



Mehr Präzision.

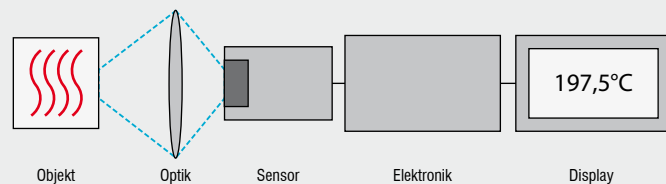
Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung



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.



Infrarot System

Die Vorteile der berührungslosen Temperaturmessung liegen klar auf der Hand:

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

Zu beachten:

- Das Messobjekt muss für den Sensor sichtbar sein
- Die Optik des Sensors muss vor Verschmutzungen geschützt werden
- Es können nur Oberflächentemperaturen gemessen werden

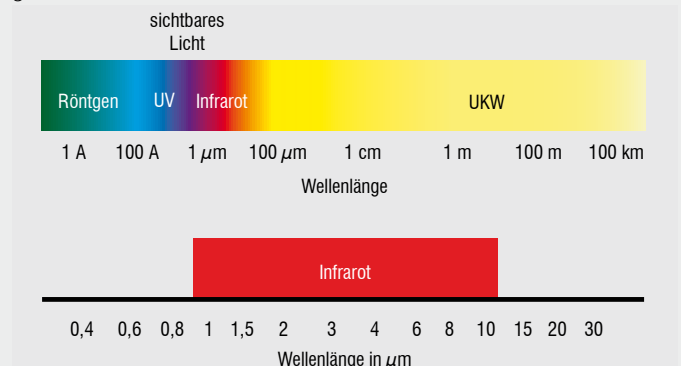


William Herschel (1738 - 1822)



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 empfindlichen 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:

$$\gamma \cdot f = c$$

Der infrarote Spektralbereich nimmt im gesamten elektromagnetischen Strahlungsspektrum nur einen sehr begrenzten Abschnitt ein. Er reicht vom Ende des sichtbaren Spektralbereichs von etwa $0,78 \mu\text{m}$ bis zu Wellenlängen von $1000 \mu\text{m}$.

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

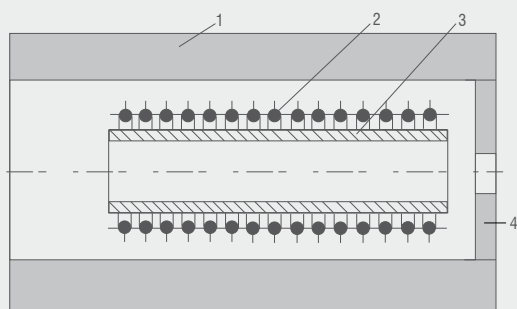
Um 1900 definierten Planck, Stefan, Boltzmann, Wien und Kirchhoff das elektromagnetische Spektrum genauer und stellten qualitative und quantitative Zusammenhänge zur Beschreibung der Infrarotenergie her.

Der schwarze Strahler

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

$$\alpha = \varepsilon = 1 \quad (\alpha \text{ Absorptionsgrad, } \varepsilon \text{ Emissionsgrad})$$

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



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 % 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_{λ_s} des schwarzen Strahlers in den Halbraum in Abhängigkeit von seiner Temperatur T und der betrachteten Wellenlänge λ .

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

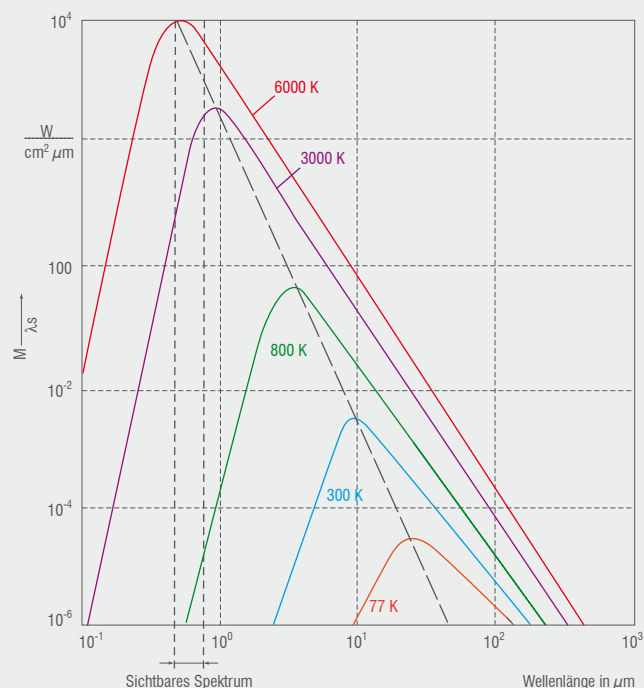
C = Lichtgeschwindigkeit

$$C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$$

$$C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ K m}$$

h = Plancksches Wirkungsquantum

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



Spektrale spezifische Ausstrahlung M_{λ_s} des schwarzen Strahlers in Abhängigkeit von der Wellenlänge

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.

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

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.

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

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 Objektoberfläche abgegebenen Strahlung auch reflektierte Strahlung aus der Umgebung und unter Umständen durch den Körper hindurch gelassene Infrarotstrahlung.

$$\text{Es gilt: } \varepsilon + \varphi + \tau = 1$$

ε der Emissionsgrad

φ der Reflexionsgrad

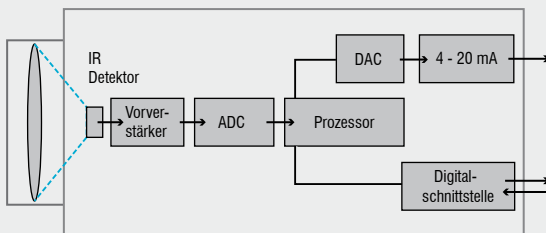
τ der Transmissionsgrad

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

$$\varepsilon + \varphi = 1$$

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 Infrarotthermometers. Die vom Messobjekt ausgehende Infrarotstrahlung wird mittels einer Eingangsoptik auf ein Infrarot-Detektorelement fokussiert, welches 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 Infrarotthermometer wegen der intern sowieso digital erfolgenden Messwertverarbeitung auch digitale Schnittstellen (USB, RS232, RS485, Ethernet, Profibus) zur Datenausgabe und für den Zugriff auf Geräteparameter.

Infrarotdetektoren

Das wichtigste Element jedes Infrarotthermometers ist der Strahlungsaufnehmer, auch Detektor genannt.

Es werden 2 Hauptgruppen von Infrarotdetektoren unterschieden.

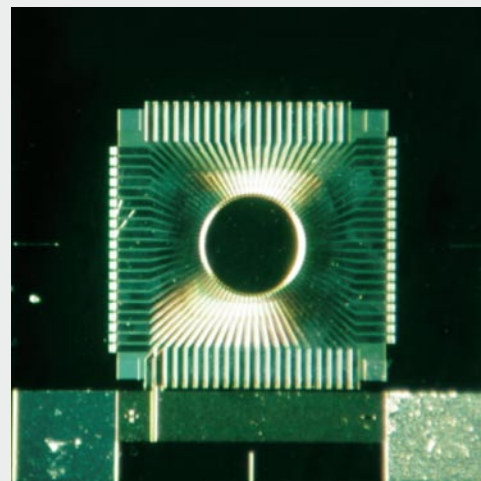


Thermische Detektoren

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.

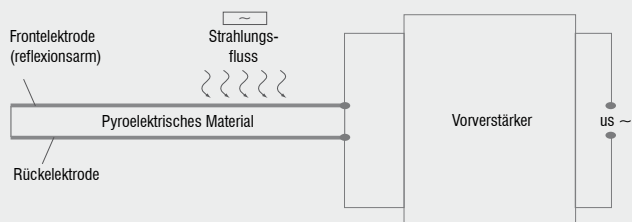
Strahlungsthermoelemente (Thermosäulen)

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



Prinzipieller Aufbau eines pyroelektrischen Detektors

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 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.

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 Zeit-

konstanten 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:

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

Da die reflektierte Umgebungsstrahlung und die Eigenstrahlung des Infrarotthermometers mit berücksichtigt werden müssen, ändert sich die Formel zu

$$U = C (\epsilon T_{\text{obj}}^4 + (1 - \epsilon) T_{\text{amb}}^4 - T_{\text{pyr}}^4)$$

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

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

Da Infrarotthermometer meist nicht im gesamten Wellenlängenbereich arbeiten, ist der Exponent n abhängig von der Wellenlänge λ . n liegt für Wellenlängen von 1 bis 14 μ m im Bereich von 17 ... 2, (bei langen Wellenlängen zwischen 2 ... 3 und bei kurzen Wellenlängen zwischen 15 ... 7).

$$U = C \cdot (\epsilon T_{\text{obj}}^n + (1 - \epsilon) \cdot T_{\text{amb}}^n - T_{\text{pyr}}^n)$$

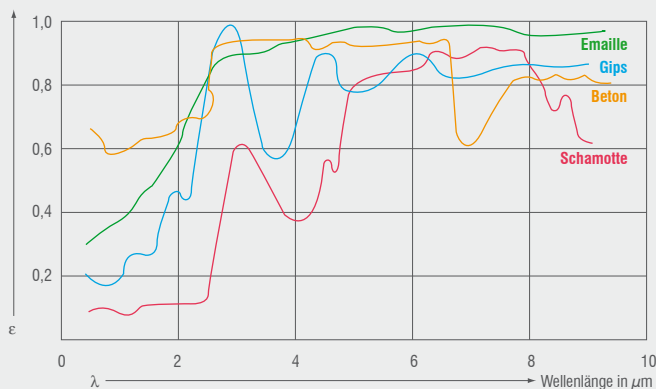
Die Objekttemperatur berechnet sich damit zu:

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

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

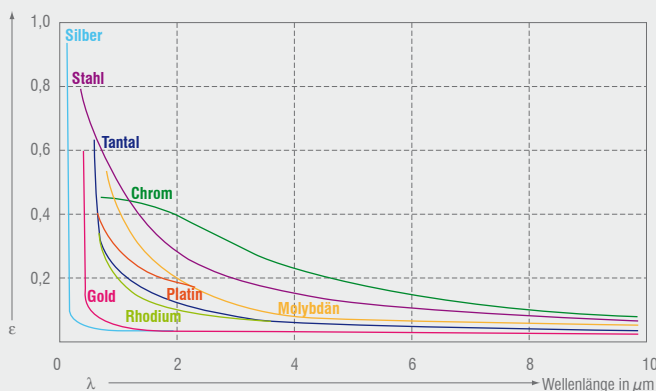
Der Emissionsgrad

Aus den Gleichungen ist ersichtlich, dass der Emissionsgrad ϵ eine zentrale Bedeutung hat, wenn man die Temperatur 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. Der Emissionsgrad ist theoretisch vom Material, von dessen Oberflächenbeschaffenheit, von der Temperatur, von der Wellenlänge und u. U. auch vom verwendeten Messaufbau abhängig. Eine Vielzahl nichtmetallischer Stoffe weist aber zumindest im langwelligen Spektralbereich unabhängig von ihrer Oberflächenbeschaffenheit einen hohen und relativ konstanten Emissionsgrad auf.



Spektraler Emissionsgrad einiger Stoffe

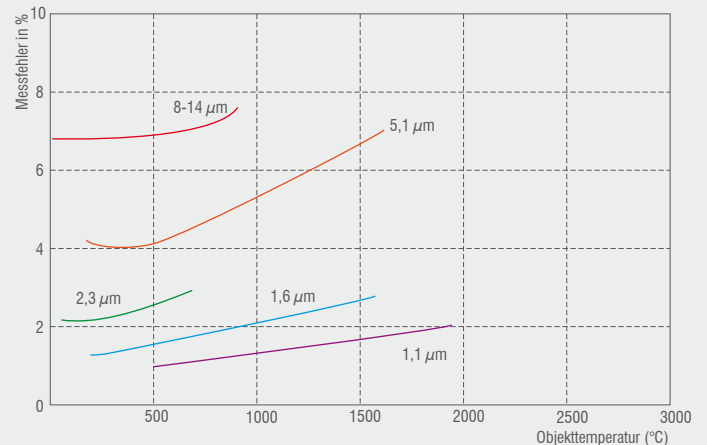
Metalle haben in der Regel einen niedrigeren, stark von der Oberflächenbeschaffenheit abhängigen und zu größeren Wellenlängen hin abfallenden Emissionsgrad.



Spektraler Emissionsgrad von Metallen

Temperaturmessung an Metallen

Diese zuvor dargestellte Abhängigkeit 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.

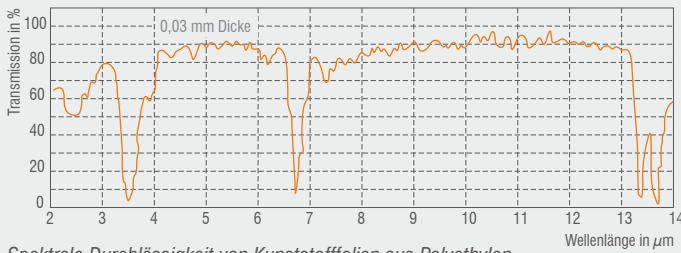


Messfehler bei 10 % falsch eingestelltem Emissionsgrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge und Objekttemperatur.

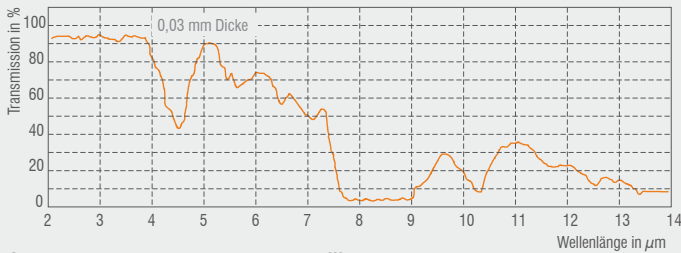
Bei Metallen liegt die optimale Wellenlänge für hohe Temperaturen mit etwa 0,8 bis 1,0 μm an der Grenze zum sichtbaren Bereich. Wellenlängen von 1,6 μm und 2,3 μm sind gut geeignet für Messungen bei niedrigeren Temperaturen.

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. Polyethylen, 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 ($> 0,4 \text{ mm}$) und pigmentierten 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 %.



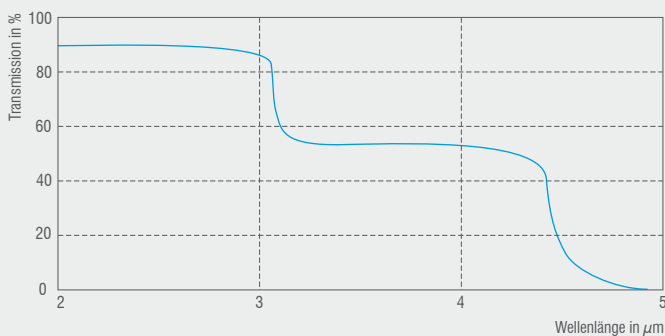
Spektrale Durchlässigkeit von Kunststofffolien aus Polyethylen



Spektrale Durchlässigkeit von Kunststofffolien aus Polyester

Temperaturmessung an und durch Glas

Werden Temperaturmessungen an Glas mit Infrarotthermometern 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. $1,0\ \mu\text{m}$, $1,6\ \mu\text{m}$ oder $2,3\ \mu\text{m}$ Wellenlänge sind für Messungen unterhalb der Oberfläche bzw. durch Glas geeignet, $5,1\ \mu\text{m}$ sind für Messungen der Oberflächentemperaturen empfehlenswert. Bei niedrigen Temperaturen sollten $8 - 14\ \mu\text{m}$ 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.



Spektrale Durchlässigkeit von Glas

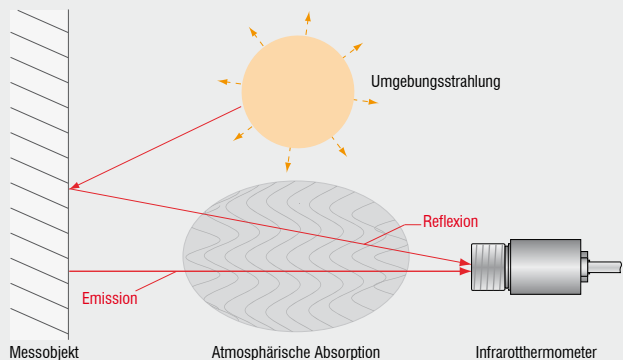
Einflüsse durch die Umgebung

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 ($8 \dots 14\ \mu\text{m}$) 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 $1,1 \dots 1,7\ \mu\text{m}$, $2 \dots 2,5\ \mu\text{m}$ und $3 \dots 5\ \mu\text{m}$.



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

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 Umgebungstemperaturinflusses. Genaueste Messergebnisse erreicht man mittels eines zweiten Temperaturmesskopfes zur automatischen Umgebungstemperaturkompensation und einem korrekt eingestellten Emissionsgrad.



Umgebungsstrahlungskompensation

Staub, Rauch und Schwebstoffe in der Atmosphäre können zur Verschmutzung der Optik und damit zu falschen Messergebnissen führen. Der Einsatz von Luftblasvorsätzen (vorschraubbare Rohrstutzen mit Druckluftanschluss) verhindert, dass sich Schwebstoffe vor der Optik ablagern. Luft- und Wasserkühlzubehör machen den Einsatz von Infrarotthermometern auch unter rauen Umgebungsbedingungen möglich.

Experimentelle Bestimmung von Emissionsgraden

Im Anhang sind die Emissionsdaten für verschiedene Materialien aus der Fachliteratur und aus Messwerten beigelegt. 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 $\leq 1/3$ 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

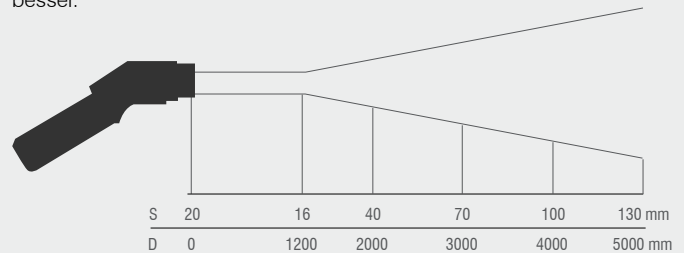
An dem zu messenden Objekt wird ein Band oder eine Farbe mit bekanntem Emissionsgrad aufgetragen. Dieser Emissionsgrad wird am Infrarotmessgerät eingestellt und der Temperaturwert des Bandes bzw. der Farbe gemessen. Anschließend erfolgt die Messung neben dieser Referenzstelle, wobei der Emissionsgrad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

Konstruktiver Aufbau von Infrarotthermometern

Infrarotthermometer 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.

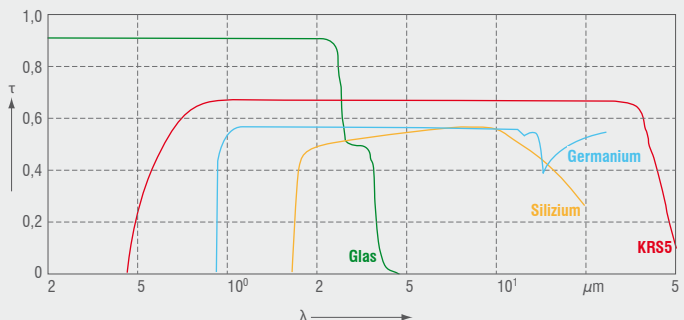
Optik und Fenster

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 D:S - das Verhältnis des Messabstandes (Entfernung Messgerät zum Messobjekt) zum Messfleckdurchmesser. Die optische Auflösung wird mit größeren Werten besser.



Optisches Diagramm eines Infrarotsensors (thermoMETER LS)

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.



Transmission typischer Infrarotmaterialien (1 mm dick)

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 Messtemperaturen bei Verwendung einer Wellenlänge $< 3 \mu\text{m}$ geeignet, bei niedrigen Temperaturen im $8 - 14 \mu\text{m}$ Bereich sind spezielle infrarotdurchlässige Materialien wie Germanium, AMTIR oder Zinkselenid zu verwenden. Bei der Auswahl des Fensters sind die folgenden Parameter ebenfalls zu berücksichtigen: Durchmesser des Fensters, Temperaturanforderungen, maximale Druckdifferenz. 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	Al2O3	SiO2	CaF2	BaF2	AMTIR	ZnS
Empfohlener Infrarotwellenlängenbereich in μm	1...4	1...2,5	2...8	2...8	3...14	2...14
Max. Fenstertemperatur in $^{\circ}\text{C}$	1800	900	600	500	300	250
Transmission im sichtbaren Bereich	ja	ja	ja	ja	nein	ja
Beständigkeit gegen Feuchte, Säuren, Ammoniakverbindungen	sehr gut	sehr gut	wenig	wenig	gut	gut

Fenster mit Antireflexionsschichten besitzen eine wesentlich höhere Transmission (bis zu 95%). 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 Infrarotthermometer und einem Vergleichsstrahler bestimmbar.

Neueste Trends bei Visiertechniken

Neue Messprinzipien und Visiertechniken ermöglichen einen immer präziseren Einsatz von Infrarottemperaturmessgeräten. 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 Kreuzlaservisierertechniken angezeigt.

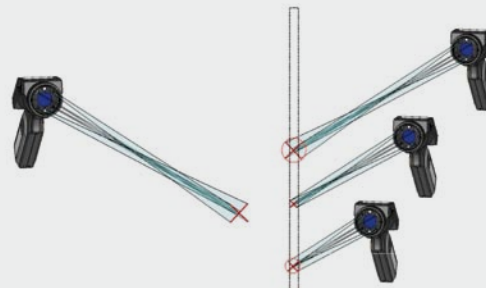
Entwicklung von Hochleistungsoptiken in Kombination mit Kreuzlaservisierertechniken

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 bequemerem 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. Desigbedingt 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 Infrarotthermometern als größenrichtiges Fadenkreuz, dessen Dimensionen exakt dem Messfleck entsprechen, darzustellen.



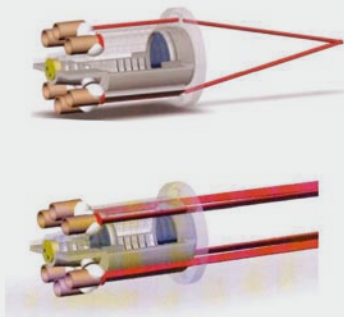
Infrarotthermometer mit Kreuzlaservisier zur exakten Messfeldmarkierung

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 Scharf punkt 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.

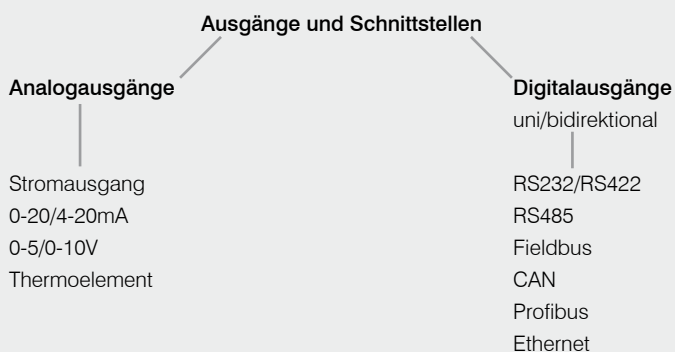
Neue Produkte nutzen nun eine Technologie, bei der eine zweilinsige Optik durch digitales Verstellen der inneren Linienposition - ähnlich einem Makro-Bild bei digitalen Fotoapparaten - auf sehr kleine Messflecken umgeschaltet werden kann. Dabei ergibt sich ein kleiner Messfleck, allerdings nur in einer 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 Infrarotthermometers, bei dem die Linienposition verstellbar ist und gleichzeitig verschiedene Laserbeleuchtungssysteme für eine größenrichtige Anzeige des Messflecks sorgen.



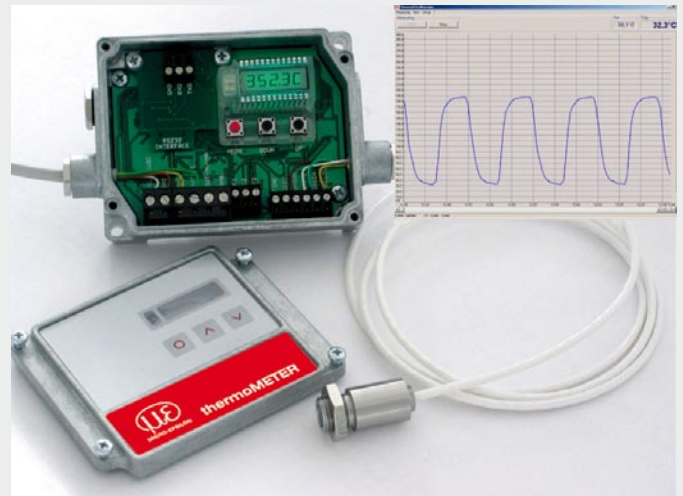
Optomechanischer Aufbau eines modernen Infrarotthermometers. Dieser Aufbau wird für die Modelle CT laser und LS benutzt

Die Elektronik: Anzeigen, Ausgänge und Schnittstellen

Die Elektronik des Infrarotthermometers linearisiert das Ausgangssignal des Detektors, um letztendlich ein lineares Stromsignal 0/4 - 20 mA oder Spannungssignal 0 - 5/10 V zu erzeugen. Dieses Signal wird bei den Infrarothandgeräten als Temperaturwert direkt auf dem LCD-Display angezeigt. Zusätzlich bieten einige Handgeräte ebenso wie die stationären Sensoren verschiedene Ausgänge und Schnittstellen zur Weiterverarbeitung an.



Beispiele für Ausgänge und Schnittstellen von Infrarotthermometern



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

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) feineingestellt 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 Infrarotthermometer mit digitaler Schnittstelle ist die Möglichkeit der Feldkalibrierung mit Hilfe verfügbarer Kalibriersoftware des Geräteherstellers.

Anwendungen von Infrarotthermometern

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

Tragbare Infrarot-Thermometer

Prinzipiell werden die portablen Infrarotthermometer 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.

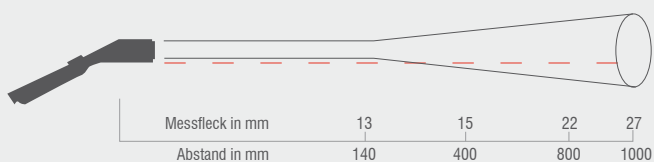
Einfach und genau - die schnelle Inspektion mit portablen Infrarotthermometern.

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 MS 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.



Tragbare Infrarot Thermometer

Temperaturen von -32 bis 530°C werden bei einer Messzeit von nur 0,3 Sekunden mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ 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

Typische Anwendungen bei der Wartung und Instandhaltung

Bei der schnellen Inspektion mit dem LS, die Messzeit beträgt nur 150ms, können Temperaturen von -32 bis 900°C erfasst werden. Mit dem eingebauten Fadenkreuz-Laservisier wird das zu messende Objekt exakt anvisiert und die exakte Messfleckgröße projiziert, 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 zweifelsige Präzisionsoptik des LS erlaubt auch die Messung sehr kleiner Objekte. Durch Umschalten in den Scharfpunkt-Modus ist es möglich, Objekte von 1 mm Größe exakt zu messen. Das Visieren wird dabei durch sich im Scharfpunkt in 62 mm Entfernung kreuzende Laser ermöglicht. Bisher am Markt erhältliche Ge-

räte waren entweder nur für größere Messentfernungen oder ausschließlich für kleinere Messobjekte ausgelegt, was den Erwerb von mehreren Modellen oder Wechseloptiken erforderte. Mit dem LS wurde ein „all in one“-Gerät geschaffen, das durch einfaches Betätigen eines Umschalters die Fokussierung auf den Nahbereich ermöglicht.



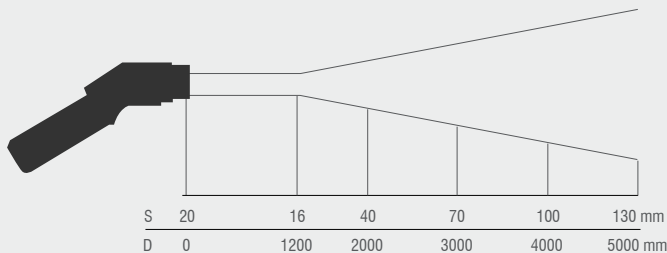
Detaillierte Infrarottemperaturmessung an einer elektrischen Steuerung mit Hilfe der eingebauten Scharfpunkt optik des LS im 1 Millimeterbereich

Eine besonders raffinierte Lösung stellt das „intelligente“ Flip-Display des LS dar. Ein eingebauter Lage-Sensor dreht die LCD-Anzeige automatisch in die bequemste Betrachtungsposition für vertikales oder horizontales Messen. Bei bisher üblichen Infrarotthermometern war bei vertikalen bzw. senkrecht nach unten gerichteten Messpositionen ein Ablesen der Anzeige schwierig und mit sportlichem Talent verbunden. In der Abbildung ist solch eine typische, vertikale Messposition bei der Temperaturmessung an elektronischen Bauelementen dargestellt. Man beachte das gut ablesbare und automatisch in die beste Position gedrehte Display. Solche „Hand Held“-Infrarotthermometer mit kleinen Messfeldgeometrien von 1 mm Größe stellen eine Alternative zum Kauf einer IR-Wärmebildkamera dar, denn unter Umständen ist wegen der hohen Produktionsstückzahlen und der Zahl der Prüf- und Testplätze ein Einsatz von mehreren IR-Wärmebildkameras an mehreren Stationen zu teuer oder der Aufwand für Umsetzungen zu hoch.



Hochgenaue Infrarottemperaturmessung mit dem LS an nur 1 mm kleinen SMD-Bauelementen beim Leiterplatten-Testlauf

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 LS 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.



Optisches Diagramm einer Scharfpunktophik

- 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 Infrarotthermometern lokalisiert werden. Überhöhte Temperaturen signalisieren, dass mehr Strom fließt. Die Kabel können an diesen Wärmepunkten auf Brüche, Korrosion oder Alterung überprüft werden.

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 Aufspüren 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 Infrarotthermometern 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 LS dient zum:

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

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

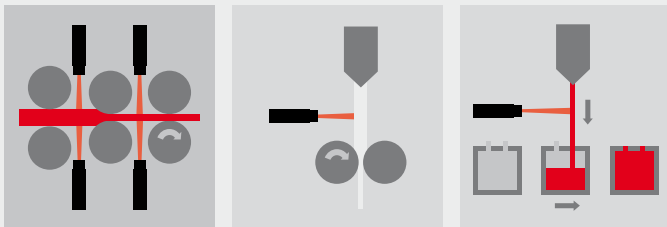
- von Motorstörungen
- von Überhitzungen am Katalysator
- am Einspritzsystem
- an der Klimaanlage
- am Kühlsystem
- am Bremssystem

Stationäre Infrarotthermometer

Im Gegensatz zu den Infrarothandgeräten werden stationäre Infrarottemperatursensoren 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 Infrarottemperatursensoren 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
- bei Messungen an elektronischen Bauteilen



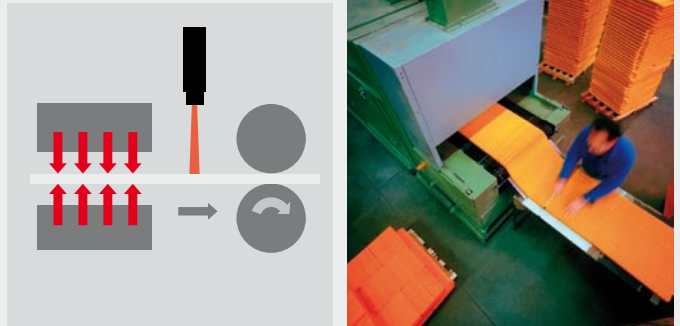
Typische Anwendungen für die Photovoltaik und Halbleiter-Industrie

In der Zellen - bzw. Modulfertigung ist die optimale und homogene Beschichtung von Oberflächen durch eine sehr hohe Genauigkeit und Temperaturauflösung der berührungslosen Temperaturmessung zu gewährleisten. Auch zur Überwachung der Homogenität bei der Produktion von hochqualitativen Glas für moderne Applikationen. Bei der Produktion von Glas für Solarpaneele als auch von Glas für Flachbildschirme wird eine hohe Homogenität von speziellen Coatings über die gesamte Ausdehnung der Oberfläche verlangt. Weitere Anwendungen finden sich beim Optimierung des Wärmeeintrages beim Induktionslöten, Heissluftlöten als auch beim modernen Laserlöten.

Neben der am Markt etablierten Solarzellen-Technologie auf Siliziumbasis gewinnt die Technologie auf Basis von III/V-, II/VI- oder I/III/VI-Halbleitern zunehmend an Bedeutung. Durch moderne und im Vergleich mit den aufwendigeren Technologieschritten der siliziumbasierten Fertigung wesentlich einfacheren und kostengünstigeren Produktion, lassen sich die Preise pro Watt installierter Leistung deutlich senken. Dabei werden zum Beispiel I/III/VI-Halbleiter mit nahezu standardmäßiger Druckmaschinenteknologie auf z. B. Metallfolien gedruckt. Bei Prozessschritten dieser Mischhalbleitermaterialien innerhalb dieser Herstellungstechnologie werden viele Modelle der thermoMETER Baureihe eingesetzt.

Typische Anwendungen für stationäre Infrarotthermometer

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



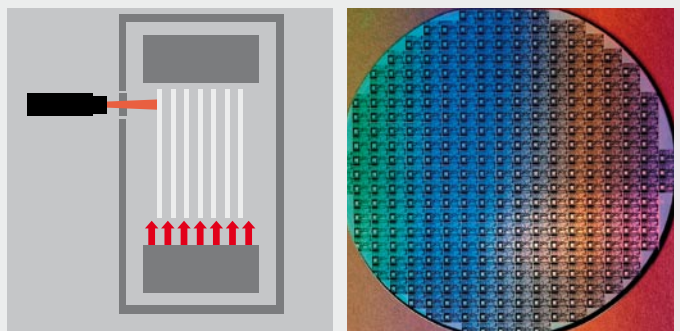
Infrarottemperaturmessung bei der Papier- und Kartonherstellung

Temperaturüberwachung und Steuerung der Walzentemperatur mit miniaturisierten Infrarottemperatursensoren

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

Kontrolle der Temperatur 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.

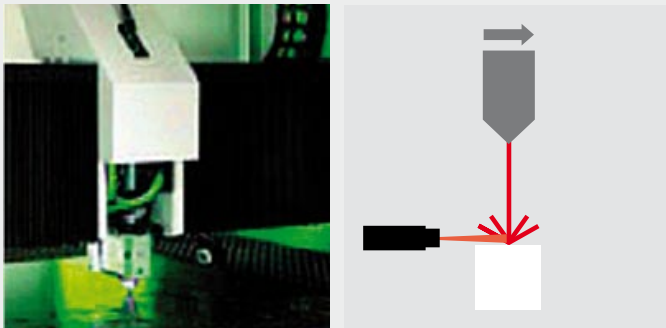


Infrarottemperaturmessung an Wafern und elektronischen Bauelementen

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

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.



Infrarottemperaturmessung beim Laserschweißen

Mit miniaturisierten Infrarottemperatursensoren CT 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 CT 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
- Protokolliermöglichkeit von Chargenproduktion
- Garantie einer hohen und gleich bleibenden Qualität der Produktion

Infrarotwärmebildkameras

Der Einsatz von portablen Wärmebildkameras gewinnt an zunehmender Bedeutung bei der vorbeugenden Instandhaltung und Wartung. Da sich Anomalien und Funktionsstörungen an sensiblen und produktionswichtigen Anlagenkomponenten oft über eine erhöhte Wärmeentwicklung „ankündigen“, lassen sich durch den konsequenten und gezielten Einsatz dieser Technologie hohe Folgekosten, verursacht durch Maschinenausfälle und Produktionsstillstand, vermeiden.



Wärmebildkamera thermoIMAGER

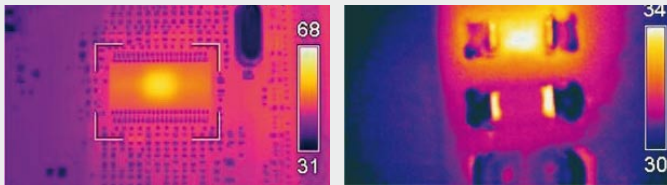
Die neuesten Wärmebildkameras sind aufgrund ihrer kleinen Bauweise, ihres geringen Gewichts und ihrer guten Ergonomie einfach zu bedienen. Über ein Notebook kann die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse unmittelbar an Ort und Stelle erfolgen, um über geeignete Instandhaltungsmaßnahmen zu entscheiden und gegebenenfalls eine Reparatur einzuleiten. Die Systeme sind gemäß der Schutzart IP67 gegen raue Umwelteinflüsse wie z.B. Staub und Spritzwasser geschützt und somit für den Industrieinsatz bestens gewappnet. Der Temperaturmessbereich der Infrarotkameras liegt zwischen -20 und 900°C. Ihre Messgenauigkeit beträgt $\pm 2\%$ vom Messwert bzw. $\pm 2^\circ\text{C}$. Eine logisch aufgebaute Menüführung in der Software ermöglicht die einfache Änderung der Grundeinstellungen (u. a. Farbpalettenwahl, Messpunktauswahl, Alarmwerte, Emissionsgrad) sowie die Verwaltung der gespeicherten Infrarotbilder oder Videos.

Der Infrarotdetektor

Die hochdynamischen Mikrobolometer sind sicher vor Überstrahlung, einfallendem Sonnenlicht und zufällig ins Bild geratenen heißen Objekten. So lassen sich z.B. Außenaufnahmen auch bei direktem Gegenlicht problemlos und ohne Gefahr für das Gerät durchführen. Die Bildwiederholfrequenz von 120 Hz kombiniert mit der hohen thermischen Auflösung von $< 0,08\text{ K}$ ermöglicht die Erfassung geringer Temperaturunterschiede in Echtzeit, auch dann noch, wenn sich die zu messenden Gegenstände bewegen oder verschiedene Messstellen in schneller Folge anvisiert werden. Die hohe thermische Empfindlichkeit sorgt auch für eine kontrastreiche Darstellung der Umgebung des zu messenden Bauteils. Damit wird eine gute Orientierung im Infrarotbild während der Messung möglich.

Intelligente Kamera

Die gemessene Temperatur wird im Display mit einer Auflösung von $0,1^\circ\text{C}$ angezeigt und der Messpunkt über ein Fadenkreuz im Display markiert. In der Praxis kann also der Anwender, nachdem er sich z.B. in einer Elektroschaltanlage zunächst einen Gesamtüberblick verschafft hat, gezielt einzelne Bauteile wie Klemmen, Kontakte oder Schütze anvisieren und einzelne Temperaturmessungen durchführen und dokumentieren. Bei der Messung sehr kleiner Objekte, wie z.B. Schaltkreise oder SMD-Bauteile auf Leiterplatten, ist diese Methode jedoch wenig geeignet, da die Ausrichtung des Fadenkreuzes auf ein so kleines Objekt sehr viel Fingerspitzengefühl verlangt oder den Einsatz eines Stativs notwendig macht. Für diese Anwendungen besitzen Infrarotkameras die Möglichkeit, auf einen Maximalwertfinder umzuschalten. Hierbei werden innerhalb eines definierten rechteckigen Bildausschnittes alle Pixel einzeln ausgewertet und der jeweilige maximale Temperaturwert angezeigt. Mit dieser sehr hilfreichen Funktion kann der Nutzer die Temperatur sehr kleiner Objekte bestimmen. Wahlweise kann natürlich auch anstelle des Maximalwertes der Minimal- bzw. Mittelwert angezeigt werden.



Temperaturmessung an einem Schaltkreis mit Hilfe der Maximalwertfunktion

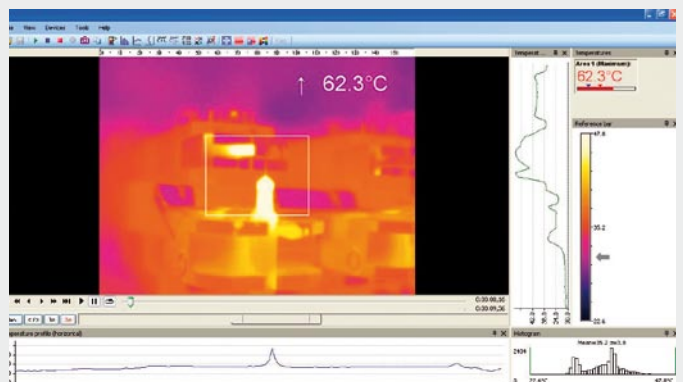
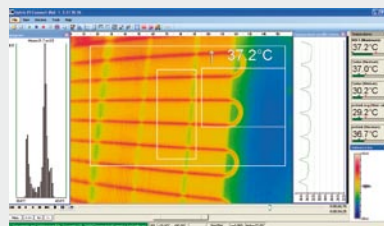
Zur weiteren ausführlichen Auswertung sowie zur Dokumentation der Messungen speichert das Messgerät die Infrarotbilder im JPEG-Format mit radiometrischen Daten zu jedem Pixel bzw. als Video im AVI oder radiometrischen RAVI Format. Eine Übertragung zu einem PC oder Laptop erfolgt einfach über die integrierte USB-Schnittstelle. Mit der zum Lieferumfang gehörenden Software kann dann die Auswertung vorgenommen werden.

Wechselobjektive für verschiedene Anwendungen

Für die verschiedenen Distanzbereiche zwischen Gerät und Objekt und um eine möglichst optimale Anpassung für unterschiedlichste Applikationen zu erreichen, stehen unterschiedliche Wechselobjektive zur Verfügung. Hierzu zählen die Überwachung mechanischer Systeme wie z.B. Messungen an Lagern, Wellen und Antriebsaggregaten, die Inspektion von Rohrleitungen und Isolierungen oder auch die klassische Gebäudethermografie. Möchte man Objekte aus größeren Entfernungen messen und hierbei eine möglichst hohe Detailauflösung einzelner Komponenten erreichen (z.B. Überprüfung von Schaltern und Isolatoren in Hochspannungsschaltanlagen), empfiehlt sich der Einsatz des 6° -Teleobjektives. Ein 23° und ein 48° Weitwinkelobjektiv runden das Angebot ab und ermöglichen z. B. die Überprüfung von elektrischen Schaltschränken mittlerer Größe „auf einen Blick“ auch bei beengten Verhältnissen, wie sie in Fertigungsanlagen häufig vorkommen. So erfasst die Kamera z.B. bei einem Abstand von nur 2 m zwischen Messobjekt und Objektiv noch eine Fläche von ca. $1,50\text{ m} \times 1,40\text{ m}$. Eine weitere wichtige Anwendung ist die bereits geschilderte Messung sehr kleiner SMD-Bauelemente auf Leiterplatten. Das 23° -Objektiv lässt sich zu diesem Zweck auf sehr kurze Entfernungen von weniger als 20 mm fokussieren (scharf stellen). Die somit erzielte Auflösung ermöglicht es, die Temperatur von Objekten bis hinunter zu einer Größe von 0,03 mm Durchmesser sicher zu bestimmen.

Software für Wärmebildkameras und Thermographielösungen

Abgerundet werden Thermographielösungen mit Software zur Online-Video-Darstellung und Aufzeichnung von schnellen thermodynamischen Prozessen mit zahlreichen Tools zur Bildanalyse. Die Möglichkeit zur komfortablen Übertragung und Verwaltung der Dateien aus der Infrarot-Kamera sowie zur nachträgliche Analyse durch die in den Infrarotbildern zur Verfügung stehenden radiometrischen Daten unterstützen die Bearbeitung der Temperaturdaten. Die Temperaturinformationen können in jedem einzelnen Bildpunkt angezeigt werden. Nachträgliche Zuordnung anderer Farbpaletten sowie die Einstellung der Farbskala helfen bei der Anpassung der Daten an die jeweiligen Erfordernisse der Analyse.



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.

Emissionsgradtabellen

Werkstoff	Werkstoff-Spezifikation	Objekt-Temperatur in °C	Emissionsgrad			Literatur
			Spektrum	T: Gesamtspektrum	SW: 2 - 5 µm, LW: 8 - 14 µm, LLW: 6,5 - 20 µm	
Werkstoff	Spezifikation	°C	Spek.	Emissionsg.	Lit.	
Aluminiumbrass		20	T	0,6	1	
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	SW	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	
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	
Aluminiumhydroxide	Pulver		T	0,28	1	
Aluminiumoxide	aktiviert, Pulver		T	0,46	1	
Aluminiumoxide	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	

Werkstoff	Spezifikation	°C	Spek.	Emissionsg.	Lit.
Ebonit			T	0,89	1
Eis	vgl. 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
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
Firmis	auf Eichenparkettboden	70	LW	0,90 - 0,93	9
Firmis	auf Eichenparkettboden	70	SW	0,9	9
Firmis	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

Emissionsgradtabellen

17

Werkstoff	Spezifikation	°C	Spek.	Emissionsg.	Lit.
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	geschmirgelt		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
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	Lampenruß	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	0,55	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
Kupferoxid	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 rauer Oberfläche	20	T	0,4	1
Lack	Bakelit	80	T	0,83	1

Werkstoff	Spezifikation	°C	Spek.	Emissionsg.	Lit.
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 versch. Farben & Qualitäten	70	LW	0,92 - 0,94	9
Lacke	8 versch. Farben & 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
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

Emissionsgradtabellen

Werkstoff	Spezifikation	°C	Spek.	Emissionsg.	Lit.
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	0,05-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
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
Schmirelpapier	grob	80	T	0,85	1
Schnee	vgl. 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
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

Werkstoff	Spezifikation	°C	Spek.	Emissionsg.	Lit.
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, Feuerfest-Produkt	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
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
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

Literatur

- 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 Vloek, 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. (Emissivity measurements with AGEMA E-Box. Technical report, AGEMA 1999.)

Für die berührungslose Temperaturmessung stehen eine Vielzahl von Infrarotthermometern 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 180°C bei der CT-Serie. Durch Einsatz von Luft- oder Wasserkühlung kann die Funktion der Messgeräte auch bei noch höheren Temperaturen 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 (D) zum Messobjekt ändert sich der zu messende Messfleckdurchmesser (S). Das Verhältnis D:S 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 Infrarotthermometer. Der Emissionsgrad ist bei vielen Infrarotmessgeräten einstellbar. Die geeigneten Werte können z. B. den Emissionsgradtabellen im Anhang entnommen werden.

Ansprechzeit des Infrarotthermometers

Die Ansprechzeiten von Infrarotthermometern 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 - 1/10 V
- Busschnittstellen, CAN und Profibus
- RS232, RS485, USB
- Ethernet

Glossar

Absorption	auch Absorptionsgrad; Verhältnis der von einem Objekt absorbierten Strahlung zur auftretenden Strahlung. Eine Zahl zwischen 0 und 1.	Reflexionsgrad	auch Reflexionsvermögen; Verhältnis der von einem Objekt reflektierten 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.	Schwarzer Strahler	Objekt mit einem Reflexionsgrad von Null. Jegliche Strahlung ist auf seine eigene Temperatur zurückzuführen.
Filter	Material, das nur für bestimmte Infrarot-Wellenlängen durchlässig ist.	Spektrale spezifische Ausstrahlung	Von einem Objekt abgegebene Energiemenge bezogen auf Zeit, Fläche und Wellenlänge ($W/m^2/\mu m$)
FOV	Sehwinkel (Field of view): Der horizontale Betrachtungswinkel eines Infrarotobjektivs.	Spezifische Ausstrahlung	Von einem Objekt abgegebene Energiemenge pro Zeit- und Flächeneinheit (W/m^2)
FPA	Focal Plane Array: Ein Infrarotdetektortyp	Strahlung	Von einem Objekt abgegebene Energiemenge bezogen auf Zeit, Fläche und Raumwinkel ($W/m^2/sr$)
Grauer Körper	Ein Objekt, das einen bestimmten Anteil der Energiemenge eines Schwarzen Körpers für jede Wellenlänge abgibt.	Strahlungsfluss	Von einem Objekt abgegebene Energiemenge pro Zeiteinheit (W)
IFOV	Momentaner Sehwinkel: Ein Maß für die geometrische Auflösung einer Infrarotkamera.	Temperaturdifferenz	Ein Wert, der durch die Subtraktion zweier Temperaturwerte berechnet wird.
NETD	Rauschäquivalente Temperaturdifferenz. Ein Maß für das Bildrauschen einer Infrarotkamera.	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.
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.)	Thermogramm	Infrarotbild
Objektsignal	Ein unkalibrierter Wert, der sich auf die Strahlungsmenge bezieht, die die Kamera von dem Messobjekt empfängt.	Transmission	auch Transmissionsgrad; Gase und Festkörper sind verschieden durchlässig. Die Transmission gibt die Menge der Infrarotstrahlung an, die sie durchlassen. Eine Zahl zwischen 0 und 1.
Palette	Die zur Anzeige eines Infrarotbildes verwendeten Farben	Umgebung	Objekte und Gase, die Strahlung an das Messobjekt abgeben
Pixel	Synonym für Bildelement. Ein einzelner Bildpunkt in einem Bild.		
Referenztemperatur	Eine Temperatur, mit der die regulären Messwerte verglichen werden können.		

Sensoren und Messsysteme von Micro-Epsilon im Überblick



Sensoren und Systeme für Weg, Position und Dimension

Wirbelstromsensoren
Optische und Lasersensoren
Kapazitive Sensoren
Linear induktive Wegsensoren
Seilzugsensoren
Laser Mikrometer
2D/3D Profilsensor (Scanner)
Bildverarbeitung



Sensoren und Messgeräte für berührungslose Temperaturmessung

IR Hand-Thermometer
Stationäre Infrarotsensoren
Wärmebildkameras



Mess- und Prüfanlagen zur Qualitätssicherung

von Kunststoff und Folien
von Reifen und Gummi
von Band-Metallen
von Automotive-Komponenten
von Glas und Scheiben