

High-seitige Strommessung – präzise und mit extrem niedriger Stromaufnahme

Catherine Chang, Applications Engineer

Einführung

Die präzise high-seitige Messung von Strömen im Mikroamperebereich verlangt nach einem sehr kleinen Messwiderstand und einem Verstärker mit geringer Offsetspannung. Der Zero-Drift-Verstärker [LTC2063](#) besitzt eine maximale Eingangs-Offsetspannung von nur 5 μV und nimmt gerade einmal 1,4 μA auf. Er eignet sich damit hervorragend für die Realisierung einer kompletten, extrem wenig Strom aufnehmenden und präzisen Schaltung für die high-seitige Strommessung (Bild 1).

Diese Schaltung nimmt beim Messen von Strömen in einem weiten Bereich von 100 μA bis 250 mA nur einen Strom zwischen 2,3 μA und 280 μA auf. Die außergewöhnlich niedrige Offsetspannung des LTC2063 macht es möglich, in dieser Schaltung einen Shunt-Widerstand von nur 100 m Ω zu verwenden, was den maximalen Spannungsabfall am Shunt-Widerstand auf nur 25 mV begrenzt. Dies wiederum minimiert die am Shunt-Widerstand entstehenden Verluste und sorgt so dafür, dass der angeschlossenen Last ein Maximum an Leistung zur Verfügung steht. Dank des Rail-to-Rail-Eingangs des LTC2063 kann diese Schaltung mit sehr niedrigen Lastströmen arbeiten, wenn die eingangsseitige Gleichtaktspannung bis nah an die Versorgungsspannung kommt. Dank seines integrierten EMI-Filters ist der LTC2063 in Umgebungen mit hohem Störaufkommen vor Hochfrequenz-Störgrößen geschützt.

Die Ausgangsspannung der Schaltung für einen bestimmten Messstrom I_{SENSE} berechnet sich wie folgt:

$$V_{\text{OUT}} = \frac{R_{\text{OUT}} \times R_{\text{SENSE}}}{R_{\text{IN}}} I_{\text{SENSE}} = 10 \times I_{\text{SENSE}}$$

Nullpunktfehler

Eine kritische Spezifikation von Strommess-Lösungen ist der Nullpunktfehler bzw. der äquivalente Fehlerstrom am Eingang für den jeweils produzierten Ausgang, wenn der Messstrom null ist. Der Nullpunkt berechnet sich in der Regel aus der Eingangs-Offsetspannung des Verstärkers, dividiert durch R_{SENSE} . Die niedrige Eingangs-Offsetspannung des LTC2063 von typisch 1 μV und maximal 5 μV sowie die geringen typischen Eingangs-Bias- und Offsetströme von 1 pA bis 3 pA ermöglichen einen eingangsbezogenen Nullpunkt-Fehlerstrom von typisch nur 10 μA (1 $\mu\text{V}/0,1 \Omega$) bzw. maximal 50 μA (5 $\mu\text{V}/0,1 \Omega$).

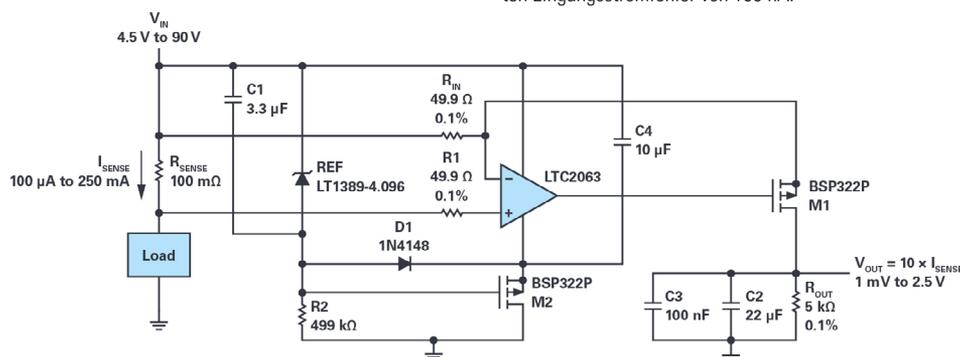


Bild 1: Präzise High-Side-Strommessschaltung auf Basis des Zero-Drift-Verstärkers LTC2063

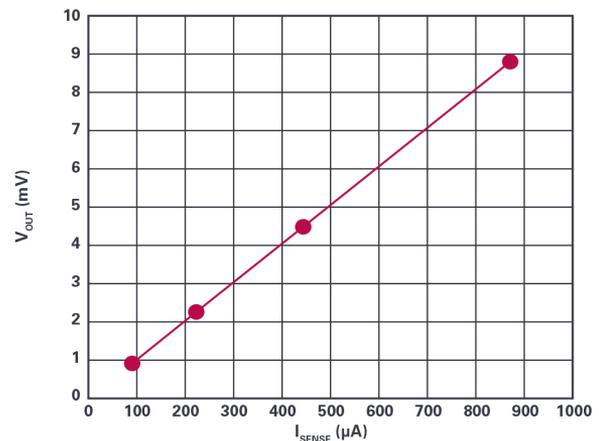


Bild 2: Keine Plateau-Bildung am unteren Ende bis zu einem I_{SENSE} -Wert von 100 μA herab

Dank dieses geringen Fehlers kann die Messschaltung ihre Linearität bis zum niedrigsten Strom des spezifizierten Bereichs (100 μA) aufrechterhalten, ohne dass es infolge eines Auflösungsverlusts zu einer Plateaubildung kommt (siehe Bild 2). Wie man in der Abbildung erkennt, verläuft die resultierende Kennlinie, die die Ausgangsspannung als Funktion des Messstroms wiedergibt, über den kompletten Strombereich absolut gerade.

Eine weitere Ursache für Nullpunktfehler ist der Drainstrom des ausgangsseitigen PMOS-Transistors bei einer Gatespannung von null (I_{DSS}). Dieser parasitäre Strom fließt, wenn V_{DS} nicht null ist und der PMOS-Transistor normalerweise abgeschaltet ist ($|V_{\text{GS}}| = 0$). Ein MOSFET mit einem hohen Leckstrom I_{DSS} erzeugt eine von null verschiedene positive Ausgangsspannung V_{OUT} , auch wenn kein I_{SENSE} fließt.

Als Transistor kommt in diesem Design der BSP322P von Infineon zum Einsatz, dessen maximaler I_{DSS} -Wert 1 μA beträgt (bei $|V_{\text{DS}}| = 100 \text{ V}$). Ein guter Schätzwert für den typischen I_{DSS} -Wert des BSP322P in dieser Anwendung bei Zimmertemperatur und mit $V_{\text{DS}} = -7,6 \text{ V}$ liegt bei nur 0,2 nA, was am Ausgang einen Fehler von nur 1 μV zur Folge hat. Bei der Messung eines Eingangsstroms von 0 A entspricht dies einem äquivalenten Eingangsstromfehler von 100 nA.

Die Architektur

Die Referenz [LT1389-4.096](#) erzeugt im Verbund mit der aus M2, R2 und D1 bestehenden Bootstrap-Schaltung mit sehr geringer Verlustleistung eine isolierte Spannung von 3 V (4,096 V zzgl. des V_{TH} -Werts von M2 von typisch -1 V). Diese verhindert, dass der LTC2063 mit seiner absoluten maximalen Versorgungsspannung von 5,5 V konfrontiert wird. Eigentlich würde ein Serienwiderstand zum Herbeiführen eines Biasstroms ausreichen, aber die Verwendung des Transistors M2 ermöglicht deutlich höhere Gesamt-Versorgungsspannungen und begrenzt außerdem die Stromaufnahme auf lediglich 280 μA am oberen Ende des Versorgungsspannungsbereichs.

Genauigkeit

Die Eingangs-Offsetspannung des LTC2063 hat einen konstanten eingangsbezogenen Stromfehler von typisch 10 μA zur Folge. An einem Full-Scale-Eingang von 250 mA ist der Offset somit nur für einen Fehler von 0,004 % verantwortlich. Am unteren Ende des Bereichs (100 μA) bedeuten 10 μA dagegen einen Fehler von 10 %. Da der Offset jedoch wie erwähnt konstant ist, lässt er sich herauskalibrieren. Wie man in Bild 3 sieht, beträgt der Gesamt-Offset des LTC2063 mit nicht abgestimmten parasitären Thermoelementen und etwaigen parasitären Eingangs-Serienwiderständen nur 2 μV .

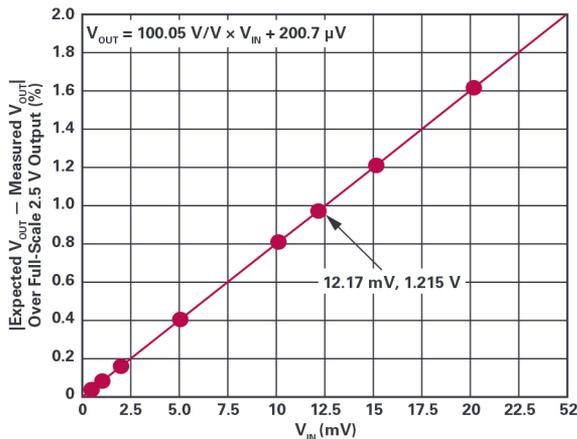


Bild 3: Umwandlung von V_{IN} in V_{OUT} bei der minimalen Versorgungsspannung von 4,5 V für den gesamten I_{SENSE} -Bereich. Ein Ausgangs-Offset von 200,7 μV ergibt, dividiert durch eine Spannungsverstärkung von 100,05 V/V, einen RTI-Eingangsoffset von 2 μV

Die in Bild 3 gezeigte Verstärkung von 100,05 V/V ist um 1,28 V/V größer als die bei den tatsächlichen Werten von R_{OUT} und R_{IN} der realen Schaltung zu erwartende Wert von $4,978 \text{ k}\Omega / 50,4 \Omega = 98,77 \text{ V/V}$. Ursache dieses Fehlers kann der parasitäre Serienwiderstand von etwa 500 m Ω zwischen den Eingängen des LTC2063 und R_{SENSE} sein.

Die wesentlichste Unsicherheitsquelle am Ausgang dieser Schaltung ist das Rauschen. Wichtig ist deshalb eine Filterung mithilfe großer Parallelkondensatoren, um die Rauschbandbreite und damit das integrierte Gesamtrauschen zu reduzieren. Mit einem 1,5-Hz-Ausgangsfilter verursacht der LTC2063 ein niederfrequentes, auf den Eingang bezogenes Rauschen von etwa 2 μV_{p-p} . Durch Mittelwertbildung des Ausgangs über eine möglichst lange Zeitspanne reduzieren sich die rauschbedingten Fehler weiter.

Als zusätzliche Fehlerquellen in dieser Strommessschaltung sind der parasitäre Leiterplattenwiderstand in Reihe mit R_{SENSE} am Eingang des LTC2063, die Toleranz der Widerstandswerte der verstärkungsbestimmenden Widerstände R_{IN} und R_{OUT} , Unstimmigkeiten zwischen den Temperaturkoeffizienten der verstärkungsbestimmenden Widerstände sowie eine Fehlerspannung an den Operationsverstärker-Eingängen infolge parasitärer Thermoelemente anzuführen. Die drei erstgenannten Fehlerquellen lassen sich minimieren, indem man für R_{SENSE} Vierdraht-Messwiderstände (Kelvin-Methode) verwendet und 0,1%-Widerstände mit ähnlichen oder niedrigen Temperaturkoeffizienten für den kritischen verstärkungsbestimmenden Pfad von R_{IN} und R_{OUT} einsetzt. Damit sich die parasitären Thermoelemente an den Eingängen des Operationsverstärkers gegenseitig aufheben, sollte R1 die gleichen Metall-Anschlüsse haben wie R_{IN} . Außerdem sollten asymmetrische Temperaturgradienten an den Eingängen so weit wie möglich vermieden werden.

Der Gesamtbeitrag aller in diesem Abschnitt behandelten Fehlerquellen beträgt höchstens 1,4 %, bezogen auf den Full-Scale-Ausgang von 2,5 V (siehe Bild 4).

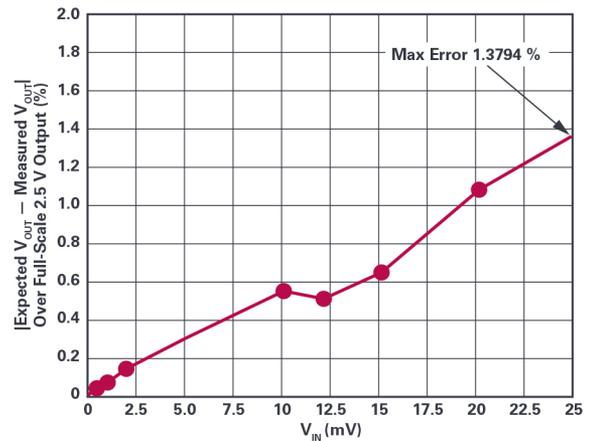


Bild 4: Der prozentuale Gesamtfehler bleibt über den gesamten Messbereich unter 1,4 %.

Stromaufnahme

Die minimale Stromaufnahme des LT1389-4.096 und des LTC2063 beträgt 2,3 μA bei den Mindestwerten von V_{SUPPLY} und I_{SENSE} (4,5 V bzw. 100 μA), bzw. bis zu 280 μA bei den maximalen Werten von V_{SUPPLY} und I_{SENSE} (90 V bzw. 250 mA), wie aus Bild 5 hervorgeht. Neben dem Strom, der von den aktiven Bauelementen aufgenommen wird, ist außerdem ein über M1 fließender Ausgangsstrom I_{DRIVE} erforderlich, der ebenfalls von V_{SUPPLY} kommen muss. Er ist proportional zur Ausgangsspannung und beträgt zwischen 200 mA für eine Ausgangsspannung von 1,0 mV (bei $I_{SENSE} = 100 \mu\text{A}$) und 500 μA für 2,5 V Ausgangsspannung (bei $I_{SENSE} = 250 \text{ mA}$). Die Gesamt-Stromaufnahme zusätzlich zu I_{SENSE} liegt damit zwischen 2,5 μA und 780 μA . Für R_{OUT} wird im Interesse eines sinnvollen Treibersignals für den ADC ein Wert von 5 k Ω gewählt.

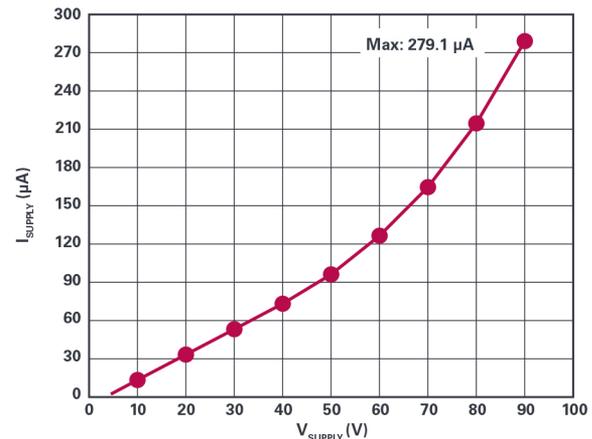


Bild 5: Die Stromaufnahme nimmt zwar mit der Versorgungsspannung zu, steigt aber niemals über 280 μA an.

Eingangsspannungsbereich

Die maximale Versorgungsspannung wird in dieser Architektur durch die maximale Spannung $|V_{DS}|$, die der PMOS-Ausgang verkraftet, festgelegt. Da der BSP322P für 100 V ausgelegt ist, ist 90 V ein sinnvoller Grenzwert.

Ausgangsspannungsbereich

Dieses Design kann eine Last von 5 k Ω ansteuern und eignet sich daher als Treiber für zahlreiche ADCs. Der Ausgangsspannungsbereich beträgt 0 V bis 2,5 V. Da der LTC2063 einen Rail-to-Rail-Ausgang besitzt, wird die maximale Gate-Treiberspannung nur durch die Reserven des LTC2063 begrenzt. Sie beträgt in dem hier vorliegenden Design typisch 3 V und berechnet sich aus den 4,096 V, die vom LT1389-4.096 kommen, abzüglich des typischen V_{TH} -Werts von M2 (typisch -1 V).

Da es sich beim Ausgangssignal dieser Schaltung nicht um eine Spannung, sondern um einen Strom handelt, haben der Masse- oder der Zuleitungs-Offset keinen Einfluss auf die Genauigkeit. Zwischen dem ausgangsseitigen PMOS M1 und R_{OUT} sind lange Leitungen deshalb durchaus erlaubt. R_{SENSE} kann somit in der Nähe des zu mes-

senden Stroms platziert werden, während sich R_{OUT} nah am ADC oder an anderen nachfolgenden Stufen der Signalkette befindet. Als Nachteil langer Leitungen ist zwar die größere EMI-Empfindlichkeit zu beachten, jedoch leitet der parallel zu R_{OUT} geschaltete Kondensator C3 (100 nF) jegliche schädlichen Störgrößen ab, bevor sie den Eingang der nachfolgenden Stufe erreichen können.

Grenzen der Geschwindigkeit

Da das Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt des LTC2063 20 kHz beträgt, wird diese Schaltung zur Messung von Signalen mit Frequenzen von höchstens 20 Hz empfohlen. Der parallel zur Last geschaltete Kondensator C2 mit 22 μ F filtert Ausgangsrauschen bis 1,5 Hz aus, um die Genauigkeit zu verbessern, und schützt die nachfolgende Stufe vor plötzlichen Stromspitzen. Diese Filterwirkung wird jedoch mit längeren Einschwingzeiten erkauft – besonders ganz am unteren Ende des Eingangsstrombereichs.

Zusammenfassung

Die extrem niedrige Eingangs-Offsetspannung des LTC2063, seine geringen I_{OFFSET} - und I_{BIAS} -Werte und sein Rail-to-Rail-Eingang ermöglichen präzise Strommessungen über den gesamten Bereich von 100 μ A bis 250 mA. Dank ihrer niedrigen Stromaufnahme von maximal 2 μ A kann die Schaltung im Großteil ihres Betriebsbereichs mit einer Stromaufnahme von deutlich unter 280 μ A auskommen. Neben der niedrigen Versorgungsspannung des LTC2063 bietet die geringe Stromaufnahme die Möglichkeit, die Schaltung mit hinreichenden Reserven aus einer Spannungsreferenz zu speisen.

Über die Autorin

Catherine Chang arbeitet als Applications Engineer in der Linear Products and Solutions Group im kalifornischen Milpitas. Sie ist seit 2006 bei Analog Devices und für Zero-Drift-Verstärker, Strommessverstärker und weitere Präzisions-Operationsverstärker in Signalaufbereitungs-Ketten für Sensoren zuständig. Sie besitzt ein Bachelor- und ein Master-Diplom in Elektrotechnik von der Stanford University. Erreichbar ist Catherine Chang unter catherine.chang@analog.com.

Online Support Community



Nehmen Sie Kontakt auf mit den Technologieexperten von Analog Devices in unserer Online Support Community. Stellen Sie Ihre schwierigen Designfragen, durchsuchen Sie die FAQs oder nehmen an einer Unterhaltung teil.

Besuchen Sie ez.analog.com