

Pyrometer messen Temperaturen in industriellen Prozessen

# Berührungslos Temperaturen messen

Die berührungslose Temperaturmesstechnik findet vermehrt Verbreitung in der industriellen Prozessmesstechnik. Dazu tragen Geräteentwicklungen und vereinheitlichte Kenngrößen für Strahlungsthermometer bei, die dem Anwender eine bessere Vergleichbarkeit und Einsatzvorbereitung ermöglichen. Der Emissionsgradeinfluss lässt sich infolge grosser Applikationserfahrungen immer besser beherrschen und anwendungsspezifische Gerätelösungen ermöglichen neue Anwendungsgebiete.

In immer mehr Industriebereichen werden herkömmliche berührende Temperaturmessgeräte durch Pyrometer abgelöst. Dazu hat ein breites Angebot ausgereifter Strahlungsthermometer, Zeilenkameras und Wärmebildgeräte beigetragen. Darüber hinaus sind zunehmend auch kundenspezifische Lösungen für bestimmte Branchen entwickelt worden, die den Einsatz der berührungslosen Temperaturmesstechnik überhaupt erst ermöglicht haben. Im vorliegenden Artikel werden grundlegende technische Merkmale von Geräten, der Emissionsgradeinfluss sowie ausgewählte Beispiele kundenspezifischer industrieller Branchenlösungen behandelt.

## **Einfluss des Emissionsgrades**

Die grösste Hemmschwelle für den Einsatz berührungsloser Temperaturmesstechnik ist der Emissionsgrad, da viele potentielle Anwender keine Erfahrungen damit haben. Das daraus resultierende mangelnde Ver-

trauen in die pyrometrischen Messmethoden ist jedoch oft unbegründet. Jahrzehntelange Erfahrungen bei Anbietern und Spezialisten sowie die Vielfalt der erfolgreich gelösten Applikationen haben dazu geführt, dass das Emissionsverhalten zahlreicher Materialien bekannt ist. Dennoch sollte mit dem Emissionsgradeinfluss nicht sorglos umgegangen werden, da er sehr oft die Ursache für Erfolg oder Misserfolg einer Applikation darstellt.

Liegt die Messtemperatur genügend hoch über der Umgebungstemperatur, ist der Einfluss des Emissionsgrades vernachlässigbar (vergleiche Kasten «Physikalisch-mathematische Zusammenhänge»). Der relative Temperaturmessfehler beträgt in diesem Falle rund ein Viertel des relativen Emissionsgradfehlers. Vorsicht ist insbesondere bei sehr niedrigem bzw. instabilem Emissionsgrad geboten. Hierbei ist die Inanspruchnahme eines Spezialisten zur Abklärung anzuraten. Aus den Gleichungen (1) und (2) wird deutlich, dass der Emissions-

### **Physikalisch-mathematische Zusammenhänge**

Gleichung (1) gibt den relativen Temperaturmessfehler als Funktion der relativen Emissionsgradabweichung an.

$$\frac{\Delta T_O}{T_O} = \frac{1}{b} \left[ 1 - \left( \frac{T_U}{T_O} \right)^b \right] \frac{\Delta \epsilon_b}{\epsilon_b} \quad (1) \quad \begin{array}{l} T_O = \text{Temperatur des Messobjekts} \\ T_U = \text{Umgebungstemperatur} \\ \epsilon_b = \text{Bandemissionsgrad} \end{array}$$

$$b \approx \frac{c_2}{\lambda_{\text{eff}} T_m} \quad (2) \quad \begin{array}{l} c_2 = \text{Plancksche Strahlungskonstante} \\ \lambda_{\text{eff}} = \text{effektive Messwellenlänge} \\ T_m = \text{mittlere Messbereichstemperatur} \end{array}$$

Für ein ideales Gesamtstrahlungspyrometer wird  $b = 4$ .

### **Relativer Temperaturmessfehler als Funktion der relativen Emissionsgradabweichung.**

gradeinfluss generell mit kürzer werdendem Wellenlängenbereich des Messgerätes sinkt. Diesem Umstand tragen neuere Messgeräteentwicklungen Rechnung, die kurzwelligere Spektralbereiche für pyrometrische Messungen verwenden.

### **Strahlungspyrometer in Vakuum-Prozessen**

In vielen Halbleiterfertigungs- und anderen Bearbeitungsprozessen unter Vakuumbedingungen ist die Oberflächentemperatur eine wesentliche Einflussgrösse. Entscheidende Voraussetzung für ihre strahlungspyrometrische Messung ist die Kenntnis der Strahlungseigenschaften der verwendeten Substrate und Schichten und die daraus resultierende Auswahl angepasster Messwellenlängen, Gerätesysteme und Signalverarbeitungsstrategien. Besonders Schichtdicken- und Temperaturabhängigkeiten der spektralen Strahlungseigenschaften von dünnen Halbleiter- bzw. Metallschichten müssen berücksichtigt werden.

Neben den Messobjekteigenschaften stellt die infrarot-optische Zugänglichkeit des Messobjektes ein typisches Problem für Vakuum-Rezipienten dar. Meist erfolgt die Strahlungsmessung durch Schaugläser (Quarzglas bis

ca. 2,5 µm, Saphir bis 5 µm, ZnSe bis 15 µm Messwellenlänge). Problematisch ist deren Einsatz bei Bearbeitungsprozessen, bei denen eine Bedampfung des Fensters erfolgt. Abhilfe können zusätzliche auswechselbare Schutzscheiben bzw. Folien oder geeignet angeordnete Schutzgasdüsen bringen.

Unerlässlich in diesen Einsatzbereichen ist die regelmässige Kontrolle des Bedampfungszustandes der Fenster z.B. durch Kontrollmessungen an speziellen Testsubstraten. Alternativ zu den Schaugläsern stehen auch Lichtwellenleiter mit Vakuumdurchführung und speziellen bedampfungsgeschützten Lichtleitoptiken zur Verfügung.

Die Vielfalt der eingesetzten Substrate, Beschichtungsmaterialien und Vakuumkammern erfordert häufig angepasste Pyrometerlösungen, die spezielle Optiken, Messwellenlängen, Ausgangssignale und Software-schnittstellen umfassen. In *Bild 1* ist ein realisiertes Beispiel dargestellt.

### **IR-Linien- und -Klein-Array-Kameras**

Berührungslose Temperaturmessaufgaben in der industriellen Fertigungsmesstechnik beschränken sich nicht auf punktförmige

#### **Inhalt**

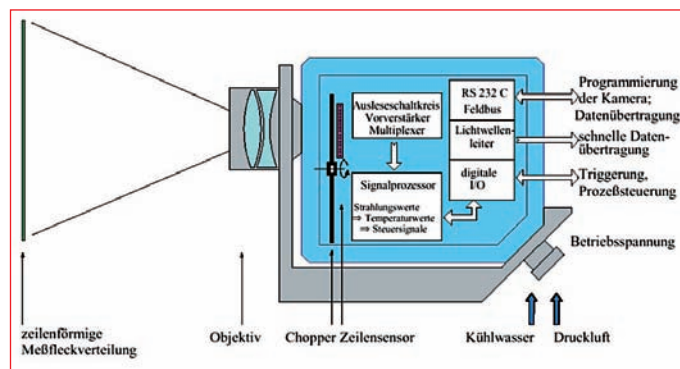
Die berührungslose Temperaturmesstechnik findet vermehrt Einzug in die industrielle Prozessmesstechnik. Der Emissionsgradeinfluss ist immer besser beherrschbar und anwendungsspezifische Gerätelösungen ermöglichen neue Anwendungsgebiete. Im vorliegenden Artikel werden grundlegende technische Merkmale von Geräten, der Emissionsgradeinfluss sowie ausgewählte Beispiele industrieller Branchenlösungen behandelt.

Messungen. Häufig werden Angaben über die Temperaturverteilung auf grossen Oberflächen oder simultane Einzelmesswerte auf mehreren Messobjekten gefordert. Lösungsmöglichkeiten reichen vom Einsatz mehrerer Strahlungs-pyrometer über die Kopplung mechanischer Ableneinheiten mit einem Pyrometer bis zum Einsatz räumlich und thermisch hochauflösender kalibrierter Wärmebildsysteme.

Innerhalb dieses Spektrums ermöglichen ungekühlte Linien- oder Klein-Array-Kameras kompakte, kostengünstige Lösungen mit einem gegenüber hochauflösenden Wärmebildgeräten reduzierten räumlichen Auflösungsvermögen und geringeren Kos-

ten. Mit den Infrarot-Kameras Pyroline und Pyroview stehen zwei berührungslose Temperaturmessgeräte für den industriellen Einsatz zur Verfügung. Kernstück der Systeme bildet ein pyroelektrischer Sensor, dessen 256 Elemente auf einer Linie (Pyroline) bzw. als 320-x-240-Matrix (Pyroview) angeordnet sind. Aufgrund des physikalischen Wirkprinzips wird für den Elektronikteil der Kamera selbst keine Kühlung benötigt. Der weitgehende Verzicht auf mechanisch bewegte Teile garantiert eine hohe Lebensdauer und Langzeitstabilität bei vergleichsweise niedrigen Preisen.

Ein spezielles Zusatzschutzgehäuse mit integrierter Kühl-



**Bild 2** Prinzipieller Aufbau des Kamerakopfes am Beispiel einer Linienkamera.

und Objektivfreibläseinrichtung gestattet den Einsatz in rauer industrieller Prozessmessumgebung. *Bild 2* skizziert am Beispiel der Linienkamera den prinzipiellen Aufbau des Kamerakopfes, der alle zum Betrieb erforderlichen Baugruppen enthält. Die wesentlichen Module sind:

- korrigiertes Infrarot-Objektiv
- Chopper
- pyroelektrischer Mehrelementensensor mit Breit- oder Schmalbandspektralfilter
- Signalverarbeitungseinheit mit digitalem Signalprozessor
- Gehäusebaugruppe.

### Steuerung via PC

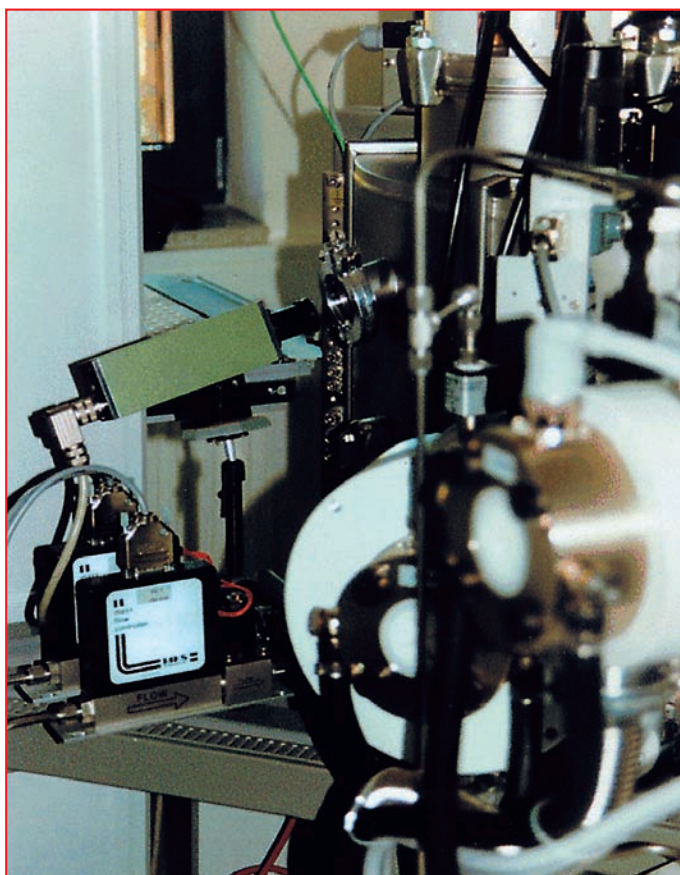
Aufgrund der im allgemeinen abgesetzten Montage in der Nähe des zu überwachenden Prozesses besitzen die Kameras keine Bedienelemente. Zur Steuerung, Überwachung und Messwertübertragung dient eine RS 232-Schnittstelle. In Verbindung mit einem PC erfolgt darüber die Programmierung, Parametrierung und Messdatenerfassung. Optional kann die Datenübertragung in Echtzeit (128 Hz Zeilenfrequenz) und über grössere Entfernungen über eine Lichtleitkabelverbindung mit PCMCIA-Schnittstellenkarte realisiert werden.

Die Kameras arbeiten auch autonom ohne ständig ange-

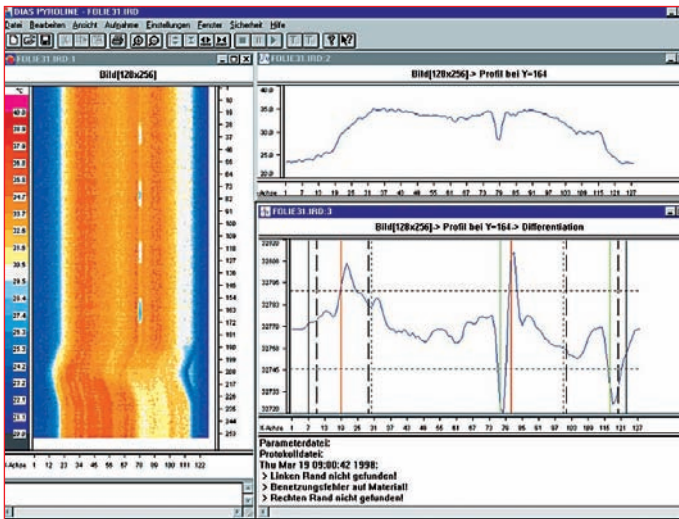
schlossenen PC. Über vier unabhängig voneinander programmierbare, galvanisch getrennte Ein- bzw. Ausgänge lassen sich einfache Überwachungsaufgaben lösen. Alle Parameter für den Standalone-Betrieb werden über die PC-Verbindung (tragbarer PC, Laptop) einmalig vor Ort programmiert. Ein integrierter nichtflüchtiger Speicher sorgt dafür, dass auch nach einer Betriebsspannungsunterbrechung die Kameras mit den programmierten Werten weiterarbeiten.

### Kontinuierliche flächenhafte Temperaturüberwachung

Anwendungsschwerpunkt von Infrarot-Linien- und -Kleinarraykameras ist die kontinuierliche flächenhafte Temperaturüberwachung in Fertigungsprozessen. Linienkameras kommen bevorzugt dann zum Einsatz, wenn sich das Messobjekt selbst bewegt. Typische Anwendungen sind die Temperaturmessung auf Papierbahnen, Schüttgut-Transportbändern, Flachglasscheiben, Zementdrehrohröfen u.ä. Analog hierzu eignen sich Kleinarraykameras für Temperaturmessungen an stationären Messobjekten, bei denen kontinuierlich Temperaturverteilungen erfasst werden sollen, die Anforderun-



**Bild 1** Anwendungen bei Vakuumkammern erfordern häufig angepasste Pyrometerlösungen mit speziellen Optiken, Messwellenlängen und Softwareschnittstellen.



**Bild 3** Eine Auswerte- und Betriebssoftware ermöglicht den Betrieb der Kameras auch via externe Rechner.

gen an die räumliche Auflösung jedoch gering sind.

Neben Anwendungen der Temperaturmesstechnik existieren verschiedenste Einsatzfälle, bei denen nicht die Absoluttemperatur massgebend ist, sondern lediglich Temperaturunterschiede bzw. Strahlungssignale auszuwerten sind. Die Kontrolle von Beschichtungen mit thermischen Prüftechniken, die Überwachung von Füllständen und die Brandüberwachung sind diesem Bereich zuzuordnen. Die unterschiedlichen Anforderungen erfordern modulare Systeme anpassungsfähiger Hard- und Softwarelösungen. Variationsmöglichkeiten wie Spektralbereichsanpassung oder die getriggerte Messung werden im Folgenden diskutiert.

**Spektralbereichsanpassung**

Die Verwendung abbildungskorrigierter Objektive für die Spektralbereiche 3...5µm und 8...14µm begrenzt die Modifikationen auf diese Wellenlängenbereichs-Fenster. Neben den breitbandigen Standardbereichen können speziell angepasste Spektralfilter zum Einsatz kom-

men, die unmittelbar als Sensorfenster integriert werden:

- Glasoberflächentemperaturmessung: 4,8...5,2µm
- Temperaturmessung durch heisse Gase und nichtrussende Flammen: 3,9µm
- Temperaturmessung im heissen Abgas: 4,5µm
- Temperaturmessung an Metallen: 1,4...1,8µm

**Getriggerte Messung**

Zwei Triggereingänge ermöglichen die Synchronisation der Messwertaufnahme mit äusseren Ereignissen und zwar getrennt für die Aufnahme von einzelnen Zeilen und für das komplette Bild. Die Standardsoftware umfasst:

- messkopffinterne Firmware zum Betrieb des in der Kamera integrierten Signalprozessors
  - PC-Software zu Service- und Inspektionszwecken
  - PC-Software zur Visualisierung und Archivierung der Messergebnisse sowie zur Steuerung der Kamera, lauffähig auf PCs mit Windows-Betriebssystem.
- Applikationsspezifische Anpassungen, spezielle Filter und Auswertungen erfolgen bevorzugt in der PC-Software.

**Signalprozessor und Zonentrennung**

Die IR-Kameras sind mit einem Signalprozessor ausgerüstet, der über die Auswertung der Messwerte hinaus eine Vielzahl von Prozesssteuerungsaufgaben ausführen kann. Die Messwerterfassung (Strahlungswerte) erfolgt mit einer Datenbreite von 16Bit. Im Signalprozessor folgt die Umrechnung in Temperaturwerte, bei der Umgebungstemperatur-einfluss, Empfindlichkeitsunterschiede der Einzelpixel, vorgegebene Emissions- und Transmissionsgrade berücksichtigt werden. Die interne Speicherung von bis zu 128 Temperaturverläufen in Echtzeit ist möglich.

Aus den Messwerten können eigenständig Steuerbefehle oder Alarmsignale abgeleitet und über digitale Schnittstelle oder in Form von Schaltfunktionen ausgegeben werden.

Dazu erfolgt eine Zoneneinteilung des Temperaturprofils, die zusätzlich auch zeitabhängig sein kann, womit der zeitliche Temperaturverlauf eines Messobjektes überwacht werden kann. Für jede Zone wird ein separater Emissionsgrad berücksichtigt.

**Auswerte- und Betriebssoftware**

Für den Betrieb der Kamera mit einem externen Rechner steht eine komfortable Auswerte- und Betriebssoftware zur Verfügung (Bild 3). Sie beinhaltet:

- Steuerung und Parametrierung der Kamera
- Darstellung der Messwerte in verschiedenen Normierungen als Temperaturprofil oder Thermobild
- Vereinbarung von Überwachungszonen und Grenzwerten
- Speichern, Laden und Drucken von Temperaturprofilen oder Thermobildern
- Punkttemperaturbestimmung.

Optionale Softwaremodule vervollständigen die applikationsanpassbaren Systeme. Eine Recorderfunktion gestattet das lückenlose Aufzeichnen der Messwerte und die anschließende Nachbearbeitung, z.B. ein zeitverzögertes Abspielen schneller Vorgänge, die Neuskalierung der Darstellung oder die nachträgliche Veränderung von Emissions- bzw. Transmissionsgrad. Speziell für Aufgaben zur Überwachung von Oberflächenstrahlungseigenschaften, Füllständen oder der Lage von Bauteilen kommt ein skalierbares Differentiationsfilter zum Einsatz. Weitere Zusätze dienen u.a. dem Datenexport oder Passwortschutz der Software.

(rb)

**Infobox**

**Autoren:**  
Dr.-Ing. Frank Nagel,  
Dr.-Ing. Manfred Zimmerhackl,  
Prof. Dr.-Ing. Günter Hofmann  
und Dr.-Ing. Helmut Budzier

**Realisierung:**  
Zusammenarbeit der Technischen Universität Dresden, Institut für Festkörperelektronik mit Transmetra Haltec GmbH  
8203 Schaffhausen  
052 624 86 26

E-Mail:  
info@transmetra.ch **4576**

Der Artikel ist erschienen in MegaLink 11/2001.

Ein Abo der Fachzeitschrift kann bestellt werden bei:

AZ Fachverlage AG  
Abodienst Megalink  
Neumattstrasse 1  
CH-5001 Aarau

Tel.: 062/8366019  
mary.hochstrasser@azag.ch

MegaLink: Fachzeitschrift für Elektronik, Datentechnik, Automation