Mikrocomputer-gestützte IR-Temperaturfühler

Charles E. Everest, Everest Interscience, Inc.

Mikrocomputer-basierte IR-Temperaturfühler sind konventionellen, analogen Aufnehmern überlegen, da die lokale Rechenleistung zur Korrektur von Sensor-Unzulänglichkeiten genutzt werden kann. Zudem ist die Eingabe von Emissionsfaktoren mit drei Stellen (einschließlich der Echtzeit-Regelung der Emissionsfaktor-Kompensation während der einzelnen Messungen) sowie die Verarbeitung der Sensordaten möglich. Durch die Übertragung von bereits verarbeiteten Daten wird die an das Datenerfassungssystem (DAS) übertragene Datenmenge reduziert.

Der Mikrocomputer macht es weiterhin möglich, den Aufnehmer in Echtzeit zu kalibrieren, ohne das Datenerfassungssystem damit zu belasten, außer wenn eine Fehlersituation vorliegt. Die lokale Protokollierung und Pufferung der Daten erlaubt eine asynchrone Abfrage der Daten durch das DAS. Die Übertragungsrate des Aufnehmers kann der des DAS angepaßt werden.

Optimierung des Sensors

IR-Thermodetektoren, die in IR-Thermometern für den mittleren Temperaturbereich eingesetzt werden, leiden alle unter verschiedenen Unzulänglichkeiten, die jedoch mit den Datenverarbeitungsfunktionen moderner Mikrocomputer korrigiert werden können. Der empfindliche Bereich des Detektors und der Meßfleck auf dem Meßobjekt sind konjugierte Abbilder voneinander, die durch die Optik gebildet werden. Da die Planck'sche Gleichung eine von der Wellenlänge abhängige Energiemenge definiert, gilt weiterhin, daß den Sensor eine vom Meßfleck ausgehende, zunehmende Strahlungsenergie dW_T für jeden µm des Spektralbereichs im IR-Spektrum erreicht. Dieser Betrag läßt sich wie folgt quantifizieren:

$$dW_T = \frac{e_T C_1 f}{l^5 \left(e^{C_2/lT_T} - 1\right)}\, dl$$

Da es sich bei der Optik und deren Medien um lineare, bilaterale Systeme handelt, wird weiterhin eine Strahlungsleistung dW_D von der Meßfläche des Sensors an den Meßfleck gesendet, die durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$dW_D = \frac{e_D C_1 f}{l^5 \left(e^{C_2/lT_D} - 1\right)}\, dl$$

Der Nettobetrag der Strahlungsleistung vom Meßobjekt an die Meßfläche des Detektors ergibt sich somit zu:

$$dW_{net} = dW_T - dW_D$$

oder

$$dW_{net} = \frac{C_1 f}{l^5} \left[\frac{e_T}{e^{C_2/lT_T} - 1} - \frac{e_D}{e^{C_2/lT_D} - 1} \right] dl$$

mit

C_1, C_2: Absolute Konstanten
f: Optische Verstärkung des optischen Systems
l: Wellenlänge in µm
e_T: Emissionsfaktor des Meßobjekts
e_D: Emissionsfaktor der Detektor-Oberfläche

Daraus folgt:

$$W_{net} = \frac{C_1 f}{l^5} \overset{l = l_2}{\underset{l = l_1}{*}} \left[\frac{e_T}{e^{C_2/lT_T} - 1} - \frac{e_D}{e^{C_2/lT_D} - 1} \right] dl$$

Aus dieser allgemeinen Energiebilanz ergibt sich, daß die Temperatur des Meßobjekts eine exponentielle Funktion der Detektortemperatur T_D ist.

Das Ausgangssignal des IR-Detektors ist eine Kleinstspannung, die proportional zur Temperaturdifferenz von Meßobjekt und Detektorgehäuse ist. Für eine genaue Temperaturmessung ist es daher notwendig, die Temperatur des Detektors präzise zu messen und die vom IR-Detektor gemessene Differenztemperatur nach Signalverarbeitung zu addieren.

Wenn unser integrierter Mikrocomputer die Genauigkeit einer dieser beiden in die Messung eingehenden Komponenten verbessern kann, wird die Gesamtgenauigkeit der Messung verbessert. Wie später erläutert, wird tatsächlich die Genauigkeit beider Einflußfaktoren durch den Einsatz eines Mikrocomputers deutlich verbessert.

Eine weitere störende Detektor-Fehlerquelle, die durch den Computer vollständig korrigiert werden kann, ist der DC-Drift aufgrund von Änderungen der Umgebungstemperatur. Die Temperatur des Detektorgehäuses T_D ist vermutlich die wichtigste Variable, die der Computer nutzt, um die Gesamtgenauigkeit zu erhöhen. Die Verfahren, derer sich der Computer dabei bedient, werden in den folgenden Abschitten erläutert.

T_D erstreckt sich über den normalen Umgebungstemperatur-Bereich, der zwischen -50 und 100°C liegen dürfte. Über diesen Bereich bietet ein Thermistor von allen Aufnehmern die genauesten Meßwerte. Thermistoren werden jedoch nur selten als Referenzelement für IR-Thermometer eingesetzt, da ihr Ausgangssignal hochgradig nichtlinear ist. Weiterhin bieten Thermistoren zwar ein extrem stabiles Signal, jedoch unterliegen die einzelnen Bauteile einer starken produktionsbedingten Streuung.

Die meisten Hersteller von IR-Thermometern beschränken sich auf eine einfache analoge Korrektur der verwendeten Detektor-Referenzelemente. Sie verzichten zugunsten eines Elements mit linearem Ausgangssignal auf die präzisere und stabilere Kompensation mittels eines Thermistors.

Auch Aufnehmer mit einer sehr stark nicht-linearen Kennlinie stellen für einen Computer keine Herrausforderung dar, da diese durch ein Taylor-Polynom der n–ten Ordnung linearisiert werden können, sofern n entsprechend hoch gewählt wurde, um für jeden beliebigen Punkt der Kennlinie die Linearisierung mit der gewünschten Präzision vorzunehmen.

$$A + BX + CX^2 + DX^3 + \ldots ZX^n$$

Ein allgemeiner Algorithmus zur Auflösung dieser Gleichung wird als Subroutine im Programmspeicher

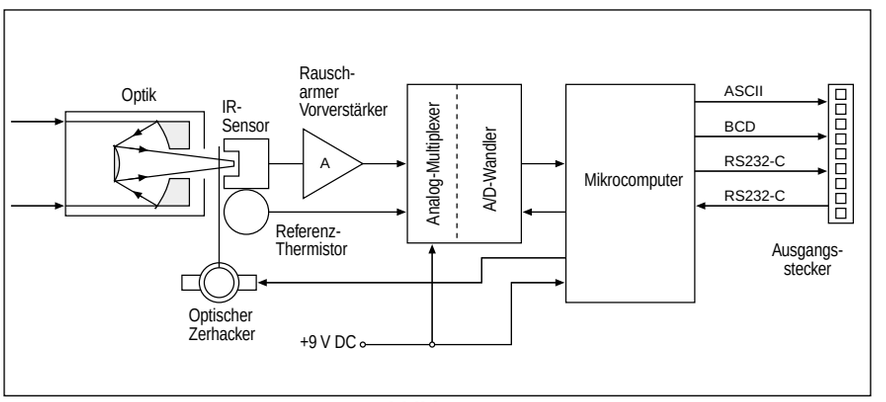

Abbildung 1.

gehalten, während die Aufnehmer-spezifischen Koeffizienten A, B, C, D .. Z in der Firmware verankert sind (EEPROM). Bei der Leistungsfähigkeit moderner Mikrocomputer sind derartige komplexe mathematische Funktionen praktisch frei von Hardwarekosten und können im Echtzeitbetrieb ausreichend schnell ausgeführt werden, ohne die Gesamtgeschwindigkeit ungünstig zu beeinflußen. Als Endergebnis kann festgehalten werden, daß die Messung der Detektortemperatur mit einer absoluten Genauigkeit von 0,05°C als durchaus normal zu betrachten ist.

Der IR-Detektor selbst hat ebenfalls eine stark nicht-lineare und Temperatur-abhängige Ansprechkurve:

$$E_0 = R \times W$$

mit

- E_o: Absolute Konstante
- W: IR-Strahlungsleistung in W/m²
- R: Ansprechfaktor (eine Proportionalitätskonstante)

Der Ansprechfaktor ist ebenfalls eine nicht-lineare Funktion von T_D. Er wird in der Industrie typischerweise durch eine einfache lineare Steilheitskorrektur kompensiert, die durch einen Temperatur-abhängigen Widerstand im Vorverstärker gespeist wird. Mit einem integrierten Mikrocomputer kann eine auf einer Taylor-Reihe dritter Ordnung basierende Korrektur mit den in Echtzeit berechneten Werten für T_D gespeist werden. Auf diese Weise kann der Fehler vollständig korrigiert werden, und dies bei geringeren Kosten als mit einem Temperatur-abhängigen Widerstand. Diese Technik ermöglicht es, daß der Preis eines neuen, Computer-gestützten IR-Thermometers nicht über dem seiner analogen Vorgänger liegt, bei wesentlich besserer Leistung und Genauigkeit.

W_T, die am Detektor auftreffende Netto-Strahlungsleistung des Meßobjekts, ist stark nicht-linear und in dieser Nicht-Linearität von der Temperatur des Meß-objekts T_T abhängig. Bei niedrigen Temperaturen des Meßobjekts (T_T < 530°C) ist sie weiterhin auch stark von der Temperatur des Detektors (T_D) selbst abhängig. Wie aus der Planck'schen Gleichung errechnet werden kann, ist W_T eine Strahlungsmenge, die von der Wellenlänge und dem Spektralverhalten des Mediums abhängig ist, durch das es die Entfernung zum Detektor zurücklegt. Für sehr breitbandige IR-Thermometer, die Objekte mit hohen Temperaturen messen, nähert sich diese Kennlinie der vierten Potenz des Stefan-Boltzmann-Gesetzes an:

$$W \prime \ K_0 T_T^4$$

mit

- o: Stefan-Boltzmann-Konstante
- K: Nicht-lineare Funktion von T_D
- T_T: Absolute Temperatur des Meßobjekts

In heute verfügbaren IR-Thermometern wird K üblicherweise mit dem Ansprech-faktor R aus der vorhergehenden Gleichung zusammengefaßt, so daß nur eine einzige, gemeinsame lineare Kompensation dieser beiden Faktoren erfolgt, obwohl sie unterschiedliche Steigungen aufweisen. Bei einer digitalen Korrektur mittels des Taylor-Polynoms müssen lediglich drei oder vier Koeffizienten gespeichert werden, die dann vom Algorithmus zur Berechnung des Polynoms herangezogen werden, um eine nahezu perfekte Korrektur beidern Koeffizienten unabhängig voneinander zu erreichen.

Die kritische Linearisierung des Terms TT4 in der obigen Gleichung wird üblicherweise durch eine lineare An-näherung gelöst, die auch als Polygon-zug bezeichnet wird. Dabei wird der gesamte Meßbereich des Instruments in eine geeignete Anzahl von Abschnitten unterteilt, typischerweise 6 bis 12. Die zwischen den Eckpunkten der entstan-denen Segmente liegende Kurve wird dann als linear betrachtet. Unglücklicher-weise ist dieses Verfahren immer nur bei zwei Temperaturen präzise, nämlich an den Stützpunkten dieses Polygonzugs. Der Fehler für den zwischen diesen Punkten liegenden Abschnitt kann bis zum Wert der spezifizierten Genauigkeit des Instruments reichen, die an einem der Eckpunkte für den größten Abschnitt bestimmt wurde. Damit ergibt sich ein Linearitätsfehler, der meist gleich groß wie die spezifizierte Genauigkeit des Instruments ist und der zusätzlich wirksam ist.

In digitalen IR-Thermometern mit integriertem Mikrocomputer kann ein Taylor-Polynom mit bis zu 7 Termen, das in Echtzeit berechnet wird, diese exponentielle Beziehung zwischen Detektor-Ausgangsspannung und Temperatur des Meßobjekts effektiv lösen.

Eine weitere Unzulänglichkeit, die durch den integrierten Mikrocomputer effizient behoben werden kann, ist der Nullpunkt-Drift. Thermische Detektoren haben in der Regel einen zu vernachlässigend kleinen Langzeit-Drift des Nullpunkts, sind jedoch sehr empfindlich gegenüber schnell auftretenden Änderungen der Temperatur. Wenn ein Instrument, das mit einem einfachen thermischen Detektor ausgestattet ist und von einem Raum in einen Raum mit einer anderen Umgebungstemperatur gebracht wird, sind Meßfehler von mehreren Grad keine Seltenheit.

Ein effektives Mittel zur Korrektur dieses Fehlers besteht darin, die auftreffende IR-Strahlung des Objekts regelmäßig (durch einen optischen Zerhacker) abzublocken und während dieser "Dunkelzeit" das verbleibende Fehler-signal des Detektors zu messen und zu speichern. Dieser Betrag kann dann vom Meßwert abgezogen werden. Diese Korrektur kann so oft wiederholt werden wie erforderlich oder der Steuerung durch den Computer unterstellt werden werden. Immer wenn der Computer ein inaktives Zeitintervall erkennt, kann diese Korrekturprozedur durchlaufen werden, ohne den Datenfluß der Nutzdaten zu unterbrechen. Wenn diese asynchrone Korrektur bezogen auf den Drift schnell erfolgt, kann eine nahezu perfekte Nullpunktstabilität erreicht werden.

Digitale Kompensation des Emissionsfaktors

Eine extrem genaue (dreistellige) Korrektur des Emissionsfaktors kann aus bis zu 10 im EEPROM gespeicherten Werten abgerufen werden oder durch komplexe, in Echtzeit ausgeführte Programmen vorgenommen werden, je nach erforderlicher Ansprechzeit. Ein Beispiel für den letzteren Ansatz ist ein Programm zur Kompensation des Emissionsfaktors eines Stahlteils, das in einem Induktionsofen erhitzt wird. Der Emissionsfaktor kann bei niedrigen Temperaturen sehr niedrig sein (; 0,1). Im Laufe der schnellen Aufheizung bildet sich jedoch auf der Oberfläche eine Oxidschicht, durch die der Emissions-faktor nach einem Zeit/Temperatur-Verlauf zunimmt. Dieses Zeit/Temperatur-Intervall kann durch den Computer einfach berechnet werden, um den entsprechenden Emissionsfaktor in Echtzeit auf den gemessenen Wert anzuwenden.

Datenverarbeitungs-Aufgaben

Die Daten des Aufnehmers können im Instrument Verarbeitungsfunktionen unterzogen werden, um die relevanten Daten zur Übertragung an einen über-geordneten Rechner zu extrahieren. So kann es beispielsweise wünschenswert sein, nur Daten zu übertragen, die einen gegebenen Grenzwert überschreiten oder die außerhalb des zulässigen Bereichs liegen. In diesem Falle können in der Firmware Sollwerte vorgegeben werden, so daß nur Daten über oder unter dem Sollwert ausgegeben werden. Diese Ausgabe kann wenn gewünscht auch über Interrupts erfolgen, so daß auf dem Schnittstellenbus eine Interrupt-hierarchie definiert werden kann, durch welche die Anzahl der an einen Bus anschließbaren Aufnehmer maximiert werden kann.

Automatische Kalibrierung

Ein intelligenter Aufnehmer kann darauf programmiert werden, Fenster im Daten-fluß der Nutzinformationen zu erkennen, in denen eine vorprogrammierte Kalibrierungsprozedur ausgeführt werden kann, ohne die Kontinuität der Nutzdaten zu unterbrechen. Dies läßt sich an einem Beispiel verdeutlichen, in dem das IR-Thermometer Dosen mißt, die auf einem Förderband laufen. Das Thermometer kann die Lücken zwischen

den einzelnen Dosen erkennen und die Zeit zwischen zwei Dosen für die Kalibrierung nutzen. Das übergeordnete Datenerfassung-System muß nicht mit der Kalibrierung befaßt werden, außer wenn ein Instrument über einen Interrupt einen Kalibrierungsfehler meldet.

Integrierte Datenprotokollierung und Pufferung

Der Aufnehmer ist sowohl mit flüchtigen als auch mit nicht-flüchtigen Speichern ausgestattet. Die nicht-flüchtige Pufferung der Daten im RAM wird genutzt, um Online-Daten aufzunehmen und für weitere Berechnungen oder die Übertragung bereitzustellen. Diese Fähigkeit, Daten lokal zu verarbeiten und zu formatieren, reduziert die Übertragungszeiten an übergeordnete Systeme. Da selbst schnelle IR-Thermometer im Vergleich zu Datenerfassungssystemen relativ langsam sind (die Größenordnungen sind hier ms zu µs), ist nur eine sehr kleine Zeitspanne erforderlich, um die einzelnen Thermometer über den Bus zu bedienen. Die Daten können oft auf 50µs/s komprimiert werden, wodurch einige Dutzend Aufnehmer an einem Leiterpaar betrieben werden können (s. “Interface Management”). Die nicht-flüchtige Speicherung von Daten in einem EEPROM dient zur Aufzeichnung wichtiger historischer Daten wie Maximum, Minimum, Mittelwert und Überschreitung von Grenzwerten.

Lokale Intelligenz zur Steuerung und Regelung

Der leistungsfähige integrierte Mikrocontroller kann auch so programmiert werden, daß er auf eingehende Temperaturdaten reagiert und externe Steuer-Funktionen ausführt. Der Mikrocomputer stellt 16 Steuerports bereit, die als Befehlseingänge für externe Signale wie Kontakte oder Signale des IR-Detektors oder als Steuerausgänge für z. B. Relais genutzt werden können. Jeder Port kann über Optokoppler elektronische Relais ansteuern, die wiederum in der Lage sind, Leistungen von bis zu 10kW bei Spannungen von bis 1600 V zu schalten.

Weiterhin stehen vier hochgenaue Präzisions-Analogeingänge zur Verfügung, die Hilfseingänge für Signale von Thermoelementen, Pt100 oder anderen IR-Detektoren verarbeiten können, um Zusatzfunktionen zu realisieren. Ein einfaches Beispiel ist die Erkennung einer Temperatur, die einen im EEPROM abgelegten Grenzwert über- oder unterschreitet. Dieser Sollwert könnte sogar vom Mikrocomputer anhand des historischen Verlaufs der Meßgröße festgelegt werden. Bis zu vier Sollwerte können gleichzeitig überwacht werden. Als komplexere Funktion wäre eine PID-Regelung der Prozeßtemperatur durch den Aufnehmer, ohne jede weitere externe Instrumentierung denkbar.

Interface-Management

Die Rechenleistung des Computers minimiert die Komplexität der Hardware, die für die Datenübertragung erforderlich ist. Dies bezieht sich sowohl auf die reine Datenübertragung als auch auf die Versorgung des Aufnehmers. So kann der Computer zum Beispiel die Busverwaltung und -zuteilung für die angeschlossenen Aufnehmer übernehmen. Wenn die Busleitung auch zur Versorgung mit der Betriebsspannung benutzt wird, lassen sich zusätzlich andere Aufnehmer anschließen und versorgen. Wenn der Computer die Versorgungsspannung abschaltet, können Daten so schnell übertragen werden, daß die Daten von vielen angeschlossenen Aufnehmern abgefragt werden können, bevor die Spannung wieder aufgeschaltet wird. Als Ergebnis läßt sich zusammenfaßen, daß für die Aufnehmer preiswerte BNC-Verbindungen benutzt werden können und daß an einem einfachen Leiterpaar bis zu 16 Aufnehmer über Entfernungen bis zu 300 m betrieben werden können.

Ein weiterer Vorteil, der aus der rein digitalen Übertragung erwächst, ist die wesentlich geringere Anfälligkeit gegen elektromagnetische Störungen als dies bei einer analogen Übertragung der Fall ist. Da die binäre Datenübertragung seriell erfolgt und für eine bi-direktionale Übertragung über eine einzige Leitung ausgelegt ist, kann anstelle der Kupferleitungen auch ein Lichtwellenleiter eingesetzt werden, der eine vollständige Unabhängigkeit von elektromagnetischen Einflüssen, bis hin zum Blitzschlag bietet. Weiterhin sind die Einsparungen an mehrpoligen Steckern und Leitungen derart hoch, daß der Mikrocomputer aus diesen Einsparungen bezahlt werden kann, ganz zu Schweigen von der höheren Zuverlässigkeit eines Einleiter-Systems gegenüber einem sechsadrigen Übertragungssystem.

Zusammenfassung

Die Überlegenheit Mikroprozessor-gestützter IR-Temperaturmeßgeräte gegenüber derzeitig verfügbaren analogen IR-Thermometern ist offensichtlich. Diese Aussage gründet sich auf die verbesserte Genauigkeit der Messung der Temperaturdifferenz zwischen Meßobjekt und Detektor sowie der Detektortemperatur selbst. Ebenso anzuführen ist die Möglichkeit Mikrocomputer-gestützter Instrumente, die lineare Annäherung durch genauere Linearisierungsverfahren zu ersetzen. Die extrem genaue Korrektur des Emissionsfaktors ist ein weiteres Plus, wie auch die automatische Kalibrierung, integrierte Datenprotokollierung und lokale Steuerintelligenz. Die Reduzierung der Schnittstellenkosten für die Verbindung von Instrument und übergeordnetem System kann sehr deutlich ausfallen. Ein extrem leistungsfähiges und präzises IR-Temperaturmeßsystem kann zu gleichen oder niedrigeren Kosten realisiert werden wie für ein derzeit verfügbares analoges System, dessen Fähigkeiten begrenzt sind.

Abdruck mit freundlicher Genehmigung der EVEREST INTERSCIENCE, INC.