
Stationäre Pyrometer in der industriellen Prozessmesstechnik

Günter Hofmann*

Einführung

Pyrometer – auch Strahlungsthermometer genannt - zur berührungslosen Temperaturmessung kommen heute bei vielfältigen Anwendungen in Industrie, Wissenschaft und weiteren Gebieten zum Einsatz. Dafür steht ein großes Spektrum an unterschiedlichen portablen und stationären Geräten zur Verfügung.

Im Folgenden sind Grundlagen sowie wichtige Eigenschaften und Auswahlkriterien für Pyrometer zusammengestellt. Das geschieht am Beispiel stationärer Geräte für die industrielle Prozessmesstechnik, weil hier besonders hohe Anforderungen an Stabilität, Zuverlässigkeit und Robustheit vorliegen. Sie müssen in der Regel viele Jahre im Dauereinsatz wartungsfrei oder wartungsarm arbeiten können.

Grundlagen

Jedes Objekt sendet eine natürliche elektromagnetische Strahlung aus, die von seiner Temperatur, der Wellenlänge und seinem Emissionsvermögen abhängt. Durch Messung der ausgesandten Strahlung kann die Temperatur des Körpers berührungslos gemessen werden.

* Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Hofmann DIAS Infrared GmbH, D-01189 Dresden

In der industriellen Prozessmesstechnik liegen die zu messenden Temperaturen meist im Bereich von etwa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$. In Übereinstimmung mit dem Planckschen Strahlungsgesetz (Bild 1) liegt das Maximum der ausgesandten Strahlung bei Raumtemperaturobjekten bei etwa $10\text{ }\mu\text{m}$ Wellenlänge. Bei höheren Messtemperaturen verschiebt sich das Strahlungsmaximum zu niedrigeren Wellenlängen, zum Beispiel auf etwa $1,3\text{ }\mu\text{m}$ bei $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Hauptanteile der Strahlung praktisch relevanter Messobjekte liegen in dem für das menschliche Auge nicht sichtbaren infraroten Wellenlängenbereich zwischen etwa $0,8\text{ }\mu\text{m}$ und $14\text{ }\mu\text{m}$. Für Messobjekte im Raumtemperaturbereich ist der Spektralbereich von $8\text{ }\mu\text{m}$ bis $14\text{ }\mu\text{m}$ (langwelliges Infrarot LWIR) von besonderem Interesse, weil sich hier sowohl das Strahlungsmaximum befindet als auch die umgebende Atmosphäre eine hohe Transparenz aufweist (atmosphärisches Fenster). Für die Messung höherer Temperaturen sind die Wellenlängenbereiche zwischen $3\text{ }\mu\text{m}$ und $5\text{ }\mu\text{m}$ (mittleres Infrarot MWIR) und $0,8\text{ }\mu\text{m}$ bis $1,1\text{ }\mu\text{m}$ bzw. $1,4\text{ }\mu\text{m}$ bis $1,8\text{ }\mu\text{m}$ (nahes Infrarot NIR bzw. SWIR) wichtig, wo ebenfalls weite Bereiche der Atmosphäre gut durchlässig sind (Bild 2).

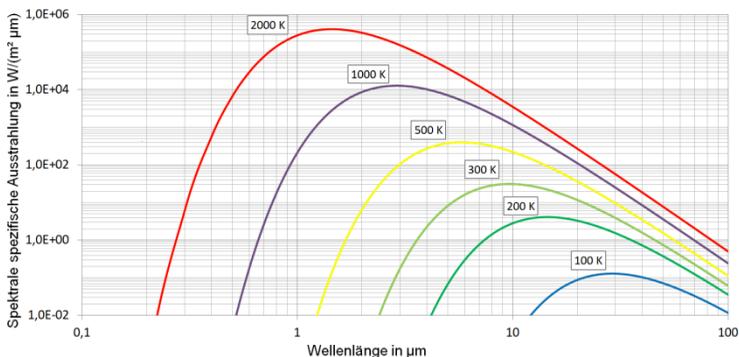


Bild 1. Wellenlängenabhängigkeit der spektralen spezifischen Ausstrahlung eines Schwarzen Strahlers (Emissionsgrad 1) [1]

Grundsätzlich gilt, dass zur Minimierung emissionsgradbedingter Temperaturmessfehler so kurzwellig wie möglich gemessen werden sollte. Soll zum Beispiel eine Temperatur von 1000 °C gemessen werden, so beträgt bei einer Fehleinstellung des Emissionsgrades um nur 1% der Temperaturmessfehler bei einem zwischen 8 µm und 14 µm (LWIR) arbeitenden Pyrometer bereits etwa 9 K, bei Verwendung eines Spektralbereiches von 0,8 µm bis 1,1 µm (nahes Infrarot NIR) dagegen nur etwa 1 K (Bild 3).

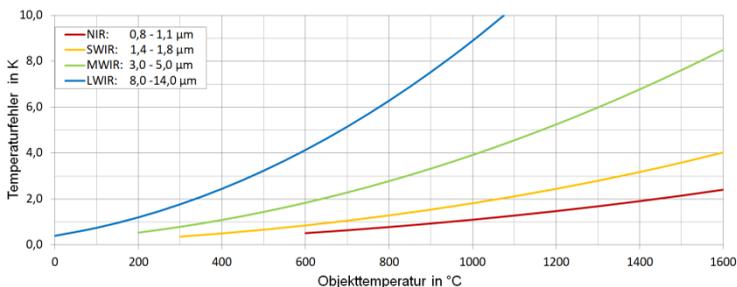


Bild 3. Resultierender Temperaturmessfehler bei einem Emissionsgradfehler von 1%

Bild 4 zeigt beispielhaft die Wellenlängenabhängigkeit des Emissionsgrades technisch interessanter Materialien. Es ist ersichtlich, dass die Messungen auch in sehr schmalbandigen Wellenlängenbereichen von Bedeutung sind, beispielsweise von 4,8 µm bis 5,2 µm für Messungen an Glasoberflächen oder um 3,4 µm zur Temperaturmessung an dünnen Kunststofffolien wegen eines sehr hohen Emissionsgrades von nahe 1. Andere Beispiele sind Wellenlängen um 4,5 µm zur Messung heißer Gase (Kohlendioxid CO₂) oder um 7,7 µm für die Messung an ultradünnen Gläsern. Besondere Bedeutung hat auch der Spektralbereich um 3,9 µm für Messungen durch Flammen.

Basierend auf diesen Grundlagen sind in Tabelle 1 typische Spektralbereiche, empfohlene Temperaturmessbereiche und Beispielanwendungen zusammengefasst.

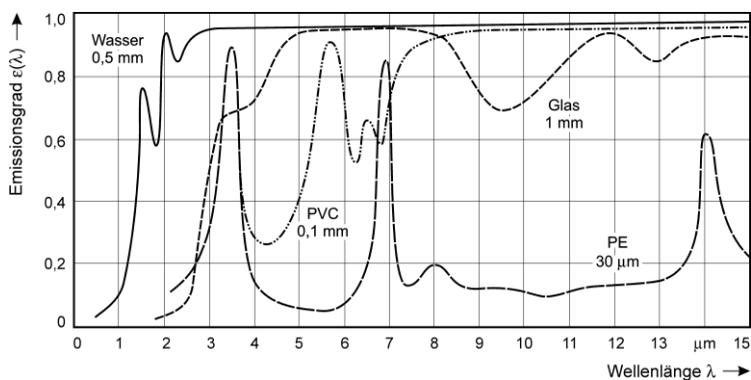


Bild 4. Emissionsgrad verschiedener Materialien [3]

Tabelle 1: Typische Temperaturmessbereiche, Spektralbereiche und Anwendungsbeispiele für Pyrometer

Temperaturmessbereich	Spektralbereich	Anwendungsbeispiele
-40 °C bis 1000 °C	8 μm bis 14 μm	Nichtmetalle, beschichtete Metalle
300 °C bis 1200 °C	um 7,7 μm	Ultradünnes Glas
100 °C bis 2500 °C	4,8 μm bis 5,2 μm	Glasoberflächen
300 °C bis 2000 °C	um 4,5 μm	CO ₂ -Messungen
300 °C bis 2500 °C	um 3,9 μm	Messung durch Flammen und Verbrennungsgase
100 °C bis 1300 °C	um 3,4 μm	Dünne Kunststofffolien
20 °C bis 2500 °C	3 μm bis 5 μm	Keramik, Metalle
150 °C bis 2500 °C	1,4 μm bis 1,8 μm	Metalle, Keramik, Graphit
500 °C bis 3000 °C	0,8 μm bis 1,1 μm	Metalle, Glasschmelzen

Aufbau und Eigenschaften

Im Bild 5 ist der prinzipielle Aufbau aktueller Pyrometer dargestellt. Die Eigenschaften der Geräte werden wesentlich vom verwendeten Infrarot-Sensor bestimmt. Zum Einsatz kommen:

Halbleiter-Fotodioden

- Si (0,8 μm bis 1,1 μm)
- InGaAs (1,4 μm bis 1,8 μm)
- Extended InGaAs (2,0 μm bis 2,6 μm)

Halbleiter-Fotowiderstände

- PbS (2,0 μm bis 2,8 μm *)
- PbSe (3 μm bis 5 μm *)

Thermische Infrarot-Sensoren

- Thermopiles (3 μm bis 14 μm)
- Pyroelektrische Sensoren (3 μm bis 14 μm *)

In Klammern sind die relevanten Spektralbereiche aufgeführt. Standardmäßig werden Einelement-Sensoren eingesetzt. Teilweise werden auch 2-Kanal-Sensoren auf Si-, InGaAs- oder extended InGaAs-Basis verwendet, die in zwei eng nebeneinander, meist überlappenden Wellenlängenbereichen arbeiten. Damit werden Quotienten-Pyrometer realisiert, die für Messungen an Objekten mit veränderlichem oder unbekanntem Emissionsgrad geeignet sind.

In Klammern sind die relevanten Spektralbereiche aufgeführt. Standardmäßig werden Einelement-Sensoren eingesetzt. Teilweise werden auch 2-Kanal-Sensoren auf Si-, InGaAs- oder extended InGaAs-Basis verwendet, die in zwei eng nebeneinander, meist überlappenden Wellenlängenbereichen arbeiten. Damit werden Quotienten-Pyrometer realisiert, die für Messungen an Objekten mit veränderlichem oder unbekanntem Emissionsgrad geeignet sind.

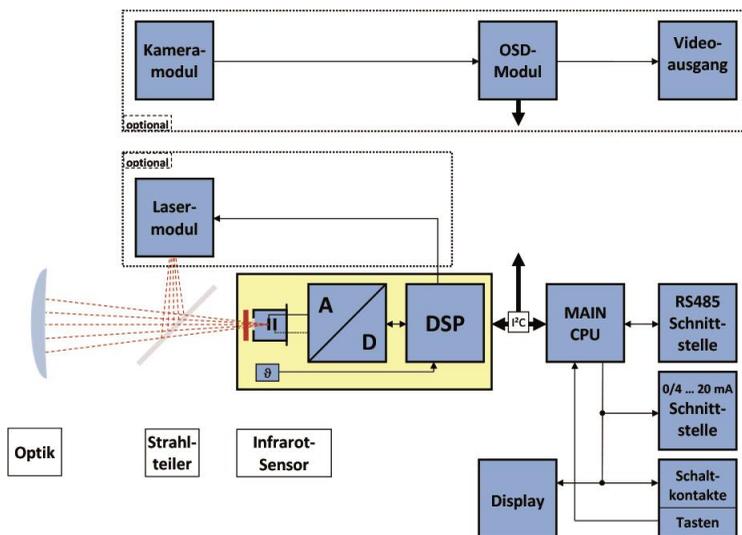


Bild 5. Prinzipieller Pyrometeraufbau

Die vom Messobjekt emittierte Infrarot-Strahlung gelangt über eine Optik auf den Infrarot-Sensor. Dabei kommen Fest- oder Varioptiken zum Einsatz. Die Optik kann bei Wellenlängen bis zu etwa $2,6 \mu\text{m}$ mit einem mehrere Meter langen Lichtwellenleiter an den Infrarot-Sensor angekoppelt werden. Diese Lichtwellenleiter-Pyrometer eignen sich besonders für Messungen bei heißen Umgebungsbedingungen oder schwer zugänglichen Messstellen. Das Verhältnis von Messentfernung zu Messfelddurchmesser wird als Distanzverhältnis bezeichnet. Messfelddurchmesser unter 1 mm bei Distanzverhältnissen von 100:1 und mehr sind möglich.

Als Visierhilfe kommen ein Laser- oder LED-Pilotlicht, ein optisches Durchblickvisier oder ein integrierter Video-Kameramodul zum Einsatz. Im optischen Strahlengang zwischen Optik und Infrarot-Sensor befindet sich deshalb meist ein Strahlteiler, der Infrarot-Mess- und Visier-Strahlengang trennt.

Das Sensorsignal gelangt direkt oder über eine analoge Sensorsignalverarbeitung in einen AD-Wandler. Die gesamte Signalverarbeitung einschließlich der Umrechnung der strahlungsproportionalen Sensorausgangssignale in Temperaturwerte erfolgt digital. Alle Pyrometer besitzen in der Regel einen temperaturlinearen 0/4 bis 20 mA Ausgang. Als digitale Schnittstelle steht meist eine RS-485 mit geeignetem Datenprotokoll (zum Beispiel Modbus RTU) zur Verfügung, die möglichst galvanisch getrennt sein sollte. Die damit ausgestatteten Pyrometer lassen sich problemlos in bestehende Bussysteme und Prozesssteuerungen integrieren.

Bei Verwendung der genannten thermischen Infrarot-Sensoren bestimmen diese die mögliche Messgeschwindigkeit. Einstellzeiten t_{95} im Bereich von 10 ms bis 100 ms werden realisiert. Die aufgeführten Halbleiter-Fotodioden und –Fotowiderstände sind viel schneller. Hier bestimmt die Sensorsignalverarbeitung und Datenübertragung das Zeitverhalten. Werte von t_{95} um 1 ms sind typisch. Die mit *) gekennzeichneten Sensortypen benötigen aus Funktions- oder Stabilitätsgründen eine periodische Modulation des einfallenden Strahlungsflusses. Das geschieht beispielsweise mit einer rotierenden Sektorscheibe, die direkt vor dem Infrarot-Sensor angeordnet ist. Dieses sogenannte Wechsellichtverfahren ist aufwändiger als das bei den anderen Sensortypen benutzte Gleichlichtverfahren ohne zusätzlichen Chopper.

Die Tabellen 2 und 3 sowie die Bilder 6 und 7 zeigen am Beispiel der PYROSPOT-Serien 10 und 44 (DIAS Infrared GmbH) die Vielfalt der vorhandenen Pyrometerlösungen.

Gangautonomie von Armbanduhren

Tabelle 2: PYROSPOT Pyrometer der Serie 10

Gerätetyp	Spektralbereich	Temperaturmessbereiche	Distanzverhältnis	t ₉₀	Schnittstelle	Visiereinrichtung
DS 10N	0,8 µm bis 1,1 µm	550 °C bis 3000 °C	200 : 1 bis 300 : 1	2 ms	RS-485	Alle Pyrometer verfügen entweder über ein LED- oder Laserpilotlicht, ein Durchblickvisier oder eine Farb-Videokamera
DG 10N	1,5 µm bis 1,8 µm	200 °C bis 2500 °C	200 : 1 bis 300 : 1	2 ms	RS-485	
DGE 10N	2,0 µm bis 2,6 µm	100 °C bis 1200 °C	100 : 1 bis 200 : 1	2 ms	RS-485	
DP 10N	2,0 µm bis 2,8 µm	50 °C bis 1200 °C	100 : 1 bis 200 : 1	1,5 ms	RS-485	
DPE 10M	3,0 µm bis 5,0 µm	20 °C bis 1000 °C	100 : 1 bis 150 : 1	1,5 ms	RS-485	
DPE 10MF	um 3,9 µm	50 °C bis 2500 °C	100 : 1 bis 200 : 1	1,5 ms	RS-485	
DPE 10C	um 4,5 µm	500 °C bis 2000 °C	100 : 1	1,5 ms	RS-485	
DY 10G	um 5 µm	100 °C bis 2500 °C	100 : 1	30 ms	RS-485	Alle Pyrometer verfügen entweder über ein LED- oder Laserpilotlicht, ein Durchblickvisier oder eine Farb-Videokamera
DY 10U	um 7,7 µm	250 °C bis 1300 °C	70 : 1	30 ms	RS-485	
DY 10L	8 µm bis 14 µm	0 °C bis 1000 °C	80 : 1 bis 100 : 1	30 ms	RS-485	
Quotienten-Pyrometer						
DSR 10N	0,7 µm bis 1,1 µm	500 °C bis 3000 °C	50 : 1 bis 300 : 1	5 ms	RS-485	Alle Pyrometer verfügen entweder über ein LED- oder Laserpilotlicht, ein Durchblickvisier oder eine Farb-Videokamera
DSR 10NF	0,7 µm bis 1,1 µm	600 °C bis 2500 °C	100 : 1 bis 300 : 1	5 ms	RS-485	
DGR 10N	1,5 µm bis 1,9 µm	300 °C bis 2300 °C	100 : 1 bis 300 : 1	5 ms	RS-485	

Tabelle 3: PYROSPOT-Pyrometer der Serie 44

Gerätetyp	Spektralbereich	Temperaturmessbereiche	Distanzverhältnis	t ₉₀	Schnittstelle	Visiereinrichtung
DS 44N	0,8 µm bis 1,1 µm	600 °C bis 2500 °C	100 : 1 bis 200 : 1	5 ms	RS-485	LED- oder Laser-Pilotlicht
DG 44N	1,5 µm bis 1,8 µm	250 °C bis 2000 °C	100 : 1 bis 200 : 1	5 ms	RS-485	LED- oder Laser-Pilotlicht
DGE 44N	2,0 µm bis 2,6 µm	75 °C bis 1200 °C	85 : 1 bis 200 : 1	5 ms	RS-485	Laser-Pilotlicht
DT 44F	um 3,9 µm	300 °C bis 2500 °C	50 : 1	10 ms ¹⁾	RS-485	LED-Pilotlicht
DT 44G	um 5,0 µm	100 °C bis 2500 °C	50 : 1	10 ms ¹⁾	RS-485	LED-Pilotlicht
DT 44L	um 8 µm bis 14 µm	-40 °C bis 1000 °C	50 : 1	10 ms ¹⁾	RS-485	LED-Pilotlicht
Quotienten-Pyrometer						
DSR 44N	0,7 µm bis 1,1 µm	600 °C bis 2500 °C	50 : 1 bis 200 : 1	5 ms	RS-485	Laser-Pilotlicht
Lichtwellenleiter-Pyrometer						
DSF 44N	0,8 µm bis 1,1 µm	600 °C bis 2500 °C	50 : 1 bis 100 : 1	5 ms	RS-485	LED- oder Laser-Pilotlicht
DGF 44N	1,5 µm bis 1,8 µm	250 °C bis 2000 °C	50 : 1 bis 100 : 1	5 ms	RS-485	LED- oder Laser-Pilotlicht
Lichtwellenleiter-Quotienten-Pyrometer						
DSRF 44N	0,7 µm bis 1,1 µm	700 °C bis 1800 °C	40 : 1	5 ms	RS-485	Laser-Pilotlicht

¹⁾ t₉₀



Bild 6. PYROSPOT Pyrometer der Serie 10



Bild 7: Busfähige PYROSPOT Pyrometer der Serie 44 mit RS-485 Schnittstelle

Die Pyrometer zeichnen sich durch eine robuste Ausführung, sehr gute Genauigkeit und ausgezeichnete Zuverlässigkeit aus. Sie sind besonders für den Einsatz in industriellen Umgebungen geeignet. Durch umfangreiches Zubehör, beispielsweise

- Kühlgehäuse
- Luftblasvorsatz
- ATEX-Gehäuse
- Schutzscheiben und -rohre
- Schnittstellenadapter
- Anzeige- und Bedieneinheiten

lassen sich die Pyrometer individuell an die Applikation anpassen oder in Systemlösungen integrieren. Zur Konfiguration der Pyrometer und Analyse der Messwerte steht die Windows®-Software PYROSOFT Spot zur Verfügung. Bei Geräten mit Display und Bedientasten (z.B. PYROSPOT Serie 10) ist die vollständige Parametrierung direkt am Pyrometer möglich.

Einbindung in lokale Netzwerke

Von besonderer Bedeutung sind zunehmend die Möglichkeiten zur Übertragung der Messwerte in lokale Netzwerke. Auch für die Parametrierung und Wartung ist die Vernetzbarkeit immer wichtiger.

Die Integration von PYROSPOT Pyrometern der Firma DIAS Infrared in lokale Netzwerke ist einfach möglich. Die zu vernetzenden Pyrometer können mit der Ethernet Interface-Box DCU^{loP} (Bild 8) direkt mit einem LAN verbunden werden. Sie sind damit sowohl für die IP-basierte Datenübertragung zum Endgerät als auch für den Datenaustausch auf Web-Seiten Basis geeignet.

Wenn mehrere PYROSPOT Pyrometer mit RS-485-Schnittstelle mit der Ethernet Interface-Box DCU^{loP} verbunden werden, ist es möglich mehrere Pyrometer über einen Anschluss unter einer IP-Adresse zu betreiben. Darüber hinaus wird die Zusammenschaltung von Pyrometern durch den eingebauten Web-Server deutlich vereinfacht. Die optionale drahtlose WLAN-Verbindung ermöglicht außerdem mittels der Web-Browser von Smartphone oder Tablet die

Inbetriebnahme, Wartung und Vorortkontrolle unkompliziert durchzuführen. Die Messwertübertragung per IP/TCP kann direkt mit der Betriebs- und Auswertesoftware PYROSOFT Spot für Pyrometer erfolgen.

An eine Ethernet Interface-Box können bis zu 32 Pyrometer angeschlossen werden. Entfernungen bis zu 30 m zwischen den angeschlossenen Pyrometern und der DCU^{IoP} sind möglich. Die Stromversorgung kann über Power-over-Ethernet (PoE) oder über eine separate 24 V DC Einspeisung erfolgen. Der integrierte Web-Server ermöglicht die Pyrometerparametrierung und liefert unter anderem folgende Informationen (Web-Seiten):

- Statusinformationen über die DCU^{IoP} (ID, IP-Adresse usw.)
- Anzahl und Art der angeschlossenen Pyrometer
- Messwertverlauf aller Pyrometer über die letzten Minuten
- Anzeige von Pyrometerparametern
- Videobild eines auswählbaren Pyrometers, wenn Videodaten vorhanden sind
- Parametrierung von Interface-Box und Pyrometern



Bild 8. Ethernet Interface-Box DCU^{IoP}

Fazit

Für die industrielle Prozessmesstechnik steht heute eine Vielzahl von leistungsfähigen stationären Pyrometern zur berührungslosen Temperaturmessung zur Verfügung. Beschaffung und Einsatz müssen gründlich geplant werden. Eine entsprechende Beratung sowie Testmessungen vor Ort sind in vielen Fällen sinnvoll, um mögliche Messfehler und Fehlerschaffungen im Vorfeld zu vermeiden.

Literatur

[1] Walther, L.; Gerber, D.: Infrarotmesstechnik. Verlag Technik, Berlin 1981

[2] Hofmann, G.: Ungekühlte Infrarotarrays, Thermische Infrarotsensoren. In: Carl Cranz Gesellschaft, Vortragsmaterialien 2018

[3] VDI/VDE 3511, Blatt 4: Technische Temperaturmessung, Strahlungsthermometrie; Beuth Verlag, Berlin