

when temperature matters

# GRUNDLAGEN

der berührungslosen  
Temperaturmessung



## Inhaltsübersicht

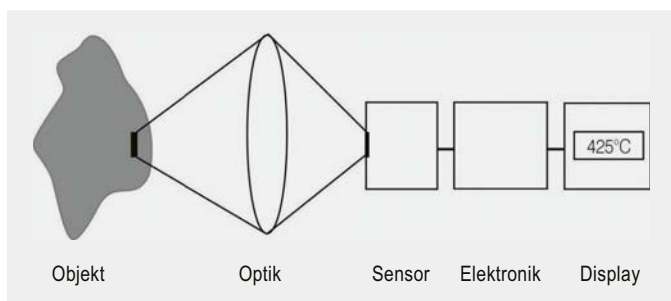
	Seite
Physikalische Grundlagen .....	4 – 9
Emissionsgrad und Temperaturmessung .....	10 – 14
Optik, Visiertechnik und Elektronik von Infrarot-Thermometern .....	15 – 18
Sensoren und Anwendungen der berührungslosen Temperaturmessung .....	19
Wärmebildkameras und Anwendungen .....	20 – 28
Infrarot-Thermometer und Anwendungen.....	29 – 31
Portable Infrarot-Thermometer.....	32
Auszug: Lexikon .....	33
Anhang: Emissionsgradtabelle .....	34 – 37
Anhang: Auswahlkriterien für Infrarot- Temperaturmessgeräte .....	38
Auszug Literatur.....	39

## 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  $-273,15\text{ °C}$  ( $= 0\text{ Kelvin}$ ) 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.



Infrarotsystem

Der Messwert kann auf einem Display angezeigt oder als analoges Signal ausgegeben werden, welches einen einfachen Anschluss an Regelsysteme der Prozesssteuerung ermöglicht.

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

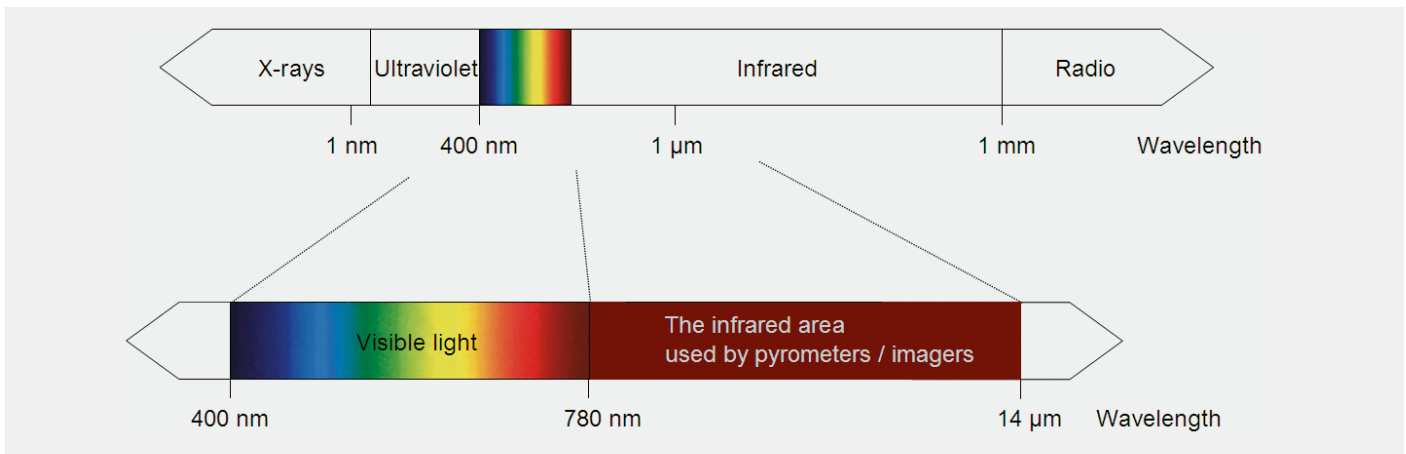


William Herschel (1738–1822)



### 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:

$$\lambda \cdot f = c$$

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  $\mu\text{m}$  bis zu Wellenlängen von 1000  $\mu\text{m}$ .

Für die Infrarot-Temperaturmessung ist nur der Wellenlängenbereich von 0,7 bis 14  $\mu\text{m}$  von Interesse. Oberhalb dieser Wellenlänge sind die Energiemengen so gering, dass Detektoren nicht empfindlich genug sind, diese zu messen.

## Physikalische Grundlagen

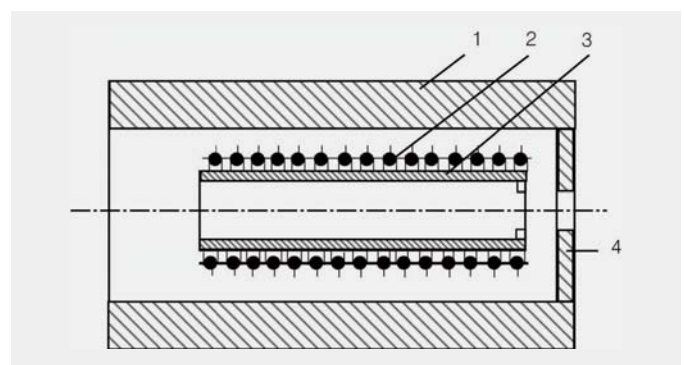
Um 1900 definierten Max Planck, Josef Stefan, Ludwig Boltzmann, Wilhelm Wien und Gustav Kirchhoff das elektromagnetische Spektrum genauer und stellten qualitative und quantitative Zusammenhänge zur Beschreibung der Infrarotenergie her.

## 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 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 Infrarot-Thermometern.



Schnittbild eines schwarzen Strahlers:

1 – keramisches Rohr, 2 – Heizung, 3 – Rohr aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 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

# Physikalische Grundlagen

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  $\lambda$ .

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

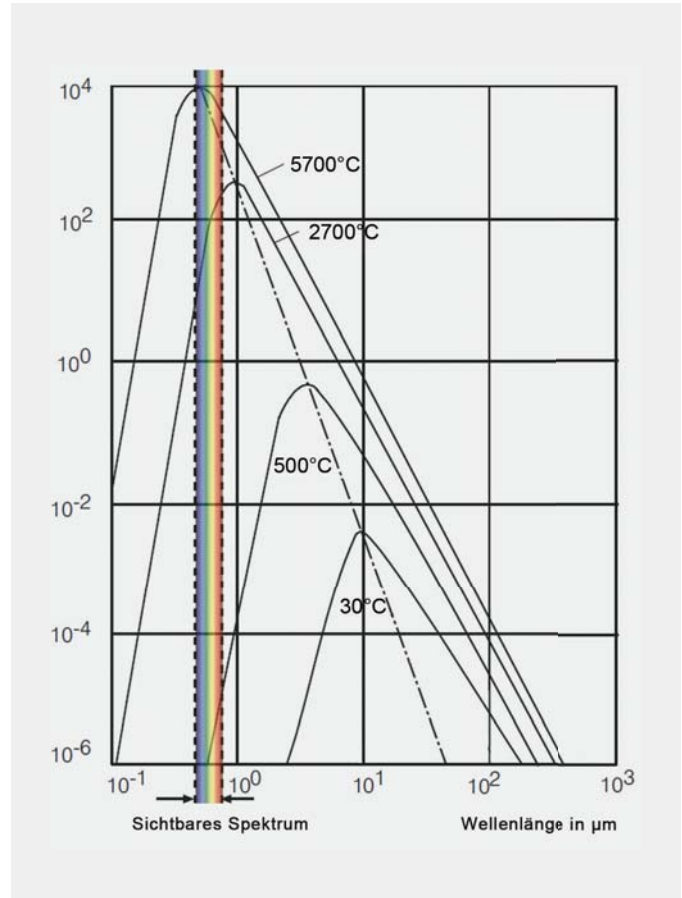
- $c$  Lichtgeschwindigkeit
- $C_1$   $3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$
- $C_2$   $1,44 \cdot 10^{-2} \text{ K m}$
- $h$  Plancksches Wirkungsquantum
- $k$  Boltzmann-Konstante

Die grafische Darstellung der Gleichung in Abhängigkeit von  $\lambda$  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-Boltzmann-Gesetz bezeichnet.

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

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.

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



Spektrale spezifische Ausstrahlung  $M_{\lambda S}$  des schwarzen Strahlers in Abhängigkeit von der Wellenlänge.

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

## Der graue Strahler

Nicht jeder Körper entspricht dem Ideal des schwarzen Strahlers. Viele Körper emittieren weniger Strahlung bei der gleichen Temperatur. Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  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.

Es gilt:  $\varepsilon + \rho + \tau = 1$

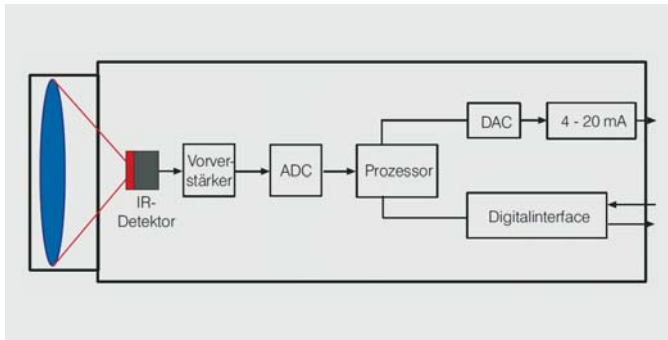
dabei ist  $\varepsilon$  der Emissionsgrad  
 $\rho$  der Reflexionsgrad  
 $\tau$  der Transmissionsgrad

Die meisten Körper haben keine Transmission im Infrarotbereich. Damit vereinfacht sich die Formel in:

$$\varepsilon + \rho = 1$$

## Aufbau und Funktionsweise von Infrarot-Thermometern

Die Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Infrarot-



Blockschaltbild eines Infrarot-Thermometers

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.

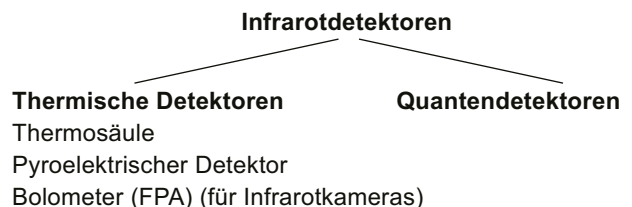
Zur Kompensation von Umgebungstemperatureinflüssen wird mit Hilfe eines zweiten Detektors die Temperatur des Messgerätes bzw. seines optischen Kanals erfasst. Die Berechnung der Temperatur des Messobjektes erfolgt also in prinzipiell drei Schritten:

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.





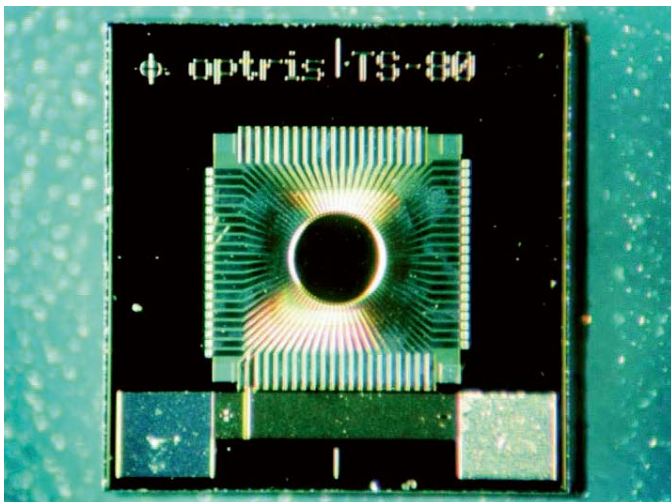
# Physikalische Grundlagen

## 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.

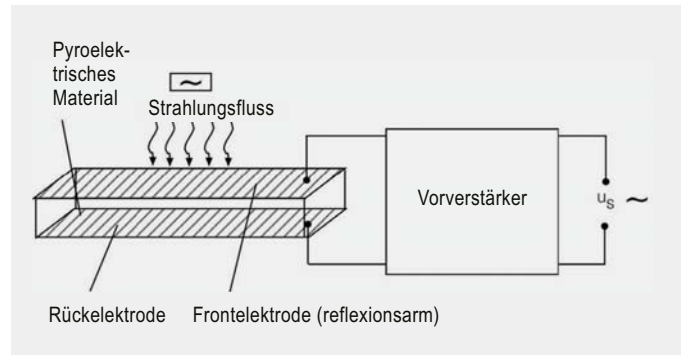
## Strahlungsthermoelemente (Thermosäulen)

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



Thermosäule TS80

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.



Prinzipieller Aufbau eines pyroelektrischen Detektors

## 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 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. FPAs (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. Typische Detektorgrößen sind heute 160x120, 320x240 und 640x480 Pixel.



## 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  $\mu$ 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 rasanten 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-Boltzmann-Gesetz:

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

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

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

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

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

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

$n$  liegt für Wellenlängen von 1 bis 14  $\mu\text{m}$  im Bereich von 17 ... 2 (bei langen Wellenlängen zwischen 2 ... 3 und bei kurzen Wellenlängen zwischen 15 ... 17).

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

Die Objekttemperatur berechnet sich damit zu:

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

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  $\varepsilon$  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 ( $\varepsilon < 1$ ). Körper, deren Emissionsgrad zusätzlich temperatur- und wellenlängenabhängig sind, z. B. Metalle, werden nichtgraue oder auch selektive Strahler genannt.

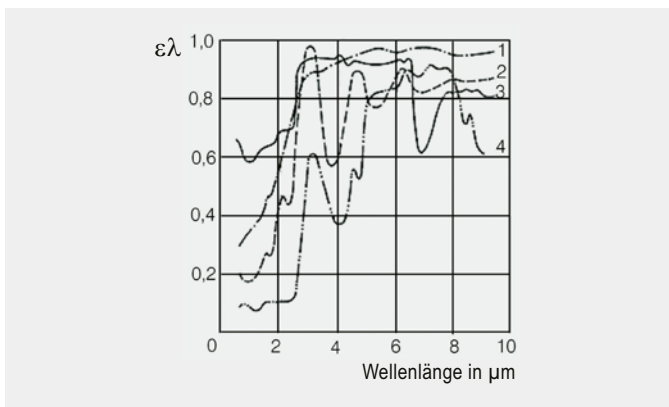
Siehe: Emissionsgradtabelle ab Seite 34

# Emissionsgrad und Temperaturmessung

## Emissionsgrad und Temperaturmessung

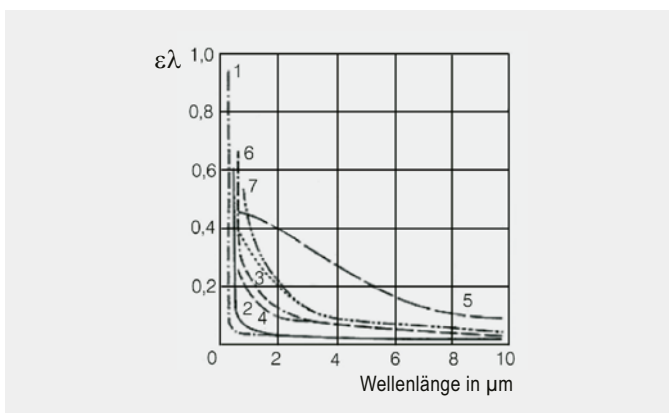
Bei der exakten Messung von Temperaturen ist der Emissionsgrad ein wesentlicher Faktor. Er ist von verschiedenen Einflüssen abhängig und muss je nach Applikation eingestellt werden.

Der Emissionsgrad ist theoretisch vom Material, von dessen Oberflächenbeschaffenheit, von der Temperatur, von der Wellenlänge, vom Messwinkel und unter Umständen 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.



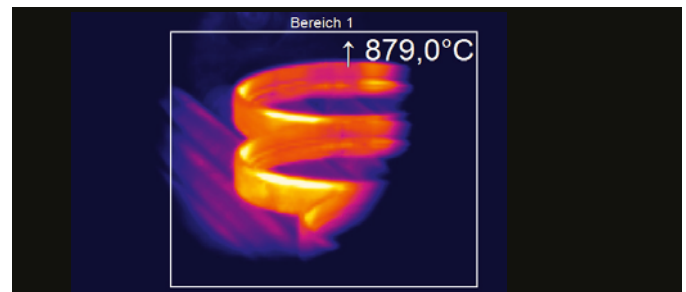
Spektraler Emissionsgrad einiger Stoffe: 1 Emaile, 2 Gips, 3 Beton, 4 Schamotte

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

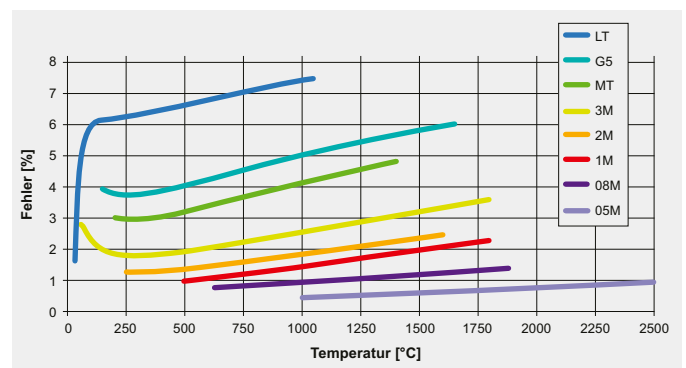
## Temperaturmessung an Metallen



Messung an Lagerringen beim Härteprozess

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 Grafik (unten) 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.

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.

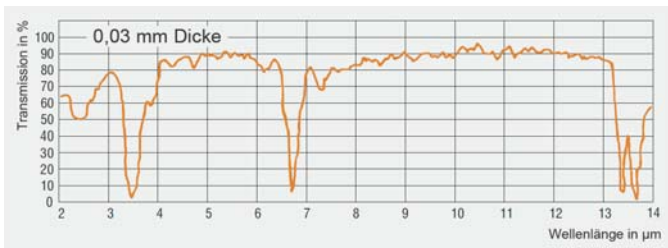


Messfehler bei 10 Prozent falsch eingestelltem Emissionsgrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge und Objekttemperatur (LT: 8–14 μm; G5: 5 μm; MT: 3,9 μm; 3M: 2,3 μm; 2M: 1,6 μm; 1M: 1,0 μm); 08M: 800 nm; 05M: 525 nm.

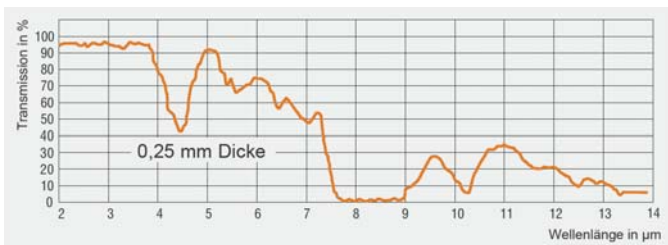
Weitere Informationen finden sie in der Broschüre zur Hochtemperatur: [www.optris.de/temperaturmessung-metallindustrie](http://www.optris.de/temperaturmessung-metallindustrie)

## 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, PTFE, FEP und Polyamid dagegen bei 7,9 µm. Bei dickeren (>0,4 mm) und pigmentierten Folien kann eine Wellenlänge zwischen 8 und 14 µm zur Temperaturmessung ausgewählt werden.

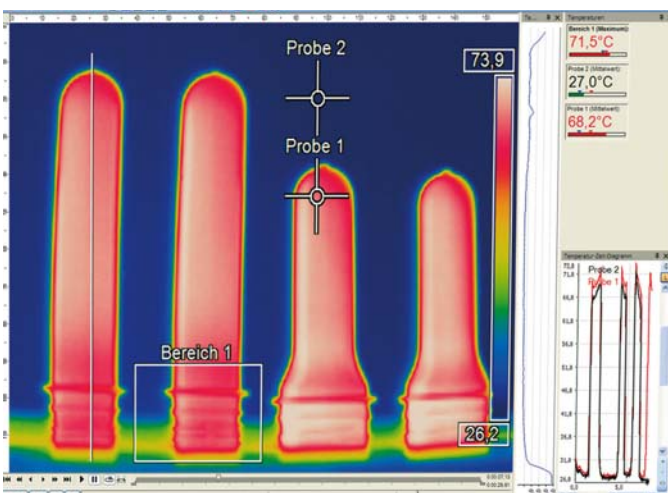


Spektrale Durchlässigkeit von Kunststofffolien aus Polyäthylen



Spektrale Durchlässigkeit von Kunststofffolien aus Polyester

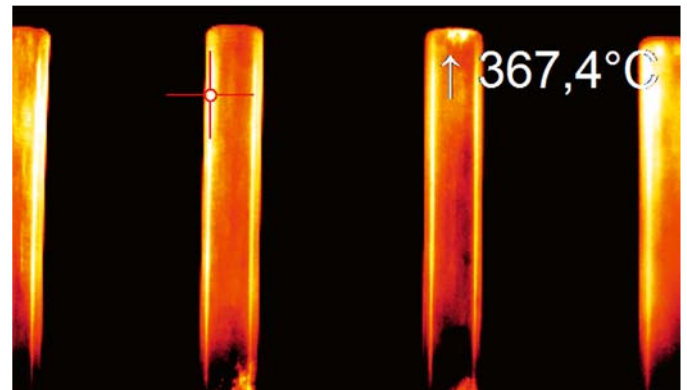
Der Infrarotgerätehersteller kann an Hand einer Probe des Kunststoffmaterials den für die Messung optimalen spektralen Bereich bestimmen. Der Reflexionsgrad liegt bei fast allen Kunststoffen zwischen 5 und 10 Prozent.



Detaillierte Kontrolle von Preforms bei der Flaschenherstellung.

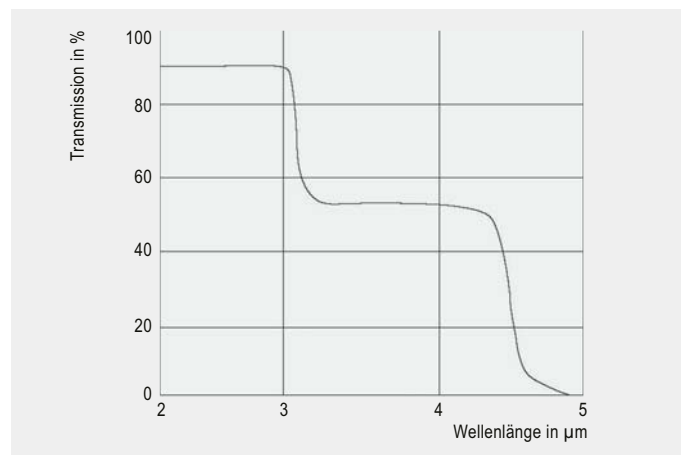
Weitere Informationen finden sie in der Broschüre zur Kunststoffanwendung:  
[www.optris.de/temperaturmessung-kunststoffverarbeitung](http://www.optris.de/temperaturmessung-kunststoffverarbeitung)

## Temperaturmessung an Glas



Hot-Spot-Messung an Glasröhren

Werden Temperaturmessungen an Glas mit Infrarot-Thermometern oder der Spezialkamera PI G7 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 und 7,9 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.



Spektrale Durchlässigkeit von Glas

Weitere Informationen finden sie in der Broschüre zur Glasanwendung:  
[www.optris.de/temperaturmessung-glasindustrie](http://www.optris.de/temperaturmessung-glasindustrie)

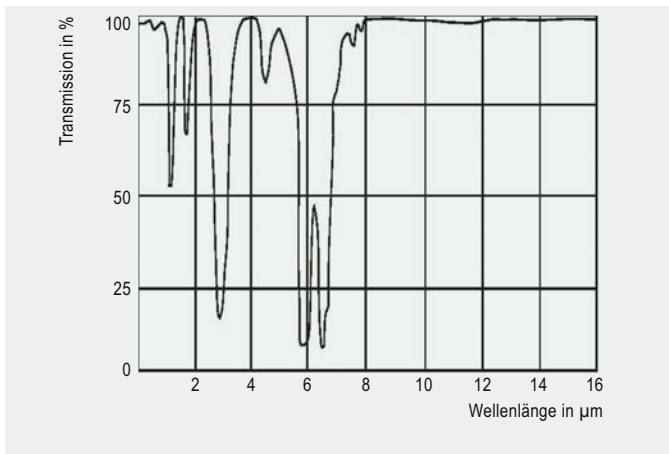
# Emissionsgrad und Temperaturmessung

## Einflüsse durch die Umgebung

Aus der unten stehenden 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  $\mu\text{m}$ ) 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

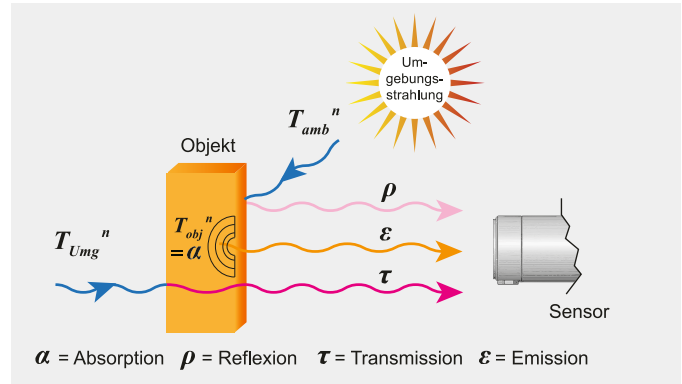
1,1 ... 1,7  $\mu\text{m}$ , 2 ... 2,5  $\mu\text{m}$  und 3 ... 5  $\mu\text{m}$ .

Weitere Einflussgrößen 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.



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

Staub, Rauch und Schwebstoffe in der Atmosphäre können 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.



Umgebungsstrahlungskompensation

## 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 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  $\epsilon$  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:

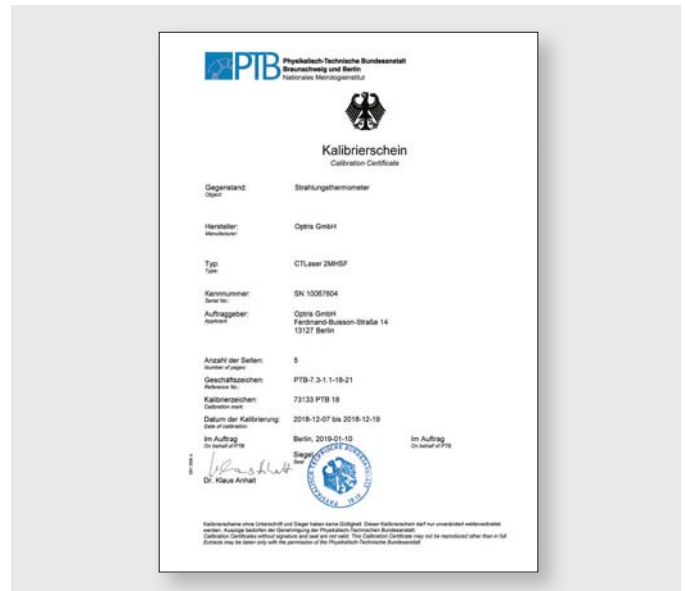
An dem zu messenden Objekt wird ein Band oder eine Farbe mit bekanntem Emissionsgrad aufgetragen. Dieser Emissionsgrad wird am Infrarotmessgerät eingestellt und der Temperaturwert des Bandes bzw. der Farbe gemessen. Anschließend erfolgt die Messung neben dieser Referenzstelle, wobei der Emissionsgrad 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 <sup>[1] [2]</sup>

Infrarot-Temperaturmessgeräte werden mit Hilfe von Schwarzen Strahlern kalibriert. Diese Strahlungsquellen können verschiedene Temperaturen mit hoher Stabilität erzeugen (siehe auch Seite 5, Abschnitt zum Schwarzen Strahler). Für den Kalibrierprozess ist es wichtig, den genauen Wert der Strahlungstemperatur zu kennen. Der Wert wird entweder mit einem Kontaktthermometer oder mit einem Transfornormal-Strahlungsthermometer gemessen und daraufhin zur Justage/ zum Einmessen der Infrarotsensoren verwendet. Für eine Kalibrierung durch den Kunden oder ein akkreditiertes Kalibrierlabor sollten die Kalibriertemperaturen in der Nähe der Temperaturen liegen, die in der jeweiligen Applikation auftreten.

Transfornormal-Strahlungsthermometer wie LS-PTB, CTlaser 2MH SF-PTB und Exactus Optical Thermometer-PTB werden zur Messung der Strahlungstemperatur der Referenzquellen verwendet. Sie werden in regelmäßigen Abständen durch die PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) kalibriert.

Auf Grundlage des PTB kann die Gerätevariante als hochpräzises Referenz-Infrarot-Thermometer für den Kunden gefertigt werden. Die DCI-Geräte werden mit vorselektierten Bauteilen gefertigt, welche eine hohe Stabilität der Messung gewährleisten. In Kombination mit einer speziellen Kalibrierung an drei Kalibrierpunkten kann für die Temperaturmessung des DCI CTlaser LT an diesen Referenzpunkten eine höhere Genauigkeit angegeben werden.



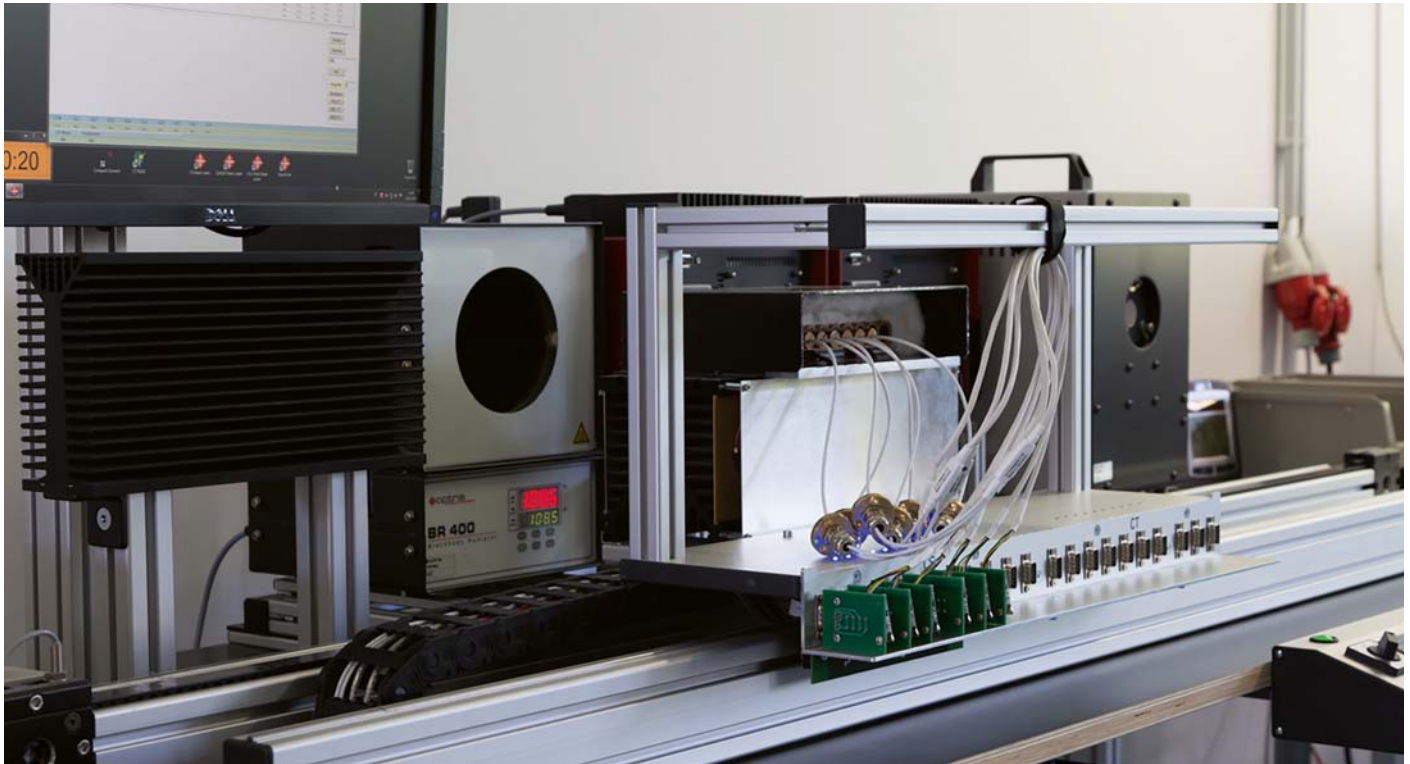
Zertifikat der PTB



Transfornormal-Strahlungsthermometer CTlaser PTB



# Emissionsgrad und Temperaturmessung



Automatisierte Kalibrierstation

Die Optik von Infrarot-Temperaturmessgeräten wird in der Regel durch das Verhältnis von Messentfernung ( $D$ ) zu Messfelddurchmesser ( $S$ ) beschrieben ( $D:S$ ). Je nach Güte der Optik empfängt das Messgerät 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. Resultierend aus diesen Zusammenhängen verwenden alle Hersteller von Infrarot-Temperaturmessgeräten 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 %.

Bei der Erstellung von Kalibrierzertifikaten wird neben der Raumtemperatur und Luftfeuchte des Kalibrierlabors auch der Messabstand und der Durchmesser der Strahleröffnung (Kalibriergeometrie) protokolliert.



Dem hohen technischen Anspruch wird man nicht nur bei der Produktion der Messgeräte gerecht, sondern auch bei der aktiven Beteiligung an branchenwichtigen Standardisierungsprozessen. Aktuell arbeiten Entwicklungsingenieure u.a. in den Fachausschüssen für *Angewandte Strahlungsthermometrie* (GMA 8.1) und *Temperaturmessung mit Wärmebildkameras* (GMA 8.16) des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) mit.



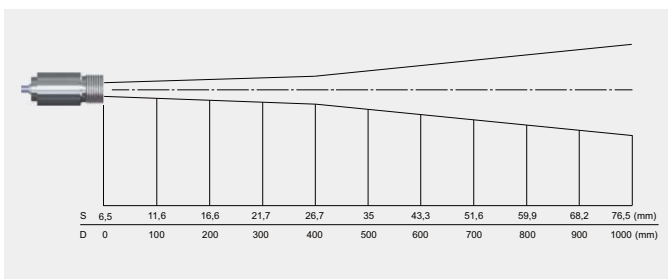
## Optik, Visiertechnik und Elektronik von IR-Thermometern

### Konstruktiver Aufbau von Infrarot-Thermometern

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 Temperaturexgangssignal steht.

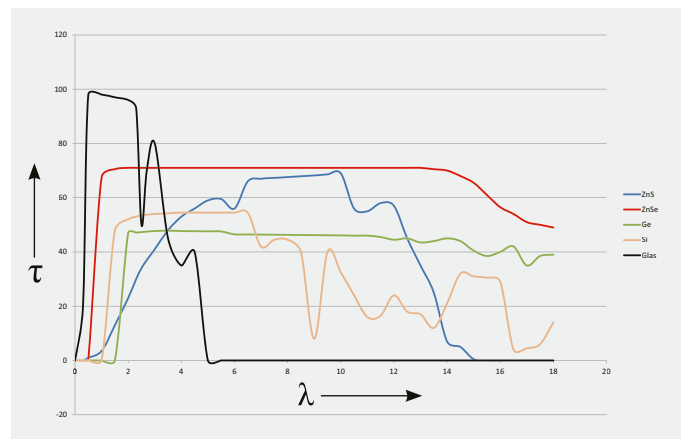
### Optik und Fenster

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 Verhältniswerten besser.



Optisches Diagramm eines Infrarotsensors CT.

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)  
Glas, Germanium (Ge), Silizium (Si), Zinksulfid (ZnS), Zinkselenid (ZnSe)

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 geeignet, bei niedrigen Temperaturen im 8 bis 14 µm Bereich sind spezielle infrarotdurchlässige Materialien wie Germanium oder Zinkselenid 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.

# Optik, Visiertechnik und Elektronik von IR-Thermometern

Fenstermaterial / Eigenschaften	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	BaF <sub>3</sub>	ZnS	ZnSe	KRS <sub>5</sub>	Ge	Si
Empfohlener Infrarotwellenlängenbereich in µm	1 ... 4	1 ... 2,5	2 ... 8	2 ... 8	2 ... 14	2 ... 14	1 ... 14	2 ... 14	1,5 ... 8
Max. Fenstertemperatur	1800	900	600	500	250	250	k. A.	100	250
Transmission im sichtbaren Bereich	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein
Beständigkeit gegen Feuchte, Säuren und Ammoniakverbindungen	sehr gut	sehr gut	wenig	wenig	gut	gut	gut	gut	sehr gut
Geeignet für UHV	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja

Die Tabelle zeigt verschiedene Fenstermaterialien im Überblick.

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-Thermometer und einem Vergleichsstrahler bestimmbar.

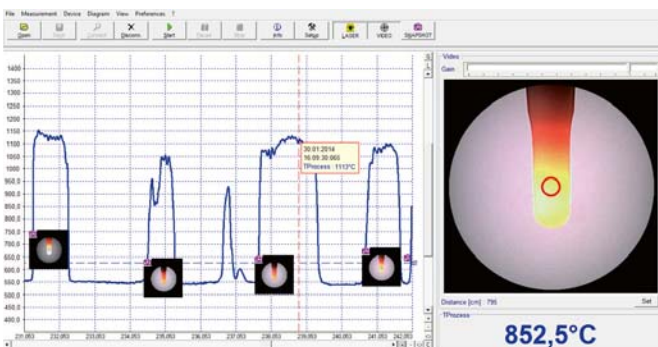
## Neueste Trends bei Visiertechniken

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 Kreuzlaserservisertechniken angezeigt. Bei anderen Geräten ersetzen Videokamerachips aufwendige optische Visiersysteme.

## Entwicklung von Hochleistungsoptiken in Kombination mit Kreuzlaserservisertechniken

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.



Die Software Compact Connect bietet umfangreiche Einstellungsmöglichkeiten für Video-Pyrometer.

### Das neue Doppel-Laser-Konzept

Das Doppel-Laservisier hilft bei der Ausrichtung des Sensors. Die Laser werden so justiert, dass sich der Infrarot-Messfleck innerhalb der beiden Laserpunkte befindet. Im Scharfpunkt der jeweiligen Optik liegen beide Laserpunkte übereinander und markieren somit als ein Laserpunkt den minimalen Messfleck. Somit lässt sich der Sensor exakt auf das zu messende Objekt positionieren.

### Das Fadenkreuz-Prinzip der Videopyrometer

Durch Nutzung neuer Laserbeleuchtungs-Technologien ist es gelungen, den Messfleck von Infrarot-Thermometern mit Hilfe eines sichtbaren Fadenkreuzes darzustellen.

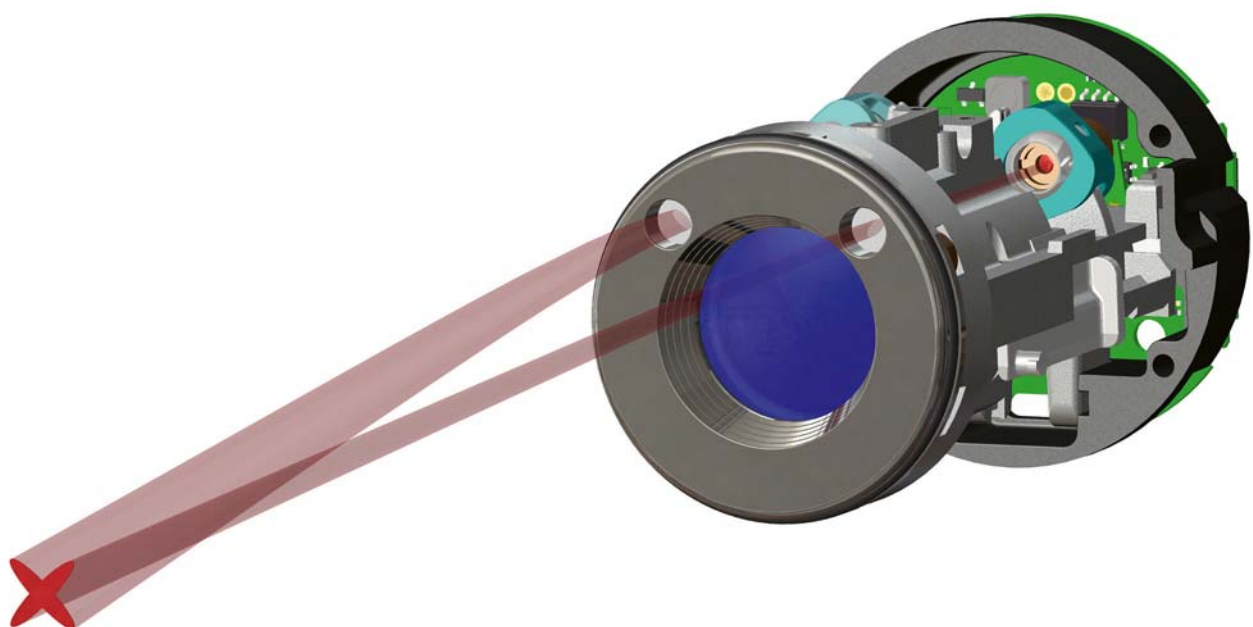
Dabei werden zwei im 90°-Winkel um den infrarotoptischen Messkanal angeordnete Laserdioden mit Liniengeneratoren versehen. Die Laserlinien erzeugen somit auf der Objektebene ein Fadenkreuz, welches unabhängig von der jeweiligen Entfernung immer präzise den Mittelpunkt des Messflecks markiert.

Mit Hilfe dieser Technologie ist es erstmals möglich, die Messfleckmitte mit einem Laser zu markieren, der nicht aus der Mitte der Optik austritt. Das bringt neben konstruktiven Vorteilen eine Verbesserung der praktischen Anwendbarkeit von Geräten mit gutem optischen Leistungsvermögen.

### Fester vs. flexibler Fokus

Viele Infrarot-Thermometer haben einen sogenannten Fixfokus, d.h. die Optiken sind auf eine bestimmte Messentfernung scharfgestellt. Der Nutzer sucht sich also aus einer Vielzahl von angebotenen Fokusvarianten die für ihn mehr oder weniger passende heraus. Dabei kann man auch außerhalb der voreingestellten Messentfernung ohne Abstriche an der Genauigkeit messen, allerdings ist in diesen Bereichen dann die optische Auflösung (D:S-Verhältnis) schlechter. Diese gilt nämlich immer nur für die Fokussentfernung.

Infrarot-Thermometer mit Variofokus können vom Anwender stufenlos auf die jeweils gewünschte Messentfernung ganz individuell fokussiert werden. Das hat den Vorteil, dass man in jedem Fall die bestmögliche optische Auflösung des Gerätes nutzen kann, da das D:S-Verhältnis hier für jede fokussierte Messentfernung gilt. Damit können solche Infrarot-Thermometer auch bei wechselnden Messabständen bzw. Objektgrößen einfach an die neue Messaufgabe angepasst werden.



*Innovatives Fadenkreuzprinzip der Videopyrometer*

# Optik, Visiertechnik und Elektronik von IR-Thermometern



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

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 Messfleckengröße unabhängig von der Entfernung, entsprechend den im Messflecken-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.

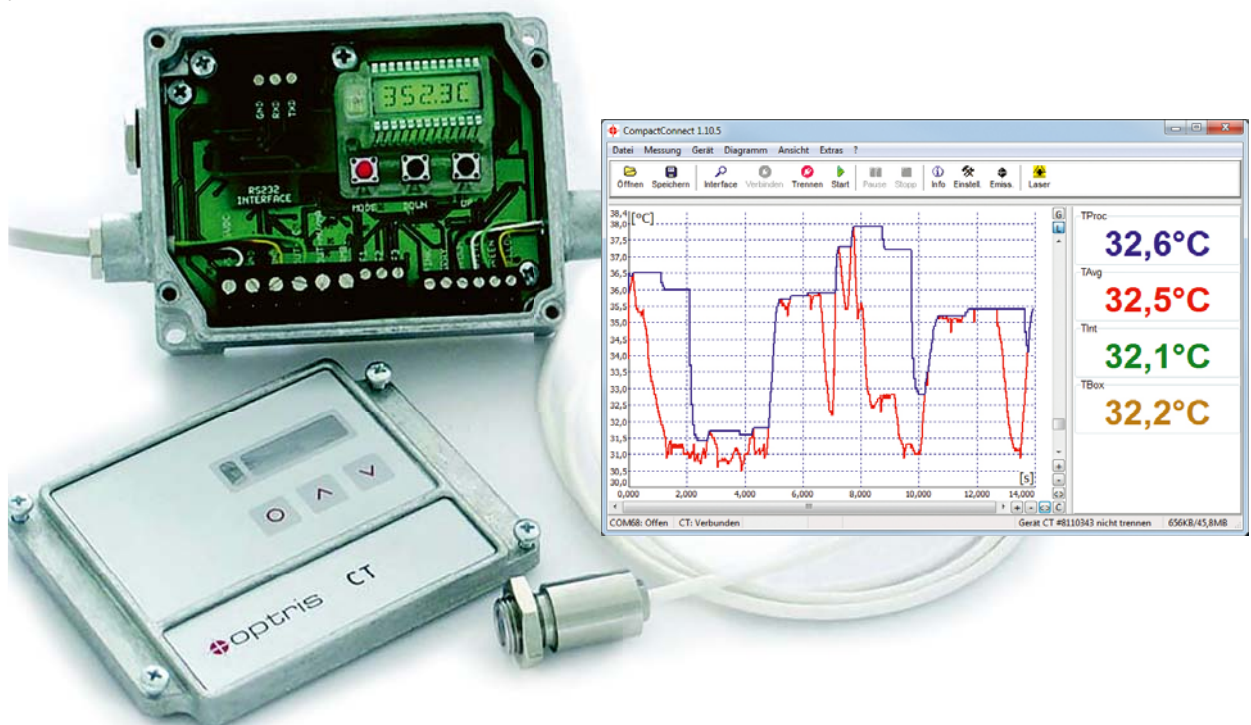
Eine Weiterentwicklung sind hier Video-Pyrometer, die eine exakte Messfeldmarkierung durch die gleichzeitige Nutzung eines Video-Moduls und eines Kreuzlaser-Visiers ermöglichen.

## 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.

Die Datenausgänge von Infrarot-Thermometern können direkt an PC, Laptop oder Messwertschreiber angeschlossen werden.

Mit PC-Software lassen sich kundenspezifische Grafiken und Tabellen erstellen.





## Sensoren und Anwendungen der berührungslosen Messung

Die berührungslose Temperaturmessung mit Infrarot-Thermometern und -Kameras ist eine sehr leistungsfähige Methode zur Beobachtung, Bewertung und Steuerung von Industrieprozessen. Anwendung findet die Messtechnik unter anderem in der Forschung & Entwicklung, vorbeugenden Instandhaltung sowie bei der Qualitätssicherung und in der Produktion. In Abhängigkeit von der Anwendung werden portable oder stationäre Infrarotsensoren ausgewählt.

### Infrarotkameras

Eine Kamera eignet sich, um Bilder der Umgebung aufzunehmen – diese können entweder statisch oder bewegt sein. Während herkömmliche Kameras das für das menschliche Auge sichtbare Licht aufnehmen, arbeiten Infrarotkameras in einem höheren Wellenlängenbereich, um so aus der detektierten Strahlung auf die Temperatur der Oberfläche zu schließen. Die so aufgenommenen Bilder können in ein Temperaturbild des aufgenommenen Gegenstands umgerechnet werden. Mit einer Falschfarbendarstellung lassen sich die verschiedenen Temperaturen durch verschiedene Farben anschaulich visualisieren. Der Anwender kann dadurch warme oder kalte Bereiche sehr einfach optisch identifizieren. Über eine entsprechende Software können die Infrarotkameras unterschiedliche Anforderungen erfüllen, so zum Beispiel Hotspots erkennen oder Line Scanning durch winzige Schlitze. Die Anwendungen von Infrarotkameras sind vielfältig und reichen von der Wartung elektrotechnischer Anlagen über die Qualitätssicherung von Werkstücken bis zur Kontrolle von Prozessen in sämtlichen Industriezweigen.

Je nach Anwendung sind Kameras mit verschiedenen Optiken, Auflösungen und Bildfrequenzen erhältlich.



Mit der IRmobile App können Sie Ihre Infrarot-Temperaturmessung direkt auf einem angeschlossenen Smartphone überwachen und analysieren. Sie benötigen dazu nur eine Optris Infrarotkamera und ein Android-Gerät ab Version 5.0.



### Infrarot-Thermometer / Pyrometer

Infrarot-Thermometer bzw. Pyrometer können die Temperatur eines Objektes berührungslos in einem Punkt messen. Infrarot-Thermometer sind sehr kompakt und lassen sich einfach in verschiedensten Anwendungsumgebungen integrieren. Es stehen Geräte zur Verfügung, die individuell nach Temperaturbereichen und Wellenlängen ausgesucht und auf die industrielle Anwendung angepasst werden können. Man unterscheidet zwischen den kompakten,

preisgünstigen Sensoren (Kompaktserie) und den leistungsstärkeren Thermometern (Hochleistungsreihe). Beide Serien können Messwerte über verschiedene Standardschnittstellen ausgegeben und so direkt für die Prozesssteuerung verwendet werden. Typische Anwendungen für Infrarot-Thermometer finden sich in vielen industriellen Prozessen,

bei denen es auf die Einhaltung exakter Temperaturen ankommt, etwa in der Kunststoff- und Metallindustrie oder bei der Herstellung von Verbundkartonagen.



# Wärmebildkameras und Anwendungen

## Wärmebildkameras und Anwendungen

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 niedriger in ihrem Stromverbrauch geworden. Seit einiger Zeit gibt es messende Thermografiesysteme, die – ähnlich einer Webcam – nur noch einen USB-Port für den Betrieb benötigen.

### Optiken von Infrarotkameras

Infrarotkameras arbeiten wie normale Digitalkameras: Sie haben ein Gesichtsfeld, das so genannte field of view, welches zwischen 6° (Teleoptik) und 90° (Weitwinkeloptik) 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. Der Vorteil 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 langwelligen Infrarotbereich (8-14  $\mu\text{m}$ ) 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

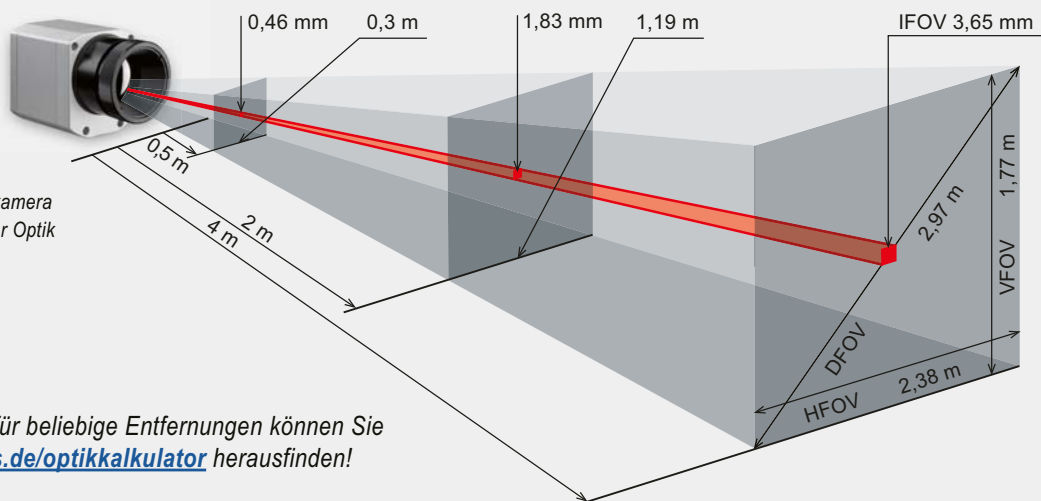
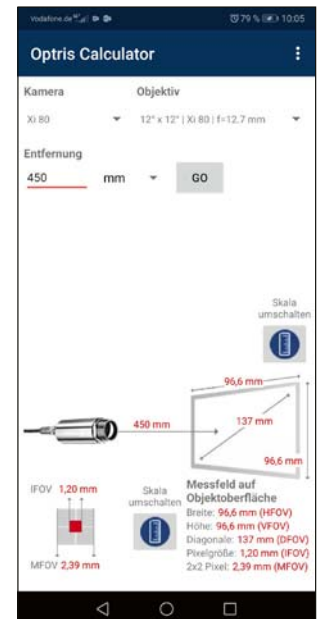
Wärmebildkameras. Sie sind als sphärische 3-Linzer oder asphärische 2-Linzer ausgeführt und müssen für thermometrisch korrekte Messungen gerade bei Kameras mit Wechselobjektiven, bezüglich ihres Einflusses auf jedes Einzelpixel kalibriert werden.

### Optikkalkulator für Wärmebildkameras



Nutzen Sie ebenso die Messfleck-Kalkulator App für unterwegs.

available on Google Play



Messfeld der Infrarotkamera  
PI 640 am Beispiel der Optik  
33° x 25°

Messfeldgrößen für beliebige Entfernungen können Sie  
unter [www.optris.de/optikkalkulator](http://www.optris.de/optikkalkulator) herausfinden!



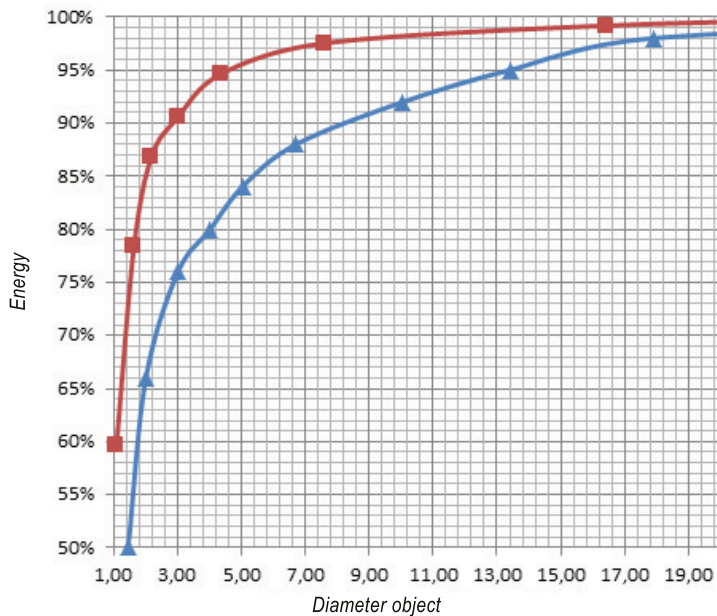


Abbildung 1:

## Geometrische Auflösung für ideale Temperaturmessung

Beim Design von Optiken für messende IR-Kameras muss besonderes Augenmerk darauf gelegt werden, wie gut der Detailkontrast eines Objektes im Bild dargestellt werden kann. Dies wird mit der Modulationsübertragungsfunktion (MTF) beschrieben. Da im Gegensatz zu visuellen Kameras bei IR-Kameras eher der thermische Kontrast wichtig ist, wird in diesem Zusammenhang die Slit Response Function (SRF) angewendet. Als Ergebnis wird ermittelt, wie viele Pixel ein Objekt ausfüllen muss, damit seine Temperatur exakt gemessen werden kann. Bei hochwertigen Infrarotoptiken sind dies 3x3 Pixel (rote Kurve; Abb.1), bei minderwertigeren Optiken können unter Umständen sogar 10x10 Pixel erforderlich sein (blaue Kurve, Abb.2), um 90% der Energie zu erhalten. Eine hochwertige Kameraoptik ermöglicht also bei gleicher Pixelanzahl des Detektors eine größere Messentfernung bzw. die exakte Temperaturmessung kleinerer Strukturen und Objekte. Die 3x3-Pixel-Geometrie bezeichnet man als MFOV (Measurement Field of View) – ein Einzelpixel auf der Objektebene wird als IFOV (Instantaneous Field of View) bezeichnet. Der MFOV ist vergleichbar mit der Messfleckdefinition bei Infrarot-Thermometern.

Herzstück einer Infrarotkamera ist in der weitaus überwiegenden Zahl aller weltweit eingesetzten Thermografiesysteme ein Focal Plane Array (FPA). FPAs sind integrierte Bildsensoren mit Größen von 6.400 bis zu 1 Million Pixel. Jeder Pixel selbst ist ein 12 x 12 bis 35 x 35  $\mu\text{m}^2$  großes Mikrobolometer. Solche 150 Nanometer dünnen, thermischen Empfänger werden durch die Wärmestrahlung innerhalb von

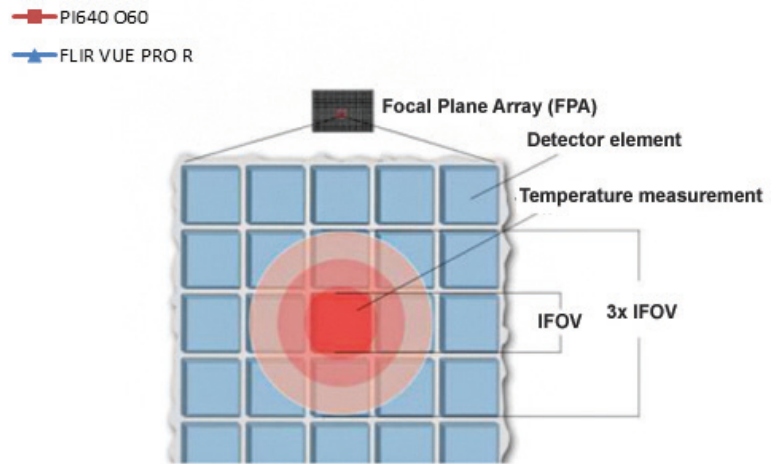


Abbildung 2:

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 FPAs 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. Infrarotkameras 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-FPAs bei definierten Temperaturen mit großer Regelgenauigkeit thermostatiert.

# Wärmebildkameras und Anwendungen

Durch die Entwicklung von immer leistungsfähigeren, kleineren und zugleich preisgünstigeren Laptops, Netbooks, Tablet-PCs und Smartphones 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 Thermografie-Systems in die Applikationsumgebung zu nutzen.

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

- 32 Hz mit 640 x 480 Pixel Bildauflösung,
- 125 Hz mit 640 x 120 Pixel (Subframe-Modus) und
- 1 kHz mit 72 x 56 Pixel.

Die USB 3.0-Technik ist sogar für XGA-Wärmebildauflösungen bis 100 Hz Videofrequenz geeignet. Durch Nutzung des Webcam-Prinzips im Thermografiebereich ergeben sich völlig neue Produkteigenschaften mit einem erheblich verbesserten Preis-/Leistungsverhältnis.

Die Infrarotkamera ist dabei über die 480 MBaud-Schnittstelle mit dem Windowsbasierten Computer, der gleichzeitig die Stromversorgung übernimmt, verbunden.

## Die Hardware von USB-Infrarotkameras

Mir der Compact Line wurden die robusten, kompakten Pyrometer mit modernen IR-Kameras fusioniert. Die Besonderheit dieser Low Budget-Kameras ist u.a. die Möglichkeit, den Scharfpunkt aus der Ferne mittels Motorfokus einzustellen und die Kamera autonom – also ohne Prozessrechner – über einen analogen Ausgang in den Prozess einzubinden. Das Novum ist hierbei, dass auch ein Hotspot analog ausgegeben werden kann.

Moderne USB-Infrarotkameras vereinen die Vorteile von kompakten, robusten Pyrometern und kompakten IR-Kameras. Neben einer Ferneinstellmöglichkeit des Scharfpunktes mittels integriertem Motorfokus können diese Kameras auch autonom arbeiten – also ohne Prozessrechner. Die IR-Kamera berechnet dann z.B. selbständig den Hotspot innerhalb des erfassten Objektfeldes und kann somit bewegten Objekten automatisch folgen. Die berechnete Temperatur des verfolgten Objektes wird direkt als analoges 0/4-20 mA-Signal ausgegeben.



*USB-Infrarotkameras zur Übertragung von Wärmebildern mit bis zu 640 x 480 Pixel und bis zu 1.000 Hz*

USB galt früher als reine Bürokommunikationsschnittstelle. 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.

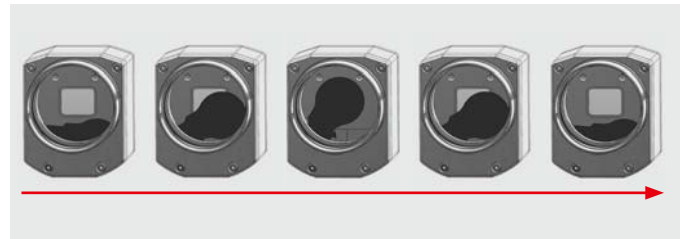
Dazu gehören:

- Schleppkettenfähige und bis zu 200 °C belastbare Kabel mit Leitungslängen von bis zu 10 m. [4]
- Bis zu 100 m Cat. 6 (Ethernet) – über USB zu GigE-Umsetzer (PoE-fähig)
- Optische Glasfaser-Ethernet-Modems für Leitungslängen von bis zu 10 km.

Auf Grund der hohen Bandbreite des USB-Busses können beispielsweise fünf 120 Hz Infrarotkameras 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 für den robusten Einsatz auf Test- und Prüfständen geeignet. 45 x 45 x 60-75 mm<sup>3</sup> Größe und 195 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 vermarktetten, messenden Infrarotkameras in bestimmten zeitlichen Abständen 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-Infrarotkamera die Eigenreferenzierung innerhalb von 250 ms. Dies ist vergleichbar mit der Dauer eines Augenlid-schlages 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 in das Gesichtsfeld des Infrarot-Sensorarrays kurzzeitig eine Temperaturreferenz hineinbewegt.*

Gerade beim Einsatz der spektral langwellig empfindlichen Kameras in der 10,6 µm-CO<sub>2</sub>-Laserbearbeitungstechnik hat sich die Möglichkeit des extern gesteuerten Verschlusses des optischen Kanals bei gleichzeitig unabhängiger Signalisierung des optomechanisch geschützten Betriebszustandes der Kamera bewährt. Es gibt aber auch spezielle CO<sub>2</sub>-Sperrfilter, die eine Temperaturmessung mit diesen IR-Kameras auch bei aktivem CO<sub>2</sub>-Laser ermöglichen.

Bei Bearbeitungslasern, die im Bereich von 900 nm bis 2,6 µm arbeiten, können langwellige IR-Kameras ohne zusätzliche Filter eingesetzt werden, da die gute Blockung des Spektralfilters auf dem Detektor ausreichend ist. Bei höheren Prozesstemperaturen und bei metallischen Oberflächen werden jedoch vorzugsweise kurzwellige Kameras eingesetzt. Eine schmalbandige spektrale Empfindlichkeit bei 800 nm bzw. 500 nm erlaubt auch hier den Einsatz dieser Kamerasysteme ohne zusätzliche Sperrfilter.

#### **Haupteinsatzgebiete des hier beschriebenen Wärmebildgerätes sind:**

- Analyse von dynamischen Wärmeprozessen bei der Produkt- und Prozessentwicklung.
- Stationärer Einsatz zur kontinuierlichen Beobachtung und Regelung thermischer Vorgänge.
- Gelegentliche Nutzung als portables Messgerät im Instandhaltungsbereich und zur Detektion von Wärmelecks. Eine einfach zu bedienende Android-App ermöglicht die Nutzung der kompakten Industriekameras auch mit dem Smartphone

# Wärmebildkameras und Anwendungen

Für die Anwendung im F&E-Bereich erweist sich die Möglichkeit einer Videoaufzeichnung mit hoher Bildfrequenz 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 einer Mikroskoplinse – 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 mit einer geometrischen Auflösung von 28 µm vermessen.



*Mikroskopoptik PI 640 für die Inspektion von Leiterplatten*

Beim stationären Einbau von USB-Infrarotkameras erweist sich deren galvanisch getrenntes Prozessinterface als vorteilhaft, bei dem aus dem Wärmebild generierte Temperaturinformationen als 0/4-20 mA- oder 0-10 V-Signal 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-Infrarotkameras die im Windows-Betriebssystem integrierten Standard USB video class bzw. HID-Treiber verwenden, entfällt jegliche Treiberinstallation. Die einzelpixelbezogene Temperaturberechnung findet im PC statt. Die im Vergleich mit visuellen Kameras eher geringen geometrischen Auflösungen von Infrarotkameras (z.B. 307.200 Pixel bei VGA-Auflösung) sorgen trotzdem für eine erstaunlich gute Bildqualität. Diese erreicht man durch einen aufwändigen softwarebasierten Rendering-Algorithmus.

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

- Zahlreiche Daten und Wärmebildexportfunktionen zur Unterstützung von Offline-Analysen
- Freipositionierbare Profildarstellung
- Beliebig viele Messfelder mit separaten Alarm-Optionen
- Auf Referenzbildern basierende Differenzvideodarstellungen
- Messung von sich bewegenden Objekten durch winzige Schlitzzeilen (Line scanning)
- Überlappung mehrerer Bilder zu einem Gesamtbild (Merging)
- Triggerung der Bilder nach definierten Ereignissen (Event grabbing)

Die Software bietet zudem einen Layout-Modus, der unterschiedlichste Darstellungsmodi speichert und restauriert. Ein Videoeditor ermöglicht die Bearbeitung der radiometrischen AVI-Dateien (.ravi). 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 Daten 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. Treiber für Linux stehen ebenfalls zur Verfügung.



## Industrielles Zubehör ermöglicht breiten Einsatz

Um die moderne Infrarotmesstechnik in der weltweiten Industrie anwenden zu können, bedarf es eines entsprechenden Zubehörs. Neben den obligatorischen (Hochtemperatur-) Kabeln und Schnittstellen-Umsetzern (bspw. von USB auf Ethernet) sind dies vor allem Schutzgehäuse für raue Umgebungen, die einen Einsatz der Kameras bis zu Umgebungstemperaturen von 250 °C bzw. 315 °C ermöglichen.

Für die Verwendung im Außenbereich stehen spezielle beheizbare Kameragehäuse zur Verfügung. Damit ist ein Einsatz unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen von -40 °C bis zu +50 °C realisierbar.

Laminare Freiblasvorsätze, die Kondensation und Staubablagerungen auf der Kameraoptik verhindern und Schutzfenster – beides kombinierbar mit den Kühl- und Schutzgehäusen – vervollständigen das Zubehörprogramm.

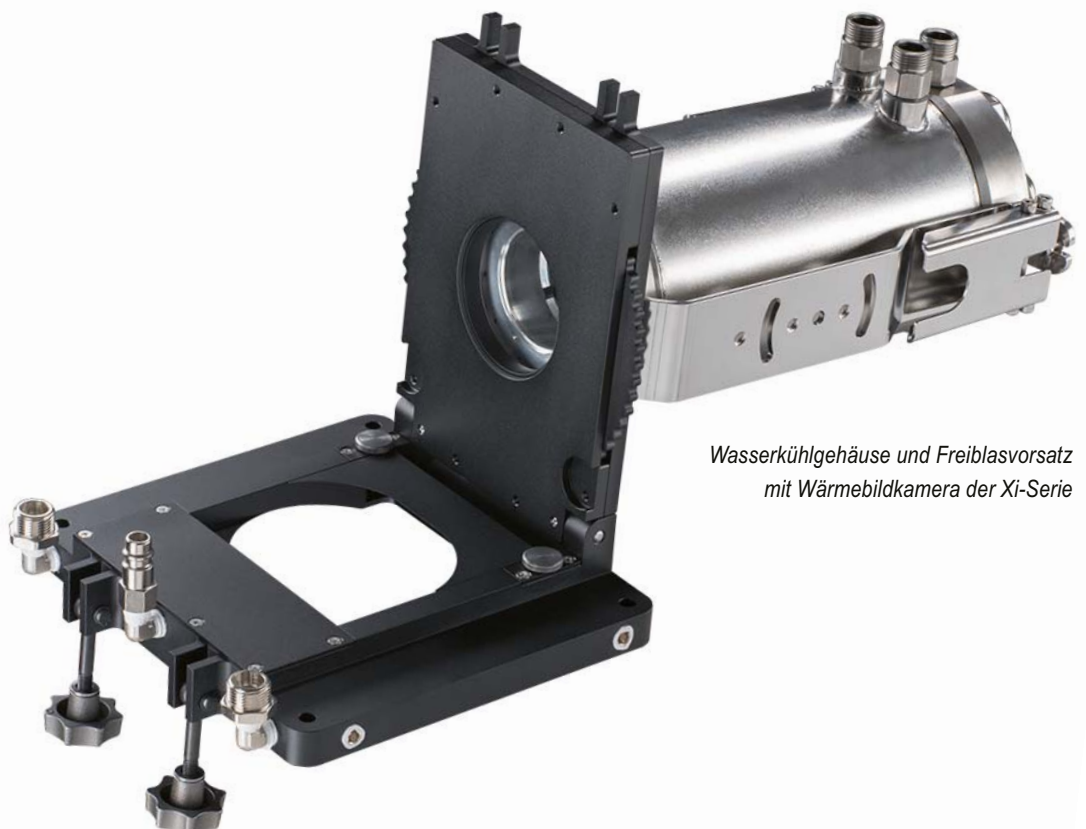
Bei extrem rauen atmosphärischen Bedingungen oder bei einfallenden Teilen sorgt ein sogenannter Shutter (servogesteuerte Verschlussklappe) für einen zuverlässigen Schutz der Kameraoptik.



Wasserkühlgehäuse mit Shutter für die Xi-Serie



Outdoor-Schutzgehäuse mit Wärmebildkamera der PI Serie



Wasserkühlgehäuse und Freiblasvorsatz mit Wärmebildkamera der Xi-Serie

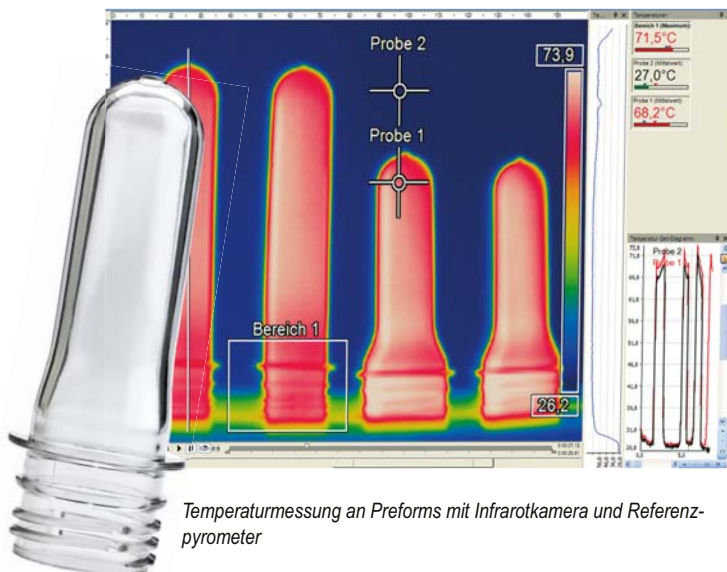
# Wärmebildkameras und Anwendungen

## Anwendungen

Im Folgenden sollen beispielhaft fünf typische Anwendungen diskutiert werden, die die Einsatzbreite von USB-Infrarotkameras beschreiben.

### 1. Optimierung von Fertigungsprozessen

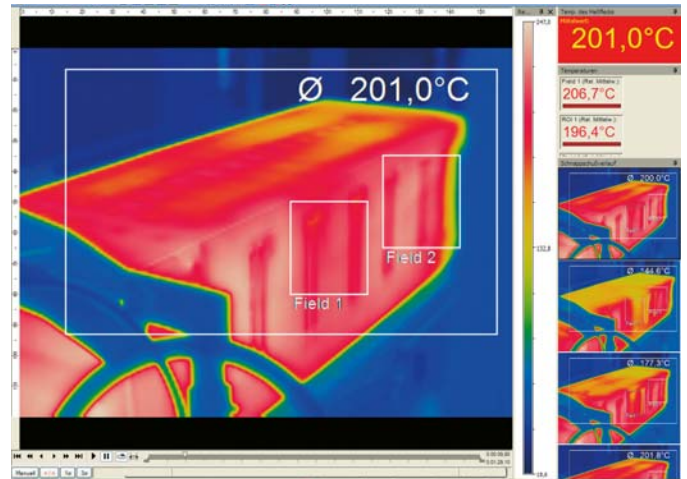
Die Herstellung von Kunststoffteilen wie PET-Flaschen erfordert eine definierte Erwärmung des sogenannten Preforms, um beim Blasformen der Flasche eine homogene Materialstärke zu garantieren. Die Fertigungsanlage wird bei Testläufen nur mit wenigen 20 mm dicken Rohlingen bei voller Arbeitsgeschwindigkeit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



Temperaturmessung an Preforms mit Infrarotkamera und Referenzpyrometer

Da der Zeitpunkt des Durchlaufs der 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 Infrarot-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 Armaturenbrettern – können durch Optimierung der Abkühlgeschwindigkeiten vermieden werden. Ähnlich dem Oszilloskop zur Analyse von elektrischen Signalverläufen ist die Infrarot-Videokamera ein wichtiges Tool zur Bewertung dynamischer thermischer Prozesse.



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

### 2. Vom Brandschutz zur Qualitätskontrolle – Infrarotkameras überwachen Hobelanlagen

Auf modernen Hobelmaschinen werden unterschiedlichste Produkte bearbeitet. Wenn Teile einer solchen Maschine zu heiß werden, könnten sich im ungünstigsten Fall die Späne entzünden und so zu einem Brand führen. Infrarotkameras detektieren überhitzte Teile sofort und bannen so wirkungsvoll die Brandgefahr. Aber die Infrarottechnik kann weit mehr leisten: Durch einen zu hohen Anpressdruck verursachte Verbrennungen auf dem Holz werden minimiert.



Die Software PIX Connect ermöglicht die Überwachung von Hobelanlagen.  
Bild: binderholz

Zur Herstellung von sägerauen Massivholzteilen werden heute Mehrseiten-Hobelmaschine genutzt, worauf das Holz geglättet, abgerichtet und ggf. profiliert wird. Eine Maschine hat mehrere Spindeln, die das Werkstück in einem Durchlauf von allen Seiten bearbeiten. Das Holz bewegt sich dabei mit einer Geschwindigkeit von bis zu 3,4 Metern pro Sekunde durch die



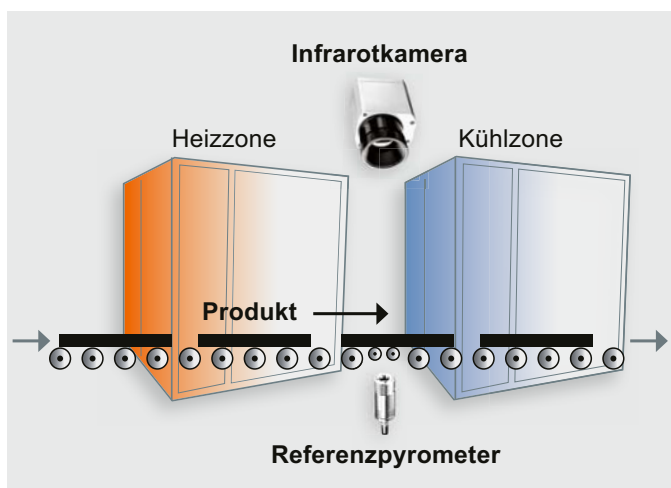
Hobelinie. Einführungslineale und Druckschuhe pressen die Holzteile gegen die Spindeln. Ist der Druck zu hoch, überhitzen die Lineale durch die große Reibung, was im schlimmsten Fall zu einem Brand führen kann. Auch Teile der Antriebstechnik, wie Getriebe, Motoren und Antriebswellen können überhitzen.

Die Überwachung von Temperaturen an den Hobelinien bietet zeitgleich die Möglichkeit, die Temperatur der Holzoberfläche auszuwerten, die sich je nach Anpressdruck ebenfalls beträchtlich erwärmen kann. Hierdurch entstehende Verfärbungen und Brandspuren beeinträchtigen die Qualität des Endproduktes. Dank der berührungslosen Temperaturüberwachung direkt in der Maschine lässt sich die Ausschussmenge reduzieren.

Werden die Schäden an Maschine und Holz frühzeitig erkannt, kann die Instandhaltung und die Produktion der entsprechenden Teile austauschen bzw. den Prozess optimieren, bevor es zum Schaden kommt. Ein Ausfall mit längerem Produktionsstillstand sowie qualitativ schlechte Holzteile werden so vermieden.

### 3. Zeilenkamera-Einsatz in Glashärtungsanlagen (Linescan)

Nachdem Baugläser in Ihre endgültige Form geschnitten wurden, müssen sie oftmals oberflächengehärtet werden. Dies geschieht in Härtingsanlagen, 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.



Wärmemessung an einer Glashärtungsanlage mit Infrarotkamera und Referenzpyrometer

Da Ofengehäuse und Kühlsektion nahe beieinander liegen, ist eine Beobachtung der aus dem Ofen transportierten Glasflächen nur durch einen winzigen Spalt möglich. Im Wärmebild erscheint das Material deshalb nur in wenigen Zeilen. Die Software erlaubt nun eine spezielle Darstellung, bei der das Gesamtbild der Glasscheiben, die mit konstanter Geschwindigkeit an dem Spalt vorbeibewegt werden, Zeile für Zeile rekonstruiert wird.

Die Kamera misst den Spalt diagonal, sodass sich bei einer 90°-Optik ein Gesichtsfeld von 111° ergibt. Da Glas in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschichtung unterschiedliche Emissionsgrade haben kann, misst ein Infrarot-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 Kameramesswerten 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.

Bei beschichteten Gläsern ist eine Temperaturmessung von unten oft die einzige Möglichkeit. Um die Kameras vor herunterfallenden Bruchstücken optimal zu schützen, gibt es entsprechendes Zubehör, u.a. einen Verschlussmechanismus für die Infrarotkameras der Compact Line.

### 4. Temperaturmessung an kleinsten Komponenten bei der Elektronikentwicklung

In der Elektronikentwicklung ist über die letzten Jahre ein eindeutiger Trend zu beobachten: Die Geräte werden deutlich leistungsfähiger bei gleichzeitigem Steigen der Packungsdichte. Entsprechend sorgfältig muss bei der Entwicklung auf die Wärmeproblematik geachtet werden. Moderne Infrarotmesstechnik ist hierbei ein wichtiges Hilfsmittel.

Die höhere Integrationsdichte führt dazu, dass auch die Wärmemenge, die durch Verlustleistung in den Komponenten entsteht, immer größer wird. Hinzu kommt die immer weiter fortschreitende Miniaturisierung, was eine effiziente Wärmeabfuhr behindern kann. Die Lebensdauer von Halbleiterbauelementen ist jedoch stark temperaturabhängig, wodurch dem thermischen Verhalten von Platinen und Baugruppen eine große Bedeutung zukommt.

# Wärmebildkameras und Anwendungen

Die Infrarot-Messtechnik arbeitet schnell, präzise und – in der Elektronikfertigung von besonderer Bedeutung – berührungslos. Um auch die Temperaturen sehr kleiner Bauteile und Strukturen auf einer Leiterplatte sicher zu erfassen, ist eine Infrarotkamera mit entsprechend hoher Auflösung notwendig.

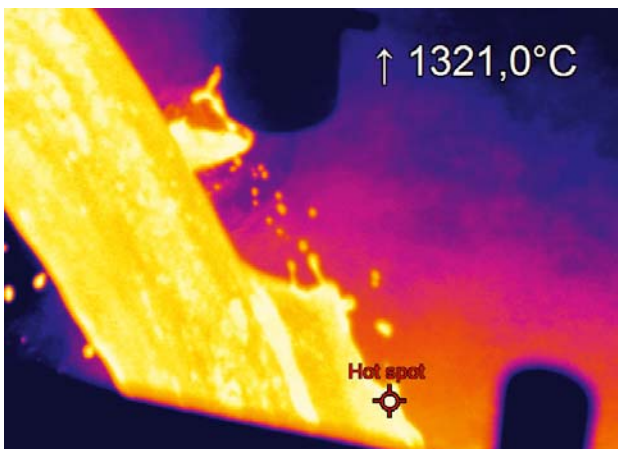


*Mikroskopoptik Xi 400 für die Analyse kleinster Komponenten*

Mit dieser lässt sich beispielsweise genau bestimmen, welches Bauelement auf einer Leiterplatte zu hohe Temperaturen aufweist. Infrarotkameras kommen in verschiedenen Phasen in der Elektronikentwicklung zum Einsatz: im Vorfeld mit thermischen Modellrechnungen, in der Produktion und bei der Endkontrolle im Rahmen der Qualitätssicherung.

## 5. Die Temperatur der Schmelze im Griff

Das Gießen von Metallen ist eines der wichtigsten Urformverfahren in der metallverarbeitenden Industrie. Wie in den meisten Verfahren in der Serienproduktion kommen heute auch in der Gießereitechnik immer häufiger automatisierte Lösungen zum Einsatz. Beispielsweise wird bei Pfannengießmaschinen Infrarot-Temperaturmesstechnik eingesetzt, um die Temperatur der Schmelze während des Abgusses zu überwachen.



*Aufgrund des durchgängigen Messbereichs von 900 bis 2450 °C eignet sich die PI 05M besonders für die Temperaturmessung von Metallschmelzen.*

Die Qualität des Gießprozesses ist unter anderem stark von der Temperatur der Schmelze abhängig. Diese wird herkömmlich im Induktionsschmelzofen vor dem Einfüllen in die Gießpfanne bestimmt. Trotz des schnellen Pfannenwechsels und dem geringen Temperaturverlust in der Pfanne während des Transports, wird die Temperatur beim Abgussvorgang nochmals mit einer Infrarotkamera bestimmt. Eine zu geringe Temperatur der Schmelze würde unweigerlich zu Qualitätsproblemen beim Werkstück führen.

Die IR-Kamera PI 05M hat eine optische Auflösung von 764 x 480 Pixel und ermöglicht eine Bildwiederholfrequenz bis zu 1 kHz. Zusätzlich hat sie für diese Anwendung eine sehr nützliche Funktionalität: Die höchste Temperatur innerhalb des Bildes – der Hotspot – kann automatisch berechnet und mit einer Peak-Hold-Funktion automatisch gehalten werden. Auch während des Abgusses entstehender Rauch oder Dampf stört somit die Temperaturmessung der Kamera nicht.

## Zusammenfassung

Die neue Kameratechnik stellt auf dem Infrarot-Markt bezüglich Flexibilität und Einsatzbreite ein Novum dar. Neben anspruchsvollen Temperaturanalysen sind die Geräte in Verbindung mit mobilen Endgeräten auch zur Lösung einfacher Instandhaltungsaufgaben geeignet. Mit Ausnahme der Hardware des USB-Infrarotkammeramesskopfes selbst können die beiden wesentlichen weiteren Komponenten des beschriebenen Thermografiesystems, nämlich Windows-Software und PC-Hardware immer aktualisiert werden. Damit wird das Gesamtsystem über die Zeit immer leistungsfähiger. Dies geschieht einerseits durch den simplen Download von Softwareupdates und -erweiterungen. Andererseits kann man aufgrund der standardisierten USB-Schnittstelle das Messsystem jederzeit mit technologisch und funktionell weiterentwickelter PC-Hardware ergänzen.

## Infrarot-Thermometer und Anwendungen

Das punktuelle Erfassen von Oberflächentemperaturen ist die „Mutter der Infrarot-Messtechnik“. Infrarot-Thermometer bzw. Pyrometer sind aufgrund unterschiedlicher Lasertechniken und Filter branchenübergreifend einsetzbar. Oftmals ist es ausreichend, einen kompletten Prozess mit einer Punktmessung zu steuern. In diesem Fall ist das Preis-/ Leistungsverhältnis der Thermometer gegenüber den IR-Kameras unschlagbar.

### Stationäre Infrarot-Thermometer Kompakt- und Hochleistungsserie

Stationäre Infrarot-Thermometer werden 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 Pyrometern 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:

#### 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.

Aufgrund der starken elektromagnetischen Felder eignen sich im Besonderen die CTlaser 1M, 2M oder 3M, da die Elektronik vom Messkopf abgesetzt ist und somit gut gegenüber der Strahlung geschützt werden kann. Daher eignen sich diese Geräte auch für den Einsatz beim Induktionshärten.



# Infrarot-Thermometer und Anwendungen

## 2. Exakte Temperaturregelung zur Herstellung innovativer Kunststoffteile



*Kleiner CT LT-Messkopf mit Laminar-Freiblaseinrichtung in einer Thermoformmaschine*

Kunststoffteile spielen in vielen Branchen eine große Rolle. Gerade für anspruchsvolle Anwendungsgebiete wie dem Automobilbau werden immer wieder neue Fertigungstechniken und Materialkombinationen entwickelt. Endlosfaserverstärkte Thermoplaste sind hierfür ein typisches Beispiel. Die Bauteile sind stabil, können komplexe Geometrien haben und weisen trotzdem ein geringes Gewicht auf. Gleichzeitig ermöglicht das Verfahren kurze Zykluszeiten, was insbesondere im Hinblick auf die Serienproduktion in großen Stückzahlen entscheidend ist.

Sie werden zunächst aufgeheizt und anschließend durch einen Thermoformprozess in die gewünschte Geometrie umgeformt. Eine möglichst gleichmäßige Oberflächentemperaturverteilung ist entscheidend für den Gesamtprozess. Herkömmliche Temperaturregler stoßen hierbei an ihre Grenzen. Zum Einsatz kommen Pyrometer vom Typ CT LT22. Entscheidende Argumente für dieses IR-Thermometer waren seine Kompaktheit, die Einsatzfähigkeit in hohen Umgebungstemperaturen bis 180 °C und die individuelle Anpassung an die Anwendung durch das industrielle Zubehör – in diesem Fall ein Freiblasvorsatz. Laut Unternehmen gab es seit fast 10 Jahren keinen Ausfall der Messgeräte.



*CS Sensorkopf*

## 3. Kontrolle der Temperatur von Papierbahn und Leim-auftrag bei der Herstellung von Verbundkartonagen



*Infrarottemperaturmessung bei der Papier- und Kartonherstellung*

Die hohen Produktionsgeschwindigkeiten der laufenden Papierbahn in modernen Papierlaminiemaschinen 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.

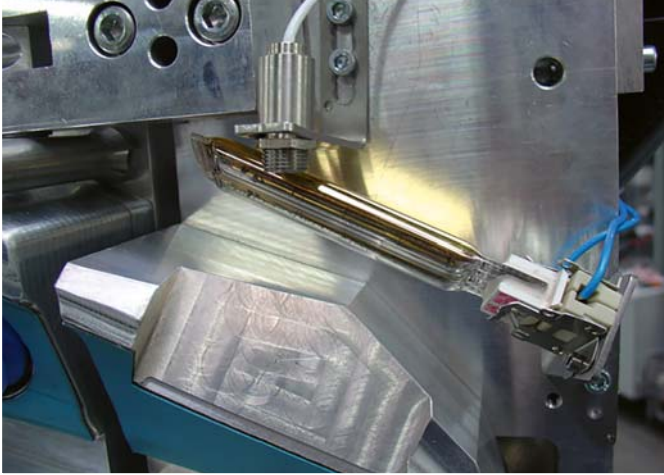
Die Temperaturüberwachung und Steuerung der Walzentemperatur mit miniaturisierten Infrarot-Temperatursensoren an definierten Messstellen quer zum Bahnverlauf an der Andruckwalze und an der Leimauftragswalze ermöglichen eine hohe Gleichförmigkeit der Laminierung. Freiblas- und Reinigungsvorrichtungen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



*CSmicro*



#### 4. Infrarot-Thermometer steuern Fügeprozess



Infrarottemperaturmessung in Verpackungsmaschinen

Beim Kleben von Bauteilen unterschiedlichster – auch sortenfremder – Materialien ist der Härtingsprozess eine sehr wichtige Komponente. Er bindet Kapital, ist zeitaufwendig und entscheidet nicht zuletzt über die Qualität des zusammengeführten Produkts. Die Anforderungen an entsprechende Mess- und Regelungssysteme steigen und basieren sukzessive auf Temperatursteuerung mittels Infrarotmesstechnik.

Die Temperatur ist eine der wichtigsten physikalischen Größen beim Kleben. Ist sie zu niedrig, wird der Klebstoff spröde. Ist sie zu hoch, erweicht der Stoff bzw. kann sogar schmelzen oder degradieren. Durch die Nutzung unterschiedlicher Wellenlängen eines Infrarotstrahlers kann das Klebemittel durch die Bauteile hindurch temperiert werden. Kurzwellige Strahlung dringt tief in massive Materialien ein und sorgt für eine gleichmäßige Durchwärmung.

Die Temperatur der Bauteile wird über Infrarot-Thermometer des Typs CT LT berührungslos gemessen. In Kombination mit elektronischen PID-Temperaturreglern takten und pulsieren die Infrarotstrahler temperaturgenau in errechneten Frequenzen und bringen werkstückschonend die Energie in einer optimalen Leistungsdichte in die Klebstoffe.

Die Einhaltung der Parameter „Temperaturverteilung“ und „Energieeindringtiefe“ garantiert das Optimum der Temperierung.



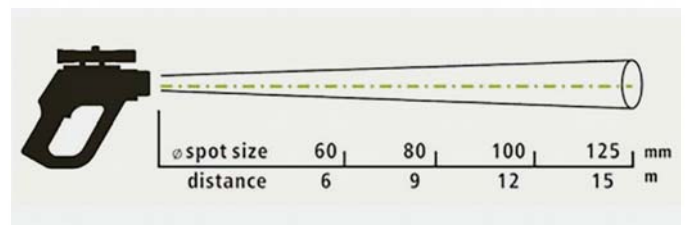
CT LT mit Elektronikbox

## Portable Infrarot-Thermometer



Detaillierte Infrarottemperaturmessung an einer Schmelze im Feingußwerk mittels P20 05M.

P20 LT



D:S = 120:1

Verhältnis von Entfernung zu Messfleckgröße 120:1

Prinzipiell werden portable Infrarot-Thermometer (auch Laser-Thermometer genannt) zur sporadischen und punktuellen Temperaturmessung im Rahmen der vorbeugenden Instandhaltung genutzt. Anwendungsfelder sind die Inspektion an elektrischen Anlagen, rotierenden Maschinen sowie als Diagnosewerkzeug in der Heizungs-, Klima- und Lüftungstechnik. Auch zur schnellen Fehleranalyse im KfZ-Bereich werden sie eingesetzt.

Ob für den Innen- oder Außenbereich, bei Sonne, Regen oder schwankenden Temperaturen, die Geräte sind – im Gegensatz zu den kostengünstigen Heimwerkergeräten – für den Einsatz unter harten Industriebedingungen konstruiert.

Auch die portablen Thermometer gibt es in unterschiedlichen Spektralbereichen. Neben dem langwelligen Bereich (8 bis 14  $\mu\text{m}$ ) sind dies vor allem die kurzwelligen Bereiche 525 nm, 1  $\mu\text{m}$  und 1,6  $\mu\text{m}$ . Speziell die kurzwelligen IR-Thermometer werden weltweit in der Metallindustrie eingesetzt. Sie können Objekte bis 2000 °C bei einer optischen Auflösung von bis zu 300:1 messen, was gerade für (geschmolzenes) Metall bestens geeignet ist.



Portables Infrarot-Thermometer P20 05M



Im Folgenden findet sich ein Auszug unseres Online-Lexikons, das unter [www.optris.de/lexikon](http://www.optris.de/lexikon) zu finden ist.



Begriff / Ausdruck	Erklärung
Absorption (Absorptionsgrad)	Verhältnis der von einem Objekt absorbierten Strahlung zur auftreffenden 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.
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.
Pixel	Synonym für Bildelement. Ein einzelner Bildpunkt in einem Bild.
Referenztemperatur	Eine Temperatur, mit der die regulären Messwerte verglichen werden können.
Reflexionsgrad	Verhältnis der von einem Objekt reflektierten Strahlung zur auftreffenden Strahlung. Eine Zahl zwischen 0 und 1
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.

# Anhang: Emissionsgradtabelle

Weitere Informationen zur Emissionsgradeinstellung am Beispiel der Software PIX Connect finden Sie auf dem YouTube-Kanal der Optris GmbH.



T: Gesamtspektrum SW: 2–5 µm (kurzwellig) LW: 8–14 µm (langwellig) LLW: 6,5–20 µm (langwellig bei kurzen Frequenzen)      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
Aluminium	Guss, sandgestrahlt	70	LW	0,46	9
Aluminium	Guss, sandgestrahlt	70	SW	0,47	9
Aluminium	in HNO <sub>3</sub> 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
Aluminium-bronze		20	T	0,6	1
Aluminium-hydroxid	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
Asphalt-straßenbelag		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

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissionsgrad	R
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 u. Stahl	elektrolytisch	22	T	0,05	4
Eisen u. Stahl	elektrolytisch	100	T	0,05	4
Eisen u. Stahl	elektrolytisch	260	T	0,07	4
Eisen u. Stahl	elektrolytisch, hochglanzpoliert	175–225	T	0,05–0,06	1
Eisen u. Stahl	frisch gewalzt	20	T	0,24	1
Eisen u. Stahl	frisch mit Schmirgelpapier bearbeitet	20	T	0,24	1
Eisen u. Stahl	geschliffenes Blech	950–1100	T	0,55–0,61	1
Eisen u. Stahl	geschmiedet, hochglanzpoliert	40–250	T	0,28	1
Eisen u. Stahl	gewalztes Blech	50	T	0,56	1
Eisen u. Stahl	glänzend, geätzt	150	T	0,16	1
Eisen u. Stahl	glänzende Oxidschicht, Blech	20	T	0,82	1
Eisen u. Stahl	heißgewalzt	20	T	0,77	1
Eisen u. Stahl	heißgewalzt	130	T	0,6	1
Eisen u. Stahl	kaltgewalzt	70	LW	0,09	9
Eisen u. Stahl	kaltgewalzt	70	SW	0,2	9
Eisen u. Stahl	mit rotem Rost bedeckt	20	T	0,61–0,85	1
Eisen u. Stahl	oxidiert	100	T	0,74	1
Eisen u. Stahl	oxidiert	100	T	0,74	4
Eisen u. Stahl	oxidiert	125–525	T	0,78–0,82	1
Eisen u. Stahl	oxidiert	200	T	0,79	2
Eisen u. Stahl	oxidiert	200–600	T	0,8	1

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissionsgrad	R
Eisen u. Stahl	oxidiert	1227	T	0,89	4
Eisen u. Stahl	poliert	100	T	0,07	2
Eisen u. Stahl	poliert	400–1000	T	0,14–0,38	1
Eisen u. Stahl	poliertes Blech	750–1050	T	0,52–0,56	1
Eisen u. Stahl	rau, ebene Oberfläche	50	T	0,95–0,98	1
Eisen u. Stahl	rostig, rot	20	T	0,69	1
Eisen u. Stahl	rostrot, Blech	22	T	0,69	4
Eisen u. Stahl	stark oxidiert	50	T	0,88	1
Eisen u. Stahl	stark oxidiert	500	T	0,98	1
Eisen u. Stahl	stark verrostet	17	SW	0,96	5
Eisen u. 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
Firnis	auf Eichenparkettboden	70	LW	0,90–0,93	9
Firnis	auf Eichenparkettboden	70	SW	0,9	9
Firnis	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
Glas	dünn	25	LW	0,8–0,95	10
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

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissionsgrad	R
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	geschmiegelt	0	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	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

# Anhang: Emissionsgradtabelle

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissionsgrad	R
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
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

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissionsgrad	R
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

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissionsgrad	R
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
Schmirgel-papier	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

Werkstoff	Spezifikation	Temperatur in °C	Spektrum	Emissionsgrad	R
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 m. 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
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 <sub>2</sub>	1230	T	0,66	1
Ziegel	Sillimanit, 33% SiO <sub>2</sub> , 64% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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



# Anhang: Auswahlkriterien für Infrarot-Temperaturmessgeräte

## Auswahlkriterien für Infrarot-Temperaturmessgeräte

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:

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

### Anwendungsziel

Die grundsätzliche Frage lautet: Punktmessung oder Flächenmessung? Je nach Anwendungsziel kommt von vorneherein entweder nur ein Infrarot-Thermometer oder eine Infrarotkamera in Frage. Darauf aufbauend muss dann das Produkt spezifiziert werden. In Ausnahmefällen gibt es auch Anwendungen, in denen beides sinnvoll wäre, hier empfehlen wir eine Beratung durch Applikationsingenieure.

### Temperaturbereich

Der Temperaturbereich des Sensors ist so zu wählen, dass eine möglichst hohe Auflösung der Objekttemperatur erzielt wird. Die Messbereiche der IR-Kameras 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 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.

Weitere Informationen auf unserem Online-Messfleckkalkulator:  
[www.optris.de/messfleck-kalkulator](http://www.optris.de/messfleck-kalkulator)

## 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 V
- Thermoelement (Typ J, Typ K)
- Schnittstellen: CAN, Profibus-DP, RS232, RS485, USB, Relais, Ethernet



Einen Überblick über die technischen Daten aller Produkte finden Sie in unserer Produktbroschüre:

[www.optris.de/downloads](http://www.optris.de/downloads)

# Literatur

## Literaturreferenzen

- [1] IEC/TS 62492-1: Industrial process control devices. Radiation thermometers. Technical data for radiation thermometers.
- [2] IEC/TS 62492-2: Industrial process control devices - Radiation thermometers - Part 2: Determination of the technical data for radiation thermometers.
- [3] VDI-Richtlinie für IR-Imager, VDI-Richtlinie 5585, Blatt 1 .
- [4] VDI-Richtlinien für Pyrometer, VDI-Richtlinie 3511, Blatt 4 / 4.2 / 4.4 / 4.5 / 4.6.
- [3] Trouilleau, C. et al.: High-performance uncooled amorphous silicon TEC less XGA IRFPA with 17  $\mu\text{m}$  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.

## Empfohlene Literatur

- 1. VDI/VDE Richtlinie, Technische Temperaturmessungen – Spezifikation von Strahlungsthermometern, Juni 2001, VDI 3511 Blatt 4.1
- 2. Stahl, Miosga: Grundlagen Infrarottechnik, Heidelberg 1980, (Dr. Alfred Hütthig Verlag)
- 3. Walther, Herrmann: Wissensspeicher Infrarotmesstechnik, Leipzig 1990. (Fachbuchverlag Leipzig)
- 4. Walther, L., Gerber, D.: Infrarotmesstechnik, Berlin 1983, (Verlag Technik Berlin)
- 5. De Witt, Nutter: Theory and Practice of Radiation Thermometry, New York 1988. (John Wiley & Son, ISBN: 0-471-61018-6.)
- 6. Wolfe, Zissis: The Infrared Handbook, Washington DC 1978, Office of Naval Research, Department of the Navy.
- 7. Crastes, A. et al.: Uncooled amorphous silicon ¼ VGA IRFPA with 25  $\mu\text{m}$  pixel-pitch for High End applications, "Infrared technologies and applications XXXIV", Proc. SPIE 6940, 2008.
- 8. Holst, Gerald C.: Electro-optical Imaging System Performance, Florida 2006. (JCD Publishing Winter Park. ISBN: 0-8194-6179-2)
- 9. Kienitz, Ulrich: Wärmebildtechnik als moderne Form der Pyrometrie, in: tm – Technisches Messen 2014; 81(3), S. 107–113.
- 10. Vollmer, Michael/ Möllmann, Klaus-Peter: Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications, Weinheim 2010. (Wiley-VCH Verlag, ISBN: 978-3-527-40717-0)
- 11. Online-Lexikon zur berührungslosen Temperaturmesstechnik: [www.optris.de/lexikon](http://www.optris.de/lexikon)



Authorized and licenced distribution partner for products of Optris

ATEG Automation GmbH  
Intzestraße 50  
42859 Remscheid

Telefon +49 (0) 2191 591457-0  
Fax +49 (0) 2191 591457-77

E-Mail [info@ateg.de](mailto:info@ateg.de)  
Internet [www.ateg.de](http://www.ateg.de)

Optris GmbH  
Ferdinand-Buisson-Str. 14  
13127 Berlin · Germany  
Tel.: +49 30 500 197 - 0  
Fax: +49 30 500 197 - 10  
E-Mail: [info@optris.de](mailto:info@optris.de)  
[www.optris.de](http://www.optris.de)