

Optische Einflussgrößen bei der berührungslosen Temperaturmessung

von **Albert Book**

Die berührungslose Temperaturmessung basiert auf einem optischen Messverfahren. Dabei haben die optischen Eigenschaften eines Pyrometers einen großen und oft unterschätzten Einfluss auf die Messgenauigkeit. Vielfach werden lediglich die im Datenblatt spezifizierten Parameter bei der Prüfung der Messunsicherheit verglichen. Doch können durch einfache, falsch ausgewählte oder falsch eingestellte Optiken sehr gravierende Messfehler entstehen. Der folgende Bericht erläutert die Grundlagen und Auswirkungen von optischen Abbildungsfehlern sowie die Spezifikation der optischen Parameter von Pyrometern. Es wird eine Möglichkeit vorgestellt, wie der Anwender selbst die Qualität der Optik des Pyrometers kontrollieren kann.



Bild 1 Pyrometer CellaTemp PA mit hochauflösender Präzisionsoptik.

Optische Abbildungsfehler

Sphärische Aberration (Öffnungsfehler)

Lichtstrahlen, die nahe am Rand einer Linse einfallen, werden auf einer anderen Entfernung fokussiert, als mittig einfallende Lichtstrahlen. Die Folge ist ein leicht verschwommenes Bild. Die Sphärische Aberration kann in optischen Systemen, die aus mehreren Linsen bestehen, durch eine geeignete Kombination mehrerer Linsenoberflächen reduziert werden.

Chromatische Aberration (Farblängsfehler)

Die Brennweite von Linsen ist von der Wellenlänge abhängig. Licht bzw. Strahlung verschiedener Wellenlängen wird in verschiedenen Punkten fokussiert. Das Bild eines Objektes erscheint dann mit farbigen Rändern um das Bild. Die chromatische Aberration kann durch den Einsatz von Optiken, die für zwei (Achromat) oder drei (Apochromat) Wellenlängen korrigiert sind, stark reduziert werden (**Bild 2**). Die Materialien der Linsen werden dabei derart gewählt, dass sich für zwei bzw. drei Wellenlängen die Abbildungsfehler der Linsen gegenseitig kompensieren.

Spezifikation der Optik von Pyrometern

Zur Spezifikation der Optik wird entweder die Messfleckgröße für eine bestimmte Entfernung oder das Distanzverhältnis, also das Verhältnis von Messabstand zu Messfelddurchmesser, angegeben.

Die Messfleckgröße von Pyrometern wird auf einen festgelegten Prozentsatz der maximal in einem Halbraum empfang-

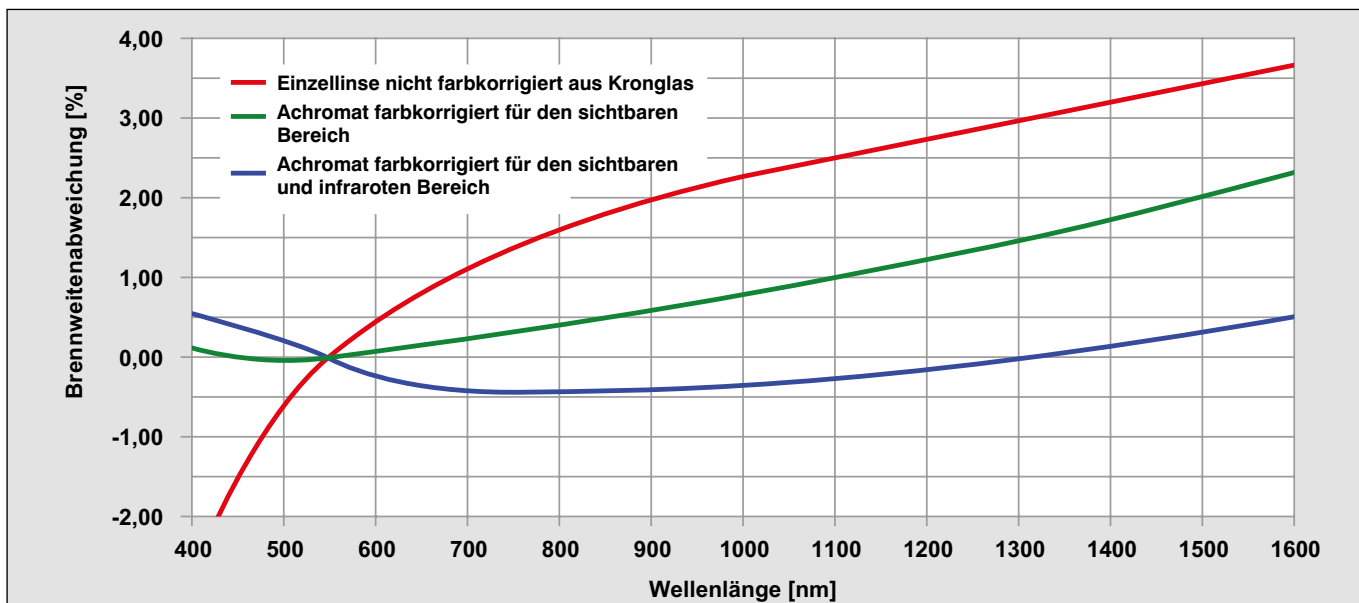


Bild 2 Brennweitenabweichung aufgrund von Farblängsfehler für unkorrigierte und farbkorrigierte Linsen.

baren Energie bezogen. 100 % entspricht einem unendlich großen Messobjekt. Die Messfeldgröße wird typisch auf 90, 95 oder 98 % der maximal empfangbaren Energie bezogen (**Bild 3**).

Wird der Strahlungsanteil auf 95 % statt auf 90 % bezogen, so ergibt sich ein größeres Messfeld.

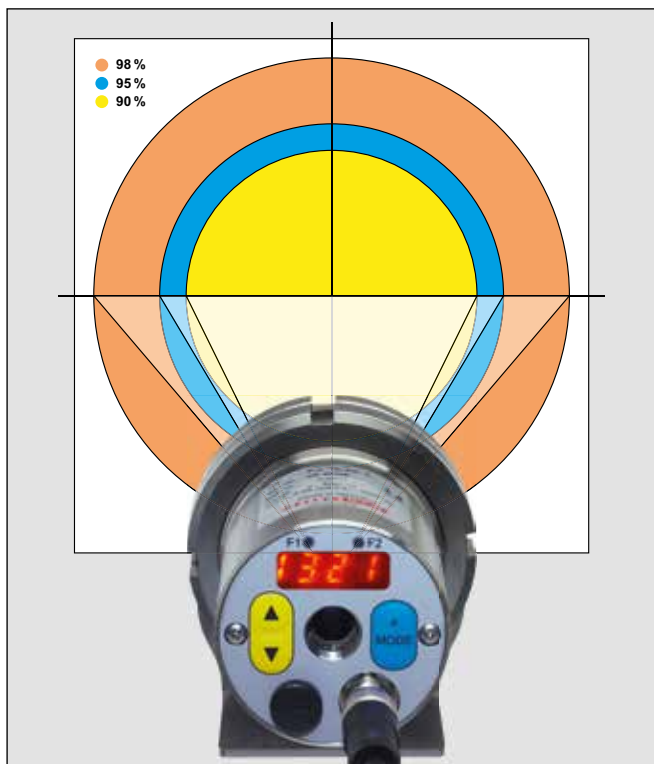


Bild 3 Darstellung der Messfeldgrößen bezogen auf 90, 95 und 98 % der maximal empfangbaren Energie.

größe sind deshalb nur vergleichbar, wenn sie sich auf den selben Prozentsatz beziehen. Einige Hersteller geben den prozentualen Strahlungsanteil nicht an oder definieren ihn auf einen geringen Prozentwert. Dadurch täuschen diese Hersteller in den Datenblättern ein sehr kleines Messfeld vor, wohlweislich, dass sie bei einer anders definierten Angabe einen deutlich größeren Wert angeben müssten. Außerdem spezifizieren einige Hersteller die Größe des Messfeldes ohne Berücksichtigung von Linsentoleranzen.

Auswirkung von optischen Fehlern

Bei Pyrometern wird zwischen Geräten mit fokussierbarer Optik und Fixfokus-Optik unterschieden. Nur in der Fokussentfernung wird das Messfeld scharf abgebildet. Bei Betrieb des Pyrometers außerhalb des Fokusbereiches ist keine gleichmäßige Verteilung der Infrarotstrahlung auf den Sensor mehr gewährleistet (**Bild 4**).

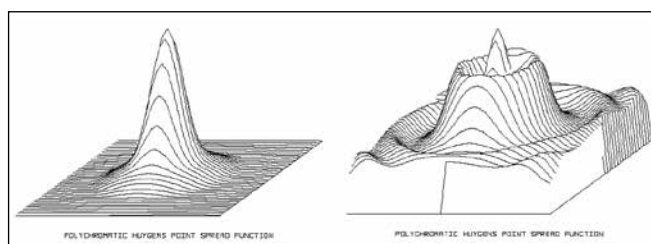


Bild 4 Vergleich der Intensitätsverteilung bei fokussierter und defokussierter Optik.

Die über die Messfläche empfangene Strahlung wird dann unterschiedlich stark erfasst. Temperaturänderungen im Zentrum wirken sich stärker aus als im Randbereich des Messfeldes.

Dies hat insbesondere Auswirkungen auf die Kalibrierung des Pyrometers vor einem „Schwarzen Strahler“. Die Öffnung des Ofens muss um ein Mehrfaches größer sein als das Messfeld des Pyrometers. Bei Geräten mit einfachen Optiken und einem großen Messfeld müssen schon extrem großflächige Strahler als Kalibrierquelle eingesetzt werden, um die Messfehler, die bei der Kalibrierung entstehen können, zu verringern. Dies ist eine der wesentlichen Fehlerquellen für die große Messunsicherheit von kostengünstigen Geräten.

Gerade bei kleinen Messobjekten, die nur geringfügig größer als die Messfläche des Pyrometers sind, kann eine falsche Fokuseinstellung zu erheblichen Messfehlern führen. Doch auch wenn das Pyrometer durch Öffnungen, Schaugläsern, Ofenwandungen oder Sichtrohre auf das Messobjekt schaut, kann eine schlecht angepasste Optik oder eine falsche Fokussierung schnell zu einer Einschnürung des Sichtkegels und damit zu Fehlmessungen führen. Wird an Objekten gemessen, die deutlich größer als das Messfeld des Pyrometers sind, kommt es bei einfachen Optiken zu einer Änderung der angezeigten Temperatur, wenn sich die Größe des Messobjektes oder der Messabstand ändern. **Bild 5** zeigt den Vergleich der Minderanzeige des Messwertes für eine hochwertige und eine einfache Optik bezogen auf den Durchmesser des Messobjektes. Bei einer einfachen Optik fällt der Messwert erheblich ab, wenn sich die Größe des Messobjektes ändert. Den gleichen Effekt bewirkt eine Änderung des Messabstandes bei konstanter Objektgröße. D.h., Geräte mit einfacher Optik zeigen bei unterschiedlichen Messabständen andere Messwerte an. Gerade beim Einsatz einfacher Handgeräte, die sicherlich bei unterschiedlichen Entfernungen eingesetzt werden, ist diese Fehlerquelle zu beachten. Dieser Effekt wird Size-of-Source Effekt (SSE)

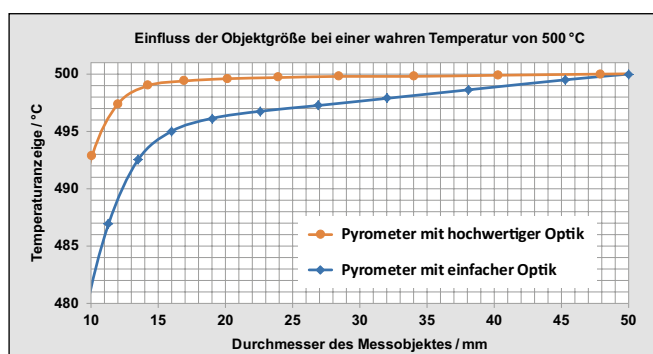


Bild 5 Vergleich der Minderanzeige des Messwertes für eine hochwertige und eine einfache Optik.

genannt und ist eine mehr oder minder große Fehlerquelle bei allen Pyrometern. Die Ursachen sind Abbildungsfehler der Optik, Streulicht und Reflexion an optischen Komponenten und Gehäuseteilen sowie Beugung durch die Wellennatur des Lichtes. Der Size-of-Source Effekt wird mit kürzer werdender Messwellenlänge geringer. Minimieren lässt sich dieser Einfluss durch eine sorgfältige Korrektur der optischen Abbildungsfehler, dem Einsatz von entspiegelten optischen Komponenten und der Vermeidung von Streulicht und Reflexionen im Gerät. Der Anwender kann diesen Fehler in der Praxis durch exaktes Fokussieren auf den Messabstand minimieren.

Die von einem Messobjekt ausgesandte Infrarotstrahlung liegt je nach der Temperatur im Wellenlängenbereich zwischen 0,6 - 20 μm also meist oberhalb des sichtbaren Lichtes. Das bedeutet zunächst, dass die Optiken für den verwendeten Wellenlängenbereich des Pyrometers korrigiert sein müssen. Wenn der Anwender visuell fokussieren möchte oder die Geräte mit einer Videokamera als Visierhilfe ausgestattet sind, müssen die Optiken so aufgebaut sein, dass die optischen Abbildungsfehler sowohl für den sichtbaren als auch für den infraroten Wellenlängenbereich gleichermaßen korrigiert sind. In einfachen Geräten werden Linsen eingesetzt, die nicht farbkorrigiert oder nur für eine Wellenlänge korrigiert sind. Dann stimmen die Fokuspunkte der Infrarot- und Sichtstrahlung nicht überein (**Bild 2**). Wenn das Pyrometer über die Visiereinrichtung scharf eingestellt ist, ist es für die Infrarotstrahlung nicht optimal scharf eingestellt.

Insbesondere bei Verwendung von Lasern zur Anzeige des Messpunktes stimmt bei einfachen Linsen der Laserpunkt nicht mit dem Messabstand überein.

Nur durch optisch aufwendige Zweilinsensysteme oder Dreilinsensysteme lassen sich diese Fehler weitestgehend eliminieren. Die Pyrometer der Serie CellaTemp® PA beispielsweise verfügen über eine hochwertige Präzisionsoptik mit breitbandentspiegeltem Linsensystem.

Damit lassen sich selbst Drähte mit einem Durchmesser von 0,3 mm temperaturmäßig korrekt erfassen.

Überprüfung der Abbildungsqualitäten

Die Abbildungseigenschaft eines Pyrometers lässt sich auf einfache Weise vom Anwender überprüfen. Dazu wird das Pyrometer auf eine definierte Strahlungsquelle ausgerichtet.

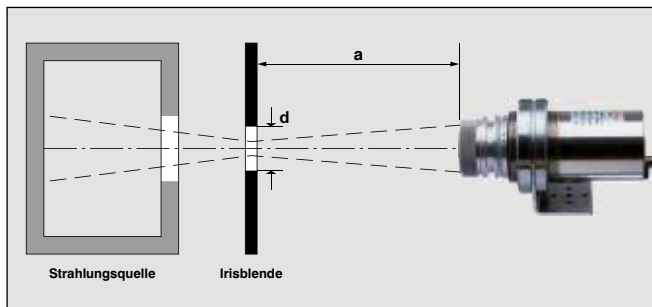


Bild 6 Messaufbau zur Überprüfung der optischen Eigenschaften.

Die Größe der Strahlungsfläche sollte dabei um ein Mehrfaches größer als das Messfeld des Pyrometers sein. Nun positioniert man im Fokusabstand (a) des Pyrometers vor der Strahlungsquelle eine geöffnete Irisblende und bestimmt mit dem Pyrometer die Temperatur bei einer Emissionsgradeinstellung von $\epsilon = 1$ (**Bild 6**). Es empfiehlt sich die Messung am Messbereichsende des Pyrometers durchzuführen, da mit höherer Temperatur optische Messfehler stärker sichtbar werden. Der Emissionsgrad am Pyrometer ist dann auf 0,98 einzustellen, was zu einem Anstieg der Temperaturanzeige führt.

Anschließend ist der Durchmesser der Blende soweit zu reduzieren, bis die angezeigte Temperatur wieder mit dem ursprünglichen Wert übereinstimmt. Der Durchmesser der Öffnung der Irisblende entspricht dann der Größe des Messfeldes bezogen auf 98 % der Strahlungsenergie. Aus dem Verhältnis zum Messabstand a ergibt sich das Distanzverhältnis $D = \frac{a}{d}$. Diese Messung ist dann für eine Messfeldgröße von 95 % und 90 % zu wiederholen und das Ergebnis mit den Prospektangaben der Hersteller zu vergleichen.

Auf diese Art lassen sich sehr einfach die tatsächlichen optischen Abbildungseigenschaften einschließlich der Auswirkungen von Linsenfehlern verschiedener Geräte prüfen und vergleichen.

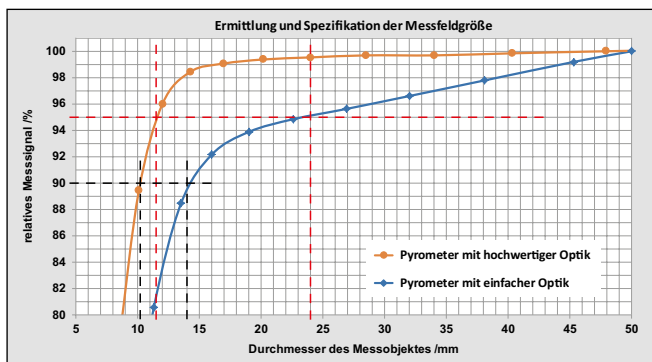


Bild 7 Vergleich der Durchmesser der Messobjekte für 90 % und 95 % der Strahlungsenergie für eine hochwertige und eine einfache Optik.

In **Bild 7** sind beispielsweise die Durchmesser der Messobjekte für 90 % und 95 % der Strahlungsenergie angegeben. Bezogen auf 90 % sind die Unterschiede in den Messfeldgrößen mit \varnothing 14 mm für die einfache Optik und \varnothing 10,2 mm für die hochwertige Optik noch relativ klein. Doch bei 95 % (\varnothing 24 mm bei der einfachen und \varnothing 11,5 mm bei der hochwertigen Optik) sind die Angaben doch schon sehr unterschiedlich. Um also einen besseren (kleineren) Wert für den Messfelddurchmesser angeben zu können, geben einige Hersteller daher lieber den Wert für eine geringere Bezugsgröße der Strahlung (z.B. 90 %) an. Damit scheint eine einfache Optik deutlich besser zu sein, als sie in Wirklichkeit ist.

Bei Pyrometern mit Pilotlicht, Videokamera oder Durchblickvisier lässt sich mit dem Test gleichzeitig feststellen, ob der Abstand des Scharfpunktes vom Messfeld und vom Sichtfeld identisch ist und ob die Messfeldmarkierung auch tatsächlich mit der Position und Größe der Messfläche des Pyrometers übereinstimmt.

Fazit

Bei der Auswahl von Pyrometern sind neben dem Vergleich der messtechnischen Parameter auch die optischen Eigenschaften genau zu vergleichen. Da leider die Prospektangaben einiger Hersteller oft unzureichend sind, sollte detailliert erfragt werden, wie das angegebene Messfeld ermittelt wurde und ob Linsenfehler und Ausrichttoleranzen bei der Spezifikation mit berücksichtigt wurden. Nur bei identischen optischen Angaben und Bezugsgrößen ist auch ein Vergleich unterschiedlicher Pyrometer möglich. In kritischen Fällen sollte man sicherheitshalber wie beschrieben die Qualität und Spezifikation der Prospektangaben selbst prüfen. Denn was nützt ein Pyrometer, das zwar mit einer elektrischen Messunsicherheit von deutlich kleiner 1 % spezifiziert ist, jedoch andererseits sich durch den Einsatz einfacher Linsen und optischer Aufbauten deutlich größere Messfehler ergeben.



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