

Optische Messfehler bei der berührungslosen Temperaturmessung

von **Albert Book**

Die Strahlungsthermometrie basiert auf einem optischen Messverfahren zur berührungslosen Ermittlung von Objekttemperaturen. Daher sind bei der Fehlerbetrachtung dieses Messverfahrens auch die optischen Messfehler zu berücksichtigen. Gerade in der Optik gibt es große Unterschiede zwischen den Strahlungsthermometern. Die Datenblattangaben der Hersteller sind dazu oft nur unzureichend und für den Anwender schwer vergleichbar. Der folgende Artikel erläutert die Grundlagen, Spezifikationen und praktischen Auswirkungen von optischen Abbildungsfehlern. Es werden Möglichkeiten vorgestellt, mit denen der Anwender die Qualität der Optik des ausgewählten Strahlungsthermometers selbst kontrollieren kann.

Definition der Messunsicherheit von Strahlungsthermometern

Wenn von Messfehlern gesprochen wird, ist damit die Abweichung zu einer Referenzgröße gemeint. Die Norm verwendet für die Angabe des Messfehlers den Begriff „Messunsicherheit“. Die Messunsicherheit ist ein Kennwert, der zur Angabe der Güte der Messung dient. Der Wert wird zusammen mit dem Messtemperaturbereich angegeben. Die Messunsicherheit ist ein Wert ohne Vorzeichen. Der häufig anzutreffende Begriff „Messgenauigkeit“ ist ein qualitativer Wert und bezeichnet die Annäherung des Messergebnisses an den wahren Wert. Daher sollte dieser nicht bei Zahlenangaben verwendet werden.

Die Messunsicherheit wird als relativer Wert bezogen auf die Referenzgröße angegeben. Bei der Temperaturmessung wird eine Differenzgröße korrekterweise in Kelvin [K] und nicht Grad Celsius [°C] spezifiziert. Eine Angabe wie ± 5 K oder $\Delta 5$ K wäre vielleicht einfacher zu verstehen, jedoch nach der Norm nicht korrekt. Um einen kleineren Wert für die Messunsicherheit angeben zu können, beziehen einiger Hersteller die Angabe der Bezugstemperatur auf Kelvin anstatt auf Grad Celsius. Eine Angabe wie „1% des Messwertes in K“ ergibt beispielsweise bei einer Temperatur von 100 °C eine Messunsicherheit von 3,73 K. Bei der Umrechnung von Grad Celsius in Kelvin ist ein Wert von 273 zu addieren ($1\% \text{ von } (100 + 273)\text{K} = 3,73 \text{ K}$). Bezieht man diese Messunsicherheit jedoch auf Grad Celsius ergibt sich ein Wert von „3,73% des Messwertes in °C“.

Ein Vorteil der berührungslosen Temperaturmessung ist die mögliche kurze Messzeit im Millisekundenbereich. Doch die Messzeit ist je nach Gerätetyp oft keine fixe Größe. Bei niedrigen Temperaturen sprich geringer Wärmestrahlung kann die Messzeit um ein Mehrfaches größer sein, als bei höheren Temperaturen. Einige Hersteller beziehen die Messunsicherheit daher auf eine große Messzeit, um dann einen besseren Wert angeben zu können.

Grundlagen der optischen Messfehler

In der Optik wird zur Beschreibung der Abbildungsfehler von Linsen der Begriff „Aberration“ verwendet. Dabei wird bei Abbildungsfehlern auf der optischen Achse im Wesentlichen zwischen der sphärischen Aberration (Öffnungsfehler) und der chromatischen Aberration (Farblängsfehler) unterschieden. Darüber hinaus sind bei der optischen Fehlerbetrachtung auch der Umfeldeinfluss und die Transmissionseigenschaft der Linse zu berücksichtigen.

Sphärische Aberration

Licht- oder Infrarotstrahlen, die im Randbereich einer Sammellinse parallel zur optischen Achse einfallen, werden auf eine kürzere Entfernung gebrochen, als Lichtstrahlen, die in der Nähe der optischen Achse einfallen (**Bild 1**). D.h. die Brennweite ist geringfügig unterschiedlich. Die Folge ist ein verschwommenes Bild.

Die sphärische Aberration lässt sich durch eine Kombination von mehreren Linsen mit unterschiedlichen Radien und durch Glasarten mit hoher Brechzahl deutlich reduzieren.

Chromatische Aberration

Die Brennweite einer Linse ist des Weiteren von der Wellenlänge abhängig. Kurzwellige Strahlen werden stärker gebrochen und besitzen daher einen kürzeren Brennpunkt als langwellige Strahlen (**Bild 2**). Als Folge erscheint das Bild eines Objektes mit einem farbigen Rand.

Die chromatische Aberration kann durch den Einsatz von Optiken, die für zwei (Achromat) oder drei (Apochromat) Wellenlängen korrigiert sind, stark reduziert werden. Die Materialien der Linsen werden derart gewählt, dass sich für zwei bzw. drei Wellenlängen die chromatischen Abbildungsfehler der Linsen gegenseitig kompensieren (**Bild 3**).

Umfeldeinfluss / Size-of-Source-Effect

Das Ausgangssignal eines Strahlungsthermometers hängt auch von der Objektgröße ab. Dieser Umfeldeinfluss wird als Size-of-Source-Effect (SSE) bezeichnet.

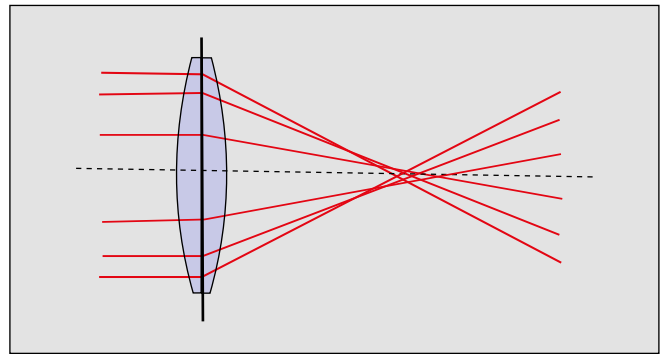


Bild 1 Randstrahlen werden stärker gebrochen und haben daher bei einfachen Linsen einen kürzeren Brennpunkt

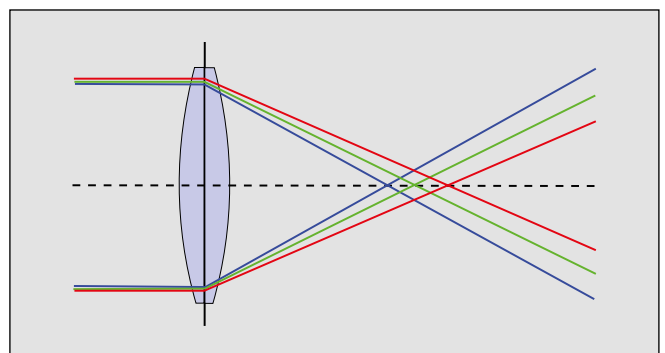


Bild 2 Kurzwellige Strahlen werden stärker gebrochen und haben daher einen kürzeren Brennpunkt

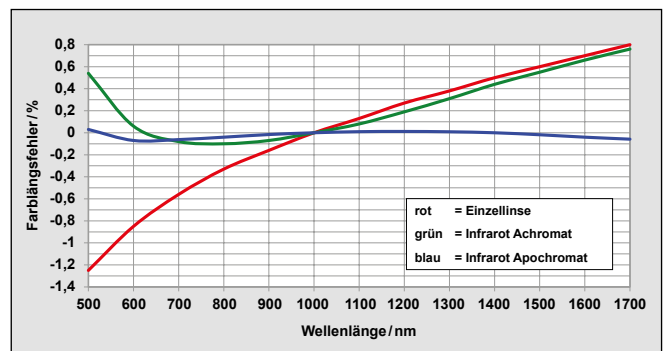


Bild 3 Vergleich des Farblängsfehlers von unterschiedlich korrigierten Objektiven

Der SSE wird durch Streulicht an den optischen Komponenten, durch Reflexion der Strahlung an den umgebenden Gehäuseteilen des optischen Strahlenganges und durch die Beugung an den Blendöffnungen verursacht. Auch wirken sich die Abbildungsfehler der Optik auf den SSE aus. Der Umfeldeinfluss beschreibt, wie viel Strahlung aus den Bereichen von außerhalb des Messfeldes auf den Sensor trifft. Der gesamte optische Aufbau bestehend aus dem Objektiv und den Blenden ist entscheidend für die Größe des Umfeldeinflusses eines Strahlungsthermometers.



Bild 4 Ermittlung der optischen Eigenschaften eines Strahlungsthermometers

Zur Bestimmung der SSE-Kurve wird das Strahlungsthermometer vor einem thermisch stabilisierten Ofen positioniert. Dabei muss der Durchmesser der Ofenöffnung deutlich größer als das Messfeld des Strahlungsthermometers sein. (**Bild 4**)

Der Ofen wird durch eine Lochblende mit veränderbarem Öffnungsdurchmesser im Fokusabstand abgedeckt. Die Öffnung wird vergrößert und dabei das empfangene Signal des Strahlungsthermometers bestimmt. Um die Kurve unabhängig von der Ofentemperatur angeben zu können, wird die Signalstärke als Relativgröße bezogen auf die maximal empfangbare Energie angegeben.

In der Grafik (**Bild 5**) sind zwei typische SSE-Kurven von Strahlungsthermometern mit unterschiedlicher optischer Qualität dargestellt.

Bezogen auf ein relatives Messsignal von 90 % ergibt sich aus den Kurvenverläufen ein Messfelddurchmesser von 10,2 mm für die hochwertige und 14,4 mm für die einfache Optik. Würde man bei der hochwertigen Optik das Messfeld für 98 % spezifizieren, wäre ein Messfelddurchmesser von 13,5 mm anzugeben. Wenn also bei den Datenblattangaben unterschiedliche Bezugsgrößen zugrunde gelegt werden, hat es den Anschein, als ob beide Geräte eine nahezu gleich gute optische Auflösung besitzen. Die Datenblattangaben zur Spezifikation der Optik sind daher nur bedingt direkt vergleichbar. Die Bezugsgrößen können sich unterscheiden oder sind erst gar nicht angegeben. Hersteller von Geräten mit schlechteren optischen Eigenschaften verwenden Bezugsgrößen, die die Werte im Datenblatt scheinbar vergleichbar gut zu den hochwertigen Geräten aussehen lassen.

Der GMA-Fachausschuss FA 2.51 „Strahlungsthermometrie“ des VDI/VDE strebt daher schon seit mehreren Jahren durch die Ausarbeitung der deutschen Richtlinie VDI 3511 Blatt 4.1 eine einheitliche Angabe und Bezugsgröße für die optischen Spezifikationen durch die Angabe der SSE-Kurve an. In der Richtlinie VDI 3511 Blatt 4.3 sind Testmethoden beschrieben, mit denen die grundlegenden Spezifikationen von Strahlungsthermometern überprüft werden können. Seit 2008 gibt es die internationale Richtlinie IEC/TS 62942-1 zur Spezifikation von Strah-

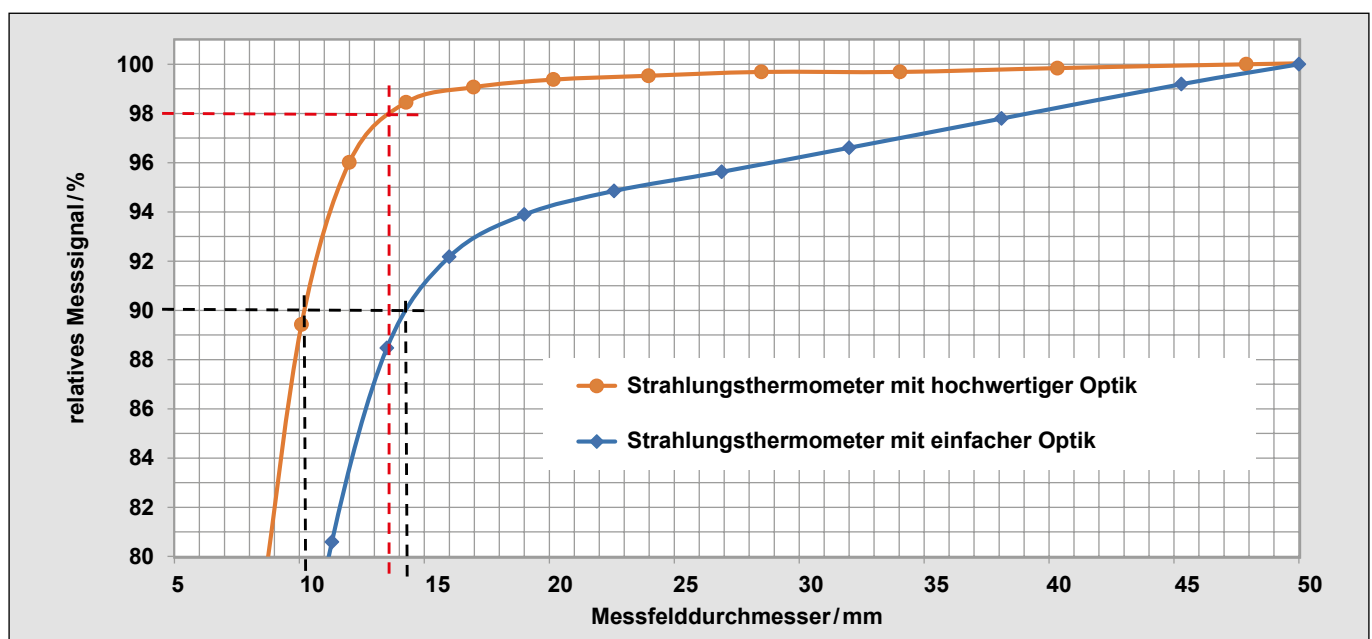


Bild 5 Vergleich der SSE-Kurven zweier Optiken mit unterschiedlicher Qualität

lungsthermometern, die aus der VDI 3511 hervorgegangen ist. Wünschenswert wäre, wenn sich alle Hersteller danach richten würden. Dann wären die optischen Eigenschaften der Geräte auch vergleichbar.

Die VDI/VDE-Richtlinie 3511 Blatt 4.1 empfiehlt, an Hand der SSE-Kurve den Messfelddurchmesser anzugeben, bei dem das Signal auf einen bestimmten Teil seines Maximalwertes abgefallen ist. Übliche Werte sind 90 %, 95 % oder 98 %. Der Maximalwert ist der Messwert, der von einer hemisphärischen Strahlungsquelle (Halbraum) erzeugt wird.

Einfluss der Größe und Transmission der Linse

Eine weitere qualitätsbestimmende Größe ist die Menge der durch die Linse auf dem Sensor gelangenden Infrarot-Strahlung. Die übertragene Strahlungsenergie steigt mit dem Quadrat des freien Objektivdurchmessers.

Je größer die empfangene Strahlung, desto besser ist die Temperaturlösung sprich die rauschäquivalente Temperaturdifferenz (Noise Equivalent Temperature Difference NETD). Diese gibt den Beitrag zur Messunsicherheit in Kelvin an, der aufgrund des Geräterauschens entsteht.

Um gerade bei niedrigen Temperaturen, kleinen Messobjekten und großen Messentfernungen für eine brauchbare Signalauswertung ausreichend Energie zum Sensor zu bekommen, ist ein großer effektiver Linsendurchmesser erforderlich. Dies verlangt hohe Ansprüche an die Optik, da mit dem Durchmesser der Linse auch die sphärische Aberration steigt. Nur mit aufwendig korrigierten Linsen und mehreren Blenden lässt sich ein derartiges Gerät mit kleinem SSE herstellen.

Auch das Material und die Beschichtung der Linse bestimmen im erheblichen Maße die Menge an Infrarot-Strahlung, die zum Sensor gelangt. Kostengünstige Geräte besitzen einfache gepresste Kunststofflinsen ohne Beschichtung. Eine hochwertige Glaslinse mit spezieller Antireflexbeschichtung hat im Vergleich dazu deutlich geringere Transmissionsverluste.

Es ist sicherlich interessant, wenn Hersteller mit dem weltweit kleinsten Messkopf werben. Bei kleinen Messköpfen mit einfachen Linsen gelangt jedoch deutlich weniger Signal zum Sensor. Dies wirkt sich negativ auf die Temperaturlösung aus. Als Ausgleich muss das Messfeld deutlich größer werden, was wiederum eine geringere optische Auflösung zur Folge hat.

Aufgrund der geringen Signalausbeute haben einfache Zweikomponentengeräten mit abgesetztem kleinen, elektronischen Messkopf bei niedrigen Objekttemperaturen das Problem, dass sich die angezeigte Temperatur ändert, wenn das Verbindungskabel vom Messkopf zur Elektronik bewegt wird.

Alle optischen Einflüsse zusammengefasst führen letztendlich dazu, dass die gemessene Temperatur mehr oder weniger stark von der Objektgröße und dem Messabstand abhängig ist. Dies lässt sich einfach überprüfen. Dazu positioniert man das Gerät im Fokusabstand vor einem homogenen heißen Messobjekt. Nun ändert man den Messabstand zu kürzerer und längerer Messentfernung und beobachtet die angezeigte Temperatur.

In einem Laborversuch wurde die Messabweichung zweier Geräte bei einer Ofentemperatur von 280 °C ermittelt. Bei Änderung des Messabstandes von 150 mm auf 300 mm änderte sich der Messwert bei dem hochwertigen Gerät um lediglich 2 K. Bei dem kostengünstigen Gerät fiel die Temperatur um 38 °C ab.

Auswirkungen der optischen Messfehler in der Praxis

In der Praxis kommt es häufig vor, dass Strahlungsthermometer nicht im Fokusabstand eingesetzt werden. Bei einfachen Geräten ist der Fokusabstand fix und nicht einstellbar. Andererseits ist der Messabstand durch die Konstruktion der Maschine oder Anlage vorgegeben. Serviceeinsätze haben oft gezeigt, dass selbst bei fokussierbaren Geräten der Messabstand falsch eingestellt war. Ein falscher Fokusabstand kann zu erheblichen Messfehlern führen.

In zahlreichen Anwendungen werden Strahlungsthermometer eingesetzt, um Messobjekte innerhalb eines Ofens zu erfassen. Das Strahlungsthermometer misst dabei durch eine Ofenöffnung hindurch auf das Objekt. Bei Geräten mit einer kleinen optischen Auflösung oder einem schlechten SSE kann dies dazu führen, dass der Messkegel von der Ofenöffnung abgeschnitten wird (**Bild 6**).

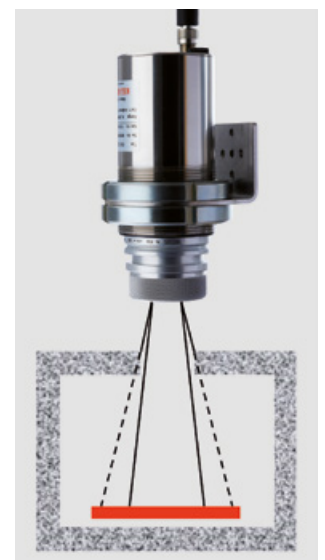


Bild 6 *Einschnürung des Messkegels bei einer zu geringen optischen Auflösung*



Bild 7 Trotz gleicher Messstelle zeigten die Geräte aufgrund einer falschen Fokuseinstellung große Temperaturunterschiede an

Bei dickwandigen Ofenöffnungen ist es elementar, dass der Fokusabstand korrekt gewählt und der Messkegel des Strahlungsthermometers deutlich kleiner als der minimale Öffnungsdurchmesser ist. Ansonsten ist das Gerät sehr ausrichtempfindlich und es besteht die Gefahr, dass das Strahlungsthermometer einen Teil der kälteren Ofenwandung erfasst. Ein Spektralpyrometer zeigt dann immer eine zu niedrige Temperatur an. Obwohl wie in **Bild 7** dargestellt die beiden Strahlungsthermometer durch ein wassergekühltes Visierrohr auf die gleiche Stelle des Bandes messen, ergab sich aufgrund einer fehlerhaften Fokussierung eine Messdifferenz von 23 °C bei einer Bandtemperatur von 850 °C.

Ohne die Möglichkeit einer parallaxefreien optischen Visiereinrichtung in Form eines Durchblick-Visiers oder einer Videokamera mit Anzeige der exakten Fokuseinstellung und Messfeldgröße, wird bei Ofenanwendungen eine Fehlmessung oft gar nicht bemerkt.

Bedenklich ist der Einsatz von Fixfokus-Geräten in Anwendungen, bei denen mehrere Geräte an einem Ofen eingesetzt und aufgrund der Ofengeometrie die Messabstände unterschiedlich sind. Im Kalibrierlabor vor einem „Schwarzen Strahler“ zeigen die Geräte den gleichen Messwert an. An dem Ofen können sich bei Geräten mit einem großen Umfeldeinfluss erhebliche Temperaturdifferenzen untereinander ergeben. Dies lässt keine eng tolerierte Ofenregelung zu. In der Praxis lässt sich dies dadurch prüfen, dass man die Geräte bei thermisch stabilen Bedingungen untereinander tauscht und die Messwerte vergleicht.

Auch gibt es zahlreiche Anwendungen wie beispielsweise in Induktionserwärmungsanlagen, bei denen das Messobjekt klein bzw. das Messfeld des Strahlungsthermometers nur geringfügig größer als das Messobjekt ist. Bei Einsatz von Geräten mit großen Umfeldeinfluss oder wenn der Fokusabstand nicht genau eingehalten wird, können sich große Messfehler ergeben. Äußerst kritisch wird es, wenn zudem noch unterschiedlich große Produkte auf einer Anlage produziert werden.

In der Grafik (**Bild 8**) sind die SSE Kurven für zwei qualitativ unterschiedliche Geräte für eine Bezugstemperatur von 1000°C dargestellt.

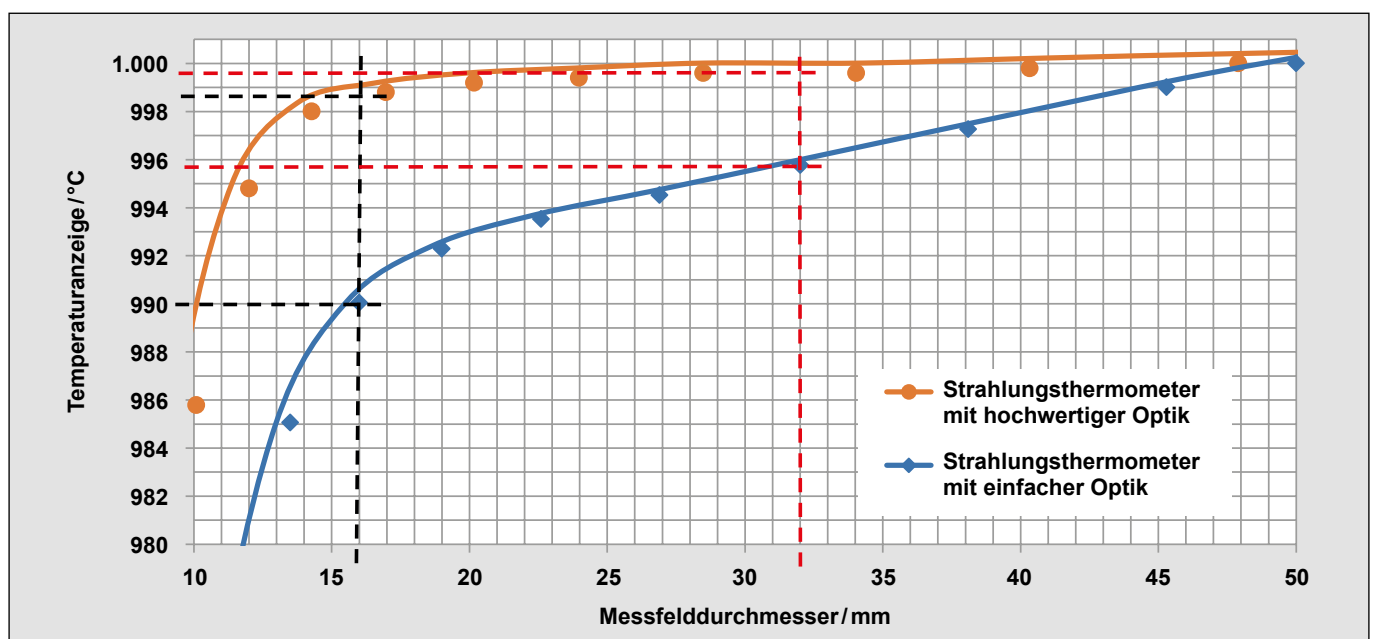


Bild 8 Einfluss auf die Temperatur bei Änderung der Objektgröße

Die Kurven verdeutlichen die Auswirkung auf die Temperatur, wenn sich die Objektgröße ändert. Verdoppelt sich beispielsweise der Durchmesser des Messobjektes von 16 mm auf 32 mm, ändert sich die Temperaturanzeige bei einem Gerät mit einer hochwertigen Optik von 998,7 °C auf 999,7 °C d.h. um lediglich 0,9 K. Hingegen steigt für in dem Beispiel bei einem Strahlungsthermometer mit einem einfachen optischen Aufbau der Messwert von 990 °C auf 995,9 °C also um 6 K.

Bezogen auf die wahre Temperatur von 1000 °C ergibt sich bei einem Objektdurchmesser von 16 mm für das hochwertige Gerät ein Messfehler von 1,2 °C. Das optisch einfache Gerät weicht hierbei um 10 °C von der wahren Temperatur ab. D.h. allein der Umfeldeinfluss verursacht bei dem einfachen Gerät eine Messunsicherheit von 1 %.

Fazit

Der Qualitätsunterschied und die Messunsicherheit von Strahlungsthermometern werden unter praxisbezogenen Gesichtspunkten weniger durch die elektrische Messunsicherheit als vielmehr durch die Qualität des optischen Systems bestimmt. Bei der Auswahl der Geräte sollten daher auch insbesondere die optischen Eigenschaften geprüft und verglichen werden.

Da die Hersteller in den Datenblättern hierzu oft wenig Auskunft geben, ist es empfehlenswert, sich weitere Informationen wie die Size-of-Source-Effect Kurve einzuholen. Bei kostengünstigen Handgeräten mit Kunststofflinse sind aufgrund des hohen Umfeldeinflusses keine besonderen Messgenauigkeiten zu erwarten. Stationäre Geräte mit kleinem Messkopf haben einfach physikalisch bedingte Grenzen in der Messgenauigkeit durch die geringere Signalausbeute. Bei der Auswahl der Geräte ist daher sehr wohl abzuwägen, welche Messunsicherheit angestrebt wird. Im Zweifelsfall sollte der Anwender vor der Inbetriebnahme die Geräte durch die beschriebenen Möglichkeiten überprüfen, um sich so ein wahres Bild von der Qualität zu machen.



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