

Kontaktlose Temperaturmessung

Theorie und Applikationen Walter Glockman, Capintec Instruments, Inc.

Die kontaktlose Temperaturmessung ist die vorzugsweise eingesetzte Technik zur Messung kleiner, bewegter oder unzugänglicher Objekte, in dynamischen Prozessen, die ein schnelles Ansprechverhalten erfordern sowie bei Temperaturen über 1000°C. Zur Auswahl des für eine gegebene Applikation am besten geeigneten Instruments ist es von entscheidender Bedeutung, die Grundlagen dieses Meßverfahrens, die relevanten Parameter sowie Merkmale und Eigenschaften der verschiedenen verfügbaren Systeme zu verstehen.

Grundbegriffe

Temperatur. Die Temperatur ist ein Ausdruck der kinetischen Energie vibrierender Atome und Moleküle. Diese Energie kann anhand verschiedener sekundärer Phänomene gemessen werden, wie z. B. Volumen- oder Druckänderungen, elektrischer Widerstand, EMK, Ladung der Oberfläche oder Emission elektromagnetischer Strahlung. Die am häufigsten verwendeten Temperaturskalen sind Celsius- und Fahrenheit-Skalen, die auf der Differenz zwischen dem Gefrier- und dem Siedepunkt von Wasser basieren und diese als 100°C bzw. 180°F definieren.

In der Thermodynamik wird eine bei 0 (oder 0 Kelvin) beginnende Skala verwendet. An diesem absoluten Nullpunkt haben alle Atome aufgehört zu schwingen, und es wird keine kinetische Energie abgegeben.

$$0 \text{ K} = -273,15^\circ\text{C} = -459,67^\circ\text{F}$$

Infrarot-Strahlung. Infrarot-Strahlung ist der Teil des elektromagnetischen Spektrums jenseits des für das menschliche Auge sichtbaren Bereichs (0,4 bis 0,75 µm) bis hin zu dem Bereich, an dem die Mikrowellen (Radar) beginnen. Der IR-Bereich deckt Wellenlängen von 0,75 µm bis 1000 µm ab. IR-Strahlung wird hauptsächlich durch Hitze erzeugt und wird daher auch als Wärmestrahlung bezeichnet.

Für die Zwecke der Temperaturmessung ist lediglich ein Teil des IR-Spektrums von praktischer Bedeutung. Das Spektrum wird häufig in "Fenster" aufgeteilt, bei denen eine verlustfreie Transmission durch den Wasserdampf in der Luft gegeben ist: 0,7–1,3 µm, 1,4–1,8 µm, 2,0–2,5 µm, 3,2–4,3 µm und 8–14 µm.

Thermometer. Die meisten bekannten Thermometer, wie z. B. Quecksilber- oder Alkoholthermometer, Pt100-Fühler usw. müssen in Kontakt mit dem Meßobjekt gebracht werden, d. h. sie müssen es berühren. Der übliche Arbeitsbereich reicht von -100–1500°C.

Strahlungsthermometer. Diese kontaktlos arbeitenden Thermometer bestimmen die Oberflächentemperatur eines Objekts durch Messung der Wärmestrahlung, die dieses abgibt.

Emissionsfaktor. Dieser Faktor definiert den Anteil an Strahlung, die das Meßobjekt im Vergleich zu einem perfekten Strahlungskörper (Schwarzkörper) emittiert. Der Emissionsfaktor ist unter anderem vom Material des Objekts und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig und kann zwischen nahezu 0 (stark reflektierender Spiegel) bis fast 1 reichen (Schwarzkörper-Simulator). Der Emissionsfaktor wird benutzt, um die tatsächliche Temperatur eines Objekts aus der gemessenen Helligkeit oder Spektralstrahlung zu bestimmen. Da der Emissionsfaktor eines Objekts auch von der Wellenlänge abhängen kann, sollte für eine gegebene Applikation ein Instrument mit einem Spektralbereich gewählt werden, in dem ein hoher Emissionsfaktor vorliegt. Die Emissionsfaktoren können für viele Materialien und

Wellenlängen der Literatur entnommen oder empirisch ermittelt werden.

Helligkeits-/Einfarb-Pyrometer. Dieser Gerätetyp mißt die Intensität oder Helligkeit der ankommenden Wärmestrahlung. Die Intensität, oder allgemeiner die Strahlungsmenge wird in einem engen Frequenzbereich des IR-Spektrums gemessen. Die Auswahl dieses Wellenlängen-Bereichs ergibt sich primär aus dem Temperaturbereich und der Art des zu messenden Materials.

Die ältesten Helligkeitspyrometer verglichen die optische Helligkeit im sichtbaren Bereich (rot) bei einer Wellenlänge von 0,65 µm durch Vergleich des glühenden Objekts mit einem heißen Glühfaden. Der Ausdruck "Einfarbig" stammt daher, daß zur Messung ein schmales Band im sichtbaren Bereich gewählt wurde. Instrumente, die auf die Messung im Infrarot-Bereich ausgelegt sind, werden als Spektralstrahlungs-pyrometer oder -Thermometer bezeichnet.

Tabelle 1: Instrumente zur stationären Temperaturmessung

Niedrige Temperaturen	Hohe Temperaturen
<p>Allzweck-Instrumente 0 bis 500°C</p> <p>8 bis 14 µm Breitband-Strahlungsthermometer</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thermosäulen-Detektor • Optische Auflösung: 4 mm Meßfleck (D = 15:1) • Ansprechzeit: 0,5 Sekunden • Einstellung des Emissionsfaktors • Analogausgang (mV/°C, mV/°F) 	<p>Allzweck-Instrumente 400 bis 2000°C</p> <p>Schmalbandige Strahlungsthermometer (0,7 bis 1,1 µm und 0,9 bis 1,9 µm)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Photoelektrischer Halbleiter-Detektor (Si, Ge) • Optische Auflösung: 1 mm Meßfleck (D = 60:1) • Ansprechzeit: 3 Millisekunden • Einstellung des Emissionsfaktors • Analogausgang (mV/°C, mV/°F)
<p>Erweiterter Temperaturbereich -30 bis 800°C</p> <p>8 bis 14 µm Thermometer mit hoher Stabilität</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pyroelektrischer Detektor • Stabilisierung durch optische Zerhacker zur Kompensation schneller Änderungen der Umgebungstemperatur • Optische Auflösung: 3 mm Meßfleck (D = 30:1) • Ansprechzeit: 50 Millisekunden • Analogausgang 4-20 mA 	<p>Hohe Stabilität/Komplexe Applikationen 300 bis 2500°C</p> <p>Schmalbandige Strahlungsthermometer</p> <ul style="list-style-type: none"> • Für Glas und/oder durch heiße Gase (3,9 µm) • Für Glasoberflächen (5,0 µm) • Für Verbrennungsabgase (4,2, 4,5 und 5,3 µm) • Pyroelektrischer Detektor • Stabilisierung durch optische Zerhacker • Optische Auflösung: 1 mm Meßfleck (D = 60:1) • Ansprechzeit: 30 Millisekunden • Analogausgang 4-20 mA
<p>Hohe Genauigkeit/Komplexe Applikationen 50 bis 800°C</p> <p>Schmalbandige Strahlungsthermometer</p> <ul style="list-style-type: none"> • Für dünne Kunststoff-Folie mit CH-Absorption (3,4 µm, 6,8 µm) • Für Polyester/Fluorkohlenstoff-Folie (8,0 µm) • Für dünnwandiges Glas und Keramik (7,8 µm) • Optische Auflösung: 1,5 mm Meßfleck (D = 100:1) 	<p>Hohe Geschwindigkeit/Verhältnismessung 150 bis 2500°C</p> <p>Schmalbandige Strahlungsthermometer (0,8/0,9 µm und 2,1/2,4 µm)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Weitgehend unabhängig von Schwankungen des Emissionsfaktors und/oder Störungen des Sichtfelds • Automatische Kompensation bewegter Meßobjekte • Interne Kalibrierungskontrolle
<p>Programmierbare Hochleistungsinstrumente -100 bis 2500°C</p> <p>Mit integrierter digitaler Signalverarbeitung, Auswahl von breit- oder schmalbandigen Bereichen zwischen 2 und 20 µm</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bidirektionale RS232-Schnittstelle • Min/Max/Differenz- und Haltefunktionen • Programmierbar für Umgebungstemperatur • Verschiedene Systeme zur Erfassung des Meßobjekts (Durchsicht, Laser, LED) 	

Verhältnis-/Mehrfarb-Pyrometer. Diese Instrumente messen die Temperatur auf der Basis zweier oder mehrerer verschiedener Wellenlängen. Das Verhältnis der Strahlungsintensitäten auf den unterschiedlichen Wellenlängen entspricht den Farben im sichtbaren Spektrum. Die Verwendung zweier unterschiedlicher, sichtbarer Farben, üblicherweise rot und grün, war lange Zeit verbreitet, um die Assoziation der Farbtemperatur zu wecken. Später wurde dieser Ausdruck dann auf die Messung von Wellenlängen im Infrarotbereich ausgedehnt. Der Vorteil der Verhältnismessung liegt darin, daß die Temperaturanzeige weitgehend unabhängig von Änderungen des Emissionsfaktors und/oder Beeinträchtigungen des Sichtfelds beeinflusst wird. Dieses Verfahren eignet sich allgemein für Temperaturen oberhalb 700°C, jedoch sind auch Messungen bis "hinunter" auf 200°C möglich.

Parameter

Moderne Module zur Verarbeitung von optischen und elektronischen Signalen steigern die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit der kontaktlosen Temperaturmessung. Für die Prozeßregelung stehen standardisierte Schnittstellen zur Verfügung, die auf die jeweilige Applikation hin optimierte Signalausgänge bereitstellen.

Messung der Strahlung

Einstellung des Emissionsfaktors. Die Genauigkeit der Temperaturmessung hängt wesentlich von der korrekten Einstellung des Instruments auf den Emissionsfaktor des Meßobjekts ab. Vorab eingestellte Werte für den Emissionsfaktor können für Online-Sensoren zur Überwachung von Objekten mit konstantem Emissionsfaktor verwendet werden. Für Objekte, deren Emissionsfaktor sich ändert, ist eine genaue und reproduzierbare Einstellung des Emissionsfaktors erforderlich.

Umgebungstemperatur. Die Wärmestrahlung eines Objekts beinhaltet immer auch eine Streu- oder Hintergrundstrahlung der Umgebung um das Objekt herum, die vom Objekt reflektiert wird. In der Praxis wird meist unterstellt, daß diese Umgebungstemperatur gleich der Umgebungstemperatur des Sensors ist. Befindet sich das Meßobjekt in einer deutlich unterschiedlichen thermischen Umgebung als der Sensor, z. B. in einem beheizten Ofen, in einem Kühlraum oder im Freien, ist eine entsprechende Korrektur notwendig, um genaue Messungen zu erhalten. Zu diesem Zwecke können separate Sensoren eingesetzt werden, anhand derer eine automatische Kompensation erfolgen kann.

Behinderung des Sichtfelds. Gase, Wasserdampf, Staub und andere Aero-

sole in der Sichtlinie des Sensors können die Temperaturmessung beeinträchtigen. Die Nutzung von "atmosphärischen Fenstern" im IR-Bereich reduziert diesen Meßfehler deutlich. Da beide optischen Kanäle gleichermaßen bedämpft werden, sind Verhältnis-Pyrometer im Allgemeinen sehr unempfindlich gegenüber Hindernissen in der Sichtlinie.

Änderungen der Umgebungstemperatur. Konstruktionsbedingt werden Strahlungsdetektoren sehr stark durch Schwankungen der Umgebungstemperatur beeinflusst. Um eine hohe Meßgenauigkeit aufrecht zu erhalten, ist eine präzise Kompensation erforderlich. Der Einfluß der Umgebungstemperatur wird als Fehler pro °C/°F Änderung der Umgebungstemperatur angegeben.

Optisches System

Optik. Die Optik von Sensoren für die kontaktlose Temperaturmessung besteht aus Linse(n) und Spiegeln, über die die Strahlung vom Objekt auf den Detektor gelangt.

Sichtfeld. Das Sichtfeld wird in Grad angegeben und erlaubt eine einfache Bestimmung der Mindest-Objektgröße bzw. der Meßfleckgröße bei einer gegebenen Entfernung. Ein sehr einfach zu handhabendes Maß ist das Verhältnis von Entfernung zu Meßfleck. So bedeutet ein Verhältnis von z. B. 20:1 eine Meßfleck-Größe von 2,5 cm bei einer Entfernung von 50 cm.

Fokussierung. Im allgemeinen sind Sensoren für die kontaktlose

Temperaturmessung mit einer Optik mit fester Brennweite ausgestattet. Bei größeren Abständen ist eine Fokussierung nicht erforderlich, wenn die Meßfläche kleiner als der Linsendurchmesser des Instruments ist.

Kleine Meßobjekte. Zur Messung kleiner Objekte oder Flächen wird eine Nahbereichs-Optik mit fester Brennweite verwendet, für die eine Mindest-Objektgröße angegeben ist. Mit derartigen Optiken können Objekte ab 0,5 mm gemessen werden.

Glasfaser-Optik. Glasfaser-Optiken erlauben eine räumliche Trennung der Optik-Einheit von Detektor und Signalverarbeitender Elektronik, um den Einsatz unter engen Platzbedingungen oder in rauen Umgebungen zu ermöglichen. Der Meßbereich für Glasfaser-Optiken beginnt meist bei 400°C, für die Mindest-Objektgrößen gelten die obigen Definitionen.

Abtasten von Objekten. Wenn eine direkte Betrachtung des Meßobjekts schwierig oder unpraktisch ist, können Spiegel zur Umlenkung des Sichtfelds eingesetzt werden. Ein beweglicher Spiegel kann eingesetzt werden, um die auftreffende Strahlung zu reflektieren und ein Temperaturprofil einer Zielfläche zu erstellen.

Eine Reihe von Temperaturprofilen, die in voreingestellten Abständen über der Meßfläche abgetastet wurden, kann als Wärmebild dargestellt werden.

Erfassen des Meßobjekts. Zum Anvisieren des Meßobjekts werden verschiedene Verfahren genutzt:

Tabelle 2: Tragbare Instrumente zur Temperaturmessung

Niedrige Temperaturen	
<p>Niedrige Temperaturen</p> <p>Allzweck-Instrumente 0 bis 500°C</p> <p>8 bis 14 µm Breitband-Strahlungsthermometer</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thermosäulen-Detektor • Optische Auflösung: 4 mm Meßfleck (D = 15:1) • Ansprechzeit: 0,5 Sekunden • Einstellung des Emissionsfaktors • Min/Max-Werte 	<p>Erweiterter Temperaturbereich -50 bis 1400°C</p> <p>8 bis 14 µm mit integrierter Signalumformung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Optische Auflösung: 32 mm Meßfleck (D = 30:1) • Datenspeicher • Min/Max- und Mittelwert-Funktion • RS232-Schnittstelle
<p>Hohe Stabilität -30 bis 800°C, 8 bis 14 µm</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pyroelektrischer Detektor • Stabilisierung durch optischen Zerhacker • Auswahl verschiedener Optiken 	<p>Miniaturlfühler -50 bis 500°C, 8 bis 14 µm mit austauschbaren Fühlern für größere Entfernungen oder kleine Meßobjekte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Große LCD-Anzeige für verschiedene Informationen • Min/Max/Differenz- und Haltefunktionen • Optische Auflösung: 2,5 mm Meßfleck (D = 7:1) • Laser- oder LED-Zielvorrichtung
Hohe Temperaturen	
<p>Hohe Temperaturen</p> <p>Allzweck-Instrumente 250 bis 2500°C</p> <p>Schmalbandige Strahlungsthermometer (0,65 µm, 0,7 bis 1,1 µm und 0,9 bis 1,9 µm)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Photoelektrischer Halbleiter-Detektor (Si, Ge) • Optische Auflösung: 0,9 mm Meßfleck (D = 250:1) 	<p>Hohe Genauigkeit/Verhältnismessung 650 bis 2500°C</p> <p>Schmalbandige Strahlungsthermometer (0,8/0,9 µm)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Weitgehend unabhängig von Schwankungen des Emissionsfaktors und/oder Störungen des Sichtfelds • Automatische Kompensation bewegter Meßobjekte

- Kimme
- Integrierte oder abnehmbare Sucher
- Durchsicht-Sucher
- Integrierte oder abnehmbare Laser- oder andere Licht-Zielvorrichtungen.

Signalverarbeitung

Direkter Ausgang. Kontaktlose Sensoren setzen die Wärmestrahlung in ein elektrisches Signal um, das proportional zu der vom Objekt abgegebenen Strahlung ist.

Linearisierter Ausgang. Eine elektronische Schaltung setzt das Wärmestrahlungssignal in ein elektrisches Signal um, das proportional zur Temperatur ist.

Sample-and-Hold. Diese bisweilen auch als **Messen-und-Halten** bezeichnete Arbeitsweise mißt nach Aktivierung durch z. B. einen Taster die Temperatur und hält den Meßwert, bis eine neue Messung ausgeführt wird.

Maximum-Speicher. Der höchste Temperaturmeßwert wird gespeichert und angezeigt, bis über ein externes Signal ein Reset erfolgt.

Minimum-Speicher. Der niedrigste Temperaturmeßwert wird gespeichert und angezeigt, bis über ein externes Signal ein Reset erfolgt.

Spitze-Spitze-Anzeige. Mit dieser auch als **Differenz-Anzeige** bezeichneten Funktion wird die Differenz zwischen Minimum und Maximum angezeigt.

Ansprechgeschwindigkeit. Dynamische Prozesse mit schnellen Temperaturänderungen erfordern kurze Ansprechzeiten. Lange Ansprechzeiten hingegen integrieren alle Signaländerungen über das Meßintervall und bewirken eine Mittelwertbildung.

Automatische Triggerung. Der größte Temperaturmeßwert wird ermittelt und angezeigt. Nach Erreichen eines einstellbaren Werts erfolgt ein Reset, der letzte Maximum-Wert wird jedoch weiterhin angezeigt, bis ein größerer Wert gemessen wird. Dieses Verfahren eignet sich für die schnelle Messung intermittierend zu messender Objekte ohne ein externes Triggersignal.

Alarme. Ein Ausgangssignal (Relais) wird ausgegeben, wenn das Signal einen voreingestellten Wert erreicht. Im allgemeinen sind zwei unabhängige Sollwerte (Hi und Lo) verfügbar.

Zubehör

Kühlmäntel. Durch Wasserkühlung kann der Umgebungstemperatur-Bereich des Sensors auf 400°C und darüber angehoben werden.

Luftspülanschluß. Aufsätze mit einem Anschluß für Druckluft leiten diese über die Linse, um diese von Dämpfen, Staub oder andere Verunreinigungen frei zu halten.

Schwarzkörper-Kalibrierung

Eine tiefe Aushöhlung, deren homogen verteilte Temperatur auf einen eingestellten Wert geregelt ist, werden als Quasi-Schwarzkörper zur Kalibrierung von IR-Thermometern eingesetzt. Mit einer effektiven Öffnung von ca. 25 mm können sie für die verschiedensten Instrumente benutzt werden und sind für bestimmte Temperaturbereiche optimiert:

- Wasserbad: 30 bis 100°C
- Aluminium-Kern: 50 bis 400°C
- Edelstahl-Kern: 350 bis 1000°C
- Tragbare Kalibriergeräte für den Betrieb mit Batterien : Auswahl fest vorgegebener Temperaturen von 40 bis 100°C

Stationär oder tragbar?

Stationäre Instrumente: Diese Geräte werden im Allgemeinen zur kontinuierlichen Überwachung und Regelung von Prozessen eingesetzt. Sie sind als Modelle für hohe und für niedrige

Temperaturen verfügbar und haben entsprechend unterschiedliche Einsatzbereiche (s. Tabelle 1).

Tragbare Instrumente. Tragbare Instrumente werden vorzugsweise für Stichproben oder Kontrollen in Prozessen sowie in der vorbeugenden Wartung, Forschung und Entwicklung, sowie anderen kurzfristigen Meßaufgaben eingesetzt. Auch hier sind Modelle für hohe und für niedrige Temperaturen verfügbar (s. Tabelle 2).

Applikationen

Geeignete Applikationen für die verschiedenen Thermometer-Ausführungen sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Abdruck aus Sensors Magazine mit freundlicher Genehmigung der Helmers Publishing, Inc.
174 Concord St.
Peterborough, NH 03458

Tabelle 3: Temperaturmessung in der Prozeßregelung

Geeignete Applikationen	Stationär			Tragbar		
	V	H	N	V	H	N
Zementöfen: Brennräume, Vorheizen	x	x		x	x	
Energieeinsparung: Untersuchung von Isolierungen und Wärmefluß, Temperaturprofile			x			x
Glühfäden: Glühen, Ziehen, Vergüten	x			x		
Lebensmittel: Backen, Schokoladenherstellung, Eindosen Gefrieren, Fritieren, Mischen, Verpacken, Rösten			x			x
Öfen: Flammen, Boilerrohre, Katalytische Cracker	x	x		x	x	
Glas: Ziehen, Herstellung und Verarbeitung von Birnen, Behältern, Bildröhren und Fasern	x	x	x	x	x	x
Wartung: Haushaltsgeräte, Lager, Antriebswellen, Isolierungen Netzleitungen, Erkennung von thermischen Leckagen			x			x
Metalle (Eisen- und Buntmetalle): Glühen, Extrusion, Verkoken, Guß, Löten, Vergüten, Induktionsheizung, Sintern, Schmelzen	x	x		x	x	
Qualitätssicherung: Platinen, Löten, Dichtungen, Schweißen, Meßtechnik	x	x	x	x	x	x
Lacke: Aushärten, Trocknen			x			
Papier: Beschichten, Trocknen, Druck, Photoemulsionen, Bahnprofile			x			x
Kunststoff: Blasformen, Spritzguß, Extrudieren von Folien, Thermoformen, Guß			x			x
Wärmebilder: Wolken, Erdoberfläche, Seen, Flüsse, Straßen, Vulkanbeobachtung			x	x		x
Kautschuk/Gummi: Kalandrierung, Guß, Extrusion, Reifen, Latex-Produkte			x			x
Silizium: Kristallwuchs, Fasern, Glühen von Wafers	x		x	x		x
Textile: Vulkanisieren, Trocknen, Fasern, Spinnen			x			x
Vakuumkammern: Verarbeitung	x			x		

V = Verhältnismessung H = Hohe Temperaturen N = Niedrige Temperaturen