

# Messtechnische Fehler in der Praxis bei der berührungslosen Temperaturmessung

von **Albert Book**

Die berührungslose Temperaturmessung oder auch Pyrometrie genannt wird von vielen Praktikern der Temperaturmessung mit Skepsis betrachtet. Die technischen Daten der Hersteller dokumentieren, dass Pyrometer sehr genaue und präzise Messgeräte sind. Entscheidend ist neben der richtigen Auswahl eines für die Anwendung geeigneten Pyrometers vor allem die Berücksichtigung von Materialeigenschaften und umgebungsbedingten Einflüssen vor Ort.

Durch den fachgerechten Einsatz können Messfehler vermieden werden. Im Folgenden werden die häufigsten Fehlerursachen und Möglichkeiten zur Reduzierung erläutert.

## Emissionsgrad

Pyrometer messen die emittierte Wärmestrahlung eines Objektes. Die vom Objekt abgestrahlte Infrarotstrahlung ist von dessen Material- und Oberflächeneigenschaften abhängig. Diese Abstrahleigenschaft wird durch den Emissionsgrad  $\epsilon$  beschrieben. Zur exakten Temperaturmessung ist der Emissionsgrad am Gerät einzustellen. Ein falsch eingestellter Emissionsgrad kann erhebliche Fehler verursachen. **Bild 1** zeigt abhängig von der Wellenlänge die Temperaturabweichung ( $\Delta T$ ) für drei Messwerte, wenn anstelle eines Emissionsgrades von 90% ein Emissionsgrad von 80% am Gerät eingestellt wird. Mit größeren Messwellenlänge oder steigender Temperatur vergrößert sich diese Fehler. Es sollte deshalb der kürzest mögliche Wellenlängenbereich gewählt werden, der für den gewünschten Messbereich zur Verfügung steht.

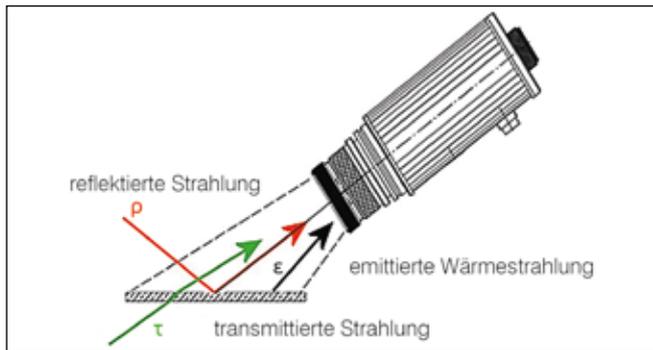
	Objekttemperatur $T_{\text{Objekt}}$		
	500 °C	800 °C	1500 °C
Messwellenlänge [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta T$ [°C]
$\lambda = 0,78 - 1,06 \mu$	5	9	25
$\lambda = 1,10 - 1,70 \mu$	8	14	37
$\lambda = 4,46 - 4,82 \mu$	23	43	103
$\lambda = 8,0 - 14,0 \mu$	43	73	150

**Bild 1** Messfehler in Abhängigkeit der Wellenlänge und Temperatur bei 10% Abweichung des Emissionsgrads ( $\epsilon_{\text{Gerät}} = 0,8$  und  $\epsilon_{\text{real}} = 0,9$ )

Gerade bei der Messung von Metalloberflächen mit unbekanntem oder stark schwankendem Emissionsgrad verringert sich durch die Wahl einer kürzeren Messwellenlänge der Messfehler erheblich. Der Emissionsgrad von Metallen nimmt mit kürzeren Wellenlängen zu. Gleichzeitig ist der Fehlereinfluss bei einer Fehleinstellung des Emissionsgrades geringer.

## Transmissionsverluste

Optimale Bedingungen gelten, wenn das Pyrometer ein freies Blickfeld auf das Objekt besitzt. Befinden sich Medien wie Staub, Gase, Rauch, Schutzscheiben oder opake Materialien im Strahlengang des Pyrometers, so verursachen diese eine Verringerung der Temperaturstrahlung des Objektes.



**Bild 2** Zusammensetzung der vom Pyrometer empfangenen Strahlung.

Sind die Transmissionsverluste bekannt, z.B. bei Messung durch ein Schutzglas ( $\tau=0,95$ ), können diese durch eine Anpassung des Emissionsgrades am Gerät kompensiert werden.

$$\epsilon_{\text{Gerät}} = \epsilon_{\text{Objekt}} \cdot \tau_{\text{Strahlengang}}$$

- $\epsilon_{\text{Gerät}}$  = einzustellender Emissionsgrad am Gerät
- $\epsilon_{\text{Objekt}}$  = Emissionsgrad des Objektes
- $\tau_{\text{Strahlengang}}$  = Transmissionsgrad der Objekte im Strahlengang

Problematischer ist es, wenn sich im Laufe der Zeit Staub, Öl oder verdampfte Materialien auf Linsen oder Schutzfenstern ansammeln. Das Pyrometer misst dann mit zunehmender Verschmutzung eine geringere Temperatur. Eine regelmäßige Reinigung der Linsen ist daher erforderlich. Freiblaseinrichtungen verlängern den Reinigungszyklus. Neuerdings sind am Markt auch Pyrometer erhältlich, die über einen integrierten Verschmutzungsgradindikator verfügen. Bei verschmutzter Linse wird ein Alarmsignal erzeugt.

## Hintergrundstrahlung / Fremdstrahlung

Entscheidend für die angezeigte Objekttemperatur ist die auf dem Detektor des Pyrometers treffende Strahlungsleistung  $\Phi_{\Sigma}$ .

Sie beinhaltet entsprechend der folgenden Formel neben dem Emissionsanteil des Messobjektes einen Anteil Hintergrundstrahlung, bestehend aus Reflexions- und Transmissionsanteil der Umgebungsstrahlung.

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{\epsilon} + \Phi_{\tau} + \Phi_{\rho}$$

- $\epsilon$  = Emissionsgrad der Messoberfläche
- $\tau$  = Transmissionsgrad des Messobjektes
- $\rho$  = Reflexionsgrad der Messoberfläche

Der Fehlereinfluss der Hintergrundstrahlung reduziert sich, je größer der Emissionsgrad des Objektes und je größer die Objekttemperatur im Vergleich zur Umgebungstemperatur ist. Problematisch ist dieser Einfluss z.B. beim Einsatz von Pyrometern am Auslauf von Durchlauföfen. Der Messfehler lässt sich vermindern, wenn die Ausrichtung der Optik eine Reflexion von Wärmestrahlung aus dem Ofen an der Messobjektoberfläche verhindert. Strahlungsquellen im Infrarotbereich wie z.B. Glühlampen, Heizstrahler oder Laser verursachen zum Teil starke Infrarotstrahlungen, die in der Praxis unterschätzt werden.

Speziell für Laseranwendungen gibt es Geräte mit Blockingfilter, um den Einfluss der energiereichen Laserstrahlung gegenüber der sehr kleinen Infrarotstrahlung zu unterbinden.

## Eine gute Optik ist durch nichts zu ersetzen

Abbildungsfehler der Optik, Streulicht und Reflexion an optischen Komponenten und Gehäuseteilen sowie Beugung durch die Wellennatur des Lichtes haben zur Folge, dass ein Teil der detektierten Strahlung außerhalb des spezifizierten Messfeldes auf den Sensor gelangt. Die Optik empfängt einen Teil der Strahlung außerhalb des Messfeldes. Dieser Einfluss der Optik wird als „Size of Source Effect“ bezeichnet. Minimieren lässt sich dieser Einfluss vom Hersteller durch eine sorgfältige Korrektur der optischen Abbildungsfehler, durch den Einsatz von entspiegelten optischen Komponenten und die Vermeidung von Reflexionen im Gerät. Eine qualitativ hochwertige Optik reduziert diese Fehlereinflüsse. Im Fokus der Optik ist der „Size of Source Effect“ am kleinsten. Bei Pyrometern mit fokussierbaren Optiken kann dieser Effekt somit deutlich reduziert werden, wenn der Messabstand korrekt eingestellt wird.

Der optische Fehler nimmt mit der Wellenlänge physikalisch bedingt zu. Daher ist bei langwellig messenden Geräten und

somit Geräten für niedrige Messbereiche ein noch höherer Aufwand zur optischen Fehlerkorrektur zu betreiben. Dies macht sich bei kostengünstigeren Pyrometern, die ab Raumtemperatur messen, in der Form negativ bemerkbar, dass der angezeigte Messwert sehr von der gewählten Messentfernung abhängig ist.

Ist das Objekt deutlich größer als der Messfleck des Pyrometers und die Fläche auf nahezu gleichem Temperaturniveau, so kann dieser Effekt fast vernachlässigt werden. Ansonsten kann der Fehler durch die Verwendung eines Gerätes mit fokussierbarer Optik und die exakte Ausrichtung auf das Objekt reduziert werden. Zur exakten Ausrichtung des Pyrometers empfiehlt sich ein Pilotlicht, ein Durchblickvisier oder eine integrierte Videokamera.

### Quotientenpyrometer

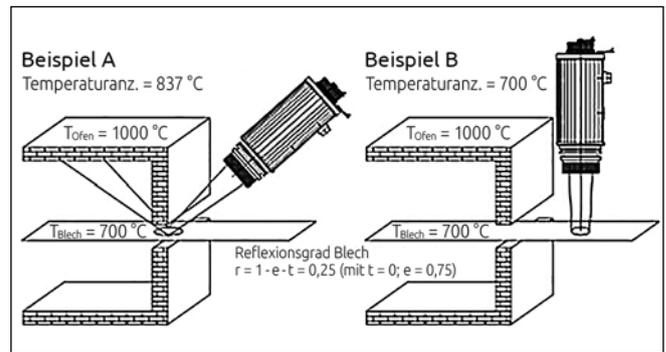
Bei einem Quotientenpyrometer wird das Verhältnis der Strahlungsdichten zweier unterschiedlicher Spektralbereiche ausgewertet. Vereinfacht gilt für die gemessene Temperatur mit den beiden Zentralwellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  folgende Formel.

$$\frac{1}{T_M} = \frac{1}{T_W} + \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2 \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)} \cdot \ln \left\{ \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right\}$$

- $T_M$  = Emissionsgrad der Messoberfläche
- $T_W$  = Transmissionsgrad des Messobjektes
- $C_2$  = Reflexionsgrad der Messoberfläche

Sind die Emissionsgrade  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$  für beide Wellenlängen gleich, so entspricht die gemessene Temperatur der Objekttemperatur. Ein Quotientenpyrometer misst somit unabhängig vom Emissionsgrad der Oberfläche, sofern die Emissionsgrade  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$  identisch sind. In der Theorie werden Quotientenpyrometer empfohlen, wenn der Emissionsgrad des Messobjektes schwankt. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass dies von der jeweiligen Anwendung abhängig ist und nur selten zutrifft. Aufgrund der Verhältnisbildung kann der Messfehler eines Quotientenpyrometers bei schwankenden und unterschiedlichen Emissionsgraden der beiden Messwellenlängen wesentlich größer werden, als der eines Spektralpyrometers. Besonders Metalle und insbesondere Buntmetalle weisen eine wellenlängenabhängige Änderung des Emissionsgrades auf.

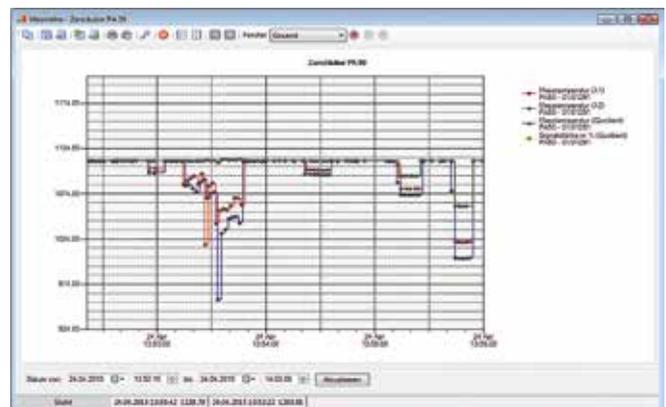
Transmissionsverluste wie Staub, Dampf oder Rauch hingegen verursachen vielfach eine homogene Schwächung der



**Bild 3** Vermeidung von Messfehlern durch reflektierte Hintergrundstrahlung durch richtige Ausrichtung des Pyrometers.

Strahlungsintensität. Im Vergleich zu Spektralpyrometern bleibt unter diesen Bedingungen der Messwert bei Quotientenpyrometern konstant.

Innovative Quotientenpyrometer ermöglichen die gleichzeitige Messung und Berechnung der Temperatur bei den beiden spektralen Wellenlängen und die Quotiententemperatur. Somit kann bei der Inbetriebnahme entschieden werden, ob für den gesamten Messbereich die Messung mit einem Spektralpyrometer oder mit einem Quotientenpyrometer reproduzierbarere und genauere Messwerte liefert.



**Bild 4** Aufzeichnung der beiden Spektralen- und Quotiententemperaturen mit der Software CellaView.



**Autor**

Dipl.-Ing. Albert Book  
 KELLER HCW GmbH · Germany  
 Infrared Thermometer Solutions  
 Tel. +49 54 51 85 320  
 albert.book@keller-msr.de  
 www.keller-msr.de/pyrometer