

# Entwurf einer 4-20 mA Stromschleife

*Alec M. Makdessian* **Datenübertragung mittels Stromschleife ist in vielen Umgebungen eine bevorzugte Technik; meistens wird sie in industriellen Anwendungen eingesetzt. Die meisten Systeme arbeiten mit der vertrauten, analogen 4-20 mA Stromschleife über Zweidraht. Ein verdrehtes, zweidrahtiges Kabel dient sowohl als Spannungsversorgung für das Modul als auch als Medium für die Übertragung des Ausgangssignals. Weniger populär ist die Dreidraht-Stromschnittstelle, deren primärer Vorteil die Übertragung von zusätzlicher Leistung für die Modulelektronik ist. Bei einer Zweidraht-Stromschleife sind als Versorgung nur 4 mA erlaubt – wohlge­merkt bei der Schnittstellenspannung.**

Stromschleifen bieten gegenüber Messumformern mit Spannungs­ausgang einige Vorteile. Zunächst einmal benötigen sie keine präzise oder stabile Versorgungsspannung. Ihre Unempfindlichkeit gegenüber ohm'schen Verlusten auf der Leitung erlauben einen Einsatz über lange Distanzen, außerdem bietet das zweidrahtige Kabel gute Immunität gegenüber Störungen und Rauschen. Der Strom von 4 mA, der nicht für die Informationsübertragung benötigt wird, erfüllt gleich zwei Zwecke: er liefert Leistung an ein entferntes Modul und unterscheidet zwischen Nulllage (4 mA) und keinem Informationsfluss (gleich kein Stromfluss). In einer zweidrahtigen 4-20 mA Stromschleife darf der Versorgungsstrom für die Sensorelektronik das Maximum von 4 mA nicht überschreiten, denn die verbleibende Spanne von 16 mA ist für die

Signalübertragung reserviert. Da eine Dreidraht-Stromschnittstelle einfach von der zweidrahtigen Version abgeleitet wird, beschränkt sich die nachfolgende Diskussion auf die zweidrahtige Version.

## Grundlagen der 4-20 mA Stromschnittstelle

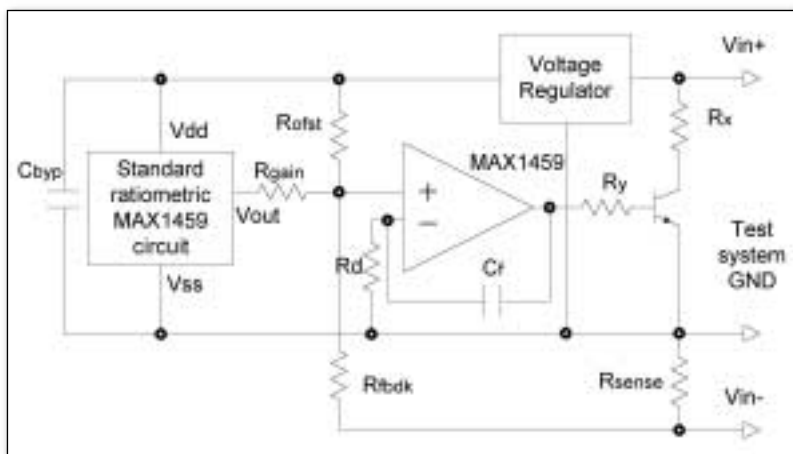
Konrad und Ashaur [1] haben in ihrem Artikel die Kompensation von piezoresistiven Sensoren mittels moderner Halbleiterkomponenten wie MAX1450, 1457, 1458 und 1459 aufgezeigt. Wenn diese Bausteine oder ASICs mit ähnlicher Funktion in einer ratiometrischen Konfiguration betrieben werden, bieten sie eine Kompensation erster Ordnung für Temperatureffekte (der MAX1457 kompensiert zusätzlich Effekte höherer Ordnung). Hierbei wer-

den typische Ungenauigkeiten von kleiner als  $\pm 1\%$  über Temperatur erreicht (der MAX1457 erreicht sogar  $\pm 0,1\%$ ). Eine typische ratiometrische Schaltung kompensiert den Sensorausgang auf eine Offset-Spannung von 0,5 V mit einem Hub von 4,0 V über den Betriebstemperaturbereich. Da Stromschleifen-Anwendungen einen Offset von 4 mA und einen Hub von 16 mA erfordern, muss der Spannungsausgang in einen Strom übersetzt werden, sobald eine eine ratiometrische 4-20 mA-Anwendung konfiguriert werden soll. Dieser Artikel zeigt Schaltungsdetails sowie erhaltene Ergebnisse einer Stromschleifenkonfiguration mit dem MAX1459 auf, einem Linearisierungsbaustein für Sensorsignale.

Als Startpunkt soll von einer normalen ratiometrischen Schaltung ausgegangen werden. Es wird gezeigt, wie diese für Stromschleifen-Anwendungen modifiziert werden kann. Im Prinzip muss nur ein Spannungsregler hinzugefügt werden, der die Schleifenspannung von 10 V bis 32 V auf 5 V ausregelt, um den MAX1459 zu betreiben. Vom MAX1459 kann der unbeschaltete, zur freien Verwendung verfügbare Operationsverstärker benutzt werden, um die Spannung in Strom zu wandeln. Hierzu werden ein externer Transistor sowie einige diskrete, passive Komponenten benötigt.

**Bild 1** zeigt die erforderliche Schaltung, die zusätzlich zur Standardschaltung mit dem MAX1459 benötigt wird. Der Spannungsregler kann irgendein preisgünstiger Baustein sein, dessen Ruhestrom ausreichend niedrig für das 4-mA-Budget ist. Die Widerstände  $R_X$  und  $R_Y$  sind optional.  $R_Y$  limitiert den Basisstrom des Transistors besonders während des Hochlaufs und bei hohen Schaltspitzen.

Der Einsatz von  $R_X$  ist schon mehr zu empfehlen, weil er den Transistor vor hohen Stromspitzen während des Einschaltvorgangs und vor Spannungstransienten schützt.  $R_X$  stellt auch bei hohen Temperaturen einen zuverlässigen Betrieb sicher. Indem er einen Teil der Leistung aufnimmt, hält er die Betriebstemperatur des Transistors innerhalb einer sicheren Region. Der Wert von  $R_X$  bestimmt sich aus minimaler Arbeitsspannung ( $V_{IN}$ ), maximalem Betriebsstrom (20 mA), dem Spannungs-



**Bild 1:** Diese Schaltung zeigt die grundlegenden Funktionsblöcke eines 4-20 mA Senders.

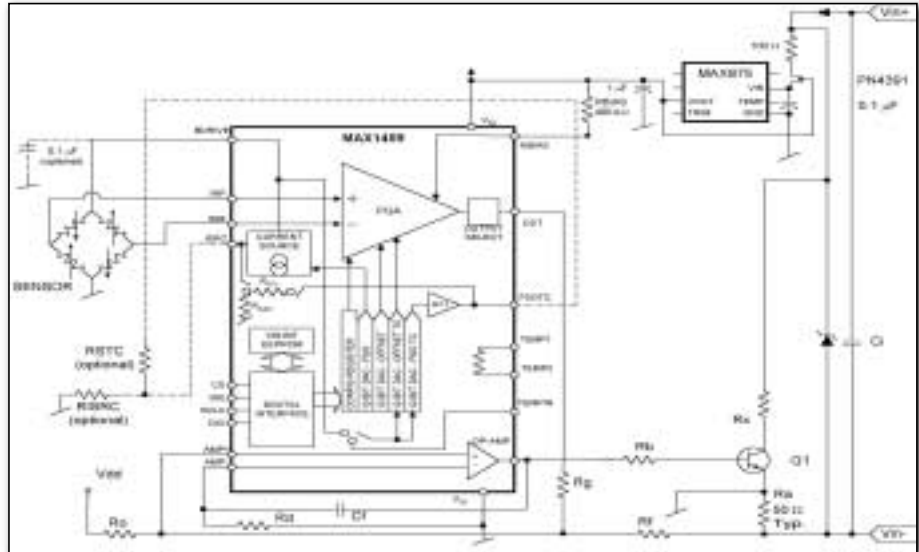
abfall über  $R_{SENSE}$  und der Sättigungsspannung  $V_{CE}$  des Transistors. In Anwendungen mit niedriger minimaler Eingangsspannung  $V_{IN}$  kann es notwendig werden,  $R_X$  komplett wegzulassen. Der Kondensator  $C_F$  wird zur Kompensation des Verstärkers empfohlen.

### Gleichungen für die Stromschleife

Alle Systemströme müssen durch die Widerstände  $R_{SENSE}$  und  $R_{FDBK}$  fließen. Das Verhältnis dieser beiden Widerstände ist so zu wählen, dass der Großteil des Stromes durch  $R_{SENSE}$  fließt, aber der Spannungsabfall darüber gering bleibt.

Wird  $R_{FDBK}$  wesentlich größer als  $R_{SENSE}$  gewählt, so vereinfacht dies die Gleichungen etwas. Dies erlaubt dann auch, den geringen parasitären Strom durch  $R_{FDBK}$  zu vernachlässigen. Auf dieser Basis können passende Werte für  $R_{SENSE}$  und  $R_{FDBK}$  gewählt werden.

Der Ausgang  $V_{OUT}$  des MAX1459 reicht von 0,5 V bei minimalem Druck bis hin zu 4,5 V bei maximalem Druck. Der Hub  $\Delta V_{OUT}$  beträgt somit 4 V. Der Offset-Strom des Senders beträgt 4 mA, der Vollbereichsausgang ist 16 mA und die Betriebsspannung  $V_{DD}$  beträgt 5 V. Weil der Strom durch  $R_D$  vernachlässigbar klein ist, fließt durch  $R_{FDBK}$  die Summe der Ströme durch  $R_{OFST}$  und



**Bild 2:** Die interne Beschriftung des MAX1459 hilft, die Schaltung aus Bild 1 besser zu verstehen.

$R_{GAIN}$ . Der Strom  $I$  reicht von 4 mA bis 20 mA. Daher gilt:

$$\frac{V_{DD}}{R_{OFST}} = \frac{R_{sense} \cdot I}{R_{fdbk}}$$

Durch Auflösen nach  $R_{OFST}$  erhält man:

$$R_{ofst} = \frac{R_{fdbk} \cdot V_{DD}}{R_{sense} \cdot I}$$

Als nächstes ist der Wert für  $R_{GAIN}$  zu bestimmen. Ein Vollbereichsausgang von 4 V über  $R_{GAIN}$  ( $\Delta V_{OUT}$ ) muss über  $R_{SENSE}$  16 mA addieren. Hierfür gilt:

$$\frac{\Delta V_{out}}{R_{gain}} = \frac{R_{sense} \cdot 16I}{R_{fdbk}}$$

Durch Auflösen nach  $R_{GAIN}$  erhält man:

$$R_{gain} = \frac{\Delta V_{out} \cdot R_{fdbk}}{R_{sense} \cdot 16mA}$$

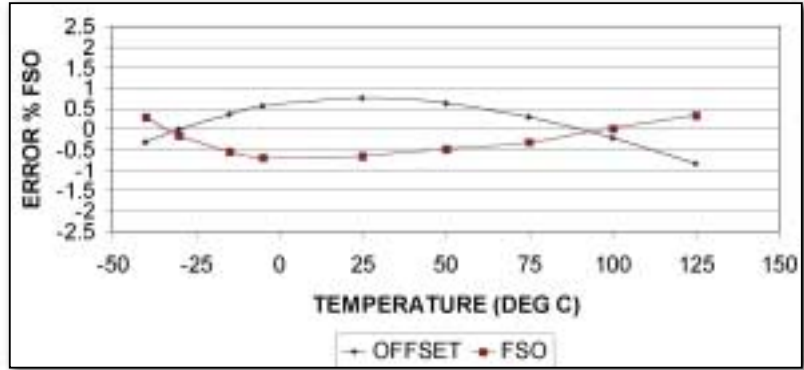
### Lösungen

**Bild 2** ist eine mehr detailliertere Version der Schaltung aus Bild 1. Wird  $R_{SENSE} = 50 \Omega$  gewählt, erzeugt dies einen Spannungsabfall von 1 V bei

20 mA. Wenn dann für  $R_{FDBK}$  100 k $\Omega$  gewählt werden, erhält man ein Widerstandsverhältnis, das den Fehler in den Gleichungen auf nur 0,05% begrenzt. Daher berücksichtigen die oben erwähnten Gleichungen den Effekt von  $R_{FDBK}$  in der Stromschleife nicht; dieser kann auch getrost vernachlässigt werden, da der Vollbereich und die Offsets durch Digital-Analog-Wandler innerhalb des MAX1459 eingestellt werden. Als nächstes soll eine minimale Betriebsspannung von 10 V und ein Wert von 390  $\Omega$  für  $R_X$  angenommen werden. Beim Maximalstrom verbleiben 2,2 V an Spielraum für  $R_{SENSE}$  und Spannungsabfall  $V_{CE}$  im Transistor. Für den optionalen  $R_Y$  wurden 5 k $\Omega$  gewählt. Zuletzt sind  $R_{OFST}$  und  $R_{GAIN}$  gemäß der Gleichungen 1 bis 4 zu bestimmen. **Tabelle 1** fasst alle Werte der Komponenten nochmals zusammen.

Die ermittelten Werte für  $R_{OFST}$  und  $R_{GAIN}$  sind Idealwerte und bieten nur sehr geringen Spielraum für Veränderungen. In der Praxis ist es wünschenswert, einen größeren Abstimmbereich für den Vollbereichsausgang zu erhalten, indem der Wert für  $R_{GAIN}$  erniedrigt wird. Der Wert von  $R_{OFST}$  sollte ebenfalls geringfügig verändert werden. Dieses Vorgehen erlaubt den Einsatz von Widerständen mit niedriger Genauigkeit. Deren Temperaturkoeffizient kommt nicht zum Tragen, da der MAX1459 den gemeinsamen Temperatureffekt der Widerstände kompensiert.

Durch Spannungs- und Lastschwankungen hervorgerufene Fehler werden durch den MAX1459 nicht kompensiert. Daher sollte der Spannungsregler diese möglichen Fehlerquellen von vor-



**Bild 3:** Nach der Kompensation erreicht man eine Reduzierung der Linearitätsfehler auf unter  $\pm 1\%$ .

herein ausregeln. Um innerhalb der Grenze von 4 mA zu bleiben, sollte der Regler-Ruhestrom weniger als 500  $\mu A$  betragen. Die Spannungsgenauigkeit und der Temperaturkoeffizient des Reglers sind von zweitrangiger Bedeutung, da der MAX1459 diese Parameter kompensiert. Die maximale Eingangsspannung des Reglers sollte größer sein als die maximale Spannung zur Versorgung der Stromschleife ( $V_{IN,MAX}$ ). Ein Abblockkondensator  $C_{BYP}$ , zusätzlich zu dem in der ratiometrischen Schaltung verwendeten, wurde eingefügt. Er unterdrückt Störungen im Ausgang der Stromschleife, die durch Schreib- bzw. Lesevorgänge im EEPROM des MAX1459 hervorgerufen werden. Der Wert dieses Kondensators hängt von der Leiterbahnführung und von den technischen Daten des Spannungsreglers ab. Die Versorgung des EEPROM kann von der des MAX1459 mit einem R-C-Netzwerk getrennt werden, dessen Kondensator einen großen

und dessen Widerstand einen kleinen Wert aufweisen.

Der Masseanschluss des Testsystems sollte an der Verbindung von  $R_{SENSE}$  und dem Emitter des Ausgangstransistors angeordnet werden. Dieser Knoten entspricht dem  $V_{SS}$ -Knoten des MAX1459. Da der Masseanschluss schwebend ist, darf er in einem Testsystem mit mehreren Messumformern nicht parallel zu anderen Geräten angeschlossen werden. Der Schleifenstrom sollte auch nicht gemessen werden, solange zwischen dem MAX1459 und dem Testsystem digitale Daten ausgetauscht werden. Zum Schalten des Masseanschlusses und von digitalen Signalen, die zum Programmieren der individuellen Module benötigt werden, sind Relais im DIP-Gehäuse zu empfehlen.

Die nach Kompensation des Sensors erhaltenen Messergebnisse sind in **Bild 3** gezeigt. Grobe Sensorfehler sind bis auf  $\pm 1\%$  temperaturkompensiert. Der Kompensationsvorgang nimmt eine Ausgangsspannung des Messumformers an, die ratiometrisch zur Versorgungsspannung ist (die Stromquelle des MAX1459). Dieser Vorgang erfordert mindestens zwei Testdrücke (Null und Vollbereich) bei zwei willkürlichen Testtemperaturen. Idealerweise sind die beiden Temperaturen diejenigen, bei denen die besten Kompensationsergebnisse erzielt werden sollen.

PARAMETER	WERT	BEMERKUNGEN
Minimale Versorgung	10 V	Bestimmt durch Spannungsabfall im Regler und $R_X$ .
Maximale Versorgung	32 V	Wird begrenzt durch den Regler und den Transistor.
Minimalstrom	4 mA	Referenzausgang bei null Druck.
Mittelstrom	12 mA	Stromausgang bei Mittelstellung.
Maximalstrom	20 mA	Stromausgang bei maximalem Druck.
$R_{SENSE}$	50 $\Omega$	1 Volt Spannungsabfall bei 20 mA.
$R_{FDBK}$	100 k $\Omega$	Sollte $\gg$ als $R_{SENSE}$ sein.
$R_{OFST}$	5 M $\Omega$	Bestimmt den Offset-Wert in der Stromschleife.
$R_{GAIN}$	500 k $\Omega$	Bestimmt die Verstärkung in der Stromschleife.
$R_X$	390 $\Omega$	Schützt den Ausgangstransistor.
$R_Y$	5 k $\Omega$	Optional.
$C_{BYP}$	2,2 $\mu F$	Reduziert Schaltrauschen im Schleifenausgang.
$C_C$	0,1 $\mu F$	Empfohlen für Stabilität über Temperatur.
$R_D$	100 k $\Omega$	Empfohlen für Stabilität über Temperatur.

**Tabelle 1:** Komponentenwerte für 4-20 mA Anwendungen



**Alec M. Makdessian** ist Mitarbeiter bei Maxim Integrated Products in Sunnyvale, Kalifornien

*Literatur*

[1] B. Konrad und M. Ashaur: „Demystifying Piezoresistive Pressure Sensors“, *Sensors*, Juli 1999, Seiten 12 bis 25