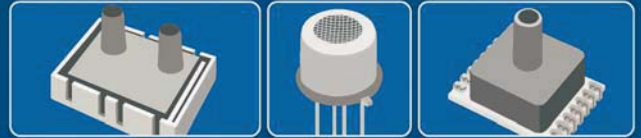


SIGNALKONDITIONIERUNG FÜR THERMISCHE DURCHFLUSSENSENSOREN

Reduziert auf das Maximum

Mass Flow Gas Pressure



Die Durchflussmessung mithilfe von Heizelementen und Temperaturfühlern eignet sich gut für die Miniaturisierung mit MEMS-Sensoren. Die gesamte Signalauswertung lässt sich dabei auf einem einzigen IC unterbringen. Dieser kann verschiedene Durchflussaufnehmer auch bidirektional auswerten und dabei das sehr genaue CTA-Messverfahren anwenden.

MARKO HEPP
BERND SCHRÖRS

Sensoren zur Durchflussmessung von Masse, Volumen oder Geschwindigkeit verwenden sehr unterschiedliche physikalische Messprinzipien. Diese bewerten, beispielsweise rein mechanisch, die Drehung eines Flügelrads oder die an Verengungen entstehenden Druckunterschiede oder Verwirbelungen. Bei der Messung des Coriolis-Effekts werden flexible Messleitungen proportional zu der Durchflussgeschwindigkeit in messbare Schwingungen versetzt. Bei nichtinvasiven magnetisch-induktiven Ver-

fahren erzeugt ein starkes polarisierendes Magnetfeld in einer leitenden Flüssigkeit oder einem Gas eine messbare Spannung proportional zur Fließgeschwindigkeit. Mit dem aus anderen Sensoranwendungen bekannten Dopplereffekt kann, etwa mittels Ultraschall, auch eine Fließgeschwindigkeit erfasst werden. Stark an Bedeutung gewinnt das thermische Verfahren, bei dem der Wärmetransport in einer Flüssigkeit oder in einem Gas ausgewertet wird. Dazu führt ein Heizelement eine bestimmte Wärmemenge zu, und Temperatursensoren messen die Wärmeverteilung. Das Prinzip eignet sich sehr gut für die Miniaturisierung mit MEMS-Sensoren

und für die Integration der Ansteuer- und Auswerteelektronik. Damit können auch geringe Durchflussmengen, wie in medizinischen Anwendungen, präzise gemessen und gesteuert werden.

Die thermische Durchflussmessung

Die mathematischen Grundlagen für die thermische Durchflussmessung wurden bereits vor 99 Jahren vom Physiker L.V. King [1] mit dem Kingschen Gesetz zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit gelegt. Dieses beschreibt, dass die einem senkrecht im Messzylinder montierten

1 MEMS-SENSOR

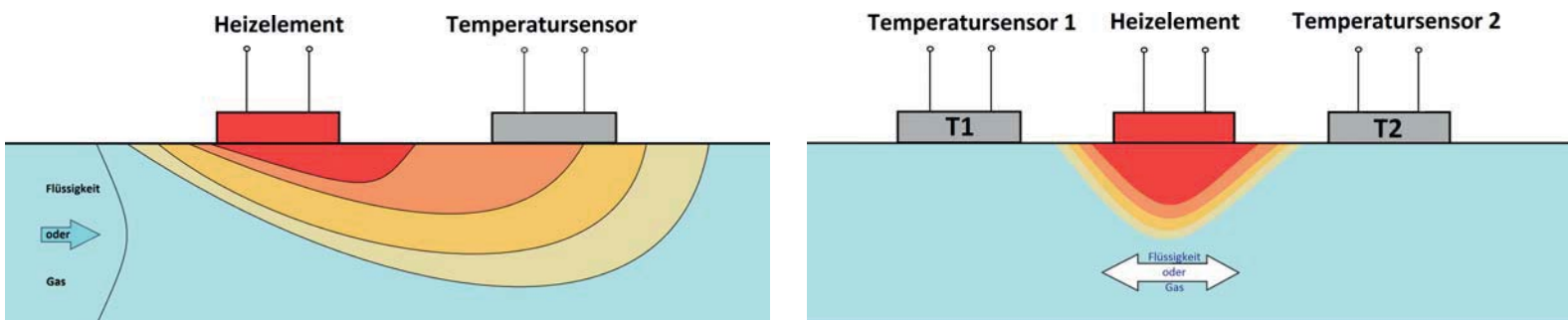


Bild 1. Thermischer Durchflusssensor mit einem (links) und mit zwei Temperaturlaufnehmern (rechts)

2 iC-HO: AUFBAU

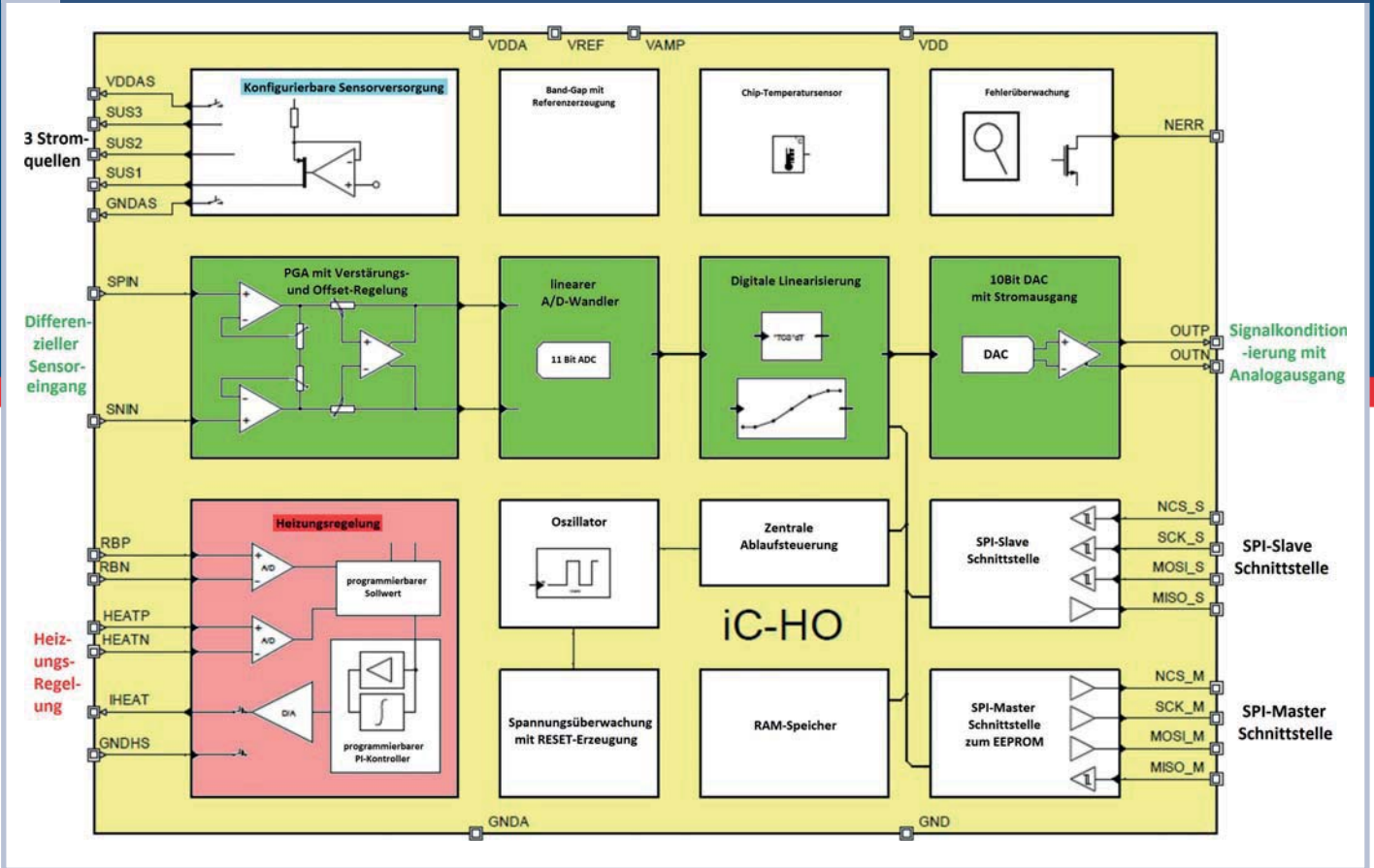


Bild 2. Funktionsblöcke der universellen Sensorsignalkonditionierung beim iC-HO

Heizdraht entzogene Wärmemenge pro Zeiteinheit abhängig ist von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der Dichte des Gases oder der Flüssigkeit. Die Berechnung setzt voraus, dass der Messzylinder vollständig durchströmt wird und der Heizdraht die Durchströmung nur unwesentlich stört. Da der Durchmesser des Messrohrs bekannt ist, muss nur noch das Strömungsprofil des zu messenden Mediums definiert sein. Bei komprimierbaren Gasen ist es notwendig auch den Druck zu messen, um aus der Dichte den Volumen- (m³/s) oder Massestrom (kg/s) berechnen zu können. Die Regelung der Heizleistung kann entweder auf konstanten Leistungsbetrieb Constant Power Anemometer, CPA) oder auf konstanten Differenztemperaturbetrieb (Constant Temperature Anemometer, CTA) eingestellt sein. Typische MEMS-Durchflusssensoren haben einen oder auch zwei Temperatursensoren. Bild 1 zeigt links symbolisch einen Durchflusssensor mit einem Heizelement und einem Temperatursensor sowie die prinzipielle Temperaturverteilung des flie-

ßenden Gases oder der Flüssigkeit. Der rechte Bildteil zeigt einen Durchflusssensor mit einem Heizelement und zwei Temperatursensoren bei einer Wärmeverteilung ohne Strömung. Mithilfe des zweiten Temperatursensors lässt sich ein Durchfluss in beide Richtungen messen.

Aus dem Kingschen Gesetz ergibt sich die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit nach einer vereinfachten Formel zu:

$$P_{He} = (T_{He} - T_M) \times (k_1 + k_2 \cdot S^N)$$

P_{He} ist dabei die Heizleistung, T_{He} die Temperatur der Heizung und T_M die Temperatur des fließenden Mediums. Die für jeden Sensor spezifischen Konstanten k₁ und k₂ werden durch Kalibrierung ermittelt, und S steht für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit. Der Exponent N ist im Idealfall 0,5 und kann je nach Sensoraufbau zwischen 0,25 und 0,5 liegen.

Typische Anwendungen für Durchflusssensoren in Gasen oder Flüssigkeiten sind:

- Messung der Strömungsgeschwindigkeit,
- Durchfluss-Controller oder Wächter,
- Volumendurchflussmessung,
- Massedurchflussmessung,
- Füllstands- und Grenzwertüberwachung.

Heizen, regeln und Sensorsignale flexibel konditionieren

Für den Betrieb und die Erfassung der Messwerte eines Durchflusssensors reichen die typischen Standard-ICs für die Signalkonditionierung nicht aus [2]. Es sind zusätzlich die Regelung des Heizkreises sowie die Versorgung der vorhandenen Sensorbrückenschaltungen notwendig. Bei der Durchflussmessung von Gasen ist zur Volumenbestimmung zusätzlich eine Druckmessung erforderlich. Für diese komplexeren Aufgaben wurde der universelle Sensorsignal-Konditionierbaustein „iC-HO“ entwickelt. Bild 2 zeigt das Blockdiagramm mit den wesentlichen Funktionsblöcken für den geregelten Heizkreis, die Sensorversorgung und den Si-

3 LINEARISIERUNG

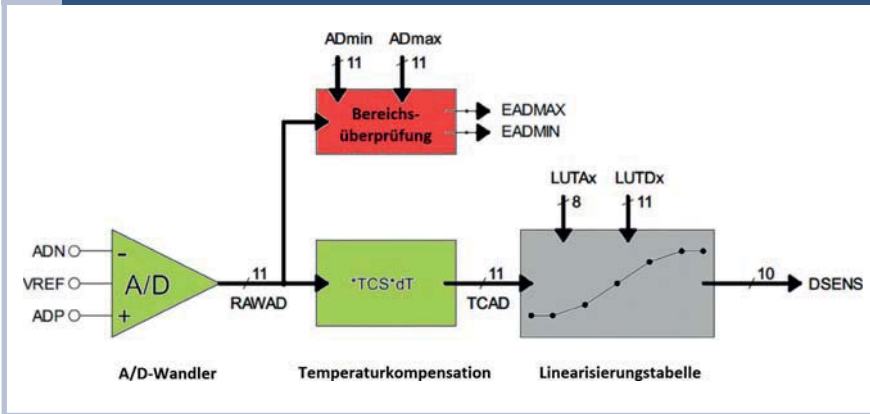


Bild 3. Digitale Linearisierung der Sensorkennlinie

gnalkonditionierungspfad mit Linearisierung und Analogausgang. Letzterer kann für die Ausgabe der linearisierten Messwerte als differenzieller Spannungswert (typisch von +4 V bis -4 V) verwendet werden.

Auf dem Chip befindet sich eine SPI-Schnittstelle (Slave) für die Verbindung zu einem Mikrocontroller. Sie bietet den Zugriff auf alle programmierbaren Funktionen der Heizkreisregelung, der Signalkonditionierung, der Linearisierung, der Kalibrierung und des Messbetriebs. Die bei der Kalibrierung ermittelten Parameter und Kennlinien-Linearisierungsdaten können über die zweite SPI-Schnittstelle (Master)

in einem externen EEPROM abgelegt werden. Der iC-HO liest diese Daten nach dem Power-up aus und verifiziert die vollständige Konfiguration durch einen CRC-Check. Verläuft dieser negativ, so wird der Auslesevorgang maximal dreimal wiederholt. Eine Initialisierung über die SPI-Schnittstelle kann nach Beendigung des EEPROM-Einlesens vom Mikrocontroller vorgenommen werden.

Der Temperatursensor im iC-HO liefert die Chiptemperatur mit einer Auflösung von 1 °C. Ein einstellbarer Offset-Wert wird automatisch hinzu addiert. Falls der MEMS-Sensor keinen Umgebungstemperatursensor enthält, kann auch er-

satzweise der auf dem Auswerte-Chip iC-HO ermittelte Wert für die Korrektur der Temperaturabhängigkeit von Offset und Empfindlichkeit des Sensors verwendet werden. Die internen A/D-Wandler-Referenzspannungen sind herausgeführt und können bei Bedarf auch von extern zugeführt werden.

Für die Sensormessbrücken beziehungsweise Messwiderstände der angeschlossenen Sensoren stellt der iC-HO drei Stromquellen zur Verfügung: SUS1 und SUS2 mit je 560 µA zur Konstantstromversorgung einer Sensorhalbbrücke und SUS3 mit vier einstellbaren Werten von 140 µA, 280 µA, 420 µA und 560 µA für den Umgebungstemperatursensor des MEMS-Sensors. Über den vollen Temperaturbereich haben die Stromquellen SUS1 und SUS2 einen Gleichlauf von typisch <0,1 Prozent.

Der Sensorsignalkonditionierer iC-HO kann im Abgleichbetriebsmodus die aufbereiteten Analogsignale an der Analogausgangsschnittstelle OUTP/OUTN ausgeben. Dadurch ist der Abgleich von Verstärkung und Offset über die Standard-Systemschnittstelle möglich. Die nötigen Referenzwerte zur Errechnung der Temperatur des Heizelements und des Umgebungstemperatursensors werden durch eine automatisierte Kalibrierung bestimmt, die über die SPI-Slave-Schnittstelle angestoßen werden kann.

4 REGELUNG

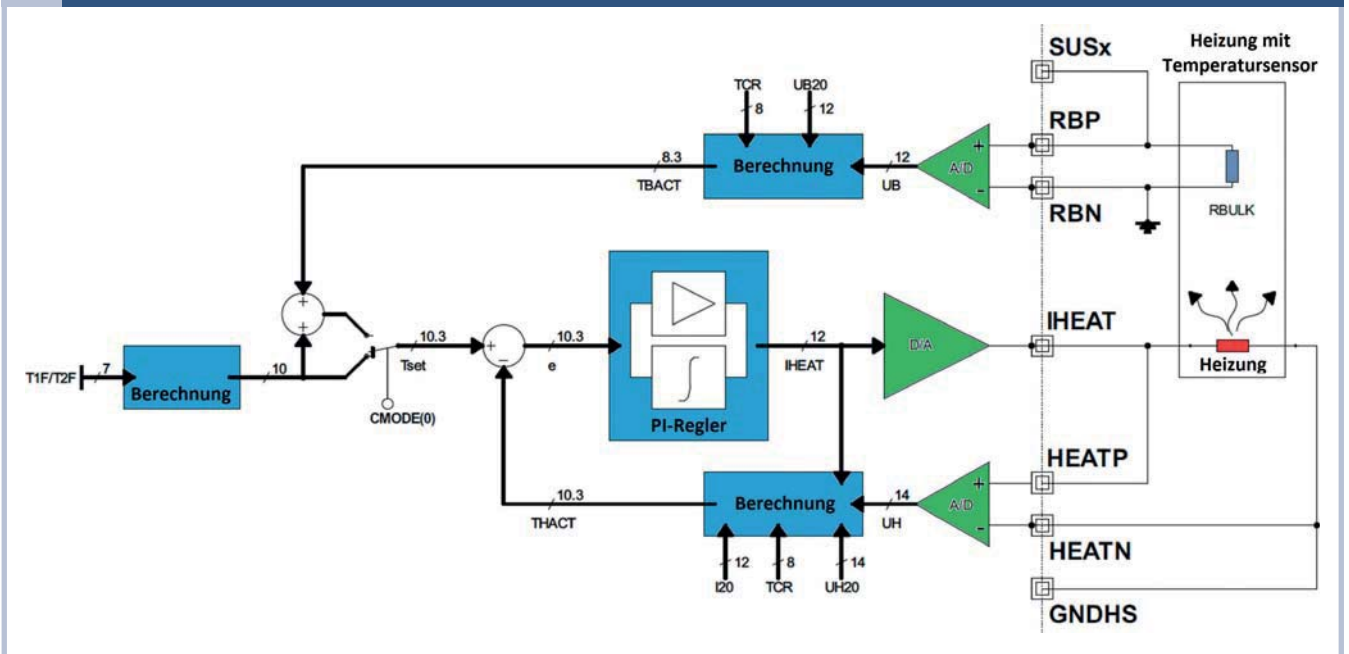


Bild 4. PI-Heizungsregelung für thermische Durchflusssensoren

Signalkonditionierung und Linearisierung der Sensorkennlinie

Der Signalkonditionierungspfad für SPIN/ SNIN verfügt über einen zweistufigen, programmierbaren Verstärker mit $V = 1,1$ bis 48 und einer programmierbaren Offset-Einstellung. Der Offset kann im Betrieb

sowohl automatisch mit der Versorgungsspannung als auch mit der Temperatur nachgeführt werden. Das konditionierte differenzielle Sensorsignal (ADP-ADN, **Bild 3**) wird mit dem nachgeschalteten 11-Bit-A/D-Wandler digitalisiert.

Danach erfolgen, wie in **Bild 3** gezeigt, eine Bereichsüberprüfung mit ein-

stellbarer Ober- und Untergrenze und eine nachgeschaltete digitale Temperaturkompensation der Sensorempfindlichkeit. Die Linearisierung der Sensorkennlinie erfolgt aus einer Wertetabelle (LUT). Diese enthält die Korrekturwerte für bis zu neun Linearisierungspunkte, die über den ganzen A/D-Wandler-Wertebereich frei wählbar sind. Der Abstand ist mit 8 Bit Auflösung nahezu beliebig einstellbar. Der Korrekturwert selbst hat volle 11 Bit Auflösung. Zwischen zwei Linearisierungspunkten wird dann linear interpoliert. Der Ausgangswert DSENS der LUT wird mit 10 Bit Auflösung über die digitale Schnittstelle sowie nach einer D/A-Wandlung an OUTP/OUTN zur Verfügung gestellt.

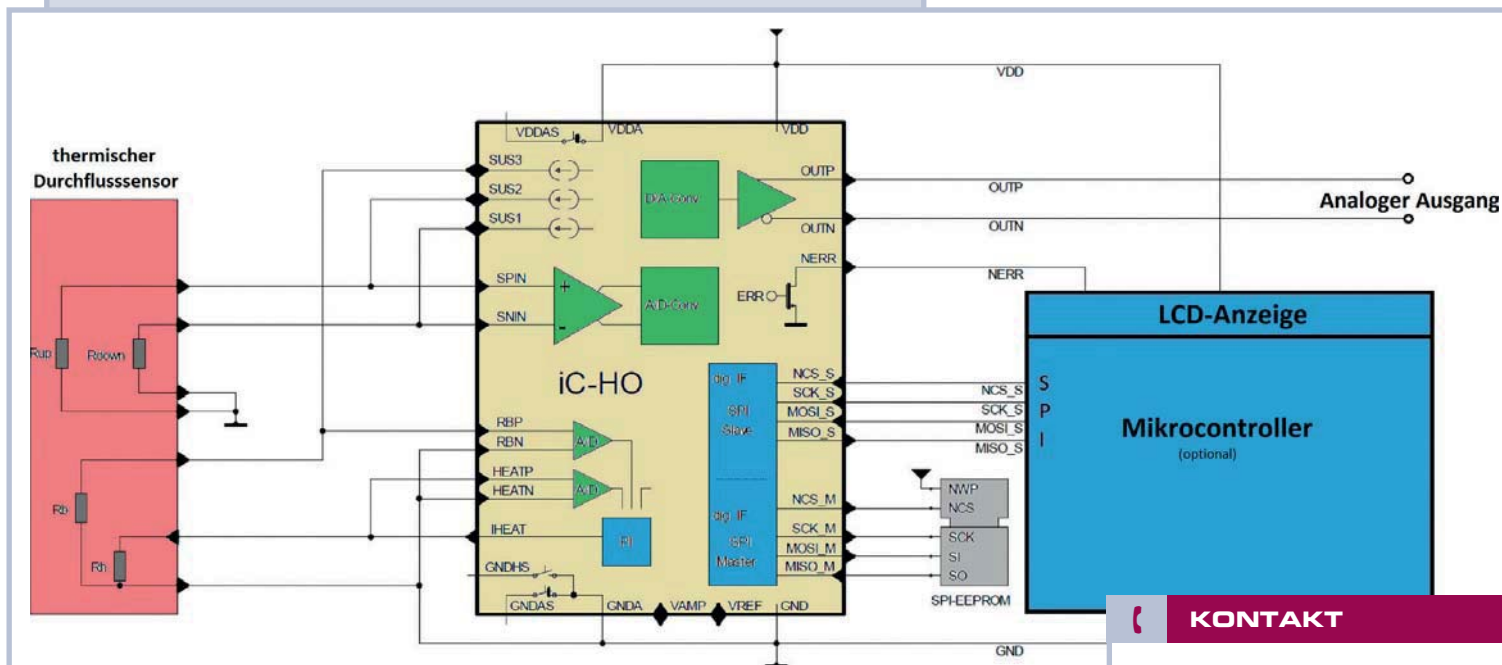
Die Messfrequenz dieses Pfades beträgt 10 kHz. Somit können auch sich schnell ändernde Zustände gut erfasst werden.

Temperaturregelung des Heizelements

Die zwei wesentlichen Betriebsarten bei der Durchflussmessung sind, wie bereit eingangs erwähnt, der konstante Leistungs- (CPA) und der konstante Differenztemperaturmodus (CTA). Der Baustein iC-HO ist dabei in der Lage, neben einer Konstantstromversorgung des

WISSENSWERT

Mit oder ohne Mikrocontroller? Das **Bild** zeigt die minimale Systemkonfiguration. Sie besteht aus dem thermischen Durchflusssensor, dem iC-HO und einem EEPROM mit Kalibrierdaten und den Betriebseinstellungen. Die Ausgabe des Messwerts erfolgt dann als Spannung an den differenziellen analogen Ausgängen (OUTP/OUTN). Sie ist proportional zum gemessenen Durchfluss und liegt typisch zwischen +4 V bei maximalem Durchfluss in eine Fließrichtung und -4 V in der Gegenrichtung oder ohne Durchfluss. Das Durchflussmesssystem zeigt auch optional einen Mikrocontroller mit Anzeige. Dieser kann die Messwerte digital aus dem Sensorsignalkonditionierer auslesen und anzeigen. Wenn ein Mikrocontroller mit On-Chip FLASH oder EEPROM verwendet wird, ist das EEPROM des iC-HO optional. Für die digitale Übertragung per IO-Link ist ein Transceiver erforderlich, der dann auch die analoge und digitale Spannungsversorgung enthält [3, 4]. Der Leistungsbedarf des iC-HO im IDLE-Modus beträgt typisch 90 mW. Dazu ist der Leistungsbedarf des MEMS-Sensors, insbesondere des Heizelements, zu addieren. Mit einem Mikrocontroller und einem Power-Schalter kann auch ein Einzelmessbetrieb implementiert werden. Eine reduzierte Messfrequenz verringert dann den Leistungsbedarf drastisch. Die Startzeit des iC-HO mit EEPROM beträgt 1,6 ms. Danach arbeitet die Regelung, und es können Messwerte abgerufen werden. Da die üblichen MEMS-Sensoren thermische Zeitkonstanten von bis zu 10 ms besitzen, hängt die Verzögerung zwischen Einschalten und Erhalt des ersten gültigen Messwerts von diesen ab.



Durchflussmessung mit oder ohne Mikrocontroller und analogem Ausgang. Tritt eine Fehlermeldung im Sensorsignalkonditionierer auf, so kann der Mikrocontroller diese analysieren und Details an die übergeordnete Steuerungsebene weitergeben. Auch ist über IO-Link die Parametrierung des Durchflussmesssystems im Servicefall möglich [3]

KONTAKT

iC-Haus GmbH,
55294 Bodenheim,
Tel. 06135 9292-300,
Fax 06135 9292-192,
www.ichaus.de

Heizelements sowohl eine Konstant- als auch eine Differenztemperaturregelung auszuführen. Bild 4 zeigt den Heizkreis eines typischen MEMS-Durchflusssensors mit Heizung und Temperatursensor RBULK als Substrat-Messwiderstand sowie das Blockschaltbild des zugehörigen PI-Regel- und Messkreises des Sensorsignalkonditionierers.

Der Heizkreisstrom wird über einen 12-Bit-D/A-Wandler gesteuert und ist in 8,75- μ A-Schritten von 0 bis 35,83 mA einstellbar. Der Widerstand des Heizkreises wird indirekt mittels Messung des Spannungsabfalls mit einem 14-Bit-A/D-Wandler gemessen. Der Substratwiderstand RBULK wird mit einer Stromquelle (typisch SUS3) beaufschlagt und die sich einstellende Spannung mit einem 12-Bit-A/D-Wandler gemessen. Dank dedizierter Anschlüsse ist eine vollständige Force- und Sense-Messung möglich, was die Genauigkeit und Temperaturstabilität besonders positiv beeinflusst. Diese Werte werden mit dem zuvor definierten Temperaturkoeffizienten TCR und den abgelegten Referenzwerten zur aktuellen Temperatur THACT beziehungsweise TBACT digital mit einer Auflösung von 0,125 °C berechnet. Der PI-Regler regelt nun den Heizkreisstrom auf



WISSENSWERT

- 1 Louis Vessot King: „On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid: Determination of the Convection Constants of Small Platinum Wires, with Applications to Hot-Wire Anemometry“; Proceedings of the Royal Society 9/1914
- 2 Marko Hepp: „Sensorsignale einfach konditionieren und sicher übertragen“; Elektronik Industrie 4/2010, 48
- 3 Uwe Malzahn: „Kompakte Sensor-IO-Lösung“; EL-Info 2/2009, 24
- 4 David Lin, Uwe Malzahn, Álvaro Pineda Garcia: „PNP/NPN/PP oder IO-Link?“; EL-info 3/2011, 44

eine mit 5 °C Auflösung konfigurierbare konstante Differenztemperatur zwischen THACT und TBACT. Bei fehlendem RBULK kann auch der integrierte Temperatursensor für diese Regelung verwendet werden. Für die Genauigkeit der thermischen Durchflussmessung ist die Wiederholgenauigkeit der Differenztemperaturregelung von größter Bedeutung. Dank der hier verwendeten Auflösungen, insbesondere der resultierenden 0,125 °C Auflösung der Temperaturberechnungen, ist die zu erwartende Genauigkeit des Gesamtsensorsystems über alle Parameter deutlich verbessert im Vergleich zu herkömmlichen diskreten Lösungen.

Die integrierte Konstanttemperaturregelung dient, in Verbindung mit der konfigurierbaren Regelung eines zeitlichen

Temperaturprofils, insbesondere dem Betrieb von MEMS-Gassensoren.

Fehlerüberwachung des Sensorsystems

Neben Heizregelung und Signalkonditionierung enthält der iC-HO auch eine Fehlerüberwachung. Somit kann die korrekte Funktion des MEMS-Sensors überwacht und konkrete Fehlermeldungen über die SPI-Slave Schnittstelle ausgelesen werden, wie Heizelement abgerissen, Kurzschluss, Messbereich über- oder unterschritten. Die möglichen Fehler können auch konfigurierbar über den NERR-Pin ausgegeben werden, womit zur Fehlererkennung nicht einmal ein Mikrocontroller im System benötigt wird. (ml)



DIE AUTOREN

Dipl.-Ing. **MARKO HEPP**
ist Applikationsingenieur
beim iC-Haus in Bodenheim.



Dipl.-Ing. **BERND SCHRÖRS**
ist Entwicklungsingenieur
beim iC-Haus in Bodenheim.



FAZIT

Nur ein Baustein. Die thermische Durchflussmessung für Flüssigkeiten und Gase mit dem universellen Sensorsignal-Konditionierbaustein iC-HO reduziert die Auswerteschaltung des Sensors auf einen einzigen IC. Dieser bietet die Möglichkeit verschiedene MEMS-Durchflusssensoren auch bidirektional auszuwerten und dabei das genaue CTA-Messverfahren zu verwenden. Dank des hohen Integrationsgrads sind kostengünstige Durchflussmesser für dezentrale Industrieanwendungen mit drei bis vier Bausteinen zu realisieren. Für kleine, etwa in Medizin-geräten eingebettete Durchflusssensoren kommt man mit nur zwei ICs aus. Bei der Gasdurchflussmessung lässt sich zusätzlich auch eine Druckmessung zur Volumen- und Massebestimmung realisieren. Dies reduziert die Systemkosten und den Platzbedarf. Die typische Reaktionszeit für eine Messung beträgt nur zirka 100 μ s. Für die einfache und schnelle Evaluierung per PC sorgt eine Evaluierungsplatine mit der zugehörigen kostenlosen GUI-Software.