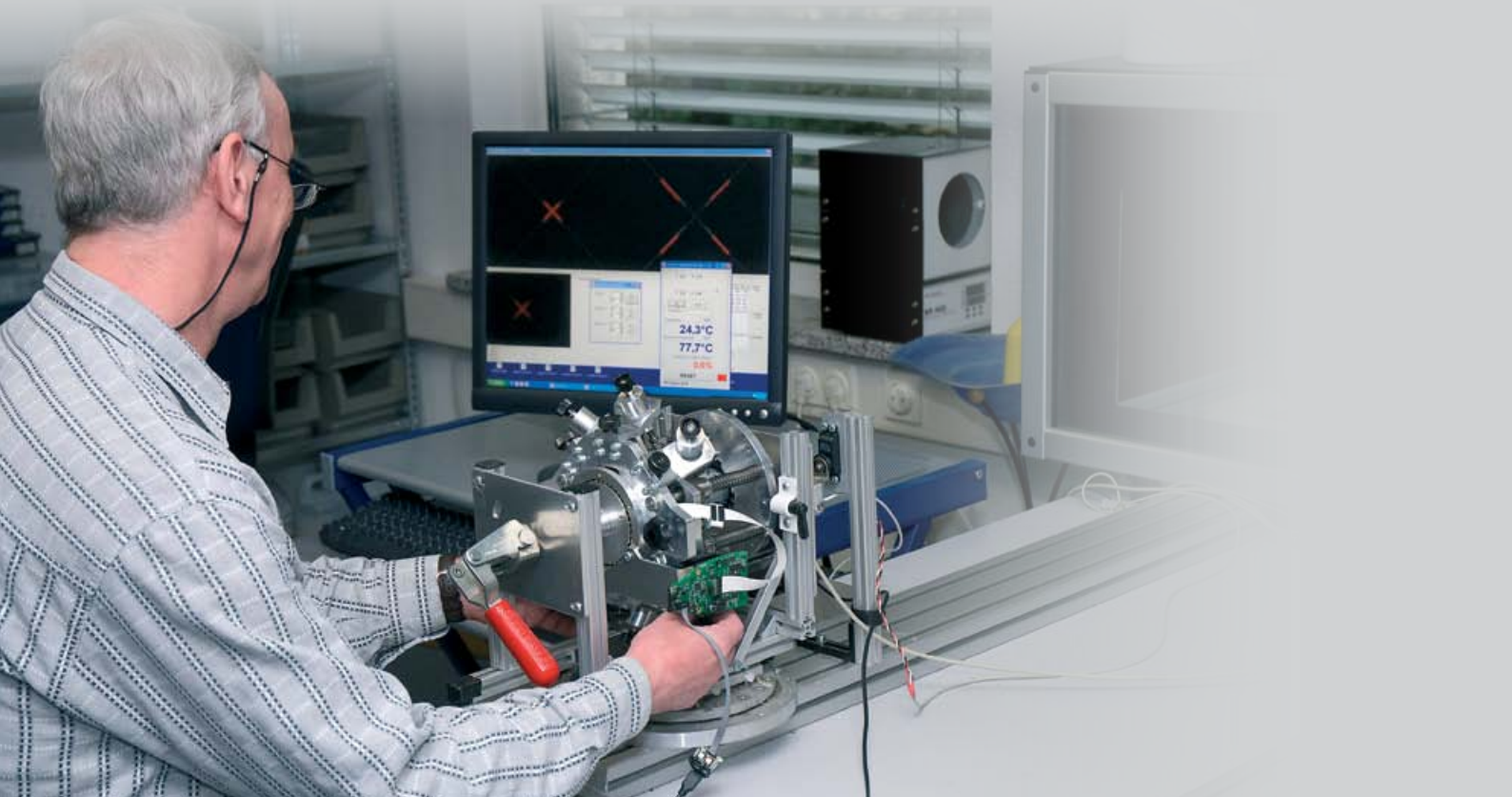


Grundlagen

der berührungslosen Temperaturmessung

Innovative Infrared Technology



Inhaltsübersicht

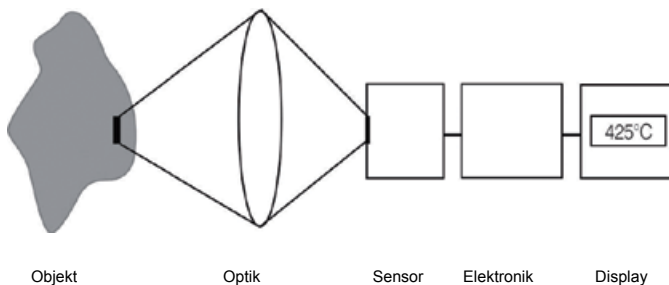
- 4-8 Physikalische Grundlagen
- 9-11 Emissionsgrad und Temperaturmessung
- 12-14 Optik, Visiertechnik und Elektronik
- 15-19 Infrarot-Thermometer und Anwendungen
- 20-24 Wärmebildkameras und Anwendungen
- 25 Literatur
- 26 Anhang: Glossar
- 27-30 Anhang: Emissionsgradtabelle
- 31 Anhang: Auswahlkriterien für Infrarot-Temperaturmessgeräte

Physikalische Grundlagen

Mit unseren Augen sehen wir die Welt im sichtbaren Licht. Dieses Licht nimmt nur einen kleinen Teil des vorhandenen Strahlungsspektrums ein, der weitaus größte Teil ist unsichtbar. Die Strahlung anderer Spektralbereiche liefert immer zusätzliche Informationen.

Das Infrarot-Temperaturmesssystem

Jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt von $-273,15^{\circ}\text{C}$ ($= 0$ Kelvin) sendet an der Oberfläche eine seiner Eigentemperatur proportionale elektromagnetische Strahlung, so genannte Eigenstrahlung aus. Ein Teil dieser Strahlung ist Infrarotstrahlung, die zur Temperaturmessung verwendet werden kann. Diese Strahlung durchdringt die Atmosphäre und wird mittels einer Linse (Eingangsoptik) auf ein Detektorelement fokussiert, welches ein der Strahlung proportionales elektrisches Signal erzeugt. Das Signal wird verstärkt und mittels nachfolgender digitaler Signalverarbeitung in eine der Objekttemperatur proportionale Ausgabegröße umgesetzt. Der Messwert kann auf einem Display angezeigt oder als analoges Signal ausgegeben werden, welches einen einfachen Anschluss an Regelsysteme der Prozesssteuerung ermöglicht.



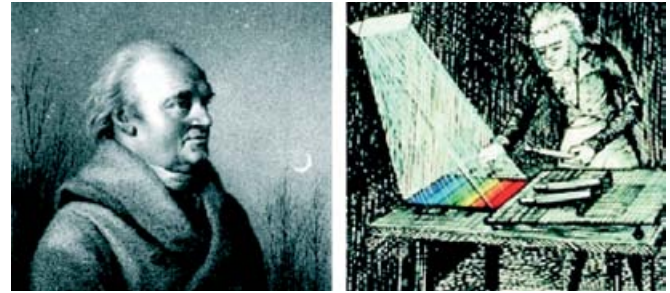
Infrarotsystem

Die Vorteile der berührungslosen Temperaturmessung liegen klar auf der Hand:

- Messung an bewegten, schwer zugänglichen oder sehr heißen Objekten
- Sehr kurze Mess- und Ansprechzeiten
- Rückwirkungsfreie Messung, keine Beeinflussung des Messobjektes
- Zerstörungsfreie Messung
- Langlebigkeit der Messstelle, kein Verschleiß

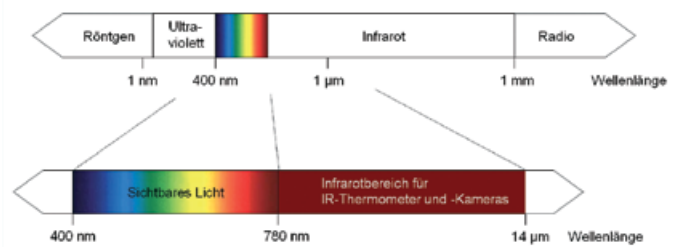
Die Entdeckung der Infrarotstrahlung

Auf der Suche nach neuen optischen Materialien entdeckte William Herschel im Jahre 1800 durch Zufall die Infrarotstrahlung. Er schwärzte die Spitze eines empfind-



William Herschel (1738 - 1822)

lichen Quecksilberthermometers und testete damit als Messeinrichtung die Erwärmung der verschiedenen Farben des Spektrums, die sich auf einem Tisch bildeten, indem Sonnenlicht durch ein Glasprisma geleitet wurde. Beim langsamen Bewegen des schwarz gefärbten Thermometers durch die Farben des Spektrums zeigte sich, dass die Temperatur von Violett nach Rot kontinuierlich anstieg. Durch das Bewegen des Thermometers in den dunklen Bereich hinter dem roten Ende des Spektrums sah Herschel, dass die Erwärmung weiter zunahm. Er fand den Punkt der maximalen Erwärmung schließlich weit hinter dem roten Bereich. Heute wird dieser Bereich infraroter Wellenlängenbereich genannt.



Das elektromagnetische Spektrum mit dem für Pyrometer genutzten Infrarotbereich

Elektromagnetisches Strahlungsspektrum

Unter einem Spektrum im engeren und physikalischen Sinne versteht man die Intensität eines Gemisches elektromagnetischer Wellen als Funktion der Wellenlänge oder der Frequenz. Das elektromagnetische Strahlungsspektrum erstreckt sich über einen Wellenlängenbereich von etwa 23 Zehnerpotenzen und unterscheidet sich in einzelnen Abschnitten durch Entstehung, Erzeugung und Anwendung der Strahlung. Alle Arten der elektromagnetischen Strahlung gehorchen ähnlichen Gesetzen der Beugung, Brechung, Reflexion und Polarisation. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist unter normalen Bedingungen gleich der Lichtgeschwindigkeit, d.h. das Produkt aus Wellenlänge und Frequenz ist konstant:

$$\lambda \cdot f = c$$

Der infrarote Spektralbereich nimmt im gesamten elektromagnetischen Strahlungsspektrum nur einen sehr begrenzten Abschnitt ein. Er reicht vom Ende des sichtbaren Spektralbereichs von etwa 0,78 μm bis zu Wellenlängen von 1000 μm .

Für die IR-Temperaturmessung ist nur der Wellenlängenbereich von 0,7 bis 14 μm von Interesse. Oberhalb dieser Wellenlänge sind die Energiemengen so gering, dass Detektoren nicht empfindlich genug sind, diese zu messen.

Physikalische Grundlagen

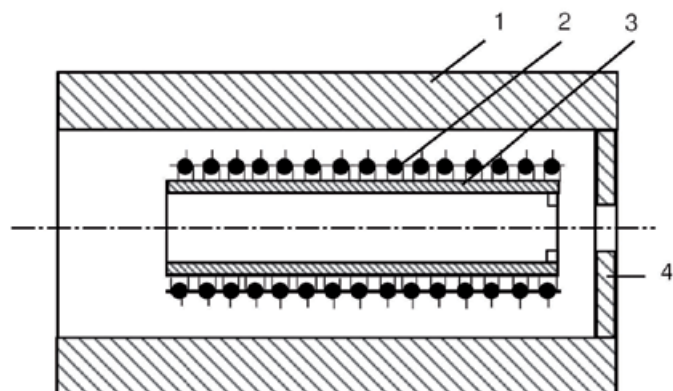
Um 1900 definierten Planck, Stefan, Boltzmann, Wien und Kirchhoff das elektromagnetische Spektrum genauer und stellten qualitative und quantitative Zusammenhänge zur Beschreibung der Infrarotenergie her.

Der schwarze Strahler

Ein schwarzer Strahler ist ein Körper, der alle auf ihn fallende Strahlung absorbiert, an ihm treten weder Reflexion noch Transmission auf.

$\alpha = \varepsilon = 1$ (α Absorptionsgrad, ε Emissionsgrad)

Ein schwarzer Strahler strahlt bei jeder Wellenlänge die für alle möglichen Strahler maximal mögliche Energie ab. Die Strahldichte ist winkelnunabhängig. Der schwarze Strahler bildet die Basis für das Verständnis der physikalischen Grundlagen der berührungslosen Temperaturmesstechnik und für das Kalibrieren von Infrarot-Thermometern.



Schnittbild eines schwarzen Strahlers:
1 - keramisches Rohr, 2 - Heizung, 3 - Rohr aus Al_2O_3 , 4 - Blende

Der Aufbau eines schwarzen Strahlers ist im Prinzip sehr einfach. Ein beheizbarer Hohlkörper hat an einem Ende ein kleines Loch. Bringt man diesen Körper auf eine bestimmte Temperatur und befindet sich somit dieser Hohlraum im Temperaturgleichgewicht, so tritt aus dem Loch ideale schwarze Strahlung der eingestellten Temperatur aus. Je nach Temperaturbereich und Verwendungszweck ist der Aufbau derartiger schwarzer Strahler vom Material und geometrischen Aufbau abhängig. Ist das Loch in der

Wand sehr klein gegenüber der gesamten Oberfläche, so kann die Störung des Idealzustands als gering angesehen werden. Blickt man z.B. mit einem Messfühler nur auf dieses Loch, so kann man die von dort kommende Temperaturstrahlung als schwarze Strahlung betrachten und das Messgerät damit kalibrieren. Einfachere Anordnungen benutzen in der Praxis Flächen, die mit pigmentierten Lacküberzügen versehen sind und die im gewünschten Wellenlängenbereich Absorptions- und Emissionsgrade bis 99 Prozent haben. Für Kalibrierungen bei praktischen Messungen ist das oft ausreichend.

Die Strahlungsgesetze des schwarzen Strahlers

Das Plancksche Strahlungsgesetz stellt den grundlegendsten Zusammenhang für die berührungslose Temperaturmessung dar. Es beschreibt die spektrale spezifische Ausstrahlung $M_{\lambda s}$ des schwarzen Strahlers in den Halbraum in Abhängigkeit von seiner Temperatur T und der betrachteten Wellenlänge λ .

$$M_{\lambda s} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$$

C Lichtgeschwindigkeit
 C_1 $3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$
 C_2 $1,44 \cdot 10^2 \text{ K m}$
 h Plancksches Wirkungsquantum

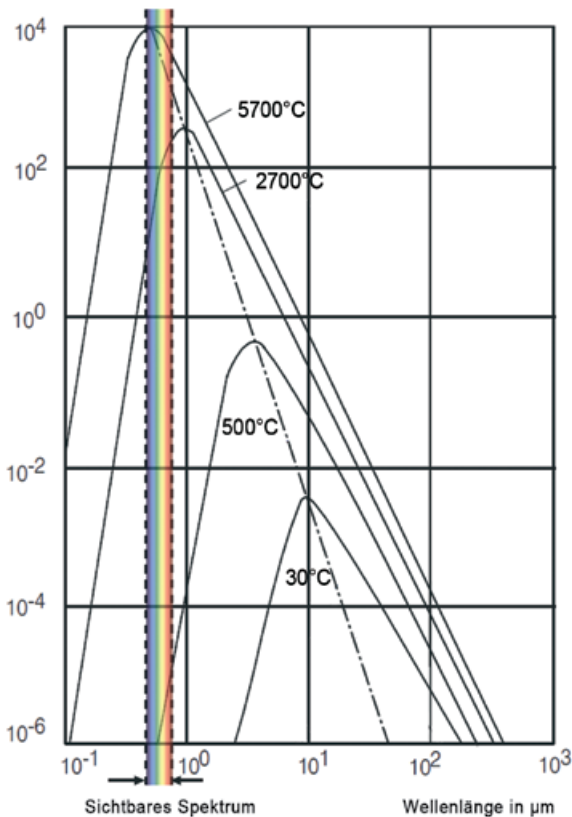
Die grafische Darstellung der Gleichung in Abhängigkeit von λ mit verschiedenen Temperaturen als Parameter wird in folgender Abbildung gezeigt.

Zu erkennen ist, dass sich das Maximum der spektralen spezifischen Ausstrahlung mit steigender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen verschiebt. Es lassen sich eine Vielzahl weiterer Zusammenhänge ableiten, von denen zwei nachfolgend kurz benannt werden. Durch Integration der spektralen Strahlungsintensität über alle Wellenlängen von null bis unendlich erhält man den Wert für die gesamte vom Körper ausgesandte Strahlung. Dieser Zusammenhang wird als Stefan-Boltzmannsches Gesetz bezeichnet.

$$M_{\lambda s} = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{Watt m}^2] \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ WM}^{-2}\text{K}^{-4}$$

Die gesamte emittierte Strahlung eines schwarzen Strahlers im gesamten Wellenlängenbereich steigt proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur. Aus der grafischen Darstellung des Planckschen Strahlungsgesetzes wird auch ersichtlich, dass die Wellenlänge, bei der die ausgesandte Strahlung eines schwarzen Strahlers das Maximum aufweist, sich bei Veränderung der Temperatur verschiebt. Das Wiensche Verschiebungsgesetz lässt sich durch Differentiation aus der Planckschen Gleichung ableiten.

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$



Spektrale spezifische Ausstrahlung M_s des schwarzen Strahlers in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Die Wellenlänge, bei der das Maximum der Strahlung liegt, verschiebt sich mit zunehmender Temperatur zum kurzwelligeren Bereich.

Der graue Strahler

Nicht jeder Körper entspricht dem Ideal des schwarzen Strahlers. Viele Körper emittieren weniger Strahlung bei der gleichen Temperatur. Der Emissionsgrad ϵ gibt das Verhältnis aus dem realen Abstrahlwert und dem des schwarzen Strahlers an. Er liegt zwischen null und eins. Ein Infrarotsensor empfängt neben der von einer Oberfläche abgegebenen Strahlung auch reflektierte Strahlung aus der Umgebung und unter Umständen durch den Körper hindurch gelassene Infrarotstrahlung.

$$\text{Es gilt: } \epsilon + \rho + \tau = 1$$

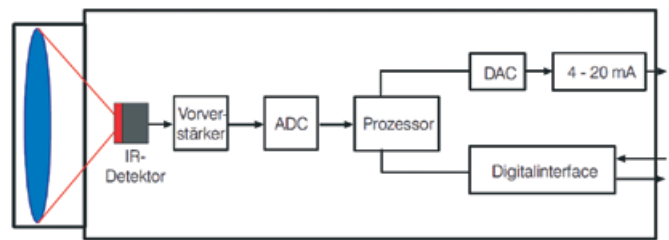
dabei ist ϵ der Emissionsgrad
 ρ der Reflexionsgrad
 τ der Transmissionsgrad

Die meisten Körper haben keine Transmission im Infrarotbereich, damit vereinfacht sich die Formel in:

$$\epsilon + \rho = 1$$

Das ist besonders praktisch, da es oft einfacher ist, die Reflexion zu messen als den Emissionsgrad zu bestimmen.

Aufbau und Funktionsweise von Infrarotthermometern



Blockschaltbild eines Infrarotthermometers

Die Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Infrarot-Thermometers. Die vom Messobjekt ausgehende Infrarotstrahlung wird mittels einer Eingangsoptik auf ein Infrarot-Detektorelement fokussiert, welche ein der Strahlung entsprechendes elektrisches Signal erzeugt, das anschließend verstärkt und weiterverarbeitet werden kann. Mit Hilfe einer digitalen Signalverarbeitung wird dieses Signal in eine der Objekttemperatur proportionale Ausgabegröße umgesetzt und über ein Display zur Anzeige gebracht oder als analoges Signal ausgegeben. Zur Kompensation von Umgebungstemperatureinflüssen wird mit Hilfe eines zweiten Detektors die Temperatur des Messgerätes bzw. seines optischen Kanals erfasst. Die Berechnung der Temperatur des Messobjektes erfolgt also in prinzipiell drei Schritten:

1. Umwandlung der empfangenen Infrarotstrahlung in ein elektrisches Signal
2. Kompensation von Geräte- und Objekthintergrundstrahlung
3. Linearisierung und Ausgabe der Temperaturinformation

Als Ausgangsgrößen stehen neben dem einfachen Anzeigen der Temperatur mittels Display standardisierte Ausgänge in Form linearer 0/4-20 mA, 0-10 V und Thermoelementsignale zur Verfügung, die einen einfachen Anschluss an Regelsysteme der Prozesssteuerung ermöglichen. Des Weiteren besitzen die meisten der heute verwendeten Infrarot-Thermometer wegen der intern digital erfolgenden Messwertverarbeitung auch digitale Schnittstellen (z.B. USB, RS485, Ethernet) zur Datenausgabe und für den Zugriff auf Geräteparameter.

Infrarotdetektoren

Das wichtigste Element jedes Infrarot-Thermometers ist der Strahlungsaufnehmer, auch Detektor genannt. Es werden zwei Hauptgruppen von Infrarotdetektoren unterschieden.

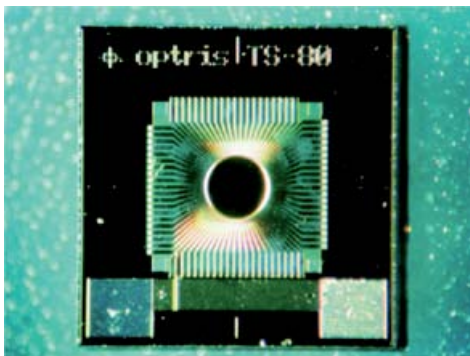


Thermische Detektoren

Bei diesen Detektoren ändert sich die Temperatur des Detektorelements durch Absorption von elektromagnetischer Strahlung. Die Veränderung der Temperatur bewirkt die Änderung einer temperaturabhängigen Eigenschaft dieses Detektors, die elektrisch ausgewertet wird und ein Maß für die absorbierte Energie ist.

Strahlungsthermoelemente (Thermosäulen)

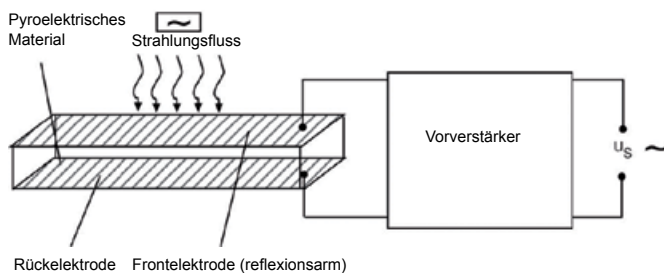
Wird die Verbindungsstelle zweier verschiedener Metalle erwärmt, so entsteht aufgrund des thermoelektrischen Effekts eine elektrische Spannung. Dieser Effekt wird seit langem technisch bei der berührenden Temperaturmessung mit Hilfe von Thermoelementen genutzt. Wenn die Erwärmung der Verbindungsstelle durch Absorption von Strahlung hervorgerufen wird, dann bezeichnet man dieses Bauelement als Strahlungsthermoelement. In der Abbildung sind auf einem Chip kreisförmig um eine Detektorfläche angeordnete Thermoelemente aus Wismut/Antimon dargestellt. Erwärmt sich die Detektorfläche, wird eine temperaturproportionale Signalspannung erzeugt, die an den Bondinseln abgegriffen werden kann.



Thermosäule TS80

Pyroelektrische Detektoren

Diese Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau eines pyroelektrischen Detektors. Das empfindliche Element besteht aus einem pyroelektrischen Material mit zwei aufgedampften Elektroden. Durch die bei der Absorption von Infrarotstrahlung hervorgerufene Temperaturänderung des empfindlichen Elements ändert sich aufgrund des pyroelektrischen Effekts die Oberflächenladung. Es ergibt



Prinzipieller Aufbau eines pyroelektrischen Detektors

sich ein elektrisches Ausgangssignal, das in einem Vorverstärker verarbeitet wird.

Aufgrund der Natur der Ladungserzeugung im Pyroelektrikum muss der Strahlungsfluss hierbei kontinuierlich alternierend unterbrochen werden (Chopperung). Der Vorteil der anschließenden frequenzselektiven Verstärkung ist ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis.

Bolometer

Bei Bolometern wird die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands ausgenutzt. Das empfindliche Element besteht aus einem Widerstand, dessen Wert sich bei Absorption von Wärmestrahlung ändert. Die Widerstandsänderung ruft eine Änderung der über dem Bolometerwiderstand abfallenden Signalspannung hervor. Um hohe Empfindlichkeit und große spezifische Detektivität zu erreichen, muss insbesondere ein Material mit einem hohen Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstands verwendet werden. In Bolometern, die bei Raumtemperatur arbeiten, wird sowohl der Temperaturkoeffizient des Widerstands von Metallen (z. B. Schwarzschild und Dünnschichtbolometer) als auch der von Halbleitern (z. B. Thermistorbolometer) ausgenutzt.

Folgende Technologieentwicklungen zeichnen sich bei in Infrarotbildgeräten eingesetzten Bolometern ab:

Die Halbleitertechnologie ersetzt die mechanischen Scanner. FPA's (Focal Plane Arrays) werden auf der Basis von Dünnschichtbolometern hergestellt. Dabei verwendet man VOX (Vanadiumoxid) oder amorphes Silizium als alternative Technologien. Diese Technologien erlauben drastische Verbesserungen des Preis-Leistungsverhältnisses. Zum neusten Standard gehören 160 x 120 und 320 x 240 Element-Arrays.

Quantendetektoren

Der entscheidende Unterschied zwischen Quantendetektoren und thermischen Detektoren besteht in ihrer schnelleren Reaktion auf die absorbierte Strahlung. Die Wirkungsweise der Quantendetektoren beruht auf dem Fotoeffekt. Dabei werden durch die auffallenden Photonen der Infrarotstrahlung Elektronen im Halbleitermaterial auf höhere Energieniveaus gehoben, beim Zurückfallen wird ein elektrisches Signal (Spannung oder Strom) erzeugt, auch eine Änderung des elektrischen Widerstandes ist möglich. Diese Signale sind exakt auswertbar. Quantendetektoren sind sehr schnell (ns bis μ s).

Die Temperaturänderung des empfindlichen Elements eines thermischen Detektors ist ein relativ langsamer Prozess, so dass die Zeitkonstanten thermischer Detektoren in der Regel um einige Größenordnungen größer sind als die Zeitkonstanten von Quantendetektoren. In sehr

grober Näherung kann man sagen, dass thermische Detektoren Zeitkonstanten im Millisekundenbereich haben, während die Zeitkonstanten von Quantendetektoren im Nano- und Mikrosekundenbereich liegen.

Trotz der stürmischen Entwicklung auf dem Gebiet der Quantendetektoren gibt es viele Anwendungsfälle, für die thermische Detektoren besser geeignet sind als Quantendetektoren. Sie stehen deshalb heute völlig gleichberechtigt neben diesen.

Umwandlung der Infrarotstrahlung in ein elektrisches Signal und Berechnung der Objekttemperatur

Das elektrische Signal am Detektor ist nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz:

$$U \sim \epsilon T_{obj}^4$$

Da die reflektierte Umgebungsstrahlung und die Eigenstrahlung des Infrarot-Thermometers mit berücksichtigt werden müssen, ändert sich die Formel zu:

$$U = C \cdot [\epsilon T_{obj}^4 + (1 - \epsilon) \cdot T_{amb}^4 - T_{Pyr}^4]$$

- U Detektorsignal
- T_{obj} Objekttemperatur
- T_{amb} Temperatur der Hintergrundstrahlung
- T_{pyr} Gerätetemperatur
- C gerätespezifische Konstante

$$\rho = 1 - \epsilon \quad \text{Reflexionsgrad des Objektes}$$

Da Infrarot-Thermometer meist nicht im gesamten Wellenlängenbereich arbeiten, ist der Exponent n abhängig von der Wellenlänge λ .

n liegt für Wellenlängen von 1 bis 14 μm im Bereich von 17 ... 2 (bei langen Wellenlängen zwischen 2 ... 3 und bei kurzen Wellenlängen zwischen 15 ... 17).

$$U = C \cdot [\epsilon T_{obj}^n + (1 - \epsilon) \cdot T_{amb}^n - T_{Pyr}^n]$$

Die Objekttemperatur berechnet sich damit zu:

$$T_{obj} = \sqrt[n]{\frac{U - C \cdot T_{amb}^n + C \cdot \epsilon T_{amb}^n + C \cdot T_{Pyr}^n}{C \epsilon}}$$

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind für alle vorkommenden Temperaturen als Kurvenschar im EEPROM des Infrarot-Thermometers gespeichert. Dadurch ist der schnelle Zugriff auf die Daten sowie eine schnelle Berechnung der Temperatur sichergestellt.

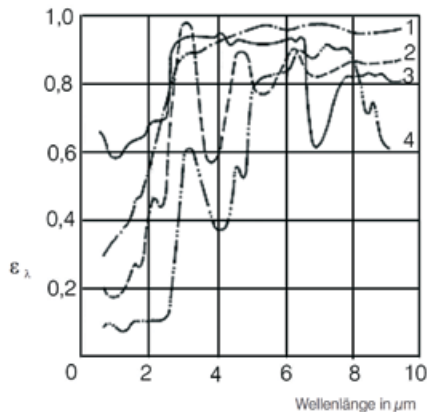
Der Emissionsgrad

Aus den Gleichungen ist ersichtlich, dass der Emissionsgrad ϵ eine zentrale Bedeutung hat, wenn man die Tem-

peratur durch eine Strahlungsmessung bestimmen will. Der Emissionsgrad ist ein Maß für das Verhältnis der thermischen Strahlungen, die ein grauer und ein schwarzer Strahler bei gleicher Temperatur abgeben. Er ist maximal 1 für den schwarzen Strahler. Als grauer Strahler wird ein Objekt bezeichnet, das bei allen Wellenlängen den gleichen Emissionsgrad besitzt und weniger Infrarotstrahlung emittiert als ein schwarzer Strahler ($\epsilon < 1$). Körper, deren Emissionsgrad zusätzlich temperatur- und wellenlängenabhängig sind, z. B. Metalle, werden nichtgraue oder auch selektive Strahler genannt.

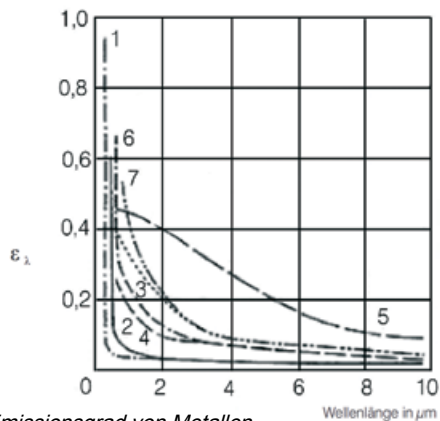
Emissionsgrad und Temperaturmessung

Der Emissionsgrad ist theoretisch vom Material, von dessen Oberflächenbeschaffenheit, von der Temperatur, von der Wellenlänge und unter Umständen auch vom verwendeten Messaufbau abhängig. Eine Vielzahl nicht-metallischer Stoffe weist aber zumindest im langwelligen Spektralbereich unabhängig von ihrer Oberflächenbeschaffenheit einen hohen und relativ konstanten Emissionsgrad auf.



Spektraler Emissionsgrad einiger Stoffe
1 Emaile, 2 Gips, 3 Beton, 4 Schamotte

Metalle haben in der Regel einen niedrigeren, stark von der Oberflächenbeschaffenheit abhängigen und zu größeren Wellenlängen hin abfallenden Emissionsgrad.

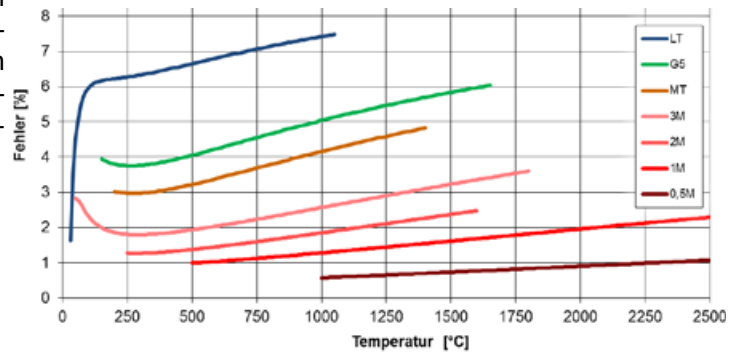


Spektraler Emissionsgrad von Metallen
1 Silber, 2 Gold, 3 Platin, 4 Rhodium, 5 Chrom, 6 Tantal, 7 Molybdän

Temperaturmessung an Metallen

Dies kann zu unterschiedlichen und unzuverlässigen Messergebnissen führen. Bei der Auswahl der geeigneten Temperaturmessgeräte ist darauf zu achten, dass die Infrarotstrahlung bei einer bestimmten Wellenlänge und in einem bestimmten Temperaturbereich gemessen wird, bei dem die Metalle einen möglichst hohen Emissionsgrad haben. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass es sinnvoll ist, die kürzeste für die Messung verfügbare

Wellenlänge zu nutzen, da sich bei vielen Metallen der Messfehler mit der Wellenlänge vergrößert.

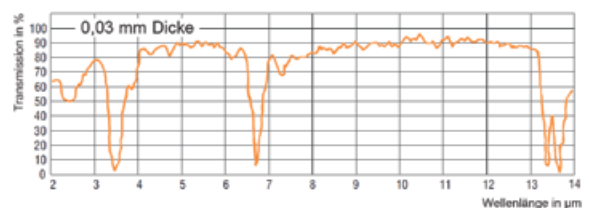


Messfehler bei 10 Prozent falsch eingestelltem Emissionsgrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge und Objekttemperatur (LT: 8-14 μm ; G5: 5 μm ; MT: 3,9 μm ; 3M: 2,3 μm ; 2M: 1,6 μm ; 1M: 1,0 μm ; 05M: 525 nm).

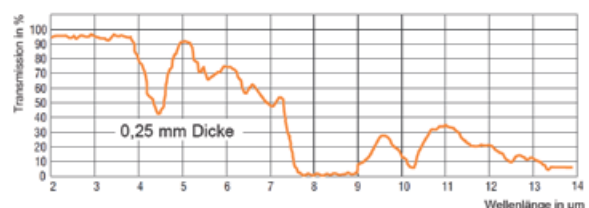
Bei Metallen liegt die optimale Wellenlänge für hohe Temperaturen mit etwa 0,8 bis 1,0 μm an der Grenze zum sichtbaren Bereich. Wellenlängen von 1,6 μm , 2,3 μm und 3,9 μm sind ebenfalls möglich.

Temperaturmessung an Kunststoffen

Die Transmissionsgrade von Kunststofffolien variieren mit der Wellenlänge. Sie verhalten sich umgekehrt proportional zur Dicke, wobei dünne Materialien durchlässiger sind als dicke Kunststoffe. Optimale Temperaturmessungen können bei Wellenlängen durchgeführt werden, bei denen der Transmissionsgrad unabhängig von der Dicke annähernd Null ist. Polyäthylen, Polypropylen, Nylon und Polystyrol sind z.B. bei 3,43 μm IR-undurchlässig, Polyester, Polyurethan, Teflon, FEP und Polyamid dagegen bei 7,9 μm . Bei dickeren (> 0,4 mm) und pigmentierten



Spektrale Durchlässigkeit von Kunststofffolien aus Polyäthylen

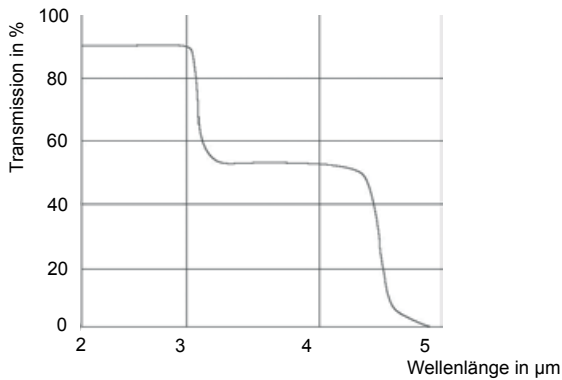


Spektrale Durchlässigkeit von Kunststofffolien aus Polyester

Folien kann eine Wellenlänge zwischen 8 und 14 μm zur Temperaturmessung ausgewählt werden. Der Infrarotgerätehersteller kann an Hand einer Probe des Kunststoffmaterials den für die Messung optimalen spektralen Bereich bestimmen. Der Reflexionsgrad liegt bei fast allen Kunststoffen zwischen 5 und 10 Prozent.

Temperaturmessung an Glas

Werden Temperaturmessungen an Glas mit Infrarot-Thermometern durchgeführt, sind sowohl die Reflexion als auch die Transmission zu berücksichtigen. Die sorgfältige Auswahl der Wellenlänge ermöglicht Messungen an der Oberfläche des Glases sowie in der Tiefe. 1,0 μm , 2,3 μm oder 3,9 μm Wellenlänge sind für Messungen unterhalb der Oberfläche geeignet, 5 μm sind für Messungen der Oberflächentemperaturen empfehlenswert. Bei niedrigen Temperaturen sollten 8 bis 14 μm genutzt und zur Kompensation der Reflexion der Emissionsgrad auf 0,85 eingestellt werden. Sinnvoll ist der Einsatz eines Messgerätes mit kurzer Ansprechzeit, da Glas als schlechter Wärmeleiter die Oberflächentemperatur schnell ändern kann.

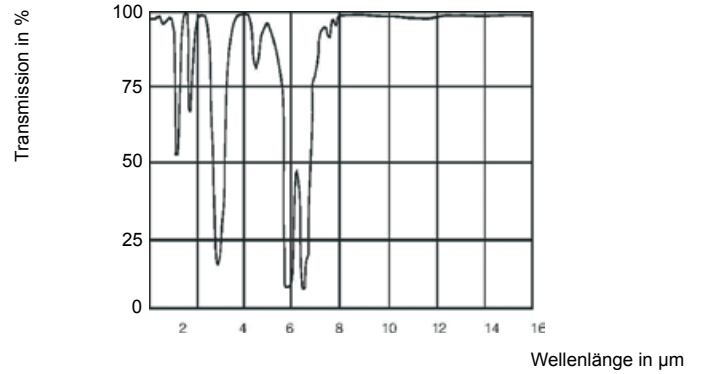


Spektraler Durchlässigkeit von Glas

Einflüsse durch die Umgebung

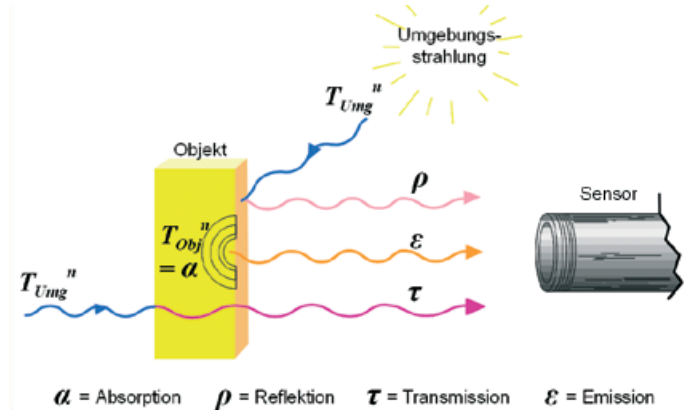
Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Durchlässigkeit (Transmission) der Luft sehr stark wellenlängenabhängig ist. Bereiche mit hoher Dämpfung wechseln sich mit Bereichen hoher Durchlässigkeit, den so genannten *atmosphärischen Fenstern* ab. Im langwelligen atmosphärischen Fenster (8...14 μm) ist die Durchlässigkeit gleichmäßig hoch, dagegen treten im kurzwelligen Bereich messbare Abschwächungen durch die Atmosphäre auf, welche zu verfälschten Messergebnissen führen können. Typische Messfenster dort sind 1,1...1,7 μm , 2...2,5 μm und 3...5 μm .

Eine weitere Einflussgröße sind mögliche Wärmestrahlungsquellen in der Umgebung des Messobjektes. Um Messwertverfälschungen aufgrund erhöhter Umgebungstemperaturen zu vermeiden (z.B. bei der Temperaturmessung von Metallen in Industrieöfen, deren Ofenwände heißer als das Messobjekt sind), erfolgt bereits im Infrarotmessgerät eine einstellbare Kompensation des Umge-



Spektraler Transmissionsgrad von Luft (1 m, 32°C, 75 % r. F.)

bungstemperatureinflusses. Genaueste Messergebnisse erreicht man mittels eines zweiten Temperaturmesskopfes zur automatischen Umgebungstemperaturkompensation und einem korrekt eingestellten Emissionsgrad. Staub, Rauch und Schwebstoffe in der Atmosphäre kön-



Umgebungsstrahlungskompensation

nen zur Verschmutzung der Optik und damit zu falschen Messergebnissen führen. Der Einsatz von Luftblasvorsätzen (vorschraubbare Rohrstopfen mit Druckluftanschluss) verhindert, dass sich Schwebstoffe vor der Optik ablagern. Luft- und Wasserkühlzubehör machen den Einsatz von Infrarot-Thermometern auch unter rauen Umgebungsbedingungen möglich.

Experimentelle Bestimmung von Emissionsgraden

Im Anhang sind die Emissionsdaten für verschiedene Materialien aus der Fachliteratur und aus Messwerten beigefügt. Will man den Emissionsgrad selbst bestimmen, gibt es verschiedene Verfahren.

Methode 1: Mit Hilfe eines Thermoelements:

Mit Hilfe eines berührenden Thermofühlers wird anschließend gleichzeitig mit der Strahlungsmessung die wahre Temperatur der Oberfläche an einem Punkt bestimmt. Danach wird der Emissionsgrad so eingestellt, dass die vom Infrarotmessgerät gemessene Temperatur mit dem Messwert des Thermoelements übereinstimmt. Für den berührenden Thermofühler ist auf guten Wärmekontakt und geringe Wärmeableitung zu achten.

Methode 2: Erzeugung eines schwarzen Strahlers mit Hilfe eines Probekörpers aus dem zu messenden Material: In gut wärmeleitenden Stoffen kann eine Bohrung angebracht werden, deren Verhältnis Durchmesser zu Bohrungstiefe $\leq \frac{1}{3}$ ist. So wirkt diese Bohrung annähernd wie ein schwarzer Strahler mit einem ϵ nahe eins. Wegen der optischen Eigenschaften des Geräts und wegen des Messabstands muss man darauf achten, dass das Messgerät beim Messvorgang nur den Boden der Bohrung anvisiert. Anschließend wird der Emissionsgrad bestimmt.

Methode 3: Mit Hilfe eines Referenzemissionsgrades: An dem zu messenden Objekt wird ein Band oder eine Farbe mit bekanntem Emissionsgrad aufgetragen. Dieser Emissionsgrad wird am Infrarotmessgerät eingestellt und der Temperaturwert des Bandes bzw. der Farbe gemessen. Anschließend erfolgt die Messung neben dieser Referenzstelle, wobei der Emissionsgrad solange nachgestellt werden muss, bis dieselbe Temperatur wie auf dem Band / der Farbe gemessen wird. Der Emissionsgrad kann anschließend abgelesen werden.

Kalibrierung von Infrarot-Thermometern ^{[1] [2]}

Infrarot-Thermometer werden mit Hilfe von Schwarzstrahlern kalibriert. Diese Strahlungsquellen können verschiedene Temperaturen mit hoher Stabilität erzeugen (siehe auch Abschnitt zum Schwarzstrahler).

Für den Kalibrierprozess ist es wichtig, den genauen Wert der Strahlungstemperatur zu kennen. Der Wert wird entweder mit einem Kontaktthermometer oder mit einem Transferstandard-Strahlungsthermometer gemessen und daraufhin zur Bestimmung der Kalibrierkonstanten für die Erstkalibrierung der Infrarotsensoren verwendet. Für eine Nachkalibrierung durch den Kunden oder ein lokales Kalibrierlabor sollten die Kalibriertemperaturen in der Nähe der Temperaturen liegen, die in der jeweiligen Applikation auftreten.

Optris verwendet das Transferstandard-Strahlungsthermometer LS-PTB (siehe Abbildung), das auf dem tragbaren IR-Thermometer optris LS basiert, zur Messung der Strahlungstemperatur der Referenzquellen. Da das LS-PTB auf die Internationale Temperaturskala von 1990 (ITS-90) rückgeführt sein muss, wird es in regelmäßigen Abständen durch die PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) kalibriert.



optris LS-PTB und Zertifikate des PTB

Die ITS-90 ist eine sehr gute Annäherung an die thermodynamische Temperatur. Sie basiert auf 17 gut reproduzierbaren Fixpunkten wie z.B. den Schmelzpunkten hochreiner Metalle. Im Rahmen der ITS-90 wird das LS-PTB innerhalb einer geschlossenen Kette von Vergleichsmessungen mit bekannter Messunsicherheit mit den nationalen Temperaturnormalen der PTB verglichen.

Auf Grundlage des LS-PTB fertigt Optris die Gerätevariante LS-DCI als hochpräzises Referenz-IR-Thermometer für den Kunden. Die DCI-Geräte werden mit vorselektierten Bauteilen gefertigt, welche eine hohe Stabilität der Messung gewährleisten. In Kombination mit einer speziellen Kalibrierung an einer Vielzahl von Kalibrierpunkten erzielt das LS-DCI zudem eine höhere Genauigkeit als die Seriengeräte.

Die Optik von IR-Thermometern wird in der Regel durch das Verhältnis von Entfernung zu Messfeld beschrieben (E:M oder D:S). Je nach Güte der Optik empfängt das IR-Thermometer jedoch auch Strahlungsanteile von außerhalb des spezifizierten Messfeldes. Der Maximalwert entspricht dabei der Strahlung, die von einer hemisphärischen Strahlungsquelle (Halbraum) abgegeben wird. Die entsprechende Signaländerung im Zusammenhang mit der Größenänderung der Strahlungsquelle wird durch den Umfeldfaktor (SSE: Size-of-Source Effect) beschrieben.



Automatisierte Kalibrierstation bei der Optris GmbH

Resultierend aus diesen Zusammenhängen verwenden alle Hersteller von IR-Thermometern zur Kalibrierung fest definierte Geometrien, d.h. in Abhängigkeit vom Öffnungsdurchmesser der Strahlungsquelle wird ein Abstand zum Referenzstrahler festgelegt. Aus den technischen Dokumentationen ist ersichtlich, dass für die Messfeldgröße der Geräte ein definierter prozentualer Wert des zuvor genannten Maximums angegeben wird – üblich sind hier 90% bzw. 95%.

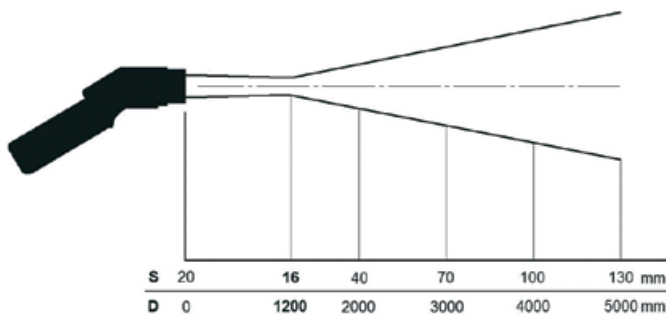
Die Optris GmbH verfügt über moderne firmeneigene Labore. Bei der Erstellung von Kalibrierzertifikaten wird neben der Raumtemperatur und Luftfeuchte des Kalibrierlabors auch der Messabstand und die Strahleröffnung (Kalibriergeometrie) protokolliert.

Konstruktiver Aufbau von Infrarotthermometern

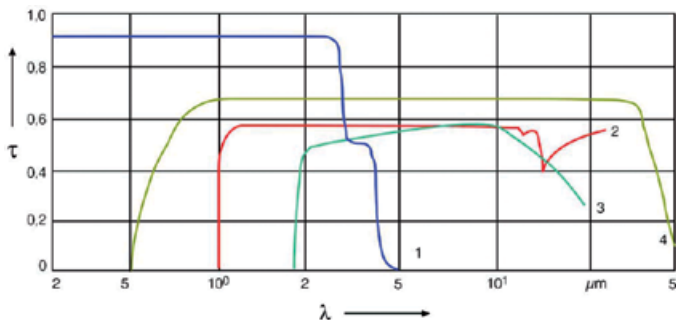
Infrarot-Thermometer werden in einer Vielzahl von Konfigurationen hergestellt, die sich in Optik, Elektronik, Technologie, Größe und Gehäuse unterscheiden. Allen gemein ist jedoch die Signalverarbeitungskette, an deren Anfang ein Infrarotstrahlungssignal und an deren Ende ein elektronisches Temperatursignal steht.

Optik und Fenster

Am Anfang der Messkette befindet sich ein optisches System, welches meist aus einer Linsenoptik besteht. Diese empfängt die von einem Messfleck abgestrahlte infrarote Energie und fokussiert sie auf einen Detektor. Wichtig bei den Messungen ist, dass das Messobjekt größer oder gleich dem Sichtfeld des Sensors ist, da anderenfalls der Messwert verfälscht wird. Das Distanzverhältnis beschreibt, wie groß der Messfleck bei einer gegebenen Entfernung ist. Es ist definiert als E:M - das Verhältnis des Messabstandes (Entfernung Messgerät zum Messobjekt) zum Messfleckdurchmesser. Die optische Auflösung wird mit größeren Werten besser.



Optisches Diagramm eines Infrarotsensors



Transmission typischer Infrarotmaterialien (1 mm dick)
1 Glas, 2 Germanium, 3 Silizium, 4 KRS₅

Infrarotoptiken lassen sich entsprechend ihres Materials nur für bestimmte Wellenlängenbereiche einsetzen. In der folgenden Abbildung sind typische Linsen und Fenstermaterialien für Infrarotthermometer mit ihren Wellenlängenbereichen dargestellt.

Für einige Messungen, wie z. B. in geschlossenen Reaktionsbehältern, Öfen oder Vakuumkammern ist es in der Regel notwendig, durch ein geeignetes Messfenster hindurch zu messen. Die Transmissionswerte des Fensters sollten bei der Auswahl eines Fenstermaterials auf die spektrale Empfindlichkeit des Sensors abgestimmt werden. Quarzglas ist für den Einsatz bei hohen Mess Temperaturen geeignet, bei niedrigen Temperaturen im 8 bis 14 μm Bereich sind spezielle infrarotdurchlässige Materialien wie Germanium, AMTIR oder Zinksele- nid zu verwenden. Bei der Auswahl des Fensters sind die folgenden Parameter ebenfalls zu berücksichtigen: Durchmesser des Fensters, Temperaturanforderungen, maximale Druckdifferenz. Für ein Fenster mit 25 mm Durchmesser, welches einer Druckdifferenz von einer Atmosphäre standhalten soll, ist z. B. eine Dicke von 1,7 mm ausreichend. Zum Ausrichten des Sensors auf das Messobjekt (z. B. im Vakuumbehälter) kann es sinnvoll sein, Fenstermaterialien einzusetzen, die auch im sichtbaren Bereich transparent sind.

Die Tabelle zeigt verschiedene Fenstermaterialien im Überblick.

Fenstermaterial/ Eigenschaften	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaF ₂	BaF ₂	AMTIR	ZnS	ZnSe	KRS ₅
Empfohlener Infrarotwellen- längenbereich in μm	1 ... 4	1 ... 2,5	2 ... 8	2 ... 8	3 ... 14	2 ... 14	2 ... 14	1 ... 14
Max. Fenster- temperatur	1800	900	600	500	300	250	250	k. A.
Transmission im sichtbaren Bereich	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja
Beständigkeit gegen Feuchte, Säuren, Ammoniakver- bindungen	sehr gut	sehr gut	wenig	wenig	gut	gut	gut	gut
Geeignet für UHV	ja	ja	ja	ja	k. A.	ja	ja	ja

Fenster mit Antireflexionsschichten besitzen eine wesentlich höhere Transmission (bis zu 95 Prozent). Der Transmissionsverlust kann zusammen mit der Transmissionseinstellung am Fenster korrigiert werden, sofern vom Hersteller die Transmission für den entsprechenden Wellenlängenbereich angegeben wurde. Ansonsten ist sie experimentell mit dem verwendeten Infrarot-Thermo- meter und einem Vergleichsstrahler bestimmbar.

Neueste Trends bei Visiertechniken

Neue Messprinzipien und Visiertechniken ermöglichen einen immer präziseren Einsatz von Infrarot-Temperaturmessgeräten. Entwicklungen aus dem Bereich der Festkörperlaser werden adaptiert, indem Messfleckgrößen mit Hilfe von Mehrfachlaseranordnungen markiert werden. Dabei werden die wahren Messfleckgrößen im Objektfeld z. B. mittels Kreuzlaservisertechniken angezeigt. Bei anderen Geräten ersetzen Videokamerachips aufwendige optische Visiersysteme.

Entwicklung von Hochleistungsoptiken in Kombination mit Kreuzlaservisertechniken

Einfache, kostengünstige Hand-Infrarotthermometer verwenden Ein-Punkt-Laserpointer, um mit einem gewissen Parallaxenfehler die Mitte des Messflecks zu kennzeichnen. Dabei bleibt es dem Anwender überlassen, anhand des Messfleck-Diagrammes und der geschätzten Entfernung die Messfleckgröße zu schätzen.

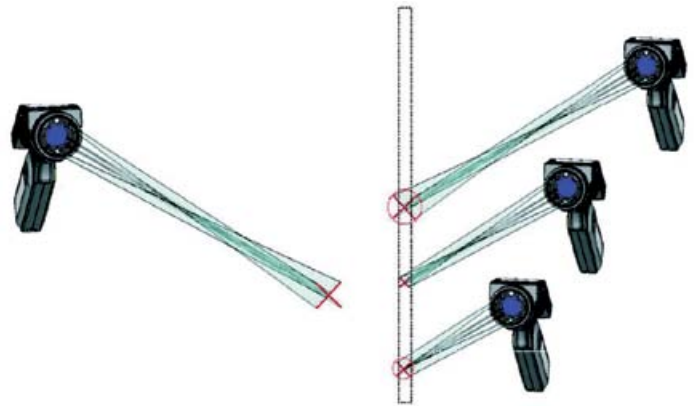
Nimmt das Messobjekt nur einen Teil des Messflecks ein, werden Temperaturerhöhungen nur als Mittelwert zwischen dem heißen Flächenanteil und dem, diese Fläche umgebenden, kalten Anteil dargestellt. Hat beispielsweise eine elektrische Verbindung aufgrund eines korrodierten Kontaktes einen höheren Ohmschen Widerstand und erwärmt sich somit in unzulässiger Weise, wird dies bei kleinen Objekten und zu großen Messflecken nur als geringfügige Erwärmung dargestellt, so dass potentiell gefährliche Situationen nicht erkannt werden.

Um Messflecken in ihrer Größe richtig anzuzeigen, wurden optische Visiere eingeführt, die in ihrem Fadenkreuz eine Größenkennzeichnung haben und so ein exaktes Visieren erlauben. Aufgrund der wesentlich bequemeren und sichereren Handhabbarkeit von Laserpyrometern hat man versucht, mit Hilfe von Laserbeleuchtungstechniken die Messfleckgröße unabhängig von der Entfernung entsprechend den im Messfleck-Diagramm dargestellten Verhältnissen anzuzeigen.

Zwei windschiefe, von der Optik ausgehende Laserstrahlen beschreiben näherungsweise die Verengung des Messstrahls bzw. dessen Aufweitung in größeren Entfernungen. Allerdings erfolgt die Durchmesser-Angabe des Messflecks dann nur mit zwei Punkten an dessen Umfang. Designbedingt ändert sich die Winkelposition dieser Laserpunkte auf dem Messkreis, was ein Visieren oftmals erschwert.

Das Fadenkreuz-Prinzip

Durch Nutzung neuer Laserbeleuchtungs-Technologien ist es gelungen, Messflecken von Infrarot-Thermometern als großrichtiges Fadenkreuz, dessen Dimensionen exakt dem Messfleck entsprechen, darzustellen.



Infrarot-Thermometer mit Kreuzlaservisier zur exakten Messfeldmarkierung

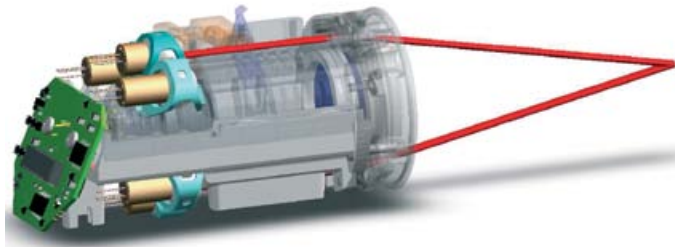
Dabei werden vier symmetrisch um den infrarotoptischen Messkanal angeordnete Laserdioden mit Liniengeneratoren versehen, die in dem durch die Optik bestimmten Scharfunkt-Abstand eine Linie definierter Länge erzeugen. Paarweise gegenüberstehende Liniengeneratoren überlagern im Scharfunkt die von ihnen projizierten Laserlinien vollständig, so dass ein Mess- bzw. Fadenkreuz entsteht, welches exakt den Messfleck-Durchmesser beschreibt. Bei kürzeren bzw. längeren Messentfernungen erfolgt diese Überlagerung nur noch teilweise, so dass sich für den Nutzer die Linienlänge und damit die Größe des Messkreuzes verändert. Mit Hilfe dieser Technologie ist es somit erstmals möglich, die präzisen Abmessungen des Messflecks übersichtlich zu erfassen. Damit verbessert sich die praktische Anwendbarkeit von Geräten mit gutem optischen Leistungsvermögen erheblich.

Die Scharfunkt-Umschaltung

Neben den im elektrischen Instandhaltungsbereich und in der industriellen Qualitätsprozesskontrolle optimalen Messentfernungen von ca. 0,75 bis 2,5 Metern besteht oftmals der Wunsch, wesentlich kleinere Objekte in kürzerer Entfernung zu erfassen. Deshalb wurden Messgeräte entwickelt, die eine Fokussierung in gewissen Grenzen erlauben. Allerdings blieb es stets eine technische Herausforderung, dabei Messflecken unter einem Millimeter zu generieren.

Neue Produkte nutzen nun eine Technologie, bei der eine zweilinsige Optik durch digitales Verstellen der inneren Linsenposition - ähnlich einem Makro-Bild bei digitalen Fotoapparaten - auf sehr kleine Messflecken umgeschaltet werden kann. Dabei ergibt sich ein kleiner Messfleck, allerdings nur in einer konstanten Entfernung. Geht man näher an das Messobjekt heran bzw. entfernt man sich weiter davon, wird der Messfleck schnell größer. Mit Hilfe zweier sich kreuzender Laserstrahlen, die in der kleinsten Messfleckposition genau einen Laserpunktdurchmesser von 1 Millimeter aufweisen, gelingt es, sowohl optimale

Entfernung als auch Messfleckgröße darzustellen. Die untere Abbildung zeigt das optische System eines modernen Infrarot-Thermometers, bei dem die Linienposition verstellbar ist und gleichzeitig verschiedene Laserbeleuchtungssysteme für eine geradenrichtige Anzeige des Messflecks sorgen.

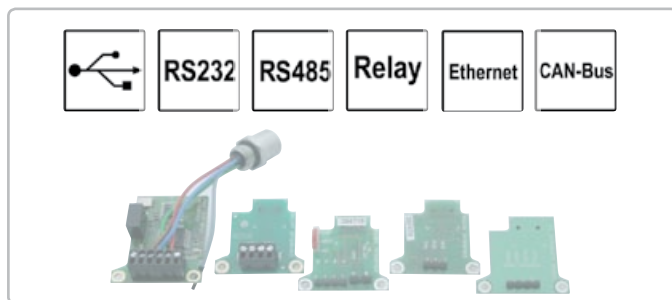


Innovatives Doppel-Laservisier

Die Elektronik

Anzeigen, Ausgänge und Schnittstellen

Die Elektronik des Infrarot-Thermometers linearisiert das Ausgangssignal des Detektors, um letztendlich ein lineares Stromsignal 0/4 - 20 mA oder Spannungssignal 0 - 10 V zu erzeugen. Dieses Signal wird bei den Infrarot-Handgeräten als Temperaturwert direkt auf dem LCD-Display angezeigt. Zusätzlich bieten einige Handgeräte ebenso wie die stationären Sensoren verschiedene Ausgänge und Schnittstellen zur Weiterverarbeitung an.



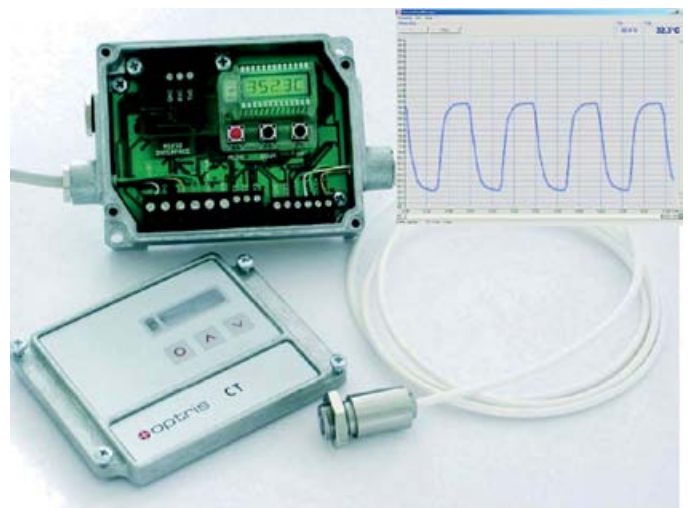
Ausgänge und Schnittstellen (analog und digital), als Beispielbild: steckbare, digitale Schnittstellenmodule der Elektronikbox

Beispiele für Ausgänge und Schnittstellen von Infrarotthermometern

Industrielle Feldbussysteme spielen eine immer größere Rolle. Sie erlauben dem Anwender mehr Flexibilität und geringeren Verkabelungsaufwand. Bei einem Produktwechsel in der Fertigungslinie können die veränderten Sensorparameter (z. B. Emissionsgrad, Messbereich oder Grenzwerte) ferneingestellt werden.

Damit wird eine kontinuierliche Prozessüberwachung und -steuerung bei minimalem Arbeitskräfteeinsatz auch an schwer zugänglichen Stellen gewährleistet. Tritt eine Störung ein, z. B. Kabelunterbrechungen, Ausfall von Komponenten, erscheint automatisch eine Fehlermeldung.

Ein weiterer Vorteil der Infrarot-Thermometer mit digitaler Schnittstelle ist die Möglichkeit der Feldkalibrierung mit Hilfe verfügbarer Kalibriersoftware des Geräteherstellers.



Die Datenausgänge von Infrarot-Thermometern können direkt an PC, Laptop oder Messwertschreiber angeschlossen werden. Mit PC-Software lassen sich kundenspezifische Grafiken und Tabellen erstellen.

Infrarot-Thermometer und Anwendungen

Anwendungen von Infrarotthermometern

Die berührungslose Temperaturmessung mit Infrarot-Thermometern ist eine sehr leistungsfähige Methode zur Beobachtung, Bewertung und Steuerung von Prozess-temperaturen und bei der vorbeugenden Instandhaltung von Maschinen und Anlagen. In Abhängigkeit von der Anwendung werden portable Infrarot-Thermometer oder stationäre Infrarotsensoren, die wiederum in Punkt- und Bildmessgeräte unterteilt werden, für den Einsatz ausgewählt.

Portable Infrarot-Thermometer

Prinzipiell werden die portablen Infrarot-Thermometer zur vorbeugenden Instandhaltung und Inspektion an elektrischen Anlagen, rotierenden Maschinen sowie als Diagnosewerkzeug in der Heizungs-, Klima und Lüftungstechnik und zur schnellen Fehleranalyse im KFZ-Bereich - wie nachfolgend beschrieben - eingesetzt.

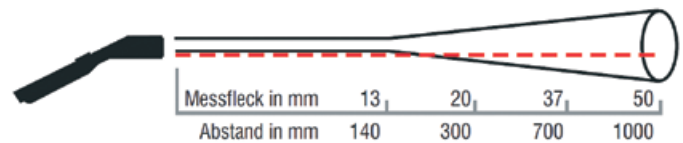
Ob für den Innen- oder Außenbereich, bei Sonne oder Regen oder schwankenden Temperaturen, die Geräte sind für den Einsatz unter harten Industriebedingungen konstruiert, z. B. das optris MS LT ist robust und im handlichen Fernbedienungsdesign extrem leicht. Ganz gleich ob es in der Jackentasche getragen, am Gürtel befestigt oder in den Werkzeugkasten gelegt wird, es sollte jederzeit bei der schnellen Inspektion zur Hand sein.



Portable Optris Infrarot-Thermometer

Temperaturen von -32 bis 530°C werden bei einer Messzeit von nur 0,3 Sekunden mit einer Genauigkeit von ± 1 Prozent bzw. $\pm 1^{\circ}\text{C}$ erfasst. Mit dem eingebauten Laser wird das zu messende Objekt anvisiert, mit nur einem Tastendruck erscheint der Temperaturwert mit $0,1^{\circ}\text{C}$ Temperaturauflösung auf dem Display. Ein Alarmsignal signalisiert die Über- oder Unterschreitung eines festgelegten Grenzwertes (MAX/MIN-Funktion), so dass

ein systematisches Abtasten des Messobjektes möglich ist und die Fehlerquelle schnell lokalisiert werden kann. Die neue Präzisionsglasoptik erlaubt die Messung sehr kleiner Objekte. Ist es möglich, sich dem zu messenden Objekt bis auf 14 cm zu nähern, ist der Messfleck nur 13 mm groß. Darüber hinaus vergrößert sich der Messfleck. In einem Meter Entfernung (E) wird die Temperatur auf einer Messfläche (M) von 50 mm Durchmesser erfasst, d.h. die optische Auflösung E:M ist 20:1.



Verhältnis von Entfernung zu Messfleckgröße 20:1

1. Typische Anwendungen bei der Wartung und Instandhaltung

Mit bloßem Auge sind Defekte an Schaltanlagen, Sicherungen, Motoren oder elektrischen Verbindungen kaum zu erkennen. Wir wissen jedoch, dass nahezu jedes Betriebsmittel, welches Strom verbraucht oder mechanische Leistung überträgt, vor Auftreten einer Störung heiß wird. Die berührungsfreie Temperaturüberwachung ist daher ein wichtiges Instrument bei der vorbeugenden Instandhaltung, um die Zuverlässigkeit von Anlagen zu gewährleisten. Die optris LS LT Handthermometer sind wegen des kleinen Messfleckdurchmessers von 1 mm und der Laserkreuzvisiertechnik ideale Werkzeuge für die schnelle, alltägliche Temperaturmessung an einer Vielzahl von Messobjekten im Unternehmen.



Detaillierte Infrarottemperaturmessung an einer elektrischen Steuerung mit Hilfe der eingebauten Scharfpunktoptik des optris LS LT im 1 Millimeterbereich

- Temperaturmessungen an schwer zugänglichen oder rotierenden Maschinen und Anlagen bzw. an elektrischen Anschlüssen von Elektromotoren
- Auffinden loser Klemmstellen, Klemmverbindungen
- Lokalisieren versteckter Defekte in Kabelkanälen
- Kontrolle von Sicherungen und Trennschaltern
- Überprüfung von Nieder- und Mittelspannungsanlagen
- Aufspüren einseitiger Überlastungen und Unsymmetrien in der Energieverteilung
- Messen von Transformatoren oder kleinen Bauteilen

Temperaturmessung an Kontakten

Bei der Übertragung großer elektrischer Leistungen sind bei Sammelschienenkontakten häufig nichtsymmetrische Lastverteilungen und Überhitzungen zu beobachten. Dadurch können sie zum Sicherheitsproblem werden. Lockere Kontakte, hervorgerufen durch mechanische Materialbewegungen aufgrund von zyklischen Erwärmungen und Abkühlungen, setzen dem Strom einen höheren Widerstand entgegen. Es wird mehr Leistung verbraucht und Wärme erzeugt. Ebenso können Schmutz und Korrosion höhere Übergangswiderstände hervorrufen. Aus den Temperaturdifferenzen gegenüber gleich belasteten Kontakten sowie der Umgebungstemperatur lassen sich Rückschlüsse auf den Betriebszustand ziehen. 10 K Differenz deuten eine schlechte Verbindung an, bei 30 K wird es kritisch.

Überprüfung von Transformatoren

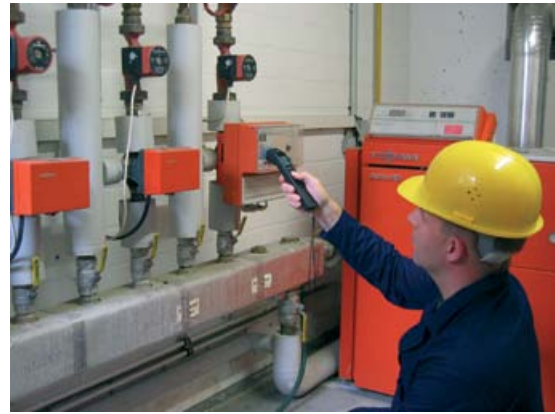
Für Transformatoren wird eine maximal zulässige Betriebstemperatur angegeben. Treten unzulässige Erwärmungen beim Messen der Wicklungen am Lufttransformator auf, liegt eine Störung vor. Fehlerursache kann die Wicklung selbst oder auch die unterschiedliche Belastung der Phasen sein.

Lokalisieren von defekten Kabeln

„Unsichtbare“ Defekte in Kabeln können durch schnelles Abscannen mit Infrarot-Thermometern lokalisiert werden. Überhöhte Temperaturen signalisieren, dass mehr Strom fließt. Die Kabel können an diesen Wärmepunkten auf Brüche, Korrosion oder Alterung überprüft werden.

2. Typische Anwendungen in der Heizungs-, Klima- und Lüftungstechnik

Zugige Räume oder schlechtes Klima werden häufig von defekten oder unregelmäßig arbeitenden Heizungs-, Klima- und Lüftungsanlagen verursacht. Der Klimatechniker wird gerufen, um die Fehlerquellen in kürzester Zeit zu lokalisieren und außerplanmäßige Abschaltungen zu vermeiden. In Abhängigkeit von der Prüfmethode war diese Aufgabe sehr zeitaufwendig und arbeitsintensiv. Zum Auf-



Überprüfen der Temperatur an Heizkreisen

spüren von Lecks in den Kanälen oder von verstopften Filtern bzw. vereisten Kühlschlangen mussten oft Luftkanäle angebohrt werden. Die eingeführten Thermometer benötigten einige Zeit zur Stabilisierung, ehe sie die korrekte Lufttemperatur im Kanal gemessen haben. Der Einsatz von Infrarot-Thermometern erleichtert die Arbeit und spart wertvolle Arbeitszeit. Aus sicherer Entfernung können bequem und in Sekundenschnelle präzise Oberflächentemperaturen der Komponenten gemessen werden. Die Leiter kann getrost in der Werkstatt bleiben.

Einfache Handhabung, zuverlässige Messergebnisse und vor allen Dingen robustes Design - das sind die Anforderungen, die Heizungs- und Klimatechniker an neue Messgeräte stellen.

Das optris LS LT dient zum:

- Aufspüren defekter Isolierungen
- Finden von Leckagen bei Fußbodenheizungen
- Prüfen der Brenner von Ölheizungen oder Gasheizkesseln
- Messungen an Wärmetauschern, Heizkreisen sowie Heizkreisverteilern
- Lokalisieren von Lecks in Kanälen
- Überprüfen der Luftauslässe und Sicherheitsventile
- Einstellen von Thermostaten oder des Raumklimas

Kontrolle der Luftkanäle

Die Verbindungsstellen der Luftkanäle sind häufige Fehlerquellen. Zum einen übertragen sich Vibrationen auf die Verbindungsstellen, zum anderen kann es aufgrund des ständigen Ausdehnens und Zusammenziehens der Kanäle beim Durchströmen von Kalt- und Warmluft zum Lösen der Verbindungsstellen kommen. Auftretende Risse können zur Überlastung des Klimaaggregates führen und deren Lebensdauer verkürzen. Beim regelmäßigen Absuchen der Kanäle mit Infrarot-Thermometern weisen Temperaturschwankungen (Temperaturanstieg oder -abfall) auf Lecks, Risse oder schadhafte Isolierungen hin.

Überprüfung der Zuluft- und Abluftauslässe

Durch Messung der Temperaturdifferenzen zwischen Zu- und Abluft lassen sich Rückschlüsse auf Störstellen ziehen. Beim Kühlen sind Differenzen von 10 bis 12 K normal. Werte oberhalb von 12 K könnten auf zu geringen Luftstrom und damit verbundenem kaltem Kühlmittel hinweisen. Niedrigere Werte weisen darauf hin, dass das Kühlmittel in den Kühlschlangen blockiert wird. Bei Heizungsanlagen sind Differenzen zwischen 15 und 40 K typisch. Größere Schwankungsbreiten werden möglicherweise von verschmutzten Filtern oder Störungen im Wärmetauscher verursacht.

Überprüfung von Brennern

Bei Ölheizungen und Gasheizkesseln ist es möglich, mittels Infrarot-Temperaturmessung die Brenner zu überprüfen. Aus den gemessenen Werten lassen sich Aussagen zu vorhandenen Fehlerquellen machen. Überhöhte Temperaturen können auf verstopfte Wärmetauscher sowie verschmutzte Oberflächen auf der Beflammungsseite hinweisen.

3. Typische Anwendungen bei der KFZ-Diagnose

Ob bei der Fahrzeuginspektion oder auf der Rennstrecke, entscheidend ist, dass mit möglichst geringem Zeitaufwand Fehlerquellen schnell lokalisiert und beseitigt werden. Damit Schluss ist mit dem testweisen Austausch teurer Teile, werden hier einige Beispiele für die Möglichkeiten der berührungslosen Temperaturmessung vorgestellt: Diagnose

- von Motorstörungen,
- von Überhitzungen am Katalysator,
- am Einspritzsystem,
- an der Klimaanlage,
- am Kühlsystem oder
- am Bremssystem. Funktionsprüfung der Bremsen und Reifen

Um die Ursache eines ungleichmäßigen Bremsverhaltens festzustellen, fährt man mit dem Auto eine gerade Strecke und bremst ab. Anschließend wird sofort die Temperatur der Bremsscheibe bzw. Bremstrommel gemessen. Treten große Temperaturdifferenzen auf, sitzen die Bremssättel oder die Bremssattelkolben fest oder gehen schwer.

Überprüfung der Heizung

Bei warmgelaufenem Motor wird am oberen Kühlmittelschlauch die Kühlmitteltemperatur gemessen. Ist die Temperatur deutlich geringer als 95°C schließt der Thermostat vermutlich nicht. Anschließend sind die Eingangs- und Ausgangstemperaturen der Schläuche an der Spritzwand zu messen. Eine um 20 K erhöhte Temperatur am

Zulauf ist normal. Sollte der Auslassschlauch jedoch kalt sein, fließt kein Kühlmittel durch die Heizung. Der Heizungswärmetauscher ist entweder verstopft oder der Heizungsregelschieber geschlossen.

Diagnose des Kühlsystems

Der Motor wird zu heiß, doch ein Leck im Kühlsystem ist nicht zu finden. Ursache könnte ein verstopfter Kühlerblock, ein defekter Kühlergebläsesensor, ein Thermostat oder ein verschlissenes Laufrad in der Kühlmittelpumpe sein.

Mit dem Infrarot-Thermometer wurden bereits der Kühler, der Kühlmitteltemperaturfühler und der Katalysator als Fehlerquelle ausgeschlossen. Der Thermostat wird wie folgt überprüft. Der Motor muss im schnellen Leerlauf warmlaufen. Anschließend wird die Temperatur des oberen Kühlmittelschlauchs sowie des Thermostatgehäuses gemessen.



Checking the heating system

Sobald der Motor eine Betriebstemperatur von 80 bis 105°C erreicht hat, öffnet der Thermostat und ein Temperaturanstieg im oberen Kühlmittelschlauch müsste angezeigt werden. Bleiben die Werte konstant, fließt kein Kühlmittel und der Thermostat wird als Fehlerquelle lokalisiert.

Die Vorteile von Infrarot-Handthermometern auf einen Blick:

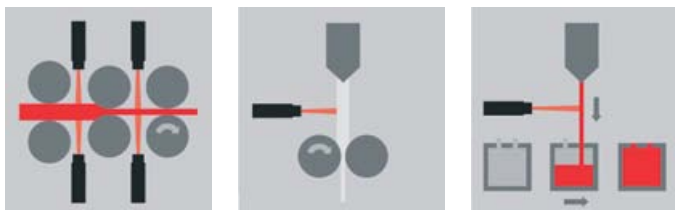
- Einfach zu bedienen
- Arbeiten berührungsfrei und liefern sekundenschnell präzise Messergebnisse
- Führen Inspektionen ohne Gefährdung an heißen oder schwer zugänglichen oder unter Last arbeitenden Komponenten durch
- Lokalisieren Fehlerquellen ohne Austausch von Bauteilen
- Spüren Schwachstellen auf bevor diese zum Problem werden
- Sparen Ihnen wertvolle Zeit und Geld

Stationäre Infrarot-Thermometer

Im Gegensatz zu den Handthermometern werden stationäre Infrarot-Temperatur Sensoren häufig zur Qualitätssicherung in Fertigungslinien eingesetzt. Neben der berührungslosen Temperaturmessung und Anzeige der Messdaten kann zusätzlich die Steuerung der Prozesstemperaturen erfolgen.

Die breite Palette der Möglichkeiten zur Anpassung von Infrarot-Temperatur Sensoren an das Messproblem erlaubt sowohl das unkomplizierte Nachrüsten an vorhandenen Produktionsanlagen als auch die langfristig konzipierte Ausstattung von Neuanlagen in enger Zusammenarbeit mit OEM-Kunden im Maschinenbau. Vielfältige Anwendungen sind zu finden:

- in der Kunststoffindustrie,
- bei der Glasherstellung,
- in der papierverarbeitenden Industrie,
- in Druckereien,
- bei Laserschweiß- und -schneidprozessen sowie
- bei Messungen an elektronischen Bauteilen



1. Temperaturmessung beim Induktionshärten

Heutzutage hat die Wärmebehandlung in der Metallverarbeitung eine wichtige Rolle eingenommen. Durch die gezielte Wärmebehandlung von Metallen lassen sich Eigenschaften wie Korrosionsbeständigkeit, Magnetismus, Härte, Duktilität, Abriebfestigkeit und Bruchverhalten beeinflussen.

Eine Variante der Wärmebehandlung ist das Induktionshärten. Hierbei wird ein Bauteil in ein starkes Wechselfeld gebracht, dadurch erwärmt und im gewünschten Gefüge eingefroren. Durch Steuerung der Frequenz ist es möglich, die Eindringtiefe der Wärme in das Material lokal einzustellen und so bestimmte Bereiche des Bauteils zu behandeln. Die angestrebte Gefügestruktur des Metalls ist abhängig von einem optimalen Temperatur-Zeit-Verlauf. Daher ist es notwendig, die Temperatur permanent zu überwachen.

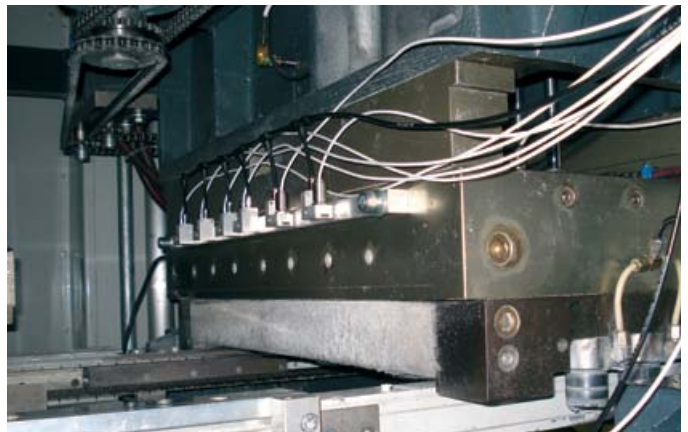


optris CTlaser 1M/2M/3M-Geräte eignen sich für den Einsatz beim Induktionshärten

Aufgrund der starken elektromagnetischen Belastungen eignet sich im Besonderen das optris CTlaser 1M, 2M oder 3M, da die Elektronik vom Optikkopf abgesetzt und somit gegenüber der Strahlung geschützt ist.

2. Prozesssteuerung beim Thermoformen

Kunststoffverarbeiter produzieren ein großes Spektrum von Kunststoffprodukten verschiedener Abmessungen, Dicken, Texturen, Farben und Prägemustern.



Small optris CT LT sensing heads installed in a machinery with laminar air purge collar.

Dabei unterliegt die Herstellung von Produkten zahlreichen thermischen Prozessen. Sind die kritischen Stellen im Prozess bekannt, werden Infrarot-Thermometer zur Temperaturmessung und -regelung eingesetzt.

Ein wichtiges Einsatzfeld ist der Einbau in Thermoformmaschinen. Beim Thermoformen wird das Ausgangsmaterial mit Strahlern erwärmt und thermisch homogenisiert. Eine hohe Homogenität über die Fläche und eine korrekte Einstellung der Umformtemperatur führen zu qualitativ hochwertigen Umformergebnissen.

Für die Kontrolle des Temperaturprofils werden zum Beispiel die Infrarot-Thermometer optris CT LT in einer Linie am Ausgang der Heizzone installiert und so mögliche Temperaturgradienten visualisiert.

3. Kontrolle der Temperatur von Papierbahn und Leimauftrag bei der Herstellung von Verbundkartonagen

Die hohen Produktionsgeschwindigkeiten der laufenden Papierbahn in modernen Papierlaminiermaschinen verlangen eine genaue und schnelle Kontrolle der Temperatur des Papiers, des Klebmittels und



Infrarottemperaturmessung bei der Papier- und Kartonherstellung

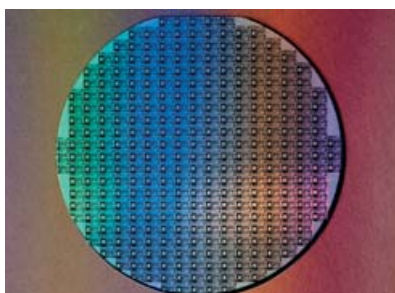
des zu kaschierenden Grundproduktes. Nur beim exakten Einhalten der durch die Technologie bestimmten Temperaturverhältnisse zwischen den Produktkomponenten wird eine exakte und verzugsfreie Laminierung erreicht.

Die Temperaturüberwachung und Steuerung der Walzentemperatur mit miniaturisierten Infrarot-Temperatur Sensoren von Optris an definierten Messstellen quer zum Bahnverlauf an der Andruckwalze und an der Leimaufragswalze ermöglichen eine hohe Gleichförmigkeit der Laminierung. Freiblas- und Reinigungsvorrichtungen am optischen Kanal der Infrarotsensoren erlauben einen wartungsfreien Messbetrieb. Eine intelligente Signalauswertung der Infrarotsensoren am Rand des Bahnverlaufs ermöglicht zudem ein geometrisches Nachsteuern der Leimaufragsvorrichtung.

4. Temperaturmessung an elektronischen Bauelementen beim Funktionstest

Immer mehr Hersteller von elektronischen Bauelementen und Leiterplatten setzen wegen der stetig höher werdenden Leistungsfähigkeit ihrer Bauelemente auf die berührungslose Temperaturmessung zur Erfassung und Beherrschung des thermischen Verhaltens ihrer Produkte.

Mit Hilfe von Infrarotwärmebildkameras ist eine detaillierte Echtzeit-Analyse des thermischen Verhaltens von bestückten Leiterplatten sowohl im F&E-Bereich als auch in der Serienproduktion möglich. Unter Umständen ist wegen der hohen Produktionsstückzahlen und der Zahl der Prüf- und Testplätze ein Einsatz von Infrarotwärmebildkameras an mehreren Stationen zu teuer oder der Aufwand für Umsetzungen zu hoch. Dann bietet sich zur Serienüberwachung von kritischen Bauelementen in Produktionsanlagen die Temperaturüberwachung mit miniaturisierten Infrarot-Temperatur Sensoren optris CT LT an.



Infrarottemperaturmessung an Wafern und elektronischen Bauelementen

Dabei werden kritische Bauelemente, die bei einer Serienfertigung auch vom Messort (Position auf der Leiterplatte) her immer wieder reproduzierbar platziert werden können, mittels Infrarot-Temperatur Sensor erfasst und die Temperaturmessung der Prüfplatzroutine zur Entscheidungsfindung zugeführt. Hierbei können mittels einer zum optris CT LT zugehörigen Vorsatzoptik kleinste Messflecken von bis zu 0,6 mm erfasst werden.



Infrarottemperaturmessung beim Laserschweißen

5. Überwachung der Produkttemperatur bei Laserschweiß- und -schneidprozessen

Die Füge- und Trennverfahren mittels Laser stellen eine hochmoderne, kosteneffektive und zeitsparende Technologie dar. Bei diesen Verfahren werden die Präzision des Laserstrahls und seine hohe Energiedichte vorteilbringend ausgenutzt. Gleichzeitig stellen die höhere geforderte Genauigkeit des Schnittes / der Fügung und kürzere Verweilzeiten bei gleichzeitig höherer Temperatur extreme Anforderungen an die Qualität des Produkthandlings und an damit verbundene Kompensationsroutinen. Ursache für genauigkeitsverringende Veränderungen ist u. a. die temperaturabhängige Längenausdehnung des Werkstoffes.

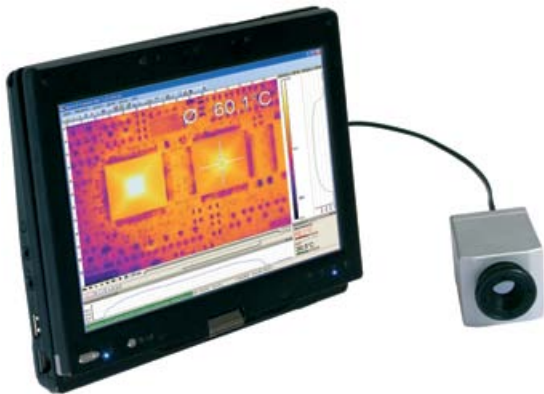
Mit miniaturisierten Infrarottemperatursensoren optris CT LT kann die Produkttemperatur dicht an der Trenn- bzw. Fügestelle sehr schnell gemessen und entsprechende Korrektursignale generiert werden. Kleinste Messflecken von bis zu 0,6 mm können durch Einsatz einer zum optris CT LT zugehörigen Vorsatzoptik erfasst werden. Die Produktionsingenieure besitzen damit ein kontinuierlich arbeitendes Mess- und Kontrollsystem für das Temperaturverhalten ihrer Produkte mit folgenden Resultaten:

- schnelle Justage und Einfahren der Anlagen bei Chargenwechsel, Reduzierung der Leerlaufzeiten und Probematerialien
- Protokollierbarkeit von Chargenproduktion
- Garantie einer hohen und gleich bleibenden Qualität der Produktion

Wärmebildkameras und Anwendungen

Was Webcams und Infrarotkameras gemeinsam haben

Lokale Erwärmungen zu sehen und damit Schwachstellen in unserer Umgebung aufzudecken war schon immer das faszinierende an moderner Wärmebildtechnik. Derartige Kameras haben nicht zuletzt durch immer effektivere Methoden der Herstellung der IR-optischen Bildsensoren eine drastische Verbesserung ihres Preis- / Leistungsverhältnisses erfahren. Die Geräte sind kleiner, robuster und genügsamer in ihrem Stromverbrauch geworden. Seit einiger Zeit gibt es messende Thermografiesysteme, die - ähnlich einer Webcam - nur noch einen USB-Port für deren Betrieb benötigen.

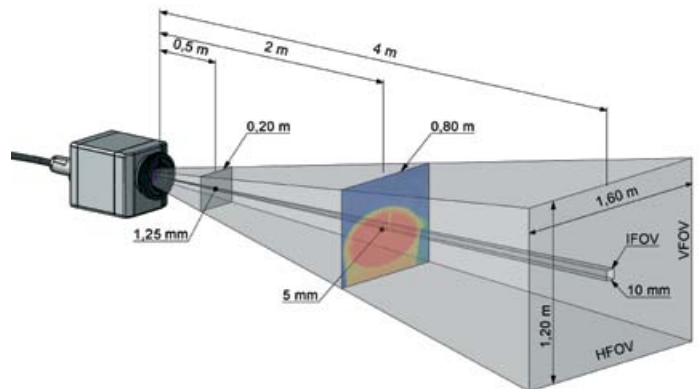


Wärmebildkamera, über USB von einem Tablett-PC mit Strom versorgt

Einleitung

Derartige Kameras arbeiten wie normale Digitalkameras: Sie haben ein Gesichtsfeld, den so genannten field of view, der als Teleobjektiv 6° , als Standardoptik 26° und als Weitwinkelobjektiv 48° betragen kann. Je weiter man vom Objekt entfernt ist, desto größer ist der erfasste Bildbereich und damit allerdings auch der Bildausschnitt, den ein einzelner Pixel erfasst. Das Gute an diesem Umstand ist, dass die Helligkeit des Leuchtens bei genügend großen Flächen unabhängig von der Entfernung ist. Temperaturmessungen sind dadurch weitgehend unbeeinflusst von der Distanz zum Messobjekt. [1]

Die Wärmestrahlung kann im mittleren Infrarotbereich nur durch Optiken aus Germanium, Germaniumlegierungen, Zinksalzen oder mit Oberflächenspiegeln fokussiert werden. Solche vergüteten Optiken sind im Vergleich zu den gewohnten, in Großserien hergestellten Objektiven im sichtbaren Spektralbereich immer noch ein erheblicher Kostenfaktor bei Wärmebildkameras. Sie sind als sphärische 3-Linser oder asphärische 2-Linser ausgeführt und müssen für thermometrisch korrekte Messungen gerade



Abhängigkeit von Messfeld (FOV) und Entfernung am Beispielobjektiv $23^\circ \times 17^\circ$

bei Kameras mit Wechselobjektiven, bezüglich ihres Einflusses auf jedes Einzelpixel kalibriert werden.

Herzstück einer IR-Kamera ist in der weitaus überwiegenden Zahl aller weltweit eingesetzten Thermografiesysteme ein focal plane array (FPA); ein integrierter Bildsensor mit Größen von 20.000 bis zu 1 Million Pixel. Jeder Pixel selbst ist ein 17×17 bis $35 \times 35 \mu\text{m}^2$ großes Mikrobolometer. Solche 150 Nanometer dünnen, thermischen Empfänger werden durch die Wärmestrahlung innerhalb von 10 ms um zirka ein Fünftel des Temperaturunterschiedes zwischen Objekt- und Eigentemperatur erwärmt. Eine derart hohe Empfindlichkeit wird durch eine extrem geringe Wärmekapazität in Verbindung mit einer vorzüglichen Isolation zur evakuierten Umgebung erreicht. Der Absorptionsgrad der teiltransparenten Empfängerfläche wird durch Interferenz der hindurchgelassenen und danach auf der Oberfläche des Siliziumchips reflektierten Lichtwelle mit der nachfolgenden Lichtwelle erhöht. [3]

Zur Nutzung dieses Eigeninterferenzeffektes muss die aus Vanadiumoxid oder amorphem Silizium bestehende Bolometerfläche mittels spezieller Ätztechniken in zirka $2 \mu\text{m}$ Entfernung vom Ausleseschaltkreis positioniert werden. Die flächen- und bandbreitenbezogene spezifische Detektivität der hier beschriebenen FPA's erreicht Werte um $10^9 \text{ cm Hz}^{1/2} / \text{W}$. Sie ist damit anderen thermischen Sensoren, wie sie beispielsweise in Pyrometern eingesetzt werden, um eine Größenordnung überlegen. Mit der Eigentemperatur des Bolometers ändert sich wiederum dessen Widerstand, der in ein elektrisches Spannungssignal gewandelt wird. Schnelle 14 bit A/D-Wandler digitalisieren das zuvor verstärkte und serialisierte Videosignal. Eine digitale Signalverarbeitung berechnet für jeden einzelnen Pixel einen Temperaturwert und erzeugt in Echtzeit die bekannten Falschfarbenbilder. Wärmebildkameras benötigen eine recht aufwendige Kalibrierung, bei der jedem Pixel bei verschiedenen Chip- bzw. Schwarzstrahlertemperaturen eine Reihe von

Empfindlichkeitskennwerten zugeordnet wird. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit werden die Bolometer-FPA's bei definierten Temperaturen mit großer Regelgenauigkeit thermostatiert.

Durch die Entwicklung von immer leistungsfähigeren, kleineren und zugleich preisgünstigeren Laptops, UMPC's, Netbooks und Tablet-PCs wird es neuerdings möglich, deren

- große Displays zur Wärmebilddarstellung,
- optimierte Li-Ion Akkus zur Stromversorgung,
- Rechenkapazität zur flexiblen und qualitativ hochwertigen Echtzeitsignaldarstellung
- Speicherkapazität zur zeitlich praktisch unbegrenzten Wärmebildvideoaufzeichnung sowie
- Ethernet-, Bluetooth-, WLAN- und Softwareschnittstellen zur Integration des Thermografiesystems in die Applikationsumgebung zu nutzen.

Die standardisierte, überall verfügbare USB 2.0 Schnittstelle erlaubt dabei Datenübertragungsraten von

- 30 Hz mit 320x240 Pixel Bildauflösung und von
- 120 Hz bei Bildgrößen von 20.000 Pixel.



USB-Wärmebildkamera zur Übertragung von Wärmebildern mit 382 x 288 Pixeln und 80 Hz

Die 2009 eingeführte USB 3.0-Technik ist sogar für XGA-Wärmebilddauflösungen bis 100 Hz Videofrequenz geeignet. Durch Nutzung des Webcam-Prinzips im Thermografiebereich ergeben sich völlig neue Produkteigenschaften mit einem erheblich verbesserten Preis- / Leistungsverhältnis. Die IR-Kamera ist dabei über die 480 Mbaud - Schnittstelle in Echtzeit mit dem Windows®-basierten Computer, der gleichzeitig die Stromversorgung übernimmt, verbunden.

Die Hardware von USB-Infrarotkameras

USB galt früher als reines Bürokommunikationsmedium. Die im Gegensatz zu FireWire überaus große Verbreitung dieses Interface-Standards hat zahlreiche Entwicklungen initiiert, die die Industrietauglichkeit der Schnittstelle und damit die Nutzbarkeit von USB 2.0-Endgeräten - und hier vor allem von USB-Kameras - erheblich verbessert haben. Dazu gehören:

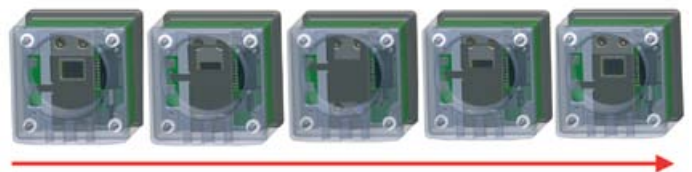
- schleppkettenfähige und bis zu 200°C belastbare Kabel mit Leitungslängen von bis zu 10 m [4]
- bis zu 100 m CAT5E (Ethernet) - Kabelverlängerungen mit Signalverstärkern

- optische Glasfaser-USB-Modems für Leitungslängen von bis zu 10 km [5]

Auf Grund der hohen Bandbreite des USB-Busses können beispielsweise fünf 120 Hz IR-Kameras mit einem Standardhub über 100 m Ethernetleitung mit dem Laptop verbunden werden.

Die wasserdichten, vibrations- und schockbeständigen Wärmebildgeräte genügen der Schutzklasse IP 67 und sind damit auch auf den robusten Einsatz an Test- und Prüfständen geeignet. 4 x 5 x 4 cm³ Größe und 200 g Gewicht vermindern dabei den Aufwand für Kühlgehäuse und Luftblasvorsätze erheblich.

Auf Grund der thermischen Drift von Bolometern und deren on-chip-Signalverarbeitung benötigen alle weltweit vermarkteten, messenden IR-Kameras im Abstand von wenigen Minuten eine Offsetkorrektur. Zu diesem Zweck wird ein geschwärztes Metallteil motorisch vor den Bildsensor bewegt. Dadurch wird jedes Bildelement mit gleicher bekannter Temperatur referenziert. Während einer solchen Offsetkalibrierung sind Wärmebildkameras natürlich blind. Um diesen störenden Effekt zu minimieren kann man durch ein externes Steuerpin die Offsetkorrektur zu einem geeigneten Zeitpunkt initiieren. Gleichzeitig wurden die Kameras so konzipiert, dass die Dauer der Eigenkalibrierung möglichst kurz ist: Der Einbau entsprechend schneller Aktoren erlaubt bei der USB-IR-Kamera die Eigenreferenzierung innerhalb von 250 ms. Dies ist vergleichbar mit der Dauer eines Augenlidschlages und damit für viele Messprozesse akzeptabel. Bei Bandprozessen, bei denen plötzliche Hot Spots detektiert werden sollen, können oftmals zeitnah generierte „gute“ Referenzbilder im Sinne einer dynamischen Differenzbildmessung genutzt werden. Dadurch wird ein Dauerbetrieb ohne mechanisch bewegtes Element möglich.



Zur Offsetreferenzierung wird das Gesichtsfeld des Infrarot-Sensorarrays mittels Linearmotor kurzzeitig geschlossen

Gerade beim Einsatz der Kamera in der 10,6 µm-CO₂-Laserbearbeitungstechnik hat sich die Möglichkeit des extern gesteuerten Verschlusses des optischen Kanals bei gleichzeitig unabhängiger Signalisierung des optomechanisch geschützten Betriebszustandes der Kamera bewährt. Auf Grund guter Filterblockung können Temperaturmessungen bei allen anderen im Bereich von 800 nm bis 2,6 µm arbeitenden Bearbeitungslasern in situ durchgeführt werden.

Haupteinsatzgebiete des hier beschriebenen Wärmebildgerätes sind:

- die Analyse von dynamischen Wärmeprozessen bei der Produkt- und Prozessentwicklung
- der stationäre Einsatz zur kontinuierlichen Beobachtung und Regelung thermischer Vorgänge
- die gelegentliche Nutzung als portables Messgerät im Instandhaltungsbereich und zur Detektion von Wärmelecks.

Für die Anwendung im F&E-Bereich erweist sich die Möglichkeit einer 120 Hz Videoaufzeichnung als vorteilhaft. Dadurch können thermische Vorgänge, die nur kurzzeitig im Gesichtsfeld der Kamera sind, später in Zeitlupe analysiert werden. Einzelbilder können somit nachträglich aus einer solchen Videosequenz mit voller geometrischer und thermischer Auflösung gewonnen werden. Außerdem bieten austauschbare Optiken, einschließlich eines Mikroskopvorsatzes, zahlreiche Möglichkeiten der Anpassung des Gerätes an unterschiedliche Messaufgaben: Während 6° Objektive eher zur Beobachtung von Details aus größerer Entfernung verwendet werden, kann man mit einem Mikroskopvorsatz Objekte von 4 x 3 mm² Größe mit einer geometrischen Auflösung von 25 x 25 µm² vermessen.

Beim stationären Einbau von USB-IR-Kameras erweist sich deren optisch isoliertes Prozessinterface als vorteilhaft, bei dem aus dem Wärmebild generierte Temperaturinformationen als Signalspannung weitergeleitet werden. Außerdem können flächenbezogene Emissionsgrade bzw. berührungslos oder berührend gemessene Referenztemperaturen dem Kamerasystem über einen Spannungseingang mitgeteilt werden. Zur Qualitätsdokumentation kann ein weiterer Digitaleingang Schnappschüsse oder Videosequenzen auslösen. Solche einzelproduktbezogenen Wärmebilder können automatisch auf zentralen Servern abgelegt werden.

Analysesoftware garantiert Flexibilität

Da USB-IR-Kameras, die ab Windows XP bereits im Betriebssystem integrierten Standard USB video class bzw. HID-Treiber verwenden, entfällt jegliche Treiberinstallation. Die einzelpixelbezogene Echtzeitkorrektur der Videodaten und Temperaturberechnung findet im PC statt. Die für 20.000 Sensorpixel erstaunlich gute Bildqualität erreicht man durch einen aufwändigen softwarebasierten Rendering-Algorithmus, der Temperaturfelder im VGA-Format berechnet.

Die Anwendersoftware zeichnet sich durch hohe Flexibilität und Portabilität aus. Über Standardfunktionen hinaus gehören zu den Softwareeigenschaften

- zahlreiche Daten und Wärmebildexportfunktionen zur Unterstützung von Reporten und Offline-Analysen

- gemischte skalierbare Farbpaletten
- horizontale bzw. vertikale Liniendarstellungen
- beliebig viele Messfeldern mit separaten Alarm-Optionen und
- auf Referenzbildern basierende Differenzvideodarstellungen.

Die Software bietet zudem einen Layout-Modus, der unterschiedlichste Darstellungsmodi speichert und restauriert. Ein Videoeditor ermöglicht die Bearbeitung der radiometrischen AVI-Dateien. Solche Dateien können mit der mehrfach parallel nutzbaren Software auch offline analysiert werden. Zu den Videoaufnahmemodi gehören intermittierende Betriebsarten, die die Aufnahme langsamer thermischer Vorgänge und deren schnelle Betrachtung gestatten.

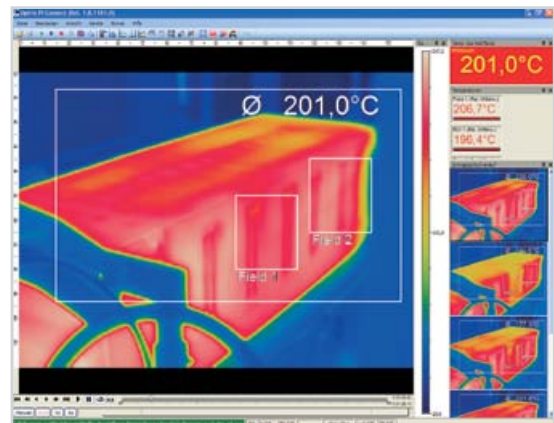
Die Übergabe von Echtzeitdaten an andere Programme erfolgt über eine ausführlich dokumentierte DLL als Bestandteil eines Software Development Kits. Über die DLL-Schnittstelle können auch alle anderen Kamerafunktionen gesteuert werden. Alternativ kann die Software mit einem seriellen (Com-) Port kommunizieren und so beispielsweise direkt eine RS422-Schnittstelle ansprechen. Der Support nutzerspezifischer Software wird durch LabVIEW-Treiber ergänzt.

Anwendungen

Im Folgenden sollen beispielhaft drei typische Anwendungen diskutiert werden, die die Einsatzbreite von USB-IR-Kameras beschreiben

1. Optimierung von Fertigungsprozessen

Die Herstellung von Kunststoffteilen wie PET-Flaschen erfordert eine definierte Erwärmung des sogenannten Preforms, um beim Blasformen der Flasche eine homogene Materialstärke zu garantieren. Die Fertigungsanlage wird bei Testläufen nur mit wenigen 20 mm dicken Rohlingen bei voller Arbeitsgeschwindigkeit von etwa einem m / s betrieben. Da der Zeitpunkt des Durchlaufs der

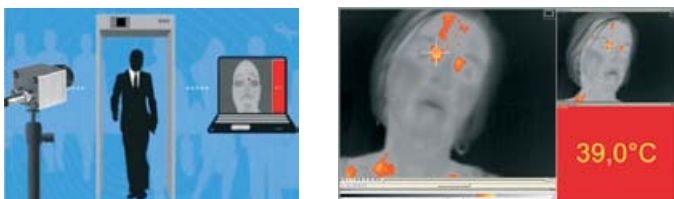


Beispiele für die umfangreichen Möglichkeiten der IR - Video- und Bildanalyse

Probekörper variieren kann, muss eine Videosequenz bei 120 Hz aufgezeichnet werden, um das Temperaturprofil eines Preforms zu messen. Die Kamera wird dabei so positioniert, dass sie der Bewegung des Materials aus einem schrägen Winkel - ähnlich dem letzten Wagen eines fahrenden Zuges - „hinterher schaut“. Im Ergebnis erhält man das für die Einstellung von Heizparametern wichtige Temperaturprofil aus einer IR-Videosequenz.

Beim Vakuumformen von großen Kunststoffteilen für Kühlschränke erlaubt die Videoaufzeichnung die genaue Vermessung des Abkühlverhaltens an verschiedenen Stellen des Formteils. Unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten haben ein Verziehen des Materials zur Folge. Oftmals durch Memory-Effekte im Kunststoff zeitversetzt auftretende Verformungen - beispielsweise an Armaturen Brettern - können durch Optimierung der Abkühlgeschwindigkeiten vermieden werden. Ähnlich dem Oszilloskop zur Analyse von elektrischen Signalverläufen ist die IR-Videokamera ein wichtiges Tool zur Bewertung dynamischer thermischer Prozesse.

2. H1N1-Inspektion von Reisenden



Anlage zum Hauttemperaturscreening an Reisenden mit Präzisionsreferenzstrahler

Durch die pandemische Verbreitung des Schweinegrippevirus ist weltweit der Bedarf an geeigneter Screening-Technik mit der Reisende auf mögliches Fieber hin überprüft werden können, gestiegen. Dabei wird die Gesichtstemperatur im Bereich der Augenhöhlen als Maß für die Körperkerntemperatur gemessen. Auch wenn diese Methode keinen absolut sicheren Fiebermessung darstellt, ist sie doch geeignet, größere Gruppen von Reisenden mit hoher Detektionswahrscheinlichkeit zu screenen.

Normale IR-Kameras weisen auf Grund der begrenzten

- Stabilität der hochempfindlichen Sensorik und der
- Abbildungsqualität der hochgeöffneten Objektive

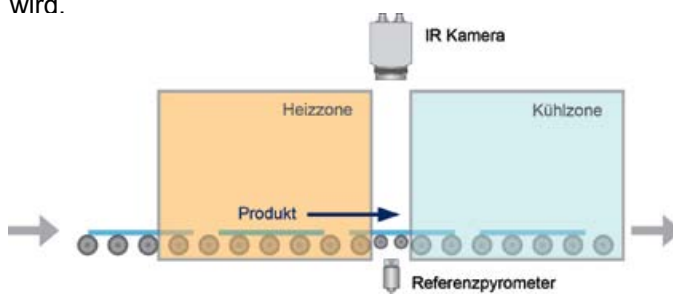
eine Messgenauigkeit von +/- 2°C auf.

Dies ist für Messungen im medizintechnischen Bereich unzureichend. Deshalb wurden flache, kleine Referenzstrahler entwickelt, die bei 34°C Strahlertemperatur eine Messgenauigkeit von 0,2°C erlauben. Die Strahler werden in der gleichen Entfernung in der auch die Hautoberflächentemperaturmessung stattfindet am Rand des Bildes positioniert. Kernstück des Messsystems ist ein zertifiziertes IR-Thermometer mit 25 mK thermischer

Auflösung. Dieses im Referenzstrahler integrierte Gerät misst die Wärmestrahlung und übermittelt die aktuellen Temperaturwerte über eine 4-20 mA-Schnittstelle an den Analogeingang der IR-Kamera. Die Software errechnet in dem entsprechenden Bildbereich einen Korrekturwert und überträgt ihn auf alle anderen Pixel des Messbildes. Bei einer vermuteten Fiebertemperatur wird automatisch ein Alarm generiert und ein radiometrisches Standbild zur Dokumentation erzeugt. Bei den betroffenen Personen muss sich in solchen Fällen eine den Körper berührende Fiebermessung beispielsweise mit einem Ohrthermometer durchgeführt werden.

3. Zeilenkamera-Einsatz in Glashärtungsanlagen

Nachdem Baugläser in Ihre endgültige Form geschnitten wurden, müssen sie oftmals oberflächengehärtet werden. Dies geschieht in Härungsanlagen, in denen das zugeschnittene Glas in einem Ofen auf zirka 600°C erwärmt wird. Nach dieser Erwärmung wird das Material mittels bewegter Rollen aus der Ofen- in eine Luftkühlsektion transportiert, wo die Oberfläche schnell und gleichmäßig abgekühlt wird. Dadurch entsteht die für Sicherheitsgläser wichtige feinkristalline gehärtete Struktur. Diese Struktur und mithin die Bruchfestigkeit des Glases hängt von einer möglichst gleichmäßigen Erwärmung aller Teilflächen ab. Da Ofengehäuse und Kühlsektion nahe beieinander liegen, ist eine Beobachtung der aus dem Ofen transportierten Glasflächen nur durch einen schmalen Spalt möglich. Im Wärmebild erscheint das Material deshalb nur in wenigen Zeilen. Die Software erlaubt nun eine spezielle Darstellung bei der das Bild der Glasoberflächen aus ca. 300 Zeilen bzw. Zeilengruppen - die 300 alle 8 ms aufgenommenen Wärmebildern entnommen wurden - generiert wird.



Wärmebildmessung an einer Glashärtungsanlage mit IR Kamera und Referenzpyrometer

Die Kamera misst den Spalt diagonal, so dass sich bei einer 48°-Optik ein Gesichtsfeld von 60° ergibt. Da Glas in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschichtung unterschiedliche Emissionsgrade haben kann, misst ein IR-Thermometer auf der nicht beschichteten Unterseite die genaue Oberflächentemperatur bei der für Glasoberflächen optimalen Wellenlänge von 5 µm. Diese entlang einer Spalte des Messbildes gewonnenen Temperaturen werden über den Analogeingang der Kamera mitgeteilt und hier mit den korrespondierenden Kameramess-

werten verglichen. Im Ergebnis entsteht ein korrigierter Emissionsgrad für das gesamte Messbild. Die Messbilder erlauben schließlich eine exakte Einstellung aller Heizsektionen im Ofen und sichern damit eine gute thermische Homogenität.

Zusammenfassung

Die neue Kameratechnik stellt auf dem IR-Markt bezüglich Flexibilität und Einsatzbreite ein Novum dar. Neben anspruchsvollen Temperaturanalysen ist das Gerät in Verbindung mit Tablet-PCs auch zur Lösung einfacher Instandhaltungsaufgaben geeignet. Mit Ausnahme der Hardware des USB-IR-Kameramesskopfes selbst können die beiden wesentlichen weiteren Komponenten des beschriebenen Thermografiesystems, nämlich Windows-Software und PC-Hardware auch zu einem späteren Zeitpunkt aktualisiert werden. Dies geschieht einerseits durch simplen Download von Softwareupdates und -erweiterungen. Andererseits kann man auf Grund der standardisierten USB-Schnittstelle das Messsystem jederzeit mit technologischer und funktionell weiterentwickelter PC-Hardware ergänzen.

Literaturreferenzen

- [1] VDI/VDE Richtlinie, Technische Temperaturmessungen - Spezifikation von Strahlungsthermometern, Juni 2001, VDI 3511 Blatt 4.1
- [2] VDI/ VDE Richtlinie Technische Temperaturmessungen, Strahlungsthermometrie – Kalibrierung von Strahlungsthermometern, 2004, VDI/ VDE 3511, Blatt 4.3
- [3] Trouilleau, C. et al.: High-performance uncooled amorphous silicon TEC less XGA IRFPA with 17µm pixel-pitch; "Infrared technologies and applications XXXV", Proc. SPIE 7298, 2009
- [4] Schmidgall, T.; Glänzend gelöst – Fehlerdetektion an spiegelnden Oberflächen mit USB2.0 - Industriekameras, A&D Kompendium 2007/2008, S. 219
- [5] Icron Technology Corp.; Options for Extending USB, White Paper, Burnaby; Canada, 2009

Empfohlene Literatur

- 1. VDI/VDE Richtlinie, Technische Temperaturmessungen - Spezifikation von Strahlungsthermometern, Juni 2001, VDI 3511 Blatt 4.1
- 2. Stahl, Miosga: Grundlagen Infrarottechnik, 1980, Dr. Alfred Hütthig Verlag Heidelberg
- 3. Walther, Herrmann: Wissensspeicher Infrarotmesstechnik, 1990, Fachbuchverlag Leipzig
- 4. Walther, L., Gerber, D.: Infrarotmesstechnik, 1983, Verlag Technik Berlin
- 5. De Witt, Nutter: Theory and Practice of Radiation Thermometry, 1988, John Wiley & Son, New York, ISBN 0-471-61018-6
- 6. Wolfe, Zissis: The Infrared Handbook, 1978, Office of Naval Research, Department of the Navy, Washington DC.
- 7. Crastes, A. et al.: Uncooled amorphous silicon ¼ VGA IRFPA with 25 µm pixel-pitch for High End applications, "Infrared technologies and applications XXXIV", Proc. SPIE 6940, 2008
- 8. Holst, Gerald C.: Electro-optical Imaging System Performance, JCD Publishing Winter Park, Florida USA, 2006, ISBN: 0-8194-6179-2

Begriff / Ausdruck	Erklärung
Absorption (Absorptionsgrad)	Verhältnis der von einem Objekt absorbierten Strahlung zur auftretenden Strahlung. Eine Zahl zwischen 0 und 1.
Emissionsgrad	Die von einem Objekt ausgehende Strahlung im Vergleich zu der eines Schwarzen Körpers. Eine Zahl zwischen 0 und 1.
Filter	Material, das nur für bestimmte Infrarot-Wellenlängen durchlässig ist.
FOV	Sehwinkel (Field of view): Der horizontale Betrachtungswinkel eines Infrarotobjektivs.
FPA	Focal Plane Array: Ein Infrarotdetektortyp
Grauer Körper	Ein Objekt, das einen bestimmten Anteil der Energiemenge eines Schwarzen Körpers für jede Wellenlänge abgibt.
IFOV	Momentaner Sehwinkel: Ein Maß für die geometrische Auflösung einer Infrarotkamera.
NETD	Rauschäquivalente Temperaturdifferenz. Ein Maß für das Bildrauschen einer Infrarotkamera.
Objektparameter	Eine Reihe von Werten, mit denen die Bedingungen, unter denen die Messungen durchgeführt werden, sowie das Messobjekt selbst beschrieben werden (z. B. Emissionsgrad, Umgebungstemperatur, Abstand usw.)
Objektsignal	Ein unkalibrierter Wert, der sich auf die Strahlungsmenge bezieht, die die Kamera von dem Messobjekt empfängt.
Palette	Die zur Anzeige eines Infrarotbildes verwendeten Farben
Pixel	Synonym für Bildelement. Ein einzelner Bildpunkt in einem Bild.

Begriff / Ausdruck	Erklärung
Referenztemperatur	Eine Temperatur, mit der die regulären Messwerte verglichen werden können.
Reflexionsgrad	Verhältnis der von einem Objekt reflektierten Strahlung zur auftretenden Strahlung. Eine Zahl zwischen 0 und 1
Schwarzer Strahler	Objekt mit einem Reflexionsgrad von Null. Jegliche Strahlung ist auf seine eigene Temperatur zurückzuführen.
Spektrale spezifische Ausstrahlung	Von einem Objekt abgegebene Energiemenge bezogen auf Zeit, Fläche und Wellenlänge ($W / m^2 / \mu m$)
Spezifische Ausstrahlung	Von einem Objekt abgegebene Energiemenge pro Zeit- und Flächeneinheit (W / m^2)
Strahlung	Von einem Objekt abgegebene Energiemenge bezogen auf Zeit, Fläche und Raumwinkel ($W / m^2 / sr$)
Strahlungsfluss	Von einem Objekt abgegebene Energiemenge pro Zeiteinheit (W)
Temperaturdifferenz	Ein Wert, der durch die Subtraktion zweier Temperaturwerte berechnet wird.
Temperaturmessbereich	Der aktuelle Temperaturmessbereich einer Infrarotkamera. Kameras können über mehrere Bereiche verfügen. Sie werden mit Hilfe von zwei Schwarzkörpertemperaturwerten angegeben, die als Grenzwerte für die aktuelle Kalibrierung dienen.
Thermogramm	Infrarotbild
Transmission (Transmissionsgrad)	Gase und Festkörper sind verschieden durchlässig. Die Transmission gibt die Menge der Infrarotstrahlung an, die sie durchlassen. Eine Zahl zwischen 0 und 1.
Umgebung	Objekte und Gase, die Strahlung an das Messobjekt abgeben

In diesem Abschnitt finden Sie eine Aufstellung von Emissionsdaten aus der Fachliteratur und eigenen Messungen der Optris GmbH.

Referenzen

1. Mikaél A. Bramson: Infrared Radiation, A Handbook for Applications, Plenum Press, N.Y.
2. William L. Wolfe, George J. Zissis: The Infrared Handbook, Office of Naval Research, Department of Navy, Washington, D.C.
3. Madding, R.P.: Thermographic Instruments and Systems. Madison, Wisconsin: University of Wisconsin - Extension, Department of Engineering and Applied Science
4. William L. Wolfe: Handbook of Military Infrared Technology, Office of Naval Research, Department of Navy, Wahsington, D.C.
5. Jones, Smith, Probert: External thermography of buildings ..., Proc. Of the Society of Phot-Optical Instrumentation Engineers, vol. 110, Industrial and Civil Applications of Infrared Technology, Juni 1977 London
6. Paljak, Pettersson: Thermography of Buildings, Swedish Building Research Institute, Stockholm 1972
7. Vlcek, J.: Determination of emissivity with imaging radiometers and some emissivities at $\lambda = 5 \mu\text{m}$. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
8. Kern: Evaluation of infrared emission of clouds and ground as measured by weather satellites, Defence Documentation Center, AD 617 417.
9. Öhman, Claes: Emittansmätningar med AGEMA E-Box. Teknisk rapport, AGEMA 1999. (Emissionsmessungen mit AGEMA E-Box. Technischer Bericht, AGEMA 1999.)

Legende:

- T: Gesamtspektrum
- SW: 2 - 5 μm
- LW: 8 - 14 μm
- LLW: 6,5 - 20 μm
- R: Referenzen

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissionsgrad	R
Aluminium	Blech, 4 Muster unterschiedlich zerkratzt	70	LW	0,03 - 0,06	9
Aluminium	Blech, 4 Muster unterschiedlich zerkratzt	70	SW	0,05 - 0,08	9
Aluminium	eloxiert, hellgrau, stumpf	70	LW	0,97	9
Aluminium	eloxiert, hellgrau, stumpf	70	WS	0,61	9
Aluminium	eloxiert, hellgrau, stumpf	70	LW	0,95	9
Aluminium	eloxiert, hellgrau, stumpf	70	SW	0,67	9
Aluminium	eloxiertes Blech	100	T	0,55	2
Aluminium	Folie	27	3 μm	0,09	3
Aluminium	Folie	27	10 μm	0,04	3
Aluminium	geraut	27	3 μm	0,28	3
Aluminium	geraut	27	10 μm	0,18	3

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissionsgrad	R
Aluminium	Guss, sandgestrahlt	70	LW	0,46	9
Aluminium	Guss, sandgestrahlt	70	SW	0,47	9
Aluminium	in HNO ₃ getaucht, Platte	100	T	0,05	4
Aluminium	poliert	50 - 100	T	0,04 - 0,06	1
Aluminium	poliert, Blech	100	T	0,05	2
Aluminium	polierte Platte	100	T	0,05	4
Aluminium	raue Oberfläche	20 - 50	T	0,06 - 0,07	1
Aluminium	stark oxidiert	50 - 500	T	0,2 - 0,3	1
Aluminium	stark verwittert	17	SW	0,83 - 0,94	5
Aluminium	unverändert, Blech	100	T	0,09	2
Aluminium	unverändert, Platte	100	T	0,09	4
Aluminium	vakuumbeschichtet	20	T	0,04	2
Aluminiumbronze		20	T	0,6	1
Aluminiumhydroxid	Pulver		T	0,28	1
Aluminiumoxid	aktiviert, Pulver		T	0,46	1
Aluminiumoxid	rein, Pulver (Aluminiumoxid)		T	0,16	1
Asbest	Bodenfliesen	35	SW	0,94	7
Asbest	Brett	20	T	0,96	1
Asbest	Gewebe		T	0,78	1
Asbest	Papier	40 - 400	T	0,93 - 0,95	1
Asbest	Pulver		T	0,40 - 0,60	1
Asbest	Ziegel	20	T	0,96	1
Asphaltstraßenbelag		4	LLW	0,967	8
Beton		20	T	0,92	2
Beton	Gehweg	5	LLW	0,974	8
Beton	rau	17	SW	0,97	5
Beton	trocken	36	SW	0,95	7
Blech	glänzend	20 - 50	T	0,04 - 0,06	1
Blech	Weißblech	100	T	0,07	2
Blei	glänzend	250	T	0,08	1
Blei	nicht oxidiert, poliert	100	T	0,05	4
Blei	oxidiert, grau	20	T	0,28	1
Blei	oxidiert, grau	22	T	0,28	4
Blei	oxidiert bei 200°C	200	T	0,63	1
Blei rot		100	T	0,93	4
Blei rot, Pulver		100	T	0,93	1
Bronze	Phosphorbronze	70	LW	0,06	9
Bronze	Phosphorbronze	70	SW	0,08	1
Bronze	poliert	50	T	0,1	1
Bronze	porös, rau	50 - 100	T	0,55	1
Bronze	Pulver		T	0,76 - 0,80	1
Chrom	poliert	50	T	0,1	1
Chrom	poliert	500 - 1000	T	0,28 - 0,38	1
Ebonit			T	0,89	1
Eis:	siehe Wasser				
Eisen, galvanisiert	Blech	92	T	0,07	4
Eisen, galvanisiert	Blech, oxidiert	20	T	0,28	1
Eisen, galvanisiert	Blech, poliert	30	T	0,23	1
Eisen, galvanisiert	stark oxidiert	70	LW	0,85	9
Eisen, galvanisiert	stark oxidiert	70	SW	0,64	9
Eisen und Stahl	elektrolytisch	22	T	0,05	4
Eisen und Stahl	elektrolytisch	100	T	0,05	4
Eisen und Stahl	elektrolytisch	260	T	0,07	4
Eisen und Stahl	elektrolytisch, hochglanzpoliert	175 - 225	T	0,05 - 0,06	1
Eisen und Stahl	frisch gewalzt	20	T	0,24	1
Eisen und Stahl	frisch mit Schmirgelpapier bearbeitet	20	T	0,24	1
Eisen und Stahl	geschliffenes Blech	950 - 1100	T	0,55 - 0,61	1
Eisen und Stahl	geschmiedet, hochglanzpoliert	40 - 250	T	0,28	1
Eisen und Stahl	gewalztes Blech	50	T	0,56	1
Eisen und Stahl	glänzend, geätzt	150	T	0,16	1
Eisen und Stahl	glänzende Oxidschicht, Blech	20	T	0,82	1
Eisen und Stahl	heißgewalzt	20	T	0,77	1
Eisen und Stahl	heißgewalzt	130	T	0,6	1
Eisen und Stahl	kaltgewalzt	70	LW	0,09	9
Eisen und Stahl	kaltgewalzt	70	SW	0,2	9

Anhang: Emissionsgradtabelle

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissionsgrad	R
Eisen und Stahl	mit rotem Rost bedeckt	20	T	0,61 - 0,85	1
Eisen und Stahl	oxidiert	100	T	0,74	1
Eisen und Stahl	oxidiert	100	T	0,74	4
Eisen und Stahl	oxidiert	125 - 525	T	0,78 - 0,82	1
Eisen und Stahl	oxidiert	200	T	0,79	2
Eisen und Stahl	oxidiert	200 - 600	T	0,8	1
Eisen und Stahl	oxidiert	1227	T	0,89	4
Eisen und Stahl	poliert	100	T	0,07	2
Eisen und Stahl	poliert	400 - 1000	T	0,14 - 0,38	1
Eisen und Stahl	poliertes Blech	750 - 1050	T	0,52 - 0,56	1
Eisen und Stahl	rau, ebene Oberfläche	50	T	0,95 - 0,98	1
Eisen und Stahl	rostig, rot	20	T	0,69	1
Eisen und Stahl	rostrot, Blech	22	T	0,69	4
Eisen und Stahl	stark oxidiert	50	T	0,88	1
Eisen und Stahl	stark oxidiert	500	T	0,98	1
Eisen und Stahl	stark verrostet	17	SW	0,96	5
Eisen und Stahl	stark verrostetes Blech	20	T	0,69	2
Eisen verzinkt	Blech	24	T	0,064	4
Emaile		20	T	0,9	1
Emaile	Lack	20	T	0,85 - 0,95	1
Erde	mit Wasser gesättigt	20	T	0,95	2
Erde	trocken	20	T	0,92	2
Faserplatte	hart, unbehandelt	20	SW	0,85	6
Faserplatte	Ottrelith	70	LW	0,88	9
Faserplatte	Ottrelith	70	SW	0,75	9
Faserplatte	Partikelplatte	70	LW	0,89	9
Faserplatte	Partikelplatte	70	SW	0,77	9
Faserplatte	porös, unbehandelt	20	SW	0,85	6
Furnis	auf Eichenparkettboden	70	LW	0,90 - 0,93	9
Furnis	auf Eichenparkettboden	70	SW	0,9	9
Furnis	matt	20	SW	0,93	6
Gips		20	T	0,8 - 0,9	1
Gipsputz		17	SW	0,86	5
Gipsputz	Gipsplatte, unbehandelt	20	SW	0,9	6
Gipsputz	raue Oberfläche	20	T	0,91	2
Gold	hochglanzpoliert	200 - 600	T	0,02 - 0,03	1
Gold	hochpoliert	100	T	0,02	2
Gold	poliert	130	T	0,018	1
Granit	poliert	20	LLW	0,849	8
Granit	rau	21	LLW	0,879	8
Granit	rau, 4 verschiedene Muster	70	LW	0,77 - 0,87	9
Granit	rau, 4 verschiedene Muster	70	SW	0,95 - 0,97	9
Gummi	hart	20	T	0,95	1
Gummi	weich, grau, rau	20	T	0,95	1
Gusseisen	bearbeitet	800 - 1000	T	0,60 - 0,70	1
Gusseisen	flüssig	1300	T	0,28	1
Gusseisen	Guss	50	T	0,81	1
Gusseisen	Gusseisenblöcke	1000	T	0,95	1
Gusseisen	oxidiert	38	T	0,63	4
Gusseisen	oxidiert	100	T	0,64	2
Gusseisen	oxidiert	260	T	0,66	4
Gusseisen	oxidiert	538	T	0,76	4
Gusseisen	oxidiert bei 600°C	200 - 600	T	0,64 - 0,78	1
Gusseisen	poliert	38	T	0,21	4
Gusseisen	poliert	40	T	0,21	2
Gusseisen	poliert	200	T	0,21	1
Gusseisen	unbearbeitet	900 - 1100	T	0,87 - 0,95	1
Haut	Mensch	32	T	0,98	2
Holz		17	SW	0,98	5
Holz		19	LLW	0,962	8
Holz	gehobelt	20	T	0,8 - 0,9	1
Holz	gehobelte Eiche	20	T	0,9	2
Holz	gehobelte Eiche	70	LW	0,88	9
Holz	gehobelte Eiche	70	SW	0,77	9
Holz	geschmirlgelt		T	0,5 - 0,7	1
Holz	Pinie, 4 verschiedene Muster	70	LW	0,81 - 0,89	9
Holz	Pinie, 4 verschiedene Muster	70	SW	0,67 - 0,75	9
Holz	Sperrholz, glatt, trocken	36	SW	0,82	7

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissionsgrad	R
Holz	Sperrholz, unbehandelt	20	SW	0,83	6
Holz	weiß, feucht	20	T	0,7 - 0,8	1
Kalk			T	0,3 - 0,4	1
Kohlenstoff	Grafit, Oberfläche gefeilt	20	T	0,98	2
Kohlenstoff	Grafitpulver		T	0,97	1
Kohlenstoff	Holzkohlepulver		T	0,96	1
Kohlenstoff	Kerzenruß	20	T	0,95	2
Kohlenstoff	Lampenuß	20 - 400	T	0,95 - 0,97	1
Kunststoff	Glasfaserlaminat (Leiterplatte)	70	LW	0,91	9
Kunststoff	Glasfaserlaminat (Leiterplatte)	70	SW	0,94	9
Kunststoff	Polyurethan-Isolierplatte	70	LW	0,5	9
Kunststoff	Polyurethan-Isolierplatte	70	SW	0,29	9
Kunststoff	PVC, Kunststoffboden, stumpf, strukturiert	70	LW	0,93	9
Kunststoff	PVC, Kunststoffboden, stumpf, strukturiert	70	SW	0,94	9
Kupfer	elektrolytisch, hochglanzpoliert	80	T	0,018	1
Kupfer	elektrolytisch, poliert	-34	T	0,006	4
Kupfer	geschabt	27	T	0,07	4
Kupfer	geschmolzen	1100 - 1300	T	0,13 - 0,15	1
Kupfer	kommerziell, glänzend	20	T	0,07	1
Kupfer	oxidiert	50	T	0,6 - 0,7	1
Kupfer	oxidiert, dunkel	27	T	0,78	4
Kupfer	oxidiert, stark	20	T	0,78	2
Kupfer	oxidiert, schwarz		T	0,88	1
Kupfer	poliert	50 - 100	T	0,02	1
Kupfer	poliert	100	T	0,03	2
Kupfer	poliert, kommerziell	27	T	0,03	4
Kupfer	poliert, mechanisch	22	T	0,015	4
Kupfer	rein, sorgfältig vorbereitete Oberfläche	22	T	0,008	4
Kupferdioxid	Pulver		T	0,84	1
Kupferdioxid	rot, Pulver		T	0,7	1
Lack	3 Farben auf Aluminium gesprüht	70	LW	0,92 - 0,94	9
Lack	3 Farben auf Aluminium gesprüht	70	SW	0,50 - 0,53	9
Lack	Aluminium auf rauher Oberfläche	20	T	0,4	1
Lack	Bakelit	80	T	0,83	1
Lack	hitzebeständig	100	T	0,92	1
Lack	schwarz, glänzend, auf Eisen gesprüht	20	T	0,87	1
Lack	schwarz, matt	100	T	0,97	2
Lack	schwarz, stumpf	40 - 100	T	0,96 - 0,98	1
Lack	weiß	40 - 100	T	0,8 - 0,95	1
Lack	weiß	100	T	0,92	2
Lacke	8 verschiedene Farben und Qualitäten	70	LW	0,92 - 0,94	9
Lacke	8 verschiedene Farben und Qualitäten	70	SW	0,88 - 0,96	9
Lacke	Aluminium, unterschiedliches Alter	50 - 100	T	0,27 - 0,67	1
Lacke	auf Ölbasis, Mittelwert von 16 Farben	100	T	0,94	2
Lacke	chromgrün		T	0,65 - 0,70	1
Lacke	kadmiumgelb		T	0,28 - 0,33	1
Lacke	kobaltblau		T	0,7 - 0,8	1
Lacke	Kunststoff, schwarz	20	SW	0,95	6
Lacke	Kunststoff, weiß	20	SW	0,84	6
Lacke	Öl	17	SW	0,87	5
Lacke	Öl, diverse Farben	100	T	0,92 - 0,96	1
Lacke	Öl, glänzend grau	20	SW	0,96	6
Lacke	Öl, grau, matt	20	SW	0,97	6
Lacke	Öl, schwarz, matt	20	SW	0,94	6
Lacke	Öl, schwarz, glänzend	20	SW	0,92	6
Leder	gebräunt, gegerbt		T	0,75 - 0,80	1
Magnesium		22	T	0,07	4
Magnesium		260	T	0,13	4
Magnesium		538	T	0,18	4

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissionsgrad	R
Magnesium	poliert	20	T	0,07	2
Magnesiumpulver			T	0,86	1
Messing	abgerieben mit 80er Schmirgelpapier	20	T	0,2	2
Messing	Blech, gewalzt	20	T	0,06	1
Messing	Blech, mit Schmirgelpapier bearbeitet	20	T	0,2	1
Messing	hochpoliert	100	T	0,03	2
Messing	oxidiert	70	SW	0,04 - 0,09	9
Messing	oxidiert	70	LW	0,03 - 0,07	9
Messing	oxidiert	100	T	0,61	2
Messing	oxidiert bei 600°C	200 - 600	T	0,59 - 0,61	1
Messing	poliert	200	T	0,03	1
Messing	stumpf, fleckig	20 - 350	T	0,22	1
Molybdän		600 - 1000	T	0,08 - 0,13	1
Molybdän		1500 - 2200	T	0,19 - 0,26	1
Molybdän	Faden	700 - 2500	T	0,1 - 0,3	1
Mörtel		17	SW	0,87	5
Mörtel	trocken	36	SW	0,94	7
Nickel	Draht	200 - 1000	T	0,1 - 0,2	1
Nickel	elektrolytisch	22	T	0,04	4
Nickel	elektrolytisch	38	T	0,06	4
Nickel	elektrolytisch	260	T	0,07	4
Nickel	elektrolytisch	538	T	0,1	4
Nickel	galvanisiert, poliert	20	T	0,05	2
Nickel	galvanisiert auf Eisen, nicht poliert	20	T	0,11 - 0,40	1
Nickel	galvanisiert auf Eisen, nicht poliert	22	T	0,11	4
Nickel	galvanisiert auf Eisen, nicht poliert	22	T	0,045	4
Nickel	hell, matt	122	T	0,041	4
Nickel	oxidiert	200	T	0,37	2
Nickel	oxidiert	227	T	0,37	4
Nickel	oxidiert	1227	T	0,85	4
Nickel	oxidiert bei 600°C	200 - 600	T	0,37 - 0,48	1
Nickel	poliert	122	T	0,045	4
Nickel	rein, poliert	100	T	0,045	1
Nickel	rein, poliert	200 - 400	T	0,07 - 0,09	1
Nickelchrom	Draht, blank	50	T	0,65	1
Nickelchrom	Draht, blank	500 - 1000	T	0,71 - 0,79	1
Nickelchrom	Draht, oxidiert	50 - 500	T	0,95 - 0,98	1
Nickelchrom	gewalzt	700	T	0,25	1
Nickelchrom	sandgestrahlt	700	T	0,7	1
Nickeloxid		500 - 650	T	0,52 - 0,59	1
Nickeloxid		1000 - 1250	T	0,75 - 0,86	1
Öl, Schmieröl	0,025-mm-Film	20	T	0,27	2
Öl, Schmieröl	0,050-mm-Film	20	T	0,46	2
Öl, Schmieröl	0,125-mm-Film	20	T	0,72	2
Öl, Schmieröl	dicke Schicht	20	T	0,82	2
Öl, Schmieröl	Film auf Ni-Basis: nur Ni-Basis	20	T	0,05	2
Papier	4 verschiedene Farben	70	LW	0,92 - 0,94	9
Papier	4 verschiedene Farben	70	SW	0,68 - 0,74	9
Papier	beschichtet mit schwarzem Lack		T	0,93	1
Papier	dunkelblau		T	0,84	1
Papier	gelb		T	0,72	1
Papier	grün		T	0,85	1
Papier	rot		T	0,76	1
Papier	schwarz		T	0,9	1
Papier	schwarz, stumpf		T	0,94	1
Papier	schwarz, stumpf	70	LW	0,89	9
Papier	schwarz, stumpf	70	SW	0,86	9
Papier	weiß	20	T	0,7 - 0,9	1
Papier	weiß, 3 verschiedene Glanzarten	70	LW	0,88 - 0,90	9
Papier	weiß, 3 verschiedene Glanzarten	70	SW	0,76 - 0,78	9
Papier	weiß, gebunden	20	T	0,93	2
Platin		17	T	0,016	4
Platin		22	T	0,05	4

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissionsgrad	R
Platin		260	T	0,06	4
Platin		538	T	0,1	4
Platin		1000 - 1500	T	0,14 - 0,18	1
Platin		1094	T	0,18	4
Platin	Band	900 - 1100	T	0,12 - 0,17	1
Platin	Draht	50 - 200	T	0,06 - 0,07	1
Platin	Draht	500 - 1000	T	0,10 - 0,16	1
Platin	Draht	1400	T	0,18	1
Platin	rein, poliert	200 - 600	T	0,05 - 0,10	1
Porzellan	glasiert	20	T	0,92	1
Porzellan	weiß, leuchtend		T	0,70 - 0,75	1
rostfreier Stahl	Blech, poliert	70	LW	0,14	9
rostfreier Stahl	Blech, poliert		SW	0,18	9
rostfreier Stahl	Blech, unbehandelt, etwas zerkratzt	70	LW	0,28	9
rostfreier Stahl	Blech, unbehandelt, etwas zerkratzt	70	SW	0,3	9
rostfreier Stahl	gewalzt	700	T	0,45	1
rostfreier Stahl	Legierung, 8% Ni, 18% Cr	500	T	0,35	1
rostfreier Stahl	sandgestrahlt	700	T	0,7	1
rostfreier Stahl	Typ 18-8, glänzend	20	T	0,16	2
rostfreier Stahl	Typ 18-8, oxidiert bei 800°C	60	T	0,85	2
Sand			T	0,6	1
Sand		20	T	0,9	2
Sandstein	poliert	19	LLW	0,909	8
Sandstein	rau	19	LLW	0,935	8
Schlacke	Kessel	0 - 100	T	0,97 - 0,93	1
Schlacke	Kessel	200 - 500	T	0,89 - 0,78	1
Schlacke	Kessel	600 - 1200	T	0,76 - 0,70	1
Schlacke	Kessel	1400 - 1800	T	0,69 - 0,67	1
Schmirgelpapier	grob	80	T	0,85	1
Schnee:	siehe Wasser				
Silber	poliert	100	T	0,03	2
Silber	rein, poliert	200 - 600	T	0,02 - 0,03	1
Spanplatte	unbehandelt	20	SW	0,9	6
Stukkatur	rau, gelbgrün	Okt 90	T	0,91	1
Styropor	Wärmedämmung	37	SW	0,6	7
Tapete	leicht gemustert, hellgrau	20	SW	0,85	6
Tapete	leicht gemustert, rot	20	SW	0,9	6
Teer			T	0,79 - 0,84	1
Teer	Papier	20	T	0,91 - 0,93	1
Titan	oxidiert bei 540°C	200	T	0,4	1
Titan	oxidiert bei 540°C	500	T	0,5	1
Titan	oxidiert bei 540°C	1000	T	0,6	1
Titan	poliert	200	T	0,15	1
Titan	poliert	500	T	0,2	1
Titan	poliert	1000	T	0,36	1
Ton	gebrannt	70	T	0,91	1
Tuch	schwarz	20	T	0,98	1
Wasser	destilliert	20	T	0,96	2
Wasser	Eis, bedeckt mit starkem Frost	0	T	0,98	1
Wasser	Eis, glatt	-10	T	0,96	2
Wasser	Eis, glatt	0	T	0,97	1
Wasser	Frostkristalle	-10	T	0,98	2
Wasser	Schicht >0,1 mm dick	0 - 100	T	0,95 - 0,98	1
Wasser	Schnee		T	0,8	1
Wasser	Schnee	-10	T	0,85	2
Wolfram		200	T	0,05	1
Wolfram		600 - 1000	T	0,1 - 0,16	1
Wolfram		1500 - 2200	T	0,24 - 0,31	1
Wolfram	Faden	3300	T	0,39	1
Ziegel	Aluminiumoxid	17	SW	0,68	5
Ziegel	Dinas-Siliziumoxid, Feuerfestprodukt	1000	T	0,66	1
Ziegel	Dinas-Siliziumoxid, glasiert, rau	1100	T	0,85	1
Ziegel	Dinas-Siliziumoxid, unglasiert, rau	1000	T	0,8	1
Ziegel	Feuerfestprodukt, Korund	1000	T	0,46	1

Anhang: Emissionsgradtabelle

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissions- grad	R
Ziegel	Feuerfestprodukt, Magnesit	1000 - 1300	T	0,38	1
Ziegel	Feuerfestprodukt, schwach strahlend	500 - 1000	T	0,65 - 0,75	1
Ziegel	Feuerfestprodukt, stark strahlend	500 - 1000	T	0,8 - 0,9	1
Ziegel	Feuerziegel	17	SW	0,68	5
Ziegel	glasiert	17	SW	0,94	5
Ziegel	Mauerwerk	35	SW	0,94	7
Ziegel	Mauerwerk, verputzt	20	T	0,94	1
Ziegel	normal	17	SW	0,86 - 0,81	5
Ziegel	rot, normal	20	T	0,93	2
Ziegel	rot, rau	20	T	0,88 - 0,93	1
Ziegel	Schamotte	20	T	0,85	1
Ziegel	Schamotte	1000	T	0,75	1
Ziegel	Schamotte	1200	T	0,59	1
Ziegel	Silizium, 95% SiO ₂	1230	T	0,66	1
Ziegel	Sillimanit, 33% SiO ₂ , 64% Al ₂ O ₃	1500	T	0,29	1
Ziegel	wasserfest	d17	SW	0,87	5
Zink	Blech	50	T	0,2	1
Zink	oxidiert bei 400°C	400	T	0,11	1
Zink	oxidierte Oberfläche	1000 - 1200	T	0,50 - 0,60	1
Zink	poliert	200 - 300	T	0,04 - 0,05	1

Für die berührungslose Temperaturmessung stehen eine Vielzahl von Infrarot-Sensoren zur Verfügung. Um das für Ihre Anwendung optimale Messgerät auszuwählen, sollten die nachfolgenden Kriterien vorab berücksichtigt werden:

- Temperaturbereich
- Umgebungsbedingungen
- Messfleckgröße
- Material und Oberflächenbeschaffenheit des Messobjektes
- Ansprechzeit des Infrarotthermometers
- Schnittstelle

Temperaturbereich

Der Temperaturbereich des Sensors ist so zu wählen, dass eine möglichst hohe Auflösung der Objekttemperatur erzielt wird. Die Messbereiche sind manuell oder per digitaler Schnittstelle an die Messaufgabe anpassbar.

Umgebungsbedingungen

Die maximal zulässige Umgebungstemperatur der Sensoren muss bei der Auswahl des Messgerätes beachtet werden. Sie beträgt bis zu 250°C bei der optris CT-Serie. Durch Einsatz von Luft- oder Wasserkühlung kann die Funktion der Messgeräte auch bei noch höheren Umgebungstemperaturen gewährleistet werden. Treten zusätzlich Staubbelastungen der Atmosphäre auf, ist die Optik mittels Freiblaseeinrichtung schmutzfrei zu halten.

Messfleckgröße

Für genaue Temperaturmessungen muss das Messobjekt größer als das Sichtfeld des Sensors sein. In Abhängigkeit von der Entfernung des Sensors (E) zum Messobjekt ändert sich der zu messende Messfleckdurchmesser (M). Das Verhältnis E:M ist für die verschiedenen Optiken in Datenblättern angegeben.

Material und Oberflächenbeschaffenheit des Messobjektes

Der Emissionsgrad ist u.a. vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit des Messobjektes abhängig. Im Allgemeinen gilt: Je größer der Emissionsgrad, desto einfacher ist eine genaue Temperaturmessung mit einem Infrarot-Sensor. Der Emissionsgrad ist bei vielen Infrarotmessgeräten einstellbar. Die geeigneten Werte können z. B. der Emissionsgradtabelle im Anhang entnommen werden.

Ansprechzeit des Infrarotthermometers

Die Ansprechzeiten von Infrarot-Sensoren sind klein gegenüber Kontaktfühlern. Sie liegen im Bereich von

1 ms bis 250 ms und sind sehr stark vom verwendeten Detektorelement abhängig. Die Ansprechzeit ist nach unten durch das Detektorelement begrenzt, kann aber mit Hilfe der Elektronik an die Messaufgabe angepasst werden (z. B. Mittelwertbildung oder Maximalwerthaltung).

Schnittstellen für die Signalausgabe

Die Schnittstelle ermöglicht die Auswertung der Messergebnisse. Zur Verfügung stehen:

- Stromschnittstelle 0 / 4 - 20 mA
- Spannungsausgang 0 - 10 mV
- Thermoelement (Typ J, Typ K)
- Busschnittstellen, CAN und DP
- RS232, RS485, USB, Relais, Ethernet.

