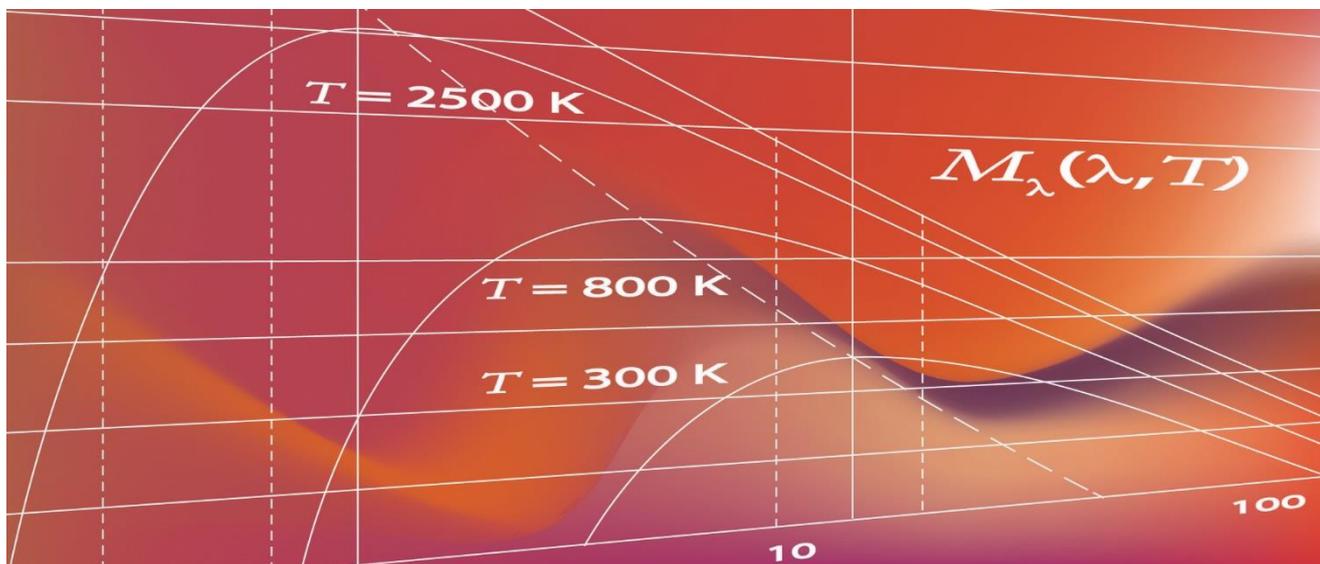


Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung



Infrarottheorie

Inhalt

1 VORWORT	5
2 ENTDECKUNG DER IR STRAHLUNG	5
3 VORTEILE VON IR-THERMOMETERN	5
4 DAS INFRAROTMESSSYSTEM	6
4.1 Das Messobjekt	6
4.1.1 Ermittlung des Emissionsgrades	8
4.1.2 Messung von Metallen	9
4.1.3 Messung an Kunststoffen	9
4.1.4 Messung an Glas	9
4.2 Umgebungsbedingungen	10
4.3 Optik und Fenster	12
4.4 Visierhilfen	14
4.5 Detektoren	15
4.6 Anzeige und Schnittstellen	15
4.7 Technische Daten von IR Thermometern	16
4.8 Kalibrierung	17
5 SPEZIALPYROMETER	18
5.1 Pyrometer mit Glasfaseroptik	18
5.2 Quotientenpyrometer	18
5.3 Bildgebende Systeme	20
5.3.1 IR-Zeilenkameras	20
5.3.2 Matrixkameras	21
6 ZUSAMMENFASSUNG	22
7 LITERATURVERZEICHNIS	23

1 Vorwort

Dieses Handbuch wendet sich insbesondere an den Praktiker, der mit der berührungslosen Temperaturmessung noch nicht so vertraut ist bzw. sie bisher noch nicht angewendet hat. Es wurde bewusst versucht, die Thematik so kurz und einfach wie möglich darzustellen. Für die Leser, die tiefer in diese Materie einsteigen wollen, wird im Literaturverzeichnis weiterführende Literatur angegeben. Der Schwerpunkt liegt auf dem praktischen Einsatz dieser Geräte und in der Beantwortung wichtiger damit im Zusammenhang stehender Fragen. Sollten Sie einen Einsatz planen und eine Beratung wünschen, können Sie uns vorab das im Anhang befindliche Formular zusenden.

2 Entdeckung der IR Strahlung

Feuer und Eis, heiß und kalt - die Extreme der Elemente haben die Menschen schon immer fasziniert und herausgefordert. Verschiedene Hilfsmittel wurden benutzt, Wärme und Kälte genauer und vergleichbar zu bestimmen. So wurden bei der Keramikherstellung Schmelzkörper eingesetzt, die das Erreichen bestimmter Temperaturen durch Formänderung anzeigten. Ein Bäcker hingegen behalf sich mit einem Blatt Papier - je schneller es im Ofen braun wurde, desto heißer war dieser. Von Nachteil war, dass dieser Vorgang nicht umkehrbar war - Abkühlung konnte nicht festgestellt werden. Die Genauigkeit der Aussage war stark vom Benutzer und dessen Erfahrung abhängig. Erst die Erfindung von Thermometern (vor ca. 400 Jahren) ermöglichte exakte Angaben zum tatsächlichen Temperaturzustand.

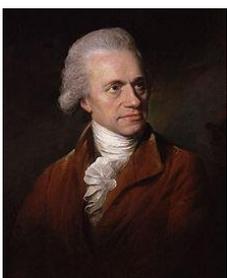


Abb. 1: William Herschel (1738 – 1822) entdeckt die IR Strahlung

Die Entdeckung der Infrarot-Strahlung durch den Physiker Wilhelm Herschel Anfang des 19. Jahrhunderts erlaubte eine neue Möglichkeit der Temperaturbestimmung - berührungslos und ohne Auswirkung auf das Messobjekt oder den Messenden. Waren die Geräte in der Anfangszeit noch schwer, unhandlich und kompliziert zu bedienen, so hat sich das Bild heute komplett gewandelt. Moderne Infrarotthermometer

sind klein, handlich, einfach zu bedienen und sogar in Maschinen einbaubar. Vom universellen Handgerät bis zum Spezialsensor für die Integration in bestehende Produktionsanlagen - die Palette ist umfangreich. Vielfältiges Zubehör und eine Software zur Aufzeichnung und Auswertung der Messergebnisse gehört bei den meisten Infrarot-Thermometern zum Lieferumfang.

3 Vorteile von IR-Thermometern

Die Temperatur ist die nach der Zeit am zweithäufigsten gemessene physikalische Größe. Sowohl in der Fertigung und Qualitätskontrolle als auch bei Wartungsarbeiten spielt die Temperatur als Indikator für den Zustand eines Produktes oder einer Maschine eine große Rolle. Eine präzise Temperaturüberwachung führt zu einer Steigerung der Produktqualität und der Produktivität. Stillstandzeiten werden verringert, da die Fertigungsprozesse kontinuierlich unter optimalen Bedingungen ablaufen können. Dabei ist die Infrarot-Technologie keine neue Erfindung - seit Jahrzehnten wird sie bereits erfolgreich in Industrie und Forschung eingesetzt. Doch haben in jüngster Zeit eingeführte Innovationen die Kosten gesenkt, die Zuverlässigkeit erhöht und den Sensoren immer kleinere Abmessungen gegeben. All diese Faktoren haben die Infrarot-Technologie für neue Anwendergruppen und Einsatzgebiete interessant gemacht.



Abb. 2: Modernes Digitales Infrarot Pyrometer (Fluke Process Instruments: Endurance Series)

Das Infrarotmesssystem

Welche Vorteile bietet die berührungslose Temperaturmessung?

1. Schnelle Messungen im ms Bereich, dadurch Zeitersparnis bzw. mehrere Messungen und mehr Informationen über Temperaturverläufe
2. Messungen an bewegten Objekten möglich (Bandprozesse)
3. Messung an gefährlichen oder schwer zugänglichen Stellen (Hochspannung führende Teile, große Messentfernung)
4. Hohe Messtemperaturen über 1300°C sind kein Problem. Hier haben Kontaktthermometer nur eine begrenzte Lebensdauer.
5. Rückwirkungsfreie Messungen d. h. dem Messobjekt wird keine Energie entzogen. Speziell bei schlechten Wärmeleitern wie Kunststoff und Holz ergibt sich damit eine hohe Messgenauigkeit und keine Verfälschung der Messwerte im Vergleich zur Berührung mit Kontaktthermometern.
6. Messungen ohne mechanische Einwirkung auf die Oberfläche. Dadurch hygienisch und verschleißfrei, beispielsweise Lackoberflächen werden nicht zerkratzt bzw. es können weiche Oberflächen gemessen werden.

Was ist beim Einsatz von IR-Thermometern zu beachten?

1. Das Objekt muss optisch (infraroptisch) für das IR-Thermometer sichtbar sein. Starker Staub oder Rauch beeinträchtigen die Messung ebenso wie feste Hindernisse. So lassen z.B. geschlossene metallische Behälter keine Messung in deren Innenen zu.
2. Die Optik des Messkopfes muss vor Staub und kondensierenden Flüssigkeiten geschützt werden. Die Hersteller bieten dazu nötiges Zubehör an.
3. Es lassen sich in der Regel nur Oberflächentemperaturen messen, wobei die unterschiedlichen Abstrahlungseigenschaften verschiedener Werkstoffoberflächen beachtet werden müssen.

Zusammenfassung

Die Hauptvorteile sind Schnelligkeit, Rückwirkungsfreiheit und der große Temperaturbereich bis 3000°C. Zu beachten ist, dass nur die Oberflächentemperatur gemessen werden kann.

4 Das Infrarotmesssystem

Ein IR-Thermometer lässt sich mit dem menschlichen Auge vergleichen. Die Linse des Auges stellt die Optik dar, durch welche die Strahlung (Photonenfluss) vom Objekt über die Atmosphäre zur lichtempfindlichen Schicht (Netzhaut) gelangt. Dort findet eine Umwandlung in ein Signal statt, welches zum Gehirn geleitet wird. Abb. 3 zeigt ein typisches IR-Messsystem.

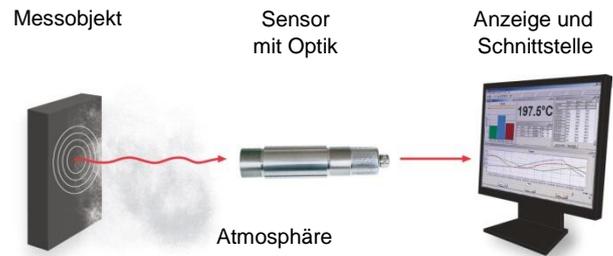


Abb. 3: Infrarotmesssystem

4.1 Das Messobjekt

Jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt sendet entsprechend seiner Temperatur infrarote Strahlung, so genannte Eigenstrahlung aus. Ursache dafür ist die innere mechanische Molekülbewegung. Die Intensität dieser Bewegung hängt von der Temperatur dieses Körpers ab. Da Molekülbewegungen gleichzeitig Ladungsbewegungen darstellen, wird eine elektromagnetische Strahlung (Photonenteilchen) ausgesandt. Diese Photonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit und gehorchen den bekannten optischen Gesetzmäßigkeiten. Sie lassen sich umlenken, mittels Linsen bündeln oder können von spiegelnden Flächen reflektiert werden. Das Spektrum dieser Strahlung erstreckt sich von 0,7 bis 1000 µm Wellenlänge. Daher ist es für unser Auge normalerweise nicht sichtbar. Dieser Bereich liegt unter dem roten Bereich des sichtbaren Lichtes und wurde deshalb infrarot („infra“ <lat.> unter) genannt, siehe Abb. 4.

Abb. 5 zeigt typische Strahlungsverhältnisse eines Körpers bei unterschiedlichen Temperaturen. Man sieht, dass heiße Körper auch noch zu einem geringen Teil sichtbare Strahlung abgeben. Das ist auch der Grund, warum jeder Mensch sehr heiße Objekte (über 600°C) als rot- bis weißglühend sehen kann. Erfahrene Stahlarbeiter können an Hand der Farbe sogar die Temperatur ziemlich genau abschätzen. Das klassische Glühfadenpyrometer wurde in der Stahl- und Eisenindustrie ab 1930 eingesetzt.

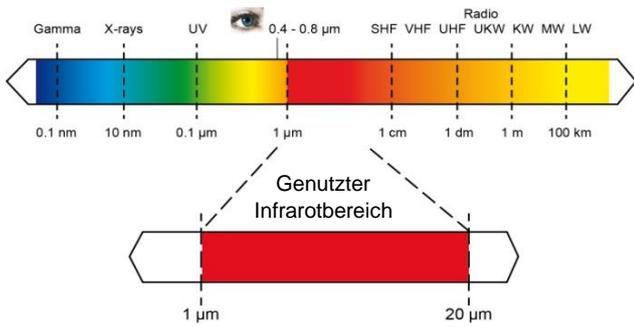


Abb. 4: Das elektromagnetische Spektrum, messtechnisch interessant der Bereich von etwa 1 bis 20 µm

Der unsichtbare Teil des Spektrums enthält bis zu 100.000 mal mehr Energie. Darauf baut die Infrarotmesstechnik auf. In Abb. 5 ist ebenfalls zu sehen, dass sich das Strahlungsmaximum mit steigender Objekttemperatur zu immer kürzeren Wellenlängen verschiebt und sich die Kurven eines Körpers bei verschiedenen Temperaturen nicht schneiden. Die Strahlungsenergie im gesamten Wellenlängenbereich (Fläche unterhalb jeder Kurve) wächst mit der vierten Potenz der Temperatur. Diese Zusammenhänge wurden von STEFAN und BOLTZMANN 1879 erkannt und erlauben eine eindeutige Temperaturbestimmung aus dem Strahlungssignal, siehe /1/ /3/ /4/ /5/.

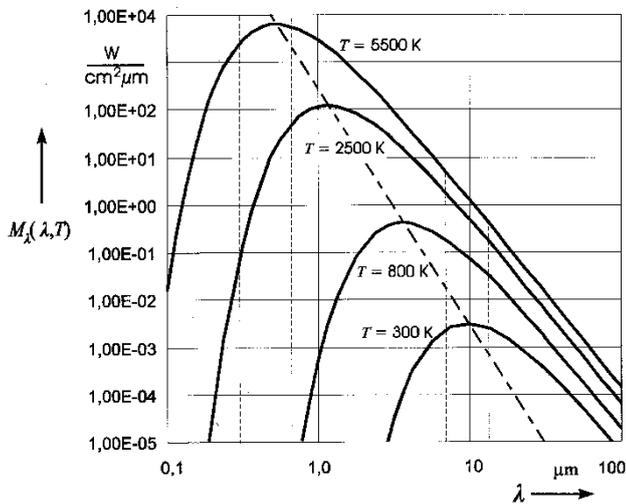


Abb. 5: Strahlungscharakteristik eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit von der Temperatur nach /3/.

Sieht man sich Abb. 5 an, sollte das Ziel darin bestehen, das IR-Thermometer so breitbandig wie möglich auszulegen, um möglichst viel Energie (entspricht der Fläche unter einer Kurve) bzw. Signal vom Messobjekt zu erhalten. Es gibt aber einige Gründe, die zeigen, dass das nicht immer von Vorteil ist. In Abb. 5 wächst die Strahlungsintensität bei 2 µm beispielsweise wesentlich stärker mit steigender Temperatur

als bei 10 µm. Je größer der Strahlungsunterschied pro Temperaturdifferenz, um so genauer arbeitet das IR-Thermometer. Entsprechend der Verschiebung des Strahlungsmaximums zu kleineren Wellenlängen mit steigender Temperatur (Wien'sches Verschiebungsgesetz) richtet sich der Wellenlängenbereich nach dem Messtemperaturbereich des Pyrometers. Bei niedrigen Temperaturen würde sich ein bei 2 µm arbeitendes IR-Thermometer wie das Auge bei Temperaturen unter 600°C verhalten, es sieht wenig bis nichts, da die Strahlungsenergie zu klein ist. Ein weiterer Grund, Geräte für verschiedene Wellenlängenbereiche zu haben, ist die Abstrahlcharakteristik von einigen Materialien, so genannten nichtgrauen Strahlern (Glas, Metalle und Kunststofffolien). Abb. 5 zeigt das Ideal, den so genannten Schwarzen Strahler oder auch Schwarzen Körper (engl.: Blackbody). Viele Körper emittieren aber weniger Strahlung bei gleicher Temperatur. Das Verhältnis aus dem realen Abstrahlwert und dem des Schwarzen Strahlers wird Emissionsgrad ε (Epsilon) genannt und kann maximal 1 (Körper entspricht dem idealen Schwarzen Strahler) und minimal 0 betragen. Körper, deren Emissionsgrad kleiner 1 ist, werden graue Strahler genannt. Körper, deren Emissionsgrad zusätzlich temperatur- und wellenlängenabhängig ist, nennt man nichtgraue Strahler.

Weiterhin gilt, dass sich die Summe der Abstrahlung aus Absorption (A), Reflexion (R) und Transmission (T) zusammensetzt und gleich Eins ist. (siehe Gleichung 1 und Abb. 6)

$$A + R + T = 1 \quad (1)$$

Feste Körper haben keine Transmission im infraroten Bereich (T = 0). Dann ergibt sich aus Gleichung 1 für die Absorption und damit Emission (nach dem so genannten KIRCHHOFSCHEM Gesetz geht man davon aus, dass alle Strahlung, die ein Körper aufgenommen (absorbiert) hat und die zu einer Temperaturerhöhung führte, auch dann von diesem Körper abgestrahlt, sprich: emittiert, wird:

$$A \leftrightarrow E = 1 - R \quad (2)$$

Das Infrarotmesssystem

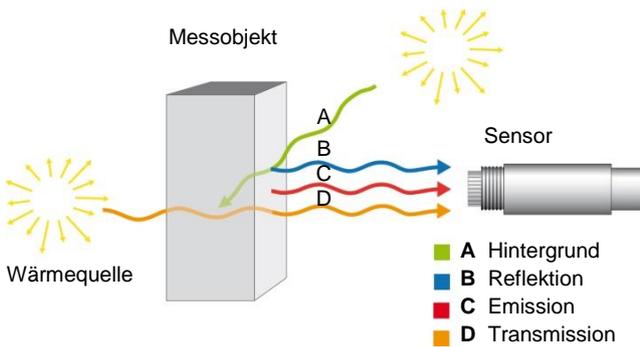


Abb. 6: Der Sensor empfängt neben der vom Messobjekt emittierten Strahlung auch Strahlungsreflexionen und Strahlung, welche das Messobjekt durchgelassen hat.

Der ideale Schwarze Strahler hat auch keine Reflexion ($R = 0$), so dass damit $E = 1$ ist.

Viele Nichtmetalle wie z. B. Holz, Kunststoff, Gummi, organische Materialien, Stein oder Beton haben nur gering reflektierende Oberflächen und deshalb hohe Emissionsgrade zwischen 0,8 und 0,95. Metalle dagegen, insbesondere mit polierten bzw. glänzenden Oberflächen, können bei etwa 0,1 liegen. Diesem Umstand wird bei den IR-Thermometern durch entsprechende Möglichkeiten zur Einstellung des Emissionsfaktors Rechnung getragen, siehe auch Abb. 7.

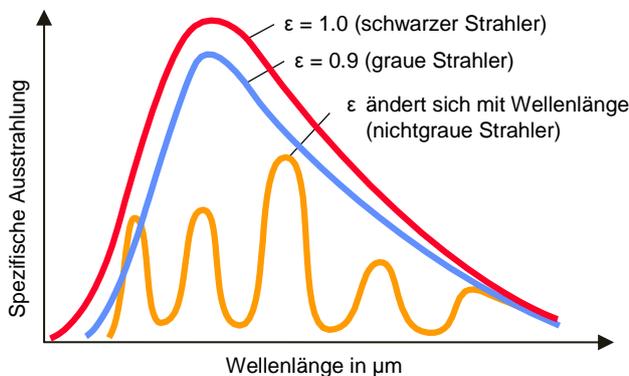


Abb. 7: Spezifische Ausstrahlung bei verschiedenen Emissionsgraden

4.1.1 Ermittlung des Emissionsgrades

Es gibt verschiedene Methoden, den Emissionsgrad eines Objektes zu bestimmen. So können Sie den Emissionsgrad für eine Reihe häufig verwendeter Materialien aus einer Tabelle entnehmen. Emissionsgradtabellen helfen Ihnen auch, den für dieses Material passenden Wellenlängenbereich und damit das richtige Messgerät zu finden. Diese Tabellenwerte sollten speziell bei Metallen nur als Orientierung ge-

nutzt werden, da der Oberflächenzustand (z. B. poliert, oxidiert oder verzundert) den Emissionsgrad mehr beeinflussen kann, als das betrachtete Material selbst. Es besteht auch die Möglichkeit, den Emissionsgrad für ein spezielles Material auf verschiedene Weise selbst zu bestimmen. Dazu benötigt man ein Pyrometer mit Emissionsgradeinstellung.

1. Erhitzen Sie eine Probe des Materials auf eine bekannte Temperatur, die Sie mit einem Kontaktthermometer (z. B. Thermoelement) sehr genau ermitteln. Anschließend messen Sie die Objekttemperatur mit dem IR-Thermometer. Verändern Sie den Emissionsgrad solange, bis die Temperatur der des Kontaktthermometers entspricht. Diesen Emissionsgrad behalten Sie nun für alle zukünftigen Messungen von Objekten aus diesem Material bei.
2. Bei relativ geringen Temperaturen (bis 260°C) befestigen Sie spezielle Kunststoffaufkleber mit bekanntem Emissionsgrad auf dem Messobjekt und bestimmen die Temperatur des Aufklebers mit dem Infrarotmessgerät und dem entsprechenden Emissionsgrad. Anschließend messen Sie die Oberflächentemperatur des Objektes ohne Aufkleber und verstellen den Emissionsgrad, bis der korrekte Temperaturwert angezeigt wird. Den so ermittelten Emissionsgrad verwenden Sie jetzt für alle Messungen an Objekten aus diesem Material.
3. Erzeugen eines „Schwarzen Strahlers“ mit Hilfe eines Probekörpers aus dem zu messenden Material. Bohren Sie ein Loch in das Objekt. Die Tiefe des Loches sollte mindestens das Fünffache des Durchmessers der Bohrung betragen. Der Durchmesser muss der Größe des Messfleckes Ihres Messgerätes entsprechen. Falls der Emissionsgrad der Innenwände größer als 0,5 ist, beträgt der Emissionsgrad des Hohlraumstrahlers jetzt etwa 1 und die in dem Loch gemessene Temperatur ist die korrekte Temperatur des Messobjektes, /4/. Wenn Sie das IR-Thermometer jetzt auf die Oberfläche des Objektes richten, verändern Sie den Emissionsgrad bis die Temperaturanzeige mit dem zuvor am "Schwarzen Strahler" ermittelten Wert übereinstimmt. Den so erhaltenen Emissionsgrad können Sie für alle Messungen am gleichen Material verwenden.
4. Wenn das Messobjekt beschichtet werden kann, tragen Sie eine matte schwarze Farbe auf, z. B. „3-M Black“ der Firma 3M oder „Senotherm“ der Fa. Weilburger Lackfabrik (Grebe Konzern) /2/, für die ein Emissionsgrad von etwa 0,95 angegeben wird. Messen Sie die Temperatur dieses "Schwarzen Strahlers" und stellen Sie den Emissionsgrad wie zuvor beschrieben ein.

4.1.2 Messung von Metallen

Der Emissionsgrad von Metallen ist von der Wellenlänge und der Temperatur abhängig. Da Metalle häufig reflektieren, besitzen sie tendenziell einen niedrigeren Emissionsgrad, was unterschiedliche und unzuverlässige Messergebnisse zur Folge haben kann. In diesen Fällen ist es wichtig, ein Instrument auszuwählen, das die Infrarot-Strahlung bei einer bestimmten Wellenlänge und in einem bestimmten Temperaturbereich misst, bei dem die Metalle einen möglichst hohen Emissionsgrad haben. Bei vielen Metallen vergrößert sich der Messfehler mit der Wellenlänge, so dass die kürzeste für die Messung verfügbare Wellenlänge genutzt werden sollte, siehe Abb. 8.

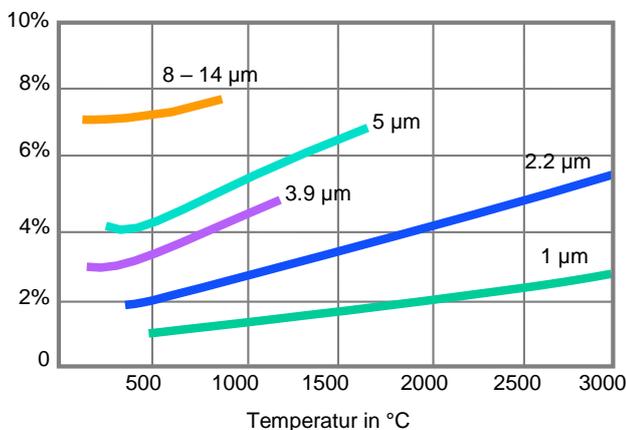


Abb. 8: Messfehler bei 10% falsch eingestelltem Emissionsgrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge und Objekttemperatur.

Die optimale Wellenlänge für hohe Temperaturen bei Metallen liegt mit etwa 0,8 bis 1,0 μm an der Grenze zum sichtbaren Bereich. Wellenlängen von 1,6; 2,2 und 3,9 μm sind ebenfalls möglich. In speziellen Fällen (z. B. Aufheizprozessen), wo über einen relativ weiten Temperaturbereich gemessen werden soll und sich der Emissionsgrad mit der Temperatur ändert, können mit Quotientenpyrometern gute Ergebnisse erzielt werden.



Abb. 9: Genaue Temperaturmessungen an Brammen, Walzblöcken oder Rohren gewährleisten eine einheitliche Produktqualität

4.1.3 Messung an Kunststoffen

Die Transmissionsgrade von Kunststofffolien variieren mit der Wellenlänge und verhalten sich proportional zu ihrer Dicke. Dünne Materialien sind durchlässiger als dicke Kunststoffe. Für eine optimale Temperaturmessung ist es wichtig, eine Wellenlänge auszuwählen, bei der der Transmissionsgrad annähernd Null ist. Einige Kunststoffe (Polyäthylen, Polypolypropylen, Nylon und Polystyrol) sind bei 3,43 μm undurchlässig, andere (Polyester, Polyurethan, Teflon, FEP und Polyamid) bei 7,9 μm. Bei dickeren (> 0,4 mm), stark pigmentierten Folien sollten Sie eine Wellenlänge zwischen 8 und 14 μm wählen.

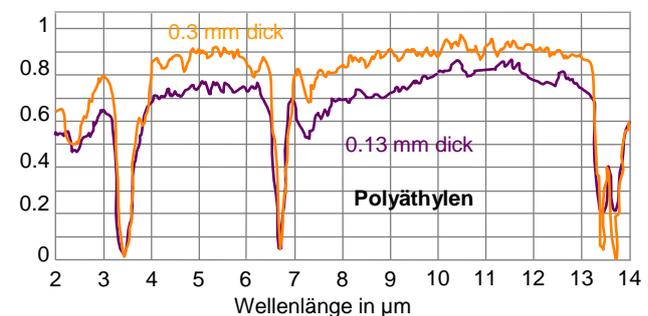


Abb. 10: Spektrale Durchlässigkeit von Kunststofffolien. Unabhängig von der Dicke ist Polyäthylen bei 3,43 μm fast undurchlässig.

Wenn Sie sich nicht sicher sind, können Sie dem Infrarotgerätehersteller eine Probe des Kunststoffes schicken, um die für die Messung optimale spektrale Bandbreite zu bestimmen. Bei vielen Kunststofffolien liegt ein Reflexionsgrad von etwa 5% vor.



Abb. 11: Berührungslose Temperaturmessung bei der Kunststoffextrusion, -beschichtung und -laminierung

4.1.4 Messung an Glas

Bei der Temperaturmessung von Glas mit einem Infrarot-Thermometer sind Reflexion und auch Transmission zu berücksichtigen. Durch sorgfältige Auswahl der Wellenlänge ist es möglich, sowohl die Oberfläche des Glases wie auch in der Tiefe die Temperatur zu messen.

Das Infrarotmesssystem

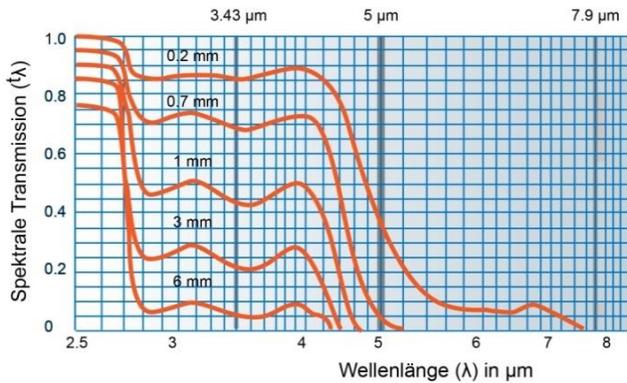


Abb. 12: Spektrale Durchlässigkeit von Glas in Abhängigkeit von der Materialdicke

Bei Anwendungen für Messungen unterhalb der Oberfläche ist ein Sensor für 1,0; 2,2 oder 3,9 μm Wellenlänge einzusetzen. Für Oberflächentemperaturen wird ein Sensor für 5 μm empfohlen. Bei niedrigen Temperaturen sollten 8 - 14 μm genutzt und zur Kompensation der Reflexion der Emissionsgrad auf 0,85 eingestellt werden. Da Glas als schlechter Wärmeleiter die Oberflächentemperatur schnell ändern kann, ist hier ein Messgerät mit kurzer Ansprechzeit zu empfehlen.



Abb. 13: Die durchgängige Temperaturüberwachung von der Glasschmelze bis zum Endprodukt gewährleistet die geforderten Produkteigenschaften, hier beim Vorspannen von Glasscheiben

Zusammenfassung

Jeder Körper sendet infrarote Strahlung aus, die für unser Auge erst bei Temperaturen oberhalb 600°C sichtbar ist (z. B. glühendes Eisen). Der Wellenlängenbereich reicht von 0,7 μm bis 1000 μm . Schwarze Strahler absorbieren und emittieren 100% der Strahlung, die ihrer Eigentemperatur entspricht. Alle anderen Körper werden mit ihrem Abstrahlverhalten dazu ins Verhältnis gesetzt. Dieses Verhältnis wird Emissionsgrad genannt.

4.2 Umgebungsbedingungen

Ein weiterer Grund, ein IR-Thermometer nur für einen bestimmten Spektralbereich auszulegen, ist das Transmissionsverhalten der Übertragungsstrecke, in der Regel die Umgebungsluft. Einige atmosphärische Bestandteile wie Wasserdampf und Kohlendioxid absorbieren infrarote Strahlung bestimmter Wellenlängen und bewirken Transmissionsverluste. Wenn man diese Absorptionsmedien außer Acht lässt, wird unter Umständen eine Temperatur angezeigt, die unter der tatsächlichen Objekttemperatur liegt. Glücklicherweise gibt es im Infrarotspektrum jedoch "Fenster", die diese Absorptionsbänder nicht enthalten. In Abb. 14 ist die Transmissionskurve einer 1 m langen Luftstrecke dargestellt. Typische Messfenster sind 1,1 ... 1,7 μm , 2 ... 2,5 μm , 3 ... 5 μm und 8 ... 14 μm . Da die Hersteller die Infrarotmessgeräte bereits weitestgehend mit atmosphärischen Korrekturfiltern versehen haben, bleiben dem Anwender diese Sorgen allerdings erspart.

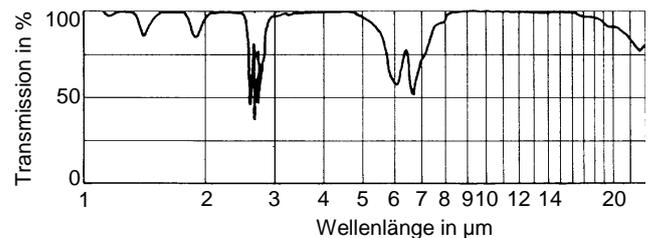


Abb. 14: Transmissionsgrad einer 1 m langen Luftstrecke bei 32°C und rel. Feuchte 75 %, nach /3/

Gleichfalls zu berücksichtigen sind Wärmestrahlungsquellen in der Umgebung des Messobjektes. So könnte die Temperaturmessung von Metallteilen in einem Industrieofen durch die höheren Temperaturen der Ofenwände verfälscht werden. Diese Wirkung der Umgebungstemperatur auf das Messergebnis wird von vielen Infrarotmessgeräten durch eine entsprechende Kompensation berücksichtigt. Anderenfalls würde für das Messobjekt ein zu hoher Temperaturwert angezeigt werden. Ein korrekt eingestellter Emissionsgrad in Verbindung mit einer automatischen Kompensation der Hintergrundtemperatur mit Hilfe eines zweiten Temperaturmesskopfes gewährleistet die genauesten Messergebnisse.

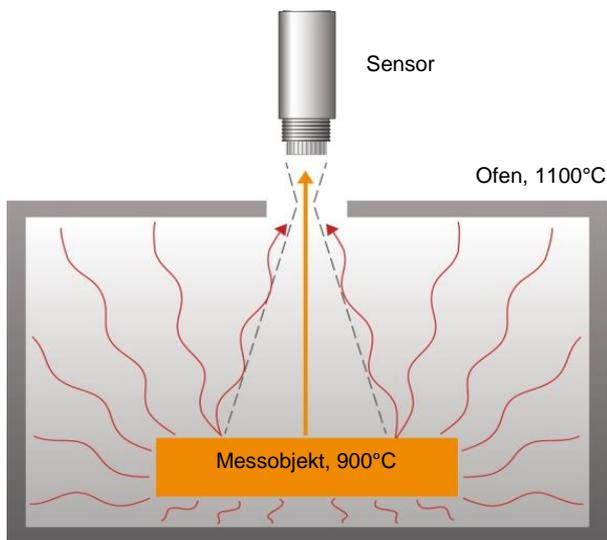


Abb. 15: Kompensation der Hintergrundtemperatur – wichtig bei Messobjekten, die kälter als die Umgebung sind.

Staub, Rauch und Schwebstoffe in der Atmosphäre können zur Verschmutzung der Optik und damit zu falschen Messwerten führen. Um Ablagerungen von Schwebstoffen zu verhindern, werden als Zubehör so genannte Luftblasvorsätze angeboten. Das sind in der Regel vorschraubbare Rohrstopfen mit Druckluftanschluss. Die Luft sorgt für einen Überdruck vor der Optik und hält somit Schmutzteilchen fern. Treten während des Messvorganges starke Staub- oder Rauchentwicklungen auf und beeinträchtigen das Messergebnis, sollten Quotientenpyrometer zum Einsatz kommen.

IR-Sensoren sind elektronische Geräte und können nur innerhalb bestimmter Betriebstemperaturbereiche arbeiten. Bei einigen Sensoren sind bis zu 85°C als obere Grenze zulässig. Oberhalb der zulässigen Betriebstemperatur müssen Luft- bzw. Wasserkühlzubehöre verwendet und spezielle Anschlusskabel für den Hochtemperatureinsatz vorgesehen werden. Beim Einsatz einer Wasserkühlung ist es oft günstig, diese zusammen mit dem Luftblasvorsatz zu verwenden, um die Bildung von Kondenswasser auf der Optik zu verhindern.



Fig. 16: Pyrometer der Thermalert 4.0 Series (Fluke Process Instruments) widerstehen Umgebungstemperaturen bis zu 85°C ohne zusätzliche Kühlung

Zusammenfassung

Faktoren	Lösung
<ul style="list-style-type: none"> Umgebungsstrahlung ist heißer als Objekt 	<ul style="list-style-type: none"> Sensor mit Kompensation der Hintergrundtemperatur Abschirmung des Hintergrundes vom Objekt
<ul style="list-style-type: none"> Staub, Dampf, Teilchen in der Atmosphäre 	<ul style="list-style-type: none"> Luftblasvorsatz für Linse Quotientenpyrometer
<ul style="list-style-type: none"> Hohe Betriebstemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> thermisch isolierte Montage Wasser- oder Luftkühlung Luftblasvorsatz für Linse Hitzeschild

Das Infrarotmesssystem

4.3 Optik und Fenster

Das optische System eines Infrarotthermometers fängt die von einem kreisförmigen Messfleck abgestrahlte infrarote Energie auf und fokussiert sie auf einen Detektor. Dabei ist zu beachten, dass das Messobjekt diesen Messfleck voll ausfüllt. Sonst „sieht“ das IR-Thermometer auch noch andere Temperaturstrahlung aus dem Hintergrund, was den Messwert verfälscht, Abb. 17.

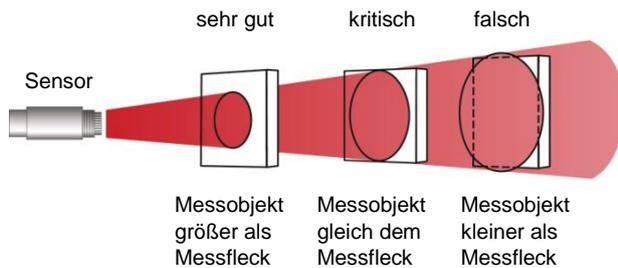


Abb. 17: Das Messobjekt muss den Messfleck voll ausfüllen, sonst kommt es zu Messwertverfälschungen (Ausnahme Quotientenpyrometer).

Die optische Auflösung ist definiert als Verhältnis zwischen der Entfernung des Messgerätes zum Messobjekt und dem Messfleckdurchmesser (D:S Distance to Spot Size). Je größer dieser Wert, desto besser ist die optische Auflösung des Messgerätes und desto kleiner kann das Messobjekt bei gegebener Entfernung sein, siehe Abb. 18.

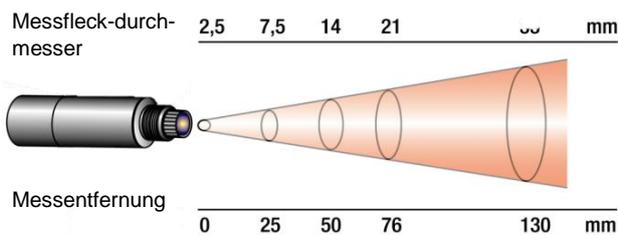


Abb. 18: Optisches Diagramm eines Infrarotsensors. In 130 mm Entfernung beträgt der Messfleck 33 mm, das ergibt ein D:S Verhältnis von etwa 4:1.

Die Optik selbst kann eine Spiegeloptik oder eine Linsenoptik sein. Linsen lassen sich entsprechend ihres Materials nur für bestimmte Wellenlängenbereiche einsetzen, sind aber aus konstruktiven Gründen die bevorzugte Lösung. In der Regel ist die Optik eine sogenannte Festfokusoptik, d. h. der Scharfpunkt befindet sich in einer vom Hersteller festgelegten Messentfernung, nur dort gilt exakt die im Datenblatt angegebene optische Auflösung D:S. Das Pyrometer misst natürlich bei jeder anderen Messentfernung kor-

rekt, jedoch verschlechtert sich die optische Auflösung D:S geringfügig. Dazu sollten die in der Geräteanleitung angegebenen Tabellen bzw. Grafiken genau studiert werden. Die technisch bessere Lösung sind Optiken mit einstellbarem Fokus, da der Anwender dann immer den maximalen D:S Wert nutzen kann.

Abb. 19 zeigt ein Gerät mit einstellbarem Fokus. Ein Stellmotor stellt auf Tastendruck am Gerät bzw. fernbedienbar über die digitale Schnittstelle den Scharfpunkt auf die gewünschte Entfernung.



Abb. 19: Pyrometer mit einstellbarem Scharfpunkt (Endurance Serie der Fa. Fluke Process Instruments). Als Visiereinrichtung kommt u.a. eine Videokamera zum Einsatz, welche bei Veränderung der Messentfernung den Messfleck immer korrekt darstellt.

In der Tabelle 1 sind einige typische Linsen und Fenstermaterialien für IR-Thermometer mit ihren Wellenlängenbereichen dargestellt. /3/

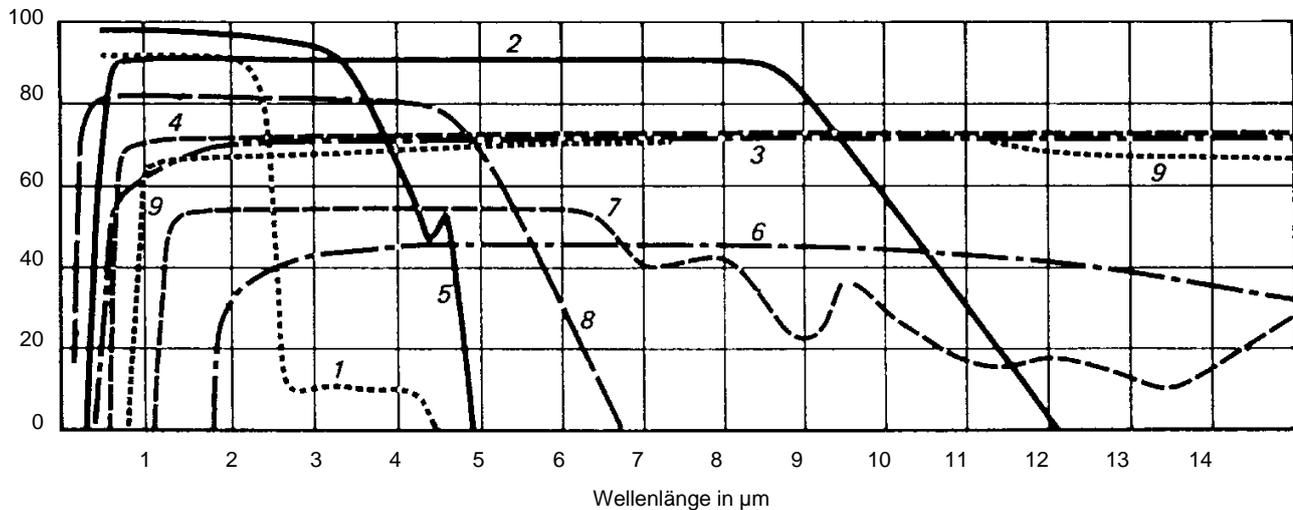
Für die Messung in geschlossenen Reaktionsbehältern, Öfen oder Vakuumkammern ist es in der Regel notwendig, durch ein geeignetes Messfenster hindurch zu messen. Bei der Auswahl des Fenstermaterials ist darauf zu achten, dass die Transmissionswerte des Fensters auf die spektrale Empfindlichkeit des Sensors abgestimmt sind. Bei hohen Temperaturen kommt zumeist Quarzglas zum Einsatz. Bei niedrigen Temperaturen im 8–14 µm-Band ist die Verwendung eines speziellen IR-durchlässigen Materials wie Germanium, Amtir oder Zinkselenit notwendig. Neben der spektralen Empfindlichkeit sind bei der Wahl des Fensters auch solche Parameter zu berücksichtigen wie Durchmesser des Fensters, Temperaturanforderungen, maximale Fensterdruckdifferenz, Umgebungsbedingungen sowie die Möglichkeit, es beidseitig sauber zu halten. Ebenso kann es wichtig sein, Transparenz im sichtbaren Bereich zu haben, um das Gerät besser auf das Messobjekt (z. B. im Vakuumbehälter) ausrichten zu können.

Die Transmission des Fensters hängt wesentlich von seiner Dicke ab. Für ein Fenster mit 25 mm Durchmesser, welches einer Druckdifferenz von einer Atmosphäre standhalten soll, ist eine Dicke von 1,7 mm ausreichend.

Fenster mit Antireflexionsschichten besitzen eine wesentlich höhere Transmission (bis zu 95%). Gibt der Hersteller die Transmission für den entsprechenden Wellenlängenbereich an, kann der Transmissionsverlust zusammen mit der Emissionsgradeinstellung korrigiert werden. Zum Beispiel ein AMTIR-Fenster mit 68% Transmission wird zur Messung eines Messobjektes mit einem Emissionsgrad von 0,9 verwendet. Man multipliziert 0,9 mit 0,68 und erhält 0,61. Dieser Wert ist am Messgerät als Emissionsgrad einzustellen.

	Empfohlener Wellenlängenbereich	Max. Fenstertemperatur	Transmission im sichtbaren Bereich	Beständig gegen Feuchte, Säure, Ammoniakverbindungen	Geeignet für UHV
Saphire Al_2O_3	1...4 μm	1800°C	ja	sehr gut	ja
Quarzglas SiO_2	1...2.5 μm	900°C	ja	sehr gut	ja
CaF_2	2...8 μm	600°C	ja	wenig	ja
BaF_2	2...8 μm	500°C	ja	wenig	ja
AMTIR	3...14 μm	300°C	nein	gut	k.A.
ZnS	2...14 μm	250°C	ja	gut	ja
ZnSe	2...14 μm	250°C	ja	gut	ja
KRS5	1...14 μm	k.A.	ja	gut	ja

Tabelle 1: Fenstermaterialien im Überblick



- | | | |
|---------------------------------|-------------|---|
| 1 Optisches Glas | 4 KRS5 | 7 Silizium |
| 2 Flusspat (CaF_2) | 5 Quarzglas | 8 Lithiumfluorid |
| 3 Zinkselenit (ZnSe) | 6 Germanium | 9 Chalkogenidglas IG2 (Ge-As-Se) |

Abb. 20: Transmission typischer IR-Materialien bei 1 mm Materialdicke

Das Infrarotmesssystem

4.4 Visierhilfen

In der Regel verfügen Pyrometer zur exakten Ausrichtung über ein eingebautes Zielfernrohr für die direkte Beobachtung mit dem Auge. Visiere mit Videokamera und angeschlossenem Bildschirm erleichtern dem Anwender die Aufgabe bzw. erlauben die regelmäßige Kontrolle der Pyrometerposition auch vom Kontrollraum aus. Weiterhin sind Pyrometer mit eingebauten oder vorschraubbaren Lasern erhältlich. Mit Hilfe des Laserstrahls kann der Anwender noch schneller und präziser den Messfleck anvisieren, was die Handhabung insbesondere von tragbaren IR-Messgeräten wesentlich erleichtert. Diese Lasermessfleckbeleuchtung ist vor allem für die Messung sich bewegender Objekte und bei ungünstigen Lichtverhältnissen zu empfehlen.

Folgende Laserarten werden unterschieden:

A Einzellaser

... mit Versatz zur optischen Achse. Einfachste Ausführung, insbesondere für Geräte mit geringer optischer Auflösung (für große Messobjekte). Der Versatz des Lasers zur optischen Achse bewirkt Parallaxenfehler, welche den Laserpunkt nur ungefähr die Messfleckmitte anzeigen lassen.

B Koaxialer Einzellaser

Laser tritt aus der Mitte der Optik aus und verläuft auf der optischen Achse. Damit wird bei jeder Messentfernung exakt das Zentrum des zu messenden Flecks markiert.

C Doppellaser

Der Doppellaser ist eine Visiereinrichtung mit zwei Laserstrahlen, um zusätzlich zur Lage auch die Größe der Messfläche zu zeigen. Damit entfällt für den Anwender die gedankliche Berechnung bzw. Vorstellung des Messfleckdurchmessers und Messfehler werden vermieden. Da die beiden Laserstrahlen nicht auf der optischen Achse verlaufen, treten Parallaxenfehler auf, die insbesondere im Nahbereich den markierten Messfleck größer als den wahren Messfleck erscheinen lassen. Damit kann der Anwender die für das Gerät eigentlich angegebene, geometrische Auflösung nicht voll ausnutzen.

D Gekreuzter Doppellaser

Der gekreuzte Doppellaser ist eine Sonderform des Doppellasers und wird für Geräte mit ausgewiesenem Scharfpunkt verwendet. Der gekreuzte Doppellaser hat ebenfalls zwei Laserstrahlen, die sich jedoch kreuzen. Im Scharfpunkt treffen sich beide Laserstrahlen und das Gerät befindet sich in der Messentfernung, wo der kleinste Messfleck auftritt.

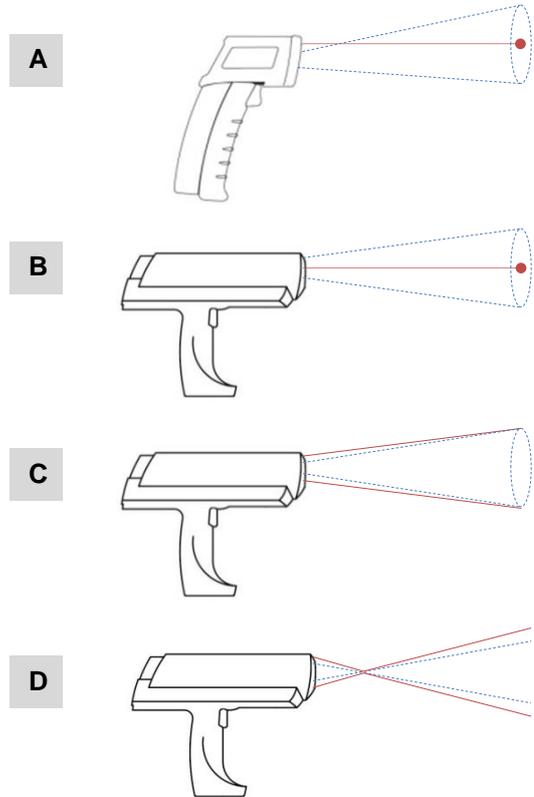


Abb. 21: Laserarten

Die Lasermessfleckbeleuchtung stellt eine wirksame visuelle Hilfe bei der präzisen Ausrichtung des Infrarotmessgerätes auf das Messobjekt dar. Nur beim Messen von sehr hellen Objekten (hohen Temperaturen) oder bei sehr hellem Tageslicht ist ein Zielfernrohr zur besseren Bestimmung des von der Optik erfassten Messfeldes günstiger.



Abb. 22: Geräte mit Laser- und Durchsichtvisier (Raynger 3i Serie, Fluke Process Instruments) erlauben eine punktgenaue Messung auch bei kleinen Messflecken.

Zusammenfassung

Wie bei einem Fotoapparat bestimmt die Leistungsfähigkeit der Optik (z. B. Teleobjektiv), welche Messobjektgröße noch aufgelöst bzw. gemessen werden kann. Das Distanzverhältnis (Messentfernung: Messfleckdurchmesser) charakterisiert die Leistungsfähigkeit der Optik beim IR-Messgerät. Der Messfleck muss für eine genaue Messung vom Messobjekt voll ausgefüllt sein. Zum einfacheren Ausrichten sind die Optiken mit Durchsicht- oder Laservisier kombiniert. Ein Durchsichtvisier kann durch eine eingebaute Videokamera ergänzt werden und erlaubt damit eine Fernüberwachung. Sind zusätzlich Schutzfenster zwischen Messgerät und Messobjekt notwendig, ist auf die richtige Auswahl des Fenstermaterials zu achten. Dabei spielen Wellenlängenbereich und Einsatzbedingungen eine wesentliche Rolle.

4.5 Detektoren

Der Detektor ist das Kernstück des IR-Thermometers. Er wandelt die empfangene Infrarotstrahlung in elektrische Signale um, die von der nachfolgenden Elektronik als Temperaturwerte ausgegeben werden. Neueste Prozessortechniken haben bei gleichzeitiger Senkung der Kosten die Systemstabilität, Zuverlässigkeit, Auflösung und Messgeschwindigkeit der Infrarot-Thermometer erhöht.

Es gibt zwei Hauptgruppen von Infrarotdetektoren: Quantendetektoren und thermische Detektoren. Quantendetektoren (Fotodioden) treten mit den auftreffenden Photonen direkt in Wechselwirkung und es entstehen Elektronenpaare und damit ein Stromsignal. Thermische Detektoren (z. B. Thermosäulen oder Bolometer) ändern ihre Temperatur in Abhängigkeit von der auftreffenden Strahlung. Die Temperaturänderung erzeugt bei der Thermosäule eine Spannung und beim Bolometer eine Widerstandsänderung. Thermische Detektoren sind auf Grund der notwendigen Eigenerwärmung viel langsamer als Quantendetektoren. Viel langsamer bedeutet hier *ms* im Verhältnis zu *ns* oder *μs* bei den letztgenannten Detektoren. Quantendetektoren werden vor allem in sehr schnellen Wärmebildkameras und Zeilenscannern eingesetzt.

4.6 Anzeige und Schnittstellen

Wichtig für den Anwender sind die verfügbaren Schnittstellen und Arten der Messwertanzeige. Die bei einigen direkt vorhandene Anzeige/Bedienfeld-Kombination kann als Primärausgang des Messgerätes betrachtet werden. Analog- oder Digitalausgänge dienen der Ansteuerung von zusätzlichen Anzeigen in der Messwarte oder können zu Regelzwecken verwendet werden. Der direkte Anschluss an Datenspeicher, Drucker, Computer oder speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) ist ebenso möglich.

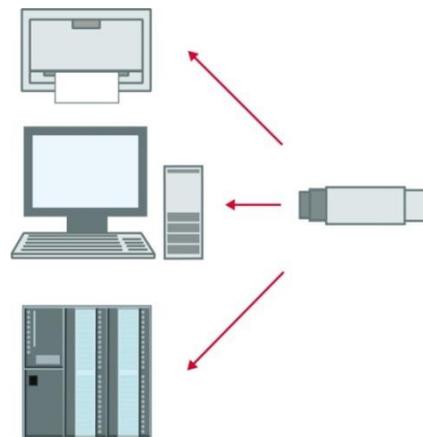


Abb. 23: Die Datenausgänge des IR-Thermometers können direkt an Drucker oder speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) angeschlossen werden. Mit PC-Software lassen sich kundenspezifische Grafiken und Tabellen erstellen.

Industrielle Feldbussysteme spielen eine immer größere Rolle und erlauben dem Anwender mehr Flexibilität. So kann z. B. der Anwender von der Schaltwarte aus die Sensoren einstellen, ohne den Fertigungsprozess unterbrechen zu müssen. Ebenfalls möglich ist die Veränderung von Parametern, wenn auf der gleichen Fertigungslinie unterschiedliche Produkte laufen. Ohne diese Ferneinstellung müsste jede Veränderung der Sensorparameter, zum Beispiel Emissionsgrad, Messbereich oder Grenzwerte, manuell am Sensor selbst vorgenommen werden. Da die Sensoren oft an schwer zugänglichen Stellen montiert sind, gewährleistet der intelligente Sensor eine kontinuierliche Prozessüberwachung und -steuerung bei minimalem Arbeitskräfteeinsatz. Bei Eintritt einer Störung – zu hohe Umgebungstemperaturen, Kabelunterbrechungen, Ausfall von Komponenten – erscheint automatisch eine Fehlermeldung.

Das Infrarotmesssystem

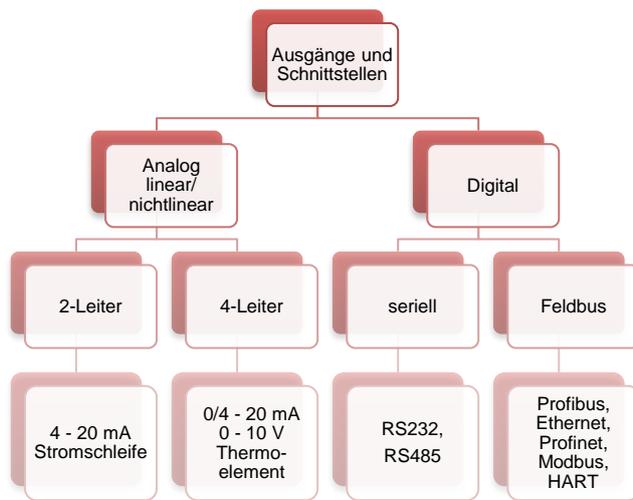


Abb. 24: Beispiele für Schnittstellen, wie sie gegenwärtig bei Infrarotmessgeräten zu finden sind.

Die Adressierbarkeit von Pyrometern erlaubt den Betrieb von mehreren Geräten an einem Netzwerk (Multidropbetrieb) und senkt damit den Installationsaufwand. Auf Grund der Vielfalt der heute verfügbaren Busprotokolle und Feldbusarten sind verschiedene Umsetzer (Gateways) auf dem Markt, welche die Anpassung (Übersetzung) gerätespezifischer Kommandos in das entsprechende Busprotokoll (zum Beispiel Profibus DP) vornehmen. Die RS485 stellt dafür eine verbreitete Hardwareplattform dar.

Ebenso anzutreffen sind Geräte basierend auf einer Ethernet-Schnittstelle, welche über eine eigene IP Adresse verfügen und damit direkt in einem Intranet/Internet über Standard Webbrowser ansprechbar sind. Problematisch im Netzbetrieb sind hier Anwendungen für schnelle Online-Messungen mit festgelegten Zeitabständen.

Ein weiterer Vorteil der Pyrometer mit digitaler Schnittstelle ist die Möglichkeit der Feldkalibrierung mit Hilfe einer gerätespezifischen Kalibriersoftware des Herstellers.

4.7 Technische Daten von IR Thermometern

Eine vollständige Übersicht mit den dazugehörigen Hinweisen zur Erhaltung und Messmethoden zur Überprüfung ist in /6/, /7/ und /8/ gegeben.

Folgende wichtige technische Daten charakterisieren ein Strahlungsthermometer und sollten bei der Auswahl eines geeigneten Pyrometers beachtet werden:

Messtemperaturbereich

Vom Hersteller angegebener Temperaturbereich, bei dem die Messabweichung innerhalb festgelegter Grenzen bleibt.

Messunsicherheit

Toleranzintervall, in dem der wahre Messwert mit einer angegebenen Wahrscheinlichkeit liegt, bezogen auf eine bestimmte Mess- und Umgebungstemperatur

Temperaturdrift

Die Temperaturdrift charakterisiert den zusätzlichen Messfehler bei Abweichung der Umgebungstemperatur von der Bezugstemperatur der Messunsicherheit, z. B. 0,01 K/K für Umgebungstemperatur > 23°C.

Temperaturauflösung

(Rauschäquivalente Temperaturdifferenz)

Anteil der Messunsicherheit, der auf Grund von Geräterauschen entsteht. Zur Angabe gehört die gültige Einstellzeit und Messtemperatur, z. B. 0,1 K (bei 100°C Messtemperatur und 150 ms Einstellzeit).

Wiederholbarkeit

Anteil der Messunsicherheit von Messungen, die innerhalb kurzer Zeit unter gleichen Bedingungen wiederholt wurden.

Langzeitstabilität

Wird wie die Messunsicherheit angegeben und bezieht sich auf einen längeren Zeitraum (mehrere Monate).

Spektralbereich

Bei Bandstrahlungs-pyrometern wird die obere und untere Grenze in μm angegeben, bei Spektralpyrometern die mittlere Wellenlänge und eine Halbwertbreite, z. B. $5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

Messfeldgröße

(in Abhängigkeit von der Messentfernung)

Es ist üblich, die Messfeldgröße, bei der das Signal auf einen bestimmten Wert abgefallen ist, anzugeben, z. B. 90%. Dazu gehört die Angabe der Messentfer-

nung. Alternativ kann das Distanzverhältnis (Entfernung zu Messfleckdurchmesser, D:S) angegeben werden.

Einstellzeit

Zeitspanne zwischen Temperaturänderung des Messobjektes und der dazugehörigen Anzeige des Messwertes. Vollständige Angaben dazu beinhalten die Größe des Temperatursprunges sowie die Grenze, bei der gemessen wird.

Beispiel: $t = 10\text{ ms}$ (25°C , 800°C , 95 %)

Erfassungszeit

Minimale erforderliche Zeitspanne, in der ein Messobjekt für das Messgerät sichtbar sein muss, damit der Ausgabewert dem Messwert folgen kann. Die Ausgabe des Messwertes kann zeitversetzt erfolgen. In der Regel ist die Erfassungszeit kürzer als die Einstellzeit. Die Angaben erfolgen wie bei der Einstellzeit.

Beispiel: $t = 1\text{ ms}$ (25°C , 800°C , 95 %)

Betriebs- und Lagertemperatur

Zulässige Umgebungstemperatur, bei der das Gerät betrieben bzw. gelagert werden darf.

Weiterhin sind mechanische und elektrische Anschlussbedingungen der Geräte zu beachten (Schutzart, Vibrationsfestigkeit usw.).

4.8 Kalibrierung

Um die Messgenauigkeit über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten, sollten Pyrometer regelmäßig überprüft und bei Abweichungen neu kalibriert werden. Dazu muss die ausführende Stelle (z. B. DKD-Labor) die Kalibriergeometrie des Herstellers kennen oder es wird die Anwendungsgeometrie für dieses Gerät zu Grunde gelegt. Die wichtigen Angaben dazu sind im Wesentlichen der Messabstand und die Messfläche des Kalibrierstrahlers bzw. die Messobjektgröße. Falls der Anwender eine Nachjustierung benötigt, ist das Gerät zum Hersteller zu senden oder, falls vorhanden, kann die von einigen Herstellern mit dem Gerät gelieferte Feldkalibriersoftware verwendet werden.

Die Anbindung der Kalibrierstrahler an die ITS90 erfolgt je nach Bauart über Referenzpyrometer (Transfernormale) oder Berührungsthermometer, welche in regelmäßigen Zeitabständen bei der PTB bzw. von DKD-Laboren kalibriert werden. In /9/ werden die verschiedenen Verfahren ausführlich beschrieben.



Abb. 25: Kalibrierung eines Schwarzstrahlers mittels Trirat LT TransfERNormal der Firma Fluke Process Instruments

Typische Messunsicherheiten eines TransfERNormals ¹	
Temperatur	Messunsicherheit 2σ
-49,9°C	0,11 K
-20,0°C	0,08 K
0,0°C	0,07 K
25,1°C	0,07 K
50,1°C	0,07 K
100,0°C	0,08 K
150,0°C	0,17 K
200,0°C	0,18 K
250,0°C	0,20 K
270,0°C	0,21 K

¹ Kalibrierzertifikats-Nr.: 2034 PTB 02, Öffnungsdurchmesser der Strahlungsquelle 60 mm, Kalibrierung im Fokuspunkt
Umgebungstemperatur 23°C ± 1°C

Tabelle 2: Temperaturwerte und dazugehörige Messunsicherheiten des TransfERNormals

5 Spezialpyrometer

5.1 Pyrometer mit Glasfaseroptik

Für Einsatzfälle, bei denen mit starken elektrischen bzw. magnetischen Störfeldern gerechnet werden muss sowie für Messungen bei hohen Umgebungstemperaturen, im Vakuum oder bei engen Platzverhältnissen werden Pyrometer mit Glasfaseroptiken eingesetzt. Dadurch ist es möglich die empfindliche Elektronik außerhalb der gefährdeten Zone zu platzieren. Typische Anwendungen sind Induktionserwärmung und Induktionsschweißen. Da die Glasfaseroptiken selbst keinerlei Elektronik enthalten, lässt sich die Betriebstemperatur ohne Kühlung wesentlich nach oben hin erweitern (bis 300°C). Die Installations- und laufenden Betriebskosten pro Messstelle sind damit gering, da keine Wasserkühlung benötigt wird.

Als Lichtleiter kommen Mono- oder Multifaser (Faserbündel) zum Einsatz. Multifasern haben den Vorteil geringerer Biegeradien.

Die Austauschbarkeit der Glasfaserkabel und Optiken ist bei modernen Geräten ohne Nachkalibrierung möglich und beschränkt sich auf die Eingabe einer mehrstelligen Werkskalibriernummer. Glasfaseroptiken werden für 1 µm und 1,6 µm Wellenlänge angeboten. Damit lassen sich Messobjekte ab 250°C messen.



Abb. 26: Modernes, digitales Glasfaserpyrometer (Endurance Series, Fluke Process Instruments)

5.2 Quotientenpyrometer

Dies sind Spezialpyrometer (auch Zweifarben- oder Verhältnispyrometer genannt), die über zwei baugleiche optische und elektrische Messkanäle verfügen. Beide Wellenlängenbereiche legt man möglichst nah zueinander und sehr schmalbandig aus, damit die Auswirkung materialspezifischer Besonderheiten (Reflexion, Emission) von Seiten des Messobjektes bei beiden Wellenlängen möglichst identisch ist. Durch eine Quotientenbildung beider Messsignale

lassen sich bestimmte Messeinflüsse eliminieren. Folgenden Arten der technischen Realisierung haben sich durchgesetzt:

1. Die Aufteilung der Messstrahlung mittels zweier Filter, welche vor einem Strahlungsdetektor rotieren (Filterrad). Die Messung in beiden Kanälen erfolgt zeitlich nacheinander, was bei sich schnell bewegenden Messobjekten zu Fehlern bei der Quotientenberechnung führen kann (Kanal 1 sieht eine andere Messstelle als Kanal 2).
2. Aufteilung der Messstrahlung mittels Strahlteiler und zwei mit Filtern versehener Strahlungsdetektoren.
3. Die Messstrahlung gelangt ohne Strahlteiler auf einen mit Filter versehenen Doppeldetektor (Sandwichaufbau). Dabei stellt der vordere Detektor den Filter für den zweiten dahinterliegenden Detektor dar.

Unter Benutzung der Pyrometergleichungen /5/ für den Kanal 1 mit der Wellenlänge λ_1 und den Kanal 2 mit λ_2 erhält man für die gemessene Temperatur T_{mess} :

$$1/T_{\text{mess}} = 1/T_{\text{objekt}} + (\lambda_1 \lambda_2)/(c_2 (\lambda_2 - \lambda_1)) \ln (\varepsilon_2/\varepsilon_1) \quad (3)$$

Sind die Emissionsgrade in beiden Kanälen gleich, so wird der Term hinter dem Pluszeichen zu Null und die gemessene Temperatur entspricht der Objekttemperatur T_{objekt} (c_2 : zweite Strahlungskonstante in $\mu\text{m}\cdot\text{K}$).

Die gleiche Betrachtungsweise lässt sich für die Messobjektfläche A ableiten, welche als A_2 und A_1 natürlich für beide Kanäle identisch ist und damit auch hier der Term nach dem Pluszeichen entfällt.

$$1/T_{\text{mess}} = 1/T_{\text{objekt}} + (\lambda_1 \lambda_2)/(c_2 (\lambda_2 - \lambda_1)) \ln (A_2/A_1) \quad (4)$$

Damit erfolgt die Messung unabhängig von der Größe des Messobjektes. Äquivalent reduziert sich die beim Pyrometer ankommende Objektstrahlung nicht nur durch eine kleinere Messfläche, sondern auch durch eine kürzere Zeitspanne, in der das Pyrometer das Objekt „zu Gesicht bekommt“. Dadurch können auch Objekte gemessen werden, welche sich nicht während der gesamten Erfassungszeit des Pyrometers im Gesichtsfeld befinden.

In gleicher Weise werden auch sich ändernde Transmissionseigenschaften der Messstrecke eliminiert. Damit lassen sich die Geräte auch bei Staub, Rauch oder jedem anderen die Strahlung des Objektes reduzierenden Effekt einsetzen. Moderne Geräte können diesen Effekt (Dämpfungsfaktor, Blockung oder engl. Attenuation) auf die eigene Optik

anwenden und bei entsprechendem Verschmutzungsgrad (z. B. bei Ausfall der Spülluft für Luftblasvorsatz) ein Alarmsignal senden.

Bei einigen Anwendungen, wo technologiebedingt eine bestimmte Partikeldichte um das Messobjekt auftritt, liefert ein Quotientenpyrometer mit Dämpfungsfaktorausgabe zusätzliche Informationen. Abb. 27 zeigt die im Rahmen der PC-Software ausgegebenen Informationen eines Quotientenpyrometers. Neben der aus der Quotientenbildung berechneten Temperatur werden auch die Messtemperaturen beider Einzelkanäle ausgegeben. Zusätzlich wird aus dem Vergleich von beiden der Dämpfungswert in Prozent berechnet und angezeigt.

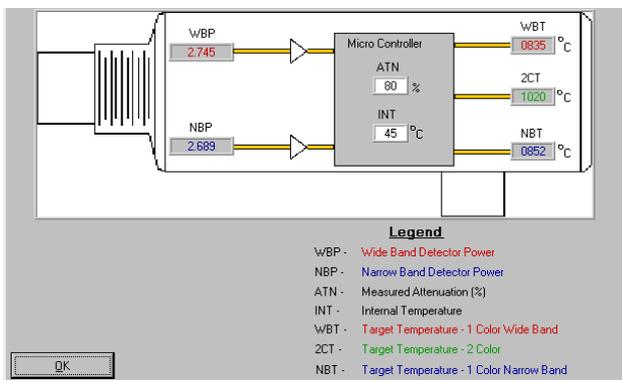


Abb. 27: Über die PC-Software eines Quotientenpyrometers ausgegebene Messdaten: Objekttemperatur im Messkanal 1 (WBT), Objekttemperatur im Messkanal 2 (NBT) und die aus dem Quotienten berechnete Objekttemperatur (2CT). Gleichzeitig werden der Blockungsgrad in Prozent (ATN) angezeigt.

Folgende Materialien mit oxidierter Oberfläche an Luft verhalten sich wie graue Strahler und sind messbar mit einem Emissionsgradverhältnis (Slope) von 1,00:

Eisen, Kobalt, Nickel, Stahl und Edelstahl.

Folgende Materialien mit glatter, reiner nicht oxidierter Oberfläche sind so genannte nichtgraue Strahler und messbar mit einem Emissionsgradverhältnis von 1,06:

Eisen, Gusseisen, Kobalt, Nickel, Wolfram, Molybdän, Stahl, Edelstahl, Tantal, Rhodium, Platin.

Zusammenfassung

Quotientenpyrometer können die Temperatur auch dann messen, wenn:

1. Das Messobjekt kleiner als der Messfleck ist bzw. ständig seine Größe ändert (Hintergrund kälter als Messobjekt).
2. Das Messobjekt sich innerhalb der Antwortzeit durch den Messfleck bewegt.
3. Die Sicht auf das Messobjekt eingeschränkt ist (Staub oder andere Partikel, Wasserdampf oder Rauch).
4. Der Emissionsgrad sich während der Messung ändert.

Der Dämpfungsfaktor liefert zusätzliche technologische Prozessinformationen bzw. kann als Alarm bei zu starker Linsen- bzw. Fensterverschmutzung genutzt werden.

Spezialpyrometer

5.3 Bildgebende Systeme

Im Gegensatz zur punktuellen Temperaturerfassung interessieren hier Temperaturverteilungen am Messobjekt. Lokale Temperaturdifferenzen sowie die Erkennung von sogenannten „Hot Spots“ oder „Cold Spots“ spielen hierbei oftmals eine wichtigere Rolle als die absoluten Temperaturwerte. In Abb. 28 sieht man die Temperaturdifferenzen einer Kunststoffolie mit einem Materialdefekt am rechten Rand.

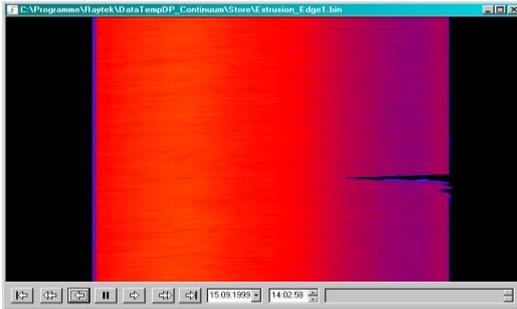


Abb. 28: Wärmebild einer Kunststoffbahn mit Materialdefekt am rechten Rand

Die technischen Spezifikationen von IR-Kameras unterscheiden sich von denen der Pyrometer dahingehend, das häufig an Stelle des Distanzverhältnisses (D:S) der gesamte Gesichtswinkel in Grad (z.B. 30°) und der auf einen Messpunkt (Pixel) bezogene Winkel in mrad (z.B. 3 mrad) angegeben wird. Für einen Vergleich mit einem Einzelpunktpyrometer lässt sich sehr einfach eine Umrechnung bei einem Meter Messentfernung anstellen, da dann die mrad Angabe eines Messpixels dem Messfleckdurchmesser in mm entspricht.

Weiterhin wird an Stelle der Einstellzeit die Zeilen- bzw. Bildfrequenz angegeben.

5.3.1 IR-Zeilenkameras

IR-Zeilenkameras werden für die Messung an bewegten Objekten eingesetzt, zum Beispiel bei Bandprozessen. Man erhält die Temperaturverteilung quer zur Bewegungsrichtung. Die zweite Koordinate für ein zweidimensionales Wärmebild liefert die Prozessbewegung selbst. Abb. 29 veranschaulicht das Messprinzip an einem Bandprozess. In Abb. 30 sieht man die Temperaturverteilung über die Folienbahn und gleichzeitig die Farbdarstellung der Temperaturwerte als Wärmebild durch Aneinanderreihung mehrerer Temperaturprofile. Deutlich zu sehen ist der Temperaturabfall in den Randzonen.

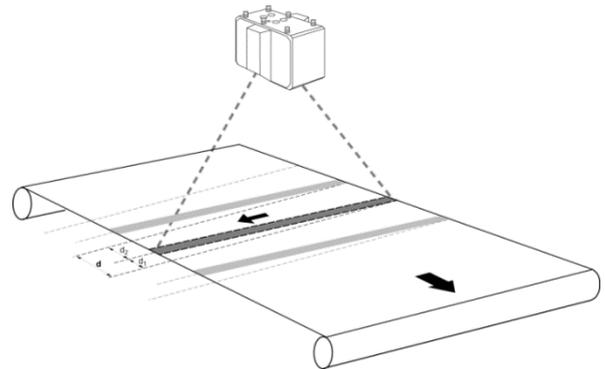


Abb. 29: Messprinzip einer Zeilenkamera

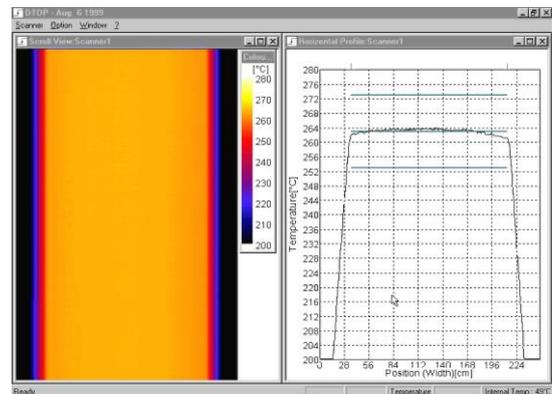


Abb. 30: Darstellung der Messwerte einer Zeilenkamera bei der Messung von Folienbandprozessen, links das Wärmebild und rechts eine Profildarstellung.

Optomechanische Systeme

Diese Systeme arbeiten mit einem Punktsensor, welcher über einen bewegten Spiegel das Gesichtsfeld abtastet. Hiermit lassen sich Profile mit hoher Genauigkeit erstellen, da jeder Objektpunkt mit demselben Sensor gemessen wird. Die optomechanische Baugruppe bestimmt in der Regel die MTBF (*Mean Time between Failures* / mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen) des Messgerätes, welche nach heutigem Stand der Technik aber bei mehreren Jahren liegen kann. Es lassen sich Zeilenfrequenzen bis zu mehreren 100 Hz erzielen und die Anzahl der Messpunkte kann bis zu 1000 erreichen.

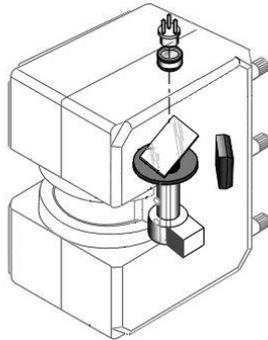


Abb. 31: Prinzip einer optomechanischen Baugruppe mit Rotationsspiegel

Da von der optischen Seite nur ein Messpunkt abgebildet werden muss, kann die Optik im Gegensatz zu den Zeilensensorsystemen sehr einfach gehalten werden und ermöglicht die Realisierung preisgünstiger Systeme. Ein weiterer großer Vorteil gegenüber Zeilen- und Matrixkameras ist der weite Gesichtswinkel, welcher durch das Eintrittsfenster im Zusammenspiel mit der Umlenkspiegeleinheit gebildet wird. 90° Gesichtswinkel sind kein Problem und lassen damit selbst an breiten Bandprozessen praktikable Messentfernungen zu.

Zeilensensorsysteme

Die Anzahl der Messpunkte wird durch die Anzahl der Pixel eines Zeilensensors bestimmt. Damit entfällt der bewegte Spiegel. Da in der Regel pyroelektrische Sensorzeilen zum Einsatz kommen und dieser Sensor nur Wechsellichtsignale verarbeitet, muss mit Hilfe einer mechanischen Baugruppe das Messsignal zerhackt werden. Damit wird auch bei diesem Messprinzip die MTBF von der Optomechanik bestimmt. Zusätzlicher Aufwand muss bei der Kalibrierung betrieben werden, um die unterschiedlichen Pixelempfindlichkeiten zu kompensieren, damit das sogenannte Musterrauschen, z. B. sichtbar bei Messung einer temperaturhomogenen Fläche, möglichst klein wird. Dieser Effekt entfällt völlig bei dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Messsystem. Lieferbare Wechseloptiken gestatten Gesichtswinkel von wenigen Grad (Teleobjektiv) bis maximal 60°.

5.3.2 Matrixkameras

Matrixkameras können vollständig ohne mechanisch bewegte Teile auskommen und liefern ein komplettes Wärmebild auch von unbewegten Objekten. Als Matrizen (FPA's) kommen für Ultrahochgeschwindigkeitskameras in der Regel gekühlte CMT Matrizen aus der Militärforschung zum Einsatz. Für preiswertere Sys-

teme, die Videobildfrequenzen liefern, wurden teilweise Versuche mit Pyrosensormatrizen gemacht. Heutzutage werden aber auf breiter Basis Bolometermatrizen eingesetzt.

Bolometer FPA's

Gerade in den letzten Jahren wurden bei den Bolometern auf Halbleiterbasis große Fortschritte erzielt. Die rauschbegrenzte Temperaturauflösung kann besser als 0,1 K sein und Bildwechselfrequenzen erreichen mehr als das doppelte heutiger Videonormen. Heutige Standardsysteme bieten eine Pixelauflösung von 320x240 oder volle VGA Auflösung von 640x480 Messpunkten. Bolometermatrizen werden ungekühlt betrieben und erlauben daher sehr kompakte Bauformen der Wärmebildkamera.



Abb. 32: Moderne Wärmebildkamera mit einer Pixelauflösung von 320x240 oder 640x480 (ThermoView TV40, Fluke Process Instruments)

6 Zusammenfassung

Infrarot-Thermometer ermitteln die von einem Körper abgestrahlte Energie, ohne diesen selbst zu berühren. Damit sind schnelle und sichere Temperaturmessungen an sich bewegenden, sehr heißen oder schwer zugänglichen Objekten möglich. Während ein Kontaktthermometer die Temperatur des Messobjektes beeinflussen kann und das Produkt selbst unter Umständen beschädigt oder verunreinigt, gewährleistet das berührungslose Verfahren jederzeit saubere, präzise und gefahrlose Messungen.

Waren Infrarot-Thermometer in der Anfangszeit noch schwer, unhandlich und kompliziert zu bedienen, so hat sich das Bild heute komplett gewandelt. Moderne Infrarotthermometer sind klein, handlich, einfach zu bedienen und sogar in Maschinen einbaubar. Vom Miniaturmesskopf bis zu anspruchsvollen Spezialsensoren für die Integration in bestehende Produktionsanlagen - die angebotene Palette ist umfangreich.

7 Literaturverzeichnis

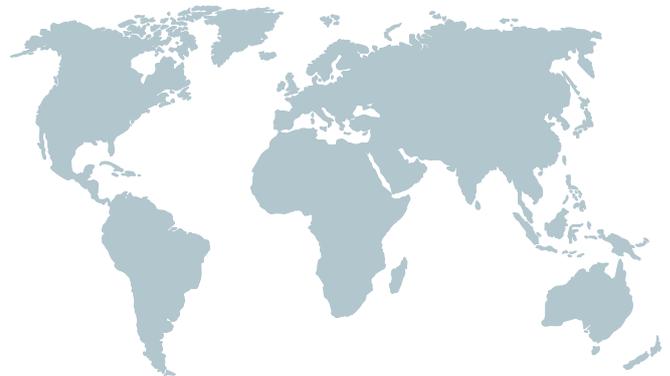
- /1/ Klaus Herrmann, Ludwig Walther:
Wissensspeicher Infrarottechnik, 1990,
Fachbuchverlag Leipzig
- /2/ Stahl, Miosga: Grundlagen Infrarottechnik,
1980, Dr. Alfred Hütthig Verlag Heidelberg
- /3/ VDI/VDE Richtlinie, Technische Temperatur-
messungen – Strahlungsthermometrie,
Januar 1995, VDI/VDE 3511 Blatt 4
- /4/ De Witt, Nutter: Theory and Practice of Radia-
tion Thermometry, 1988, John Wiley&Son,
New York, ISBN 0-471-61018-6
- /5/ Wolfe, Zissis: The Infrared Handbook, 1978, Of-
fice of Naval Research,
Department of the Navy, Washington DC.
- /6/ VDI/VDE Richtlinie, Technische Temperatur-
messungen – Spezifikation von Strahlungsther-
mometern, Juni 2001,
VDI/VDE 3511 Blatt 4.1
- /7/ VDI/VDE Richtlinie, Technische Temperatur-
messungen – Erhaltung der Spezifikation von
Strahlungsthermometern, Januar 2002,
VDI/VDE 3511 Blatt 4.2
- /8/ VDI/VDE Richtlinie, Technische Temperatur-
messungen – Standard-Test-Methoden für
Strahlungsthermometern mit einem Wellenlän-
genbereich, Juli 2005, VDI/VDE 3511 Blatt 4.3
- /9/ VDI/VDE Richtlinie, Technische Temperatur-
messungen – Kalibrierung von Strahlungsther-
mometern, Juli 2005, VDI/VDE 3511 Blatt 4.4

Fluke Process Instruments entwickelt, fertigt und vertreibt eine breite Palette herausragender Qualitätsprodukte für die berührungslose Temperaturmessung im industriellen und kommerziellen Bereich. Die innovativen, anspruchsvollen Messgeräte entsprechen unterschiedlichsten Kundenanforderungen.

Produkte von Fluke Process Instruments finden sich überall dort, wo die Temperatur eine wichtige Rolle zur Sicherung der Qualität spielt – in der Lebensmittelbranche ebenso wie im Stahlwerk, in der Glashütte oder in der Zementfabrik.

Sensoren zur Prozessautomatisierung von Fluke Process Instruments ermöglichen eine kontinuierliche Temperaturüberwachung. Die intelligenten, digitalen Systeme erlauben die Fernprogrammierung der Infrarot-Sensoren und die Übertragung, Aufzeichnung sowie Auswertung aufgenommener Messdaten. Sensoren von Fluke Process Instruments gewährleisten die exakte und zuverlässige Überwachung der Temperatur in industriellen Fertigungsprozessen.

Industrie-Sensoren von Fluke Process Instruments sind zuverlässige, kostengünstige und einfach zu bedienende Lösungen für die präzise Temperaturüberwachung. Durch Senkung von Stillstandszeiten, der Verringerung von Ausschuss und die Erhöhung der Effektivität und Produktivität der Fertigungsprozesse gewährleistet ihr Einsatz sofortige und wesentliche Einsparungen an Zeit und Geld.



Fluke Process Instruments

Amerika

Everett, WA USA

Tel: +1 800 227 8074

+1 425 446 6300

solutions@flukeprocessinstruments.com

EMEA

Berlin, Deutschland

Tel: +49 30 478 0080

info@flukeprocessinstruments.de

China

Peking, China

Tel: +86 10 6438 4691

info@flukeprocessinstruments.cn

Weltweiter Service

Fluke Process Instruments bietet verschiedene Serviceleistungen, einschließlich Reparatur und Kalibrierung.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Ihrer Niederlassung.

www.flukeprocessinstruments.com

© 2018 Fluke Process Instruments.

Alle Rechte vorbehalten. Änderungen vorbehalten.

55514-1, Rev. 1.0, Jun 2018