad (4)$$

$$e_{nr} = \sqrt{4kTR_{eq}\Delta f} \quad (5)$$

Im letzten Schritt werden alle Rauschquellen zusammengefasst und mit der Rauschverstärkung multipliziert, um das Ausgangsrauschen zu berechnen. Dieser Effektivwert des Rauschens wird normalerweise mit dem Wert 6 multipliziert, um den Spitze-Spitze-Wert abzuschätzen. Aus dem ersten Teil der Artikelreihe wissen wir, dass bei einer beliebigen Messung der Momentanwert des Rauschens mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,7% unter dem Sechsfachen des Effektivwertes liegt. In den Gleichungen 6, 7 und 8 ist dieser letzte Schritt zusammengefasst.

$$e_{n_{in}} = \sqrt{e_{n_i}^2 + e_{n_v}^2 + e_{n_r}^2} \quad (6)$$

$$e_{n_{out}} = e_{n_{in}} \cdot \text{Rauschverstärkung} \quad (7)$$

$$e_{n_{out_{pp}}} = e_{n_{out}}^{6,0} \quad \text{für } \pm 3\sigma \quad (8)$$

Berechnungsbeispiel

Simulationssoftware kann dem Entwickler einen Teil der schwierigen Berechnung in der Praxis abnehmen. Dabei ist es wichtig, die theoretischen Grundlagen zu kennen, um nachzuvollziehen, wie Rauschen funktioniert. Vor der Schaltungssimulation sollte man stets eine Übersichtsrechnung durchführen, um festzustellen, ob das Ergebnis der Simulation korrekt ist. Im vierten Teil wird erklärt, wie man diese Untersuchung mit

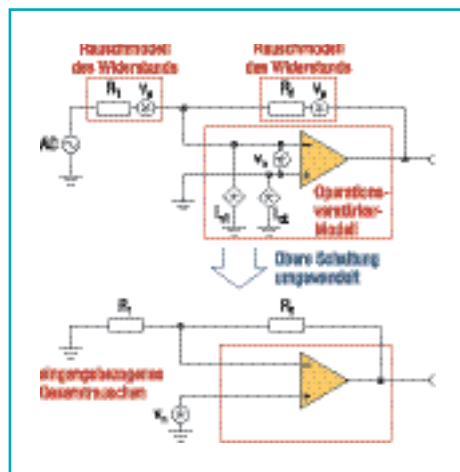


Bild 1: Zusammenfassung der Rauschquellen

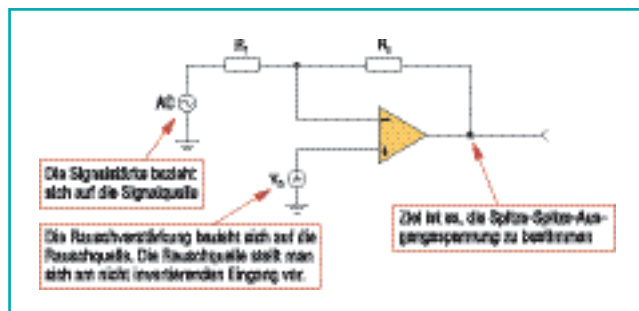


Bild 2: Rauschverstärkung und Signalverstärkung im Vergleich

POWERBENCH

Ihr DESIGN unsere LÖSUNG



Ganz einfach

Entwickeln Sie Ihren eigenen DC/DC Wandler oder Ihre konfigurierbare Stromversorgung mit Victor PowerBench™ und weiteren Online-Tools einfach, schnell und jederzeit.

- Spezifizieren Sie online Ihre Anforderungen
- Speichern Sie dieses Design im eigenen Account „My Designs“

Testen Sie es

Entwickeln Sie Ihre Produkte auf vicons.europa.com/powerbench

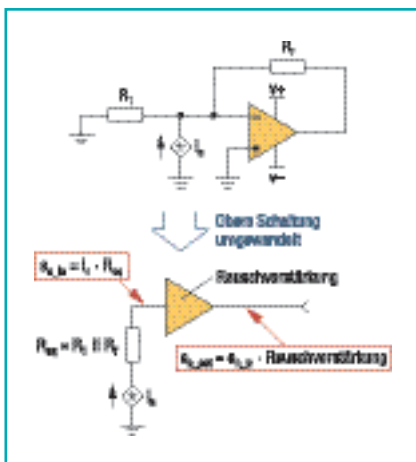


Bild 3: Umrechnung des Stromrauschens in Spannungsrauschen (Ersatzschaltung)

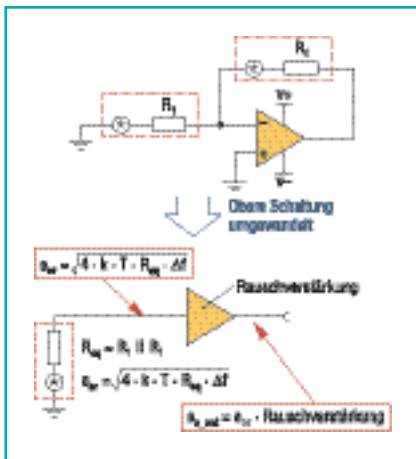


Bild 4: Eingangsbezogenes thermisches Rauschen für eine einfache Operationsverstärkerschaltung (Ersatzschaltung)

► einem SPICE-Simulationsprogramm durchführen kann. Bild 5 veranschaulicht die einfache Operationsverstärkerschaltung, die für dieses Untersuchungsbeispiel verwendet wird. Die technischen Daten wurden aus dem Datenblatt des OPA627 entnommen. Bei dieser Untersuchung werden im ersten Schritt die Rauschverstärkung und die Rauschbandbreite der Schaltung bestimmt. Die Rauschverstärkung (RV) ist durch die Gleichung

$$RV = \frac{R_f}{R_i} + 1 = \frac{100\text{ k}}{1\text{ k}} + 1 = 101 \quad (9)$$

gegeben. Die Signalbandbreite wird durch die Bandbreite des Operationsverstärkers begrenzt. Mit dem im Datenblatt aufgeführten Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt kann die Bandbreite der Schaltung anhand Gleichung 10 bestimmt werden. Falls das Verstärkungs-Bandbreitenprodukt nicht im Datenblatt enthalten ist, verwenden Sie

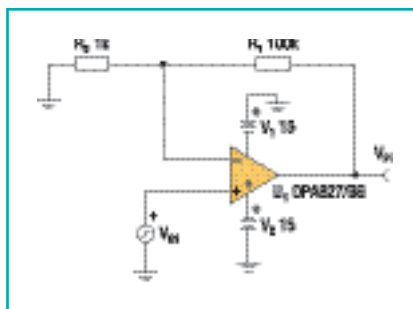


Bild 5: Beispiel für eine einfache Operationsverstärkerschaltung, die hier auf der Basis der Daten des OPA627 verwendet wurde

die angegebene Unity-Gain-Bandbreite. Diese entspricht annähernd dem Verstärkungs-Bandbreitenprodukt (Bild 6).

Regelbandbreite =
$$\frac{\text{Verstärkungsbandbreitenprodukt}}{\text{Rauschverstärkung}} \quad (10)$$

Regelbandbreite =
$$\frac{16\text{ MHz}}{101} = 158\text{ kHz}$$

Danach werden die Angaben für die Spektraldichte des Breitband- und 1/f-Rauschens aus dem Datenblatt entnommen. Diese Daten sind grafisch oder tabellarisch angegeben. Die Spektraldichtewerte und die Regelbandbreite werden verwendet, um das Gesamt-Eingangsspannungsrauschen zu berechnen. Beispiel 1 (im Internet) zeigt, wie das Gesamt-Eingangsrauschen mit den zuvor eingeführten Formeln berechnet wird.

Stromrauschen in Spannungsrauschen umrechnen

Als Nächstes muss das Stromrauschen in ein äquivalentes eingangsbezogenes Spannungsrauschen umgerechnet werden. Zuerst wandelt man die Spektraldichte des Stromrauschens in eine Stromquelle um. Die Stromquelle wird mit einem Ersatz-Eingangswiderstand multipliziert, um das Eingangsspannungsrauschen zu berechnen. In diesem Beispiel ist keine 1/f-Berechnung erforderlich, da es sich um einen Verstärker mit J-FET-Eingang handelt. Bei J-FET-Verstärkern gibt es im Allgemeinen kein 1/f-Stromrauschen. Dieser Berechnungsablauf ist in Beispiel 2 (siehe Internet) zu-

Stromversorgungen für Medizintechnik und Industrie

Standard ab Lager lieferbar
Kundenspezifische Anpassung und Entwicklung
Besondere "time-to-market."



GlobTek vertrieb@globtek.de

+49-7071-990 211

+49-7071-990 232

Medical & ITE Power Supply Guide

NO. 13	MODEL	W	IN V	OUT V	REG.	EFFICIENCY	TEMP. RANGE	ENVIRONMENTAL	EMC COMPLIANCE	OTHER FEATURES
SWITCHMODE POWER SUPPLIES										
20-60W	6TMD1000	100-250V	20V	45 VDC	1	80%	-40 to 70°C	CE	✓	✓
50-60W	6T-5001	100-250V	50V	45 VDC	1	80%	-40 to 70°C	CE	✓	✓
0-65W	6TMD0500	100-250V	0-65V	45 VDC	1	80%	-40 to 70°C	CE	✓	✓



www.globtek.de

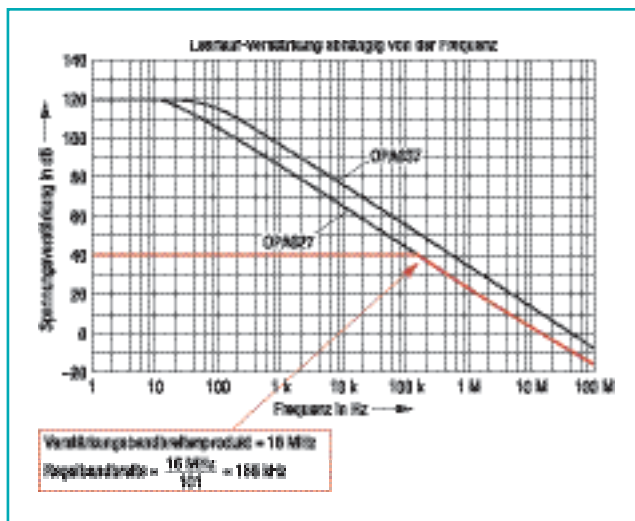


Bild 6:
Regelbandbreite bei einem einfachen, nicht invertierenden Verstärker

sammengefasst. Beispiel 3 (Internet) veranschaulicht, wie das eingangsbezogene Widerstandsrauschen berechnet wird. Hierbei entspricht das Widerstandsrauschen etwa der Größe des Operationsverstärkerrauschens und trägt dadurch erheblich zum Ausgangsrauschen bei. Da jetzt alle Rauschkomponenten berechnet sind, lässt sich das eingangsbezogene Gesamtrauschen bestimmen. Dieses Ergebnis wird mit der Rauschverstärkung multipliziert, um das Ausgangsrauschen zu berechnen. Abschließend wird der Umrechnungsfaktor aus Tabelle 1 (siehe Teil 1) verwendet, um den Spitze-Spitze-Wert am Ausgang abzuschätzen. Beispiel 4 (im Internet) zeigt die Einzelheiten. Dieser Teil der Artikelserie beendet die manuellen Berechnungsmöglichkeiten für eine einfache Operationsverstärkerschaltung. Mit diesem Verfahren kann man anhand der Angaben aus dem Datenblatt den Spitze-Spitze-Wert des Ausgangsrauschens bestimmen.

Für die Beispielschaltung errechnet sich der Spitze-Spitze-Wert des Ausgangsrauschens zu 1,94 mV_{pp}. In den nachfolgenden Artikeln wird anhand dieses Beispiels und anhand von Messungen sowie der SPICE-Analyse nachgewiesen, dass dies tatsächlich einen exakten Wert des Ausgangsrauschens darstellt. Obwohl die Berechnungen für eine einfache Schaltung ausgelegt waren, kann dieses Verfahren auch auf kompliziertere Schaltungen angewendet werden. Im nächsten Teil wird gezeigt, wie ein Softwareprogramm zur Schaltungssimulation (TINA SPICE) für die Rauschuntersuchung eingesetzt werden kann. (kr)

Literatur

Hogg, R. V., Tanis, E. A.: Probability and Statistical Inference, 3. Auflage, Macmillan Publishing Co
 Motchenbacher, C. D., Connelly, J. A.: Low-Noise Electronic System Design, A Wiley-Interscience Publication

Texas Instruments

Tel. +49(0)8161 803311

www.elektronikpraxis.de

Datenblatt des OPA627

Verstärker und lineare Bauelemente bei Texas Instruments

InfoClick

225084

POWERBENCH

Ihr Design SCHNELL und KOSTENGÜNSTIG



Ihr Produkt im Handumdrehen

Entwickeln Sie Ihren eigenen DC/DC Wandler oder Ihre konfigurierbare Stromversorgung mit Vicor PowerBench™ und weiteren Online-Tools einfach, schnell und jederzeit.

- Tausende individuelle Produkte zu Standardpreisen verfügbar
- kurze Lieferzeiten

Probieren Sie es aus

Besuchen Sie vicoreurope.com/powerbench und Sie erhalten Ihr Produkt in kürzester Zeit.

