

Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung “Strahlungsthermometrie”



Autor: Dr.-Ing. Gruner
Kgruner@Raytek.de

Inhalt

Vorwort

1. Vorteile beim Einsatz von IR-Thermometern

2. Das Infrarotmesssystem

2.1. Das Messobjekt

2.1.1. Ermittlung des Emissionsgrades

2.1.2. Messung von Metallen

2.1.3. Messung an Kunststoffen

2.1.4. Messung an Glas

2.2. Umgebungsbedingungen

2.3. Optik und Fenster

2.4. Detektoren

2.5. Anzeige und Schnittstellen

3. Spezialpyrometer

3.1. Pyrometer mit Glasfaseroptik

3.2. Quotientenpyrometer

4. Literaturverzeichnis

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 Frageblatt zusenden.

1. Vorteile beim Einsatz 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. Stillstandszeiten 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.

Welche Vorteile bietet die berührungslose Temperaturmessung?

1. Schnell (im ms-Bereich), dadurch Zeitersparnis bzw. mehrere Messungen und mehr Informationsgewinn möglich (Temperaturfeldbestimmung)
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. Dort haben Kontaktthermometer nur eine begrenzte Lebensdauer.

5. Rückwirkungsfrei d. h. dem Messobjekt wird keine Energie entzogen. Speziell bei schlechten Wärmeleitern wie Plastik und Holz ergibt sich damit eine hohe Messgenauigkeit und keine Verfälschung der Messwerte im Vergleich zur Berührung mit Kontaktthermometern.
6. Hygienisch und ohne mechanische Einwirkung auf die Oberfläche. Dadurch verschleißfrei, beispielsweise Lackoberflächen werden nicht zerkratzt bzw. es können weiche Oberflächen gemessen werden.

Nachdem die Vorteile genannt wurden, bleibt die Frage, was beim Einsatz von IR-Thermometern zu beachten ist:

1. Das Objekt muss optisch (infrarotoptisch) für das IR-Thermometer sichtbar sein. Starker Staub oder Rauch beeinträchtigen die Messung sowie feste Hindernisse z.B. geschlossene metallische Reaktionsgefäße lassen im Inneren natürlich keine Messung 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.

2. Das Messsystem

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. In der Abb. 1 ist ein IR-Messsystem gezeigt.

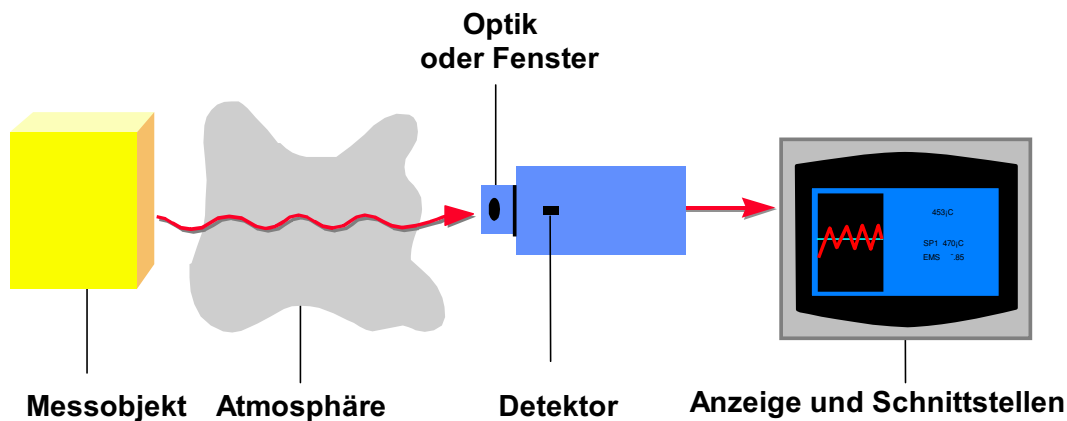


Abb.: 1 Infrarotmesssystem

2.1. Das Messobjekt

Jeder Körper mit einer Temperatur (T) 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 lateinisch „infra“-rot genannt (siehe Abb. 2).

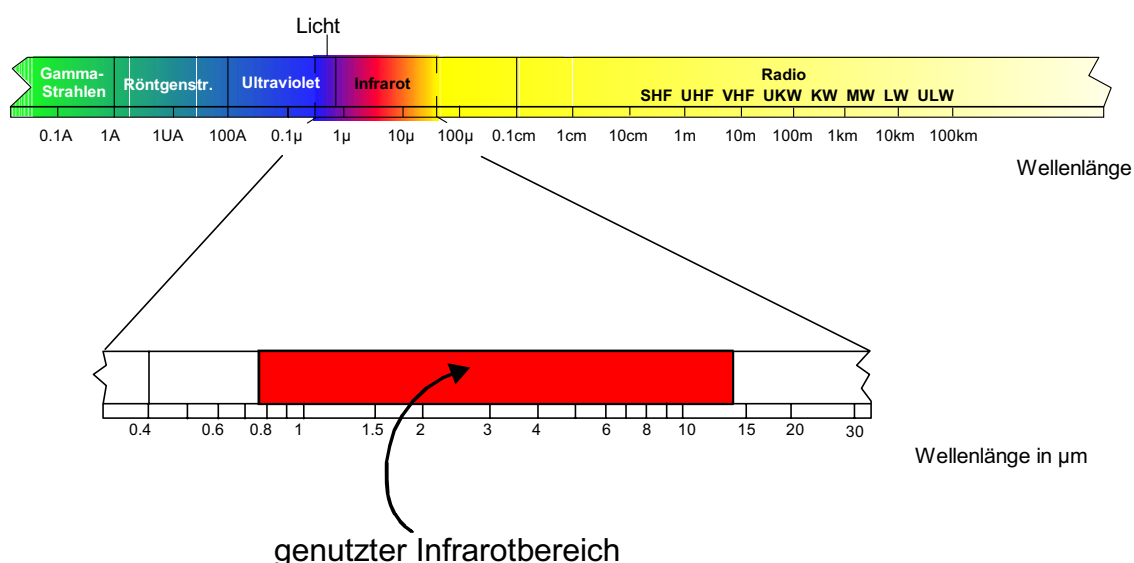


Abb. 2: Das elektromagnetische Spektrum, messtechnisch interessant der Bereich von etwa 0,7 bis 14 μm

Die Abb. 3 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. Der unsichtbare Teil des Spektrums enthält aber bis zu 100000 mal mehr Energie. Darauf baut die Infrarotmesstechnik auf. In der Abb. 3 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 4. Potenz der Temperatur. Diese Zusammenhänge wurden von STEFAN und BOLTZMANN 1879 erkannt und erlauben eine eindeutige Temperaturbestimmung aus dem Strahlungssignal, siehe /1/, /3/, /4/ u. /5/.

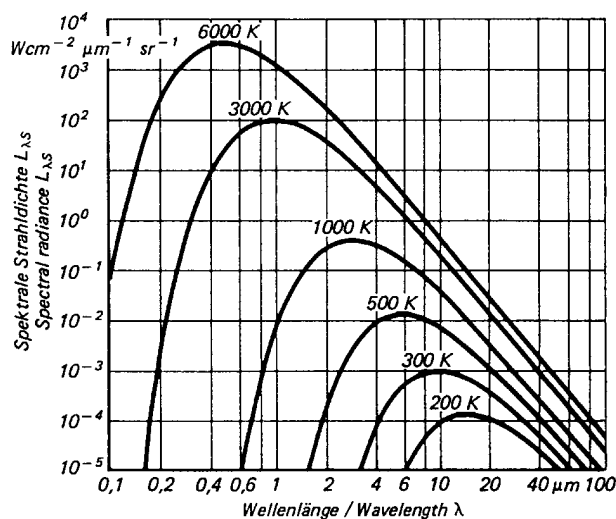


Abb. 3: Strahlungscharakteristik eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit von der Temperatur nach /3/.

Sieht man sich Abb. 3 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. 3 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 (Wiensches 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). Die Abb. 3 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. 4)

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

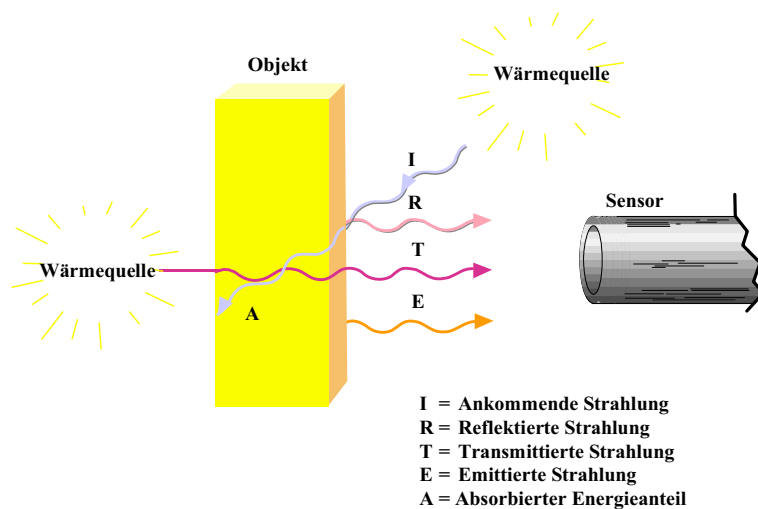


Abb. 4: Der Sensor empfängt neben der vom Messobjekt emittierten Strahlung auch Strahlungsreflexionen und Strahlung, welche das Messobjekt durchgelassen hat.

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 KIRCHHOFSCHEN 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 (emittiert) wird):

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

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. 5.

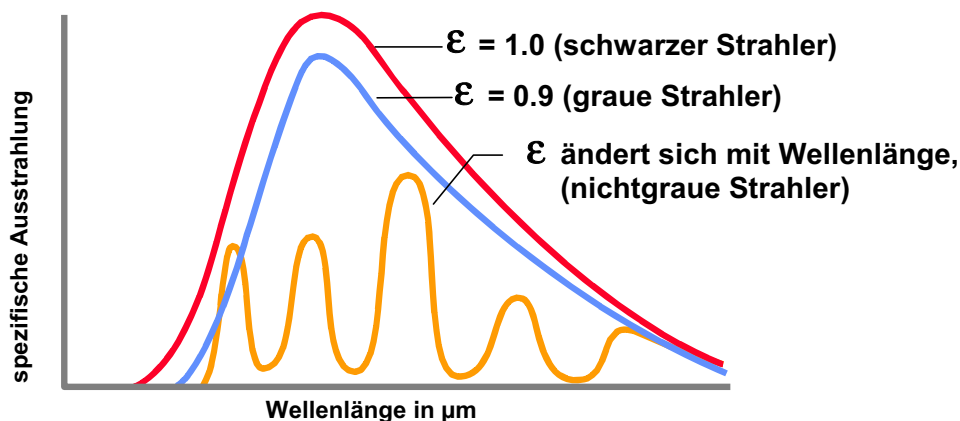


Abb. 5: Spezifische Ausstrahlung bei verschiedenen Emissionsgraden

2.1.1. Ermittlung des Emissionsgrades

Es gibt verschiedene Methoden, den Emissionsgrad eines Objektes zu bestimmen. So können Sie als erstes 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 genutzt werden, da der Oberflächenzustand (z. B. poliert, oxidiert oder verzundert) den Emissionsgrad mehr beeinflussen kann, als die verschiedenen Werkstoffe selbst. Es besteht 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. Erzeugung 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 („3-M Black“ der Fa. Minnesota Mining Company oder „Senotherm“ der Fa. Weilburger Lackfabrik /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.

2.1.2. 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. 6.

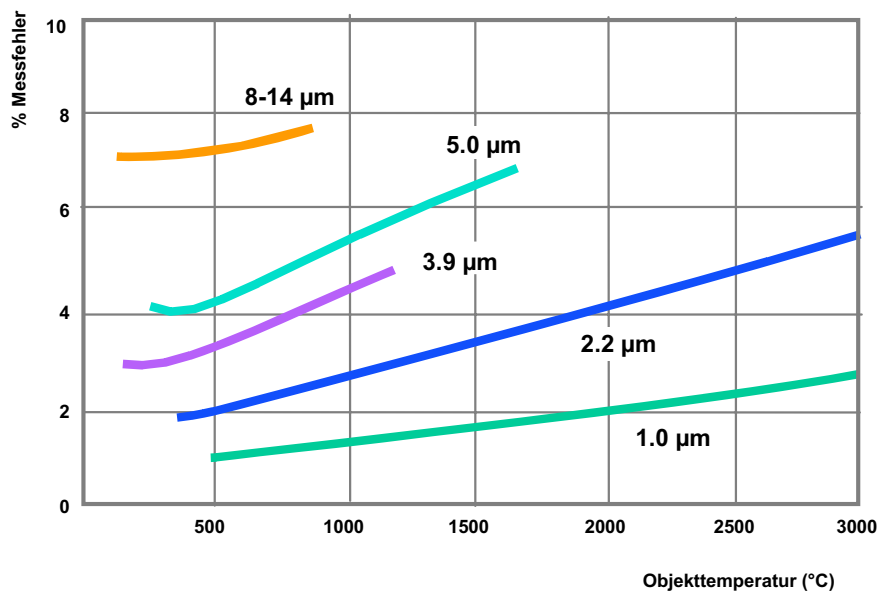


Abb. 6: Messfehler bei 10% falsch eingestelltem Emissionsgrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge und Objekttemperatur.

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 (siehe Abschnitt 3.).

2.1.3. 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, Polypropylen, Nylon und Polystyrol) sind bei 3,43 μm undurchlässig, andere (Polyester, Polyurethan, Teflon, FEP und Polyamid) bei 7,9 μm . Bei dickeren ($> 0,4 \text{ mm}$), stark pigmentierten Folien sollten Sie eine Wellenlänge zwischen 8 und 14 μm wählen. 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 fast allen Kunststofffolien liegt ein Reflexionsgrad zwischen 5 und 10% vor.

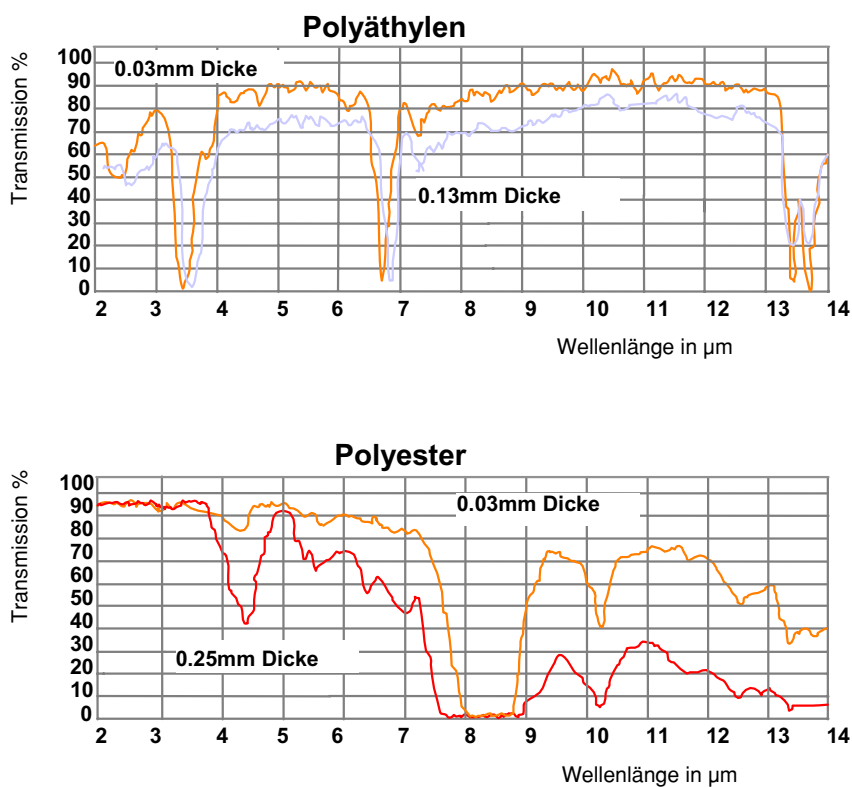


Abb. 7: Spektrale Durchlässigkeit von Kunststofffolien. Unabhängig von der Dicke ist Polyäthylen bei 3,43 μm fast und Polyester bei 7,9 μm vollkommen undurchlässig.

2.1.4. 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. 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.

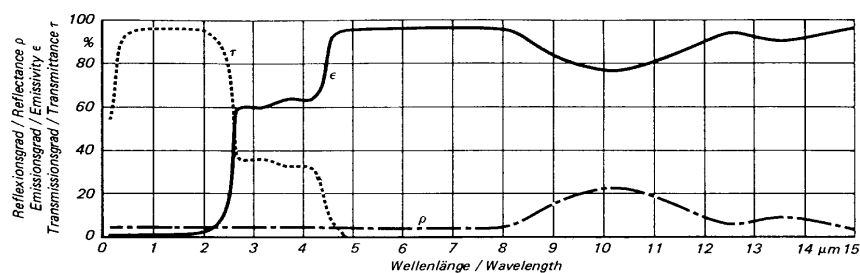


Abb. 8: Spektrale Durchlässigkeit von Glas nach /3/

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.

2.2. Umgebungsbedingungen

Ein weiterer Grund, ein IR-Thermometer nur für einen bestimmten Spektralbereich auszulegen (Bandstrahlungs-pyrometer), 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 der Abbildung 8 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.

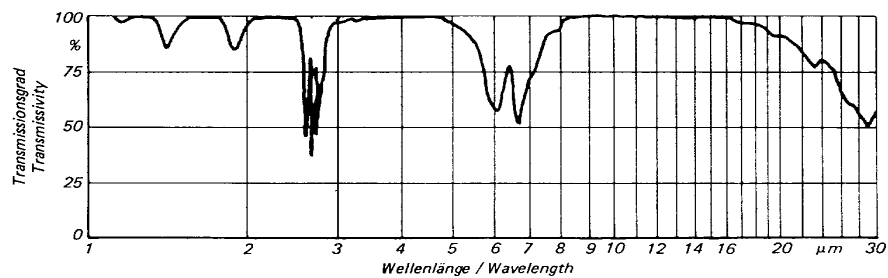


Abb. 9: Transmissionsgrad einer 1 m langen Luftstrecke bei 32°C und rel. Feuchte 75%, nach /3/.

Gleichfalls zu berücksichtigen sind Wärmestrahlungsquellen in der Umgebung des Messobjektes. So könnte die Temperaturmessung von Metallstücken 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 Umgebungstemperaturkompensation mit Hilfe eines zweiten Temperaturmesskopfes gewährleistet die genauesten Messergebnisse.

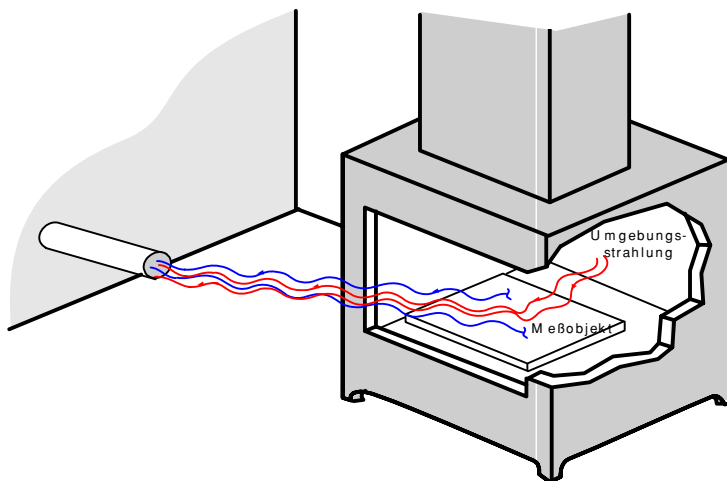


Abb. 10: Umgebungsstrahlungskompensation - wichtig bei Messobjekten, die kälter als die Umgebung sind.

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 Rohrstutzen 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, siehe Abschnitt 3.

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. Wasserkühlzubehöerteile 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 Kondenswasserbildung auf der Optik zu verhindern.

Zusammenfassung:

Faktoren	Lösung
♦ Umgebungsstrahlung ist heißer als Objekt	♦ Sensor mit Umgebungsstrahlungskompensation ♦ Abschirmung des Hintergrundes vom Objekt
♦ Staub, Dampf, Teilchen in der Atmosphäre	♦ Luftblasvorsatz für Linse ♦ Quotientenpyrometer
♦ Hohe Betriebstemperatur	♦ thermisch isolierte Montage ♦ Wasser- oder Luftkühlung ♦ Luftblasvorsatz für Linse ♦ Hitzeschild

2.3. 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. 11.

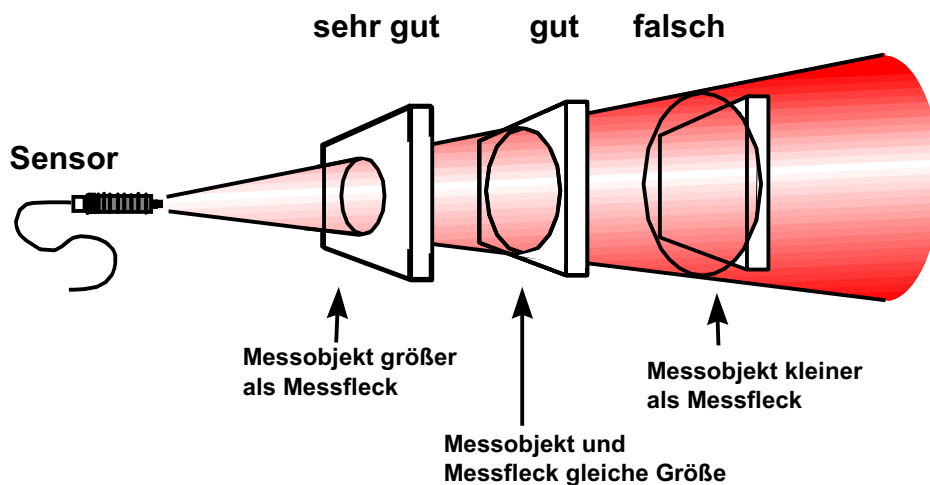


Abb.11: Das Messobjekt muss den Messfleck voll ausfüllen, sonst kommt es zu Messwertverfälschungen (Ausnahme Quotientenpyrometer Abschnitt 3).

Die optische Auflösung ist definiert als Verhältnis zwischen der Entfernung des Messgerätes zum Messobjekt und dem Messfleckdurchmesser ($E : M$). Je größer dieser Wert, desto besser ist die optische Auflösung des Messgerätes und desto kleiner kann das Messobjekt bei gegebener Entfernung sein, Abb. 12.

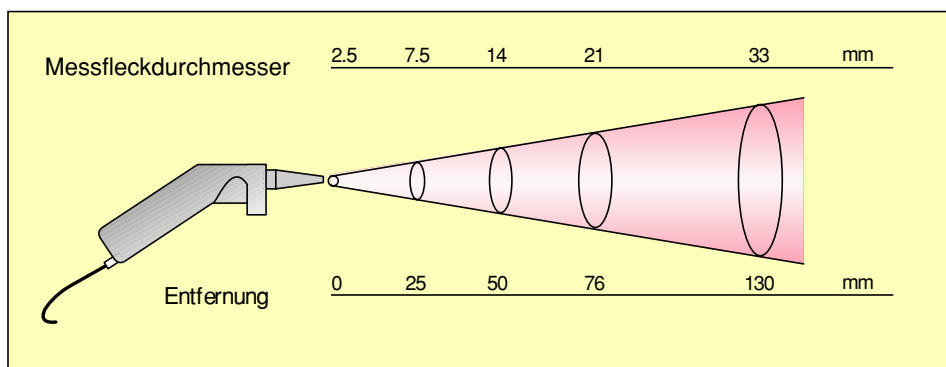


Abb. 12: Optisches Diagramm eines Infrarotsensors. In 130 mm Entfernung beträgt der Messfleck 33 mm, das ergibt ein Verhältnis von etwa 4:1.

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 Abb. 13 sind einige typische Linsen und Fenstermaterialien für IR-Thermometer mit ihren Wellenlängenbereichen dargestellt, /3/.

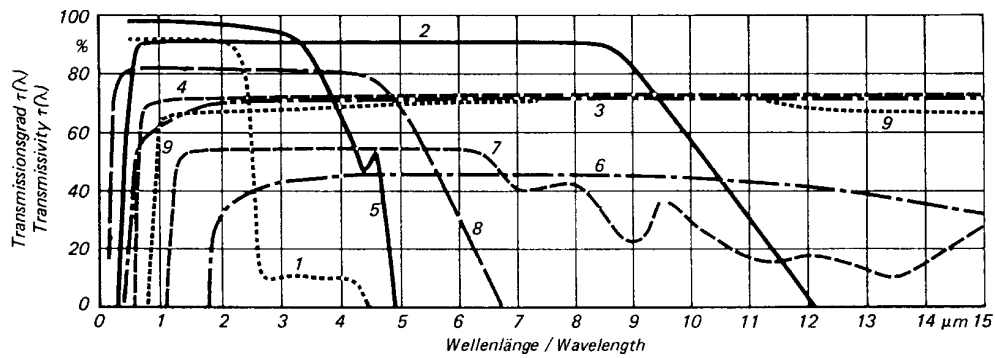


Abb. 13: Transmission typischer IR-Materialien (1 mm dick)

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1- Optisches Glas | 6- Germanium |
| 2- Flussspat (CaF) | 7- Silizium |
| 3- Zinkselenit (ZnSe) | 8- Lithiumfluorit |
| 4- KRS5 | 9- Chalkogenidglas IG2 |
| 5- Quarzglas | |

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 eines 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.

Tabelle 1 zeigt verschiedene Fenstermaterialien im Überblick.

Tabelle 1

Fenstermaterial /Eigenschaften	Saphire Al_2O_3	Quarz-glas SiO_2	CaF_2	BaF_2	AMTIR	ZnS	ZnSe	KRS5
Empfohlener IR-Wellenlängenbereich in μm	1...4	1...2,5	2...8	2...8	3...14	2...14	2...14	1...14
Max. Fenster-temperatur in $^\circ\text{C}$	1800	900	600	500	300	250	250	k.A.
Transmission im sichtbaren Bereich	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja
Beständigkeit gegen Feuchte, Säuren, Ammoniakverb.	Sehr gut	Sehr gut	wenig	wenig	gut	gut	gut	gut
Geeignet für UHV	ja	ja	ja	ja	k.A.	ja	ja	ja

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.

In der Regel verfügen Pyrometer zur exakten Ausrichtung über ein eingebautes Zielfernrohr bzw. über eingebaute oder vorschraubbare Laser. Mit Hilfe des Laserstrahls kann der Anwender noch schneller und präziser den Messfleck anvisieren, was die Handhabung des IR-Messgerätes wesentlich erleichtert. Diese Lasermessfleckbeleuchtung ist vor allem für die Messung sich bewegender Objekte und bei ungünstigen Lichtverhältnissen zu empfehlen. Folgende Laservisiereinrichtungen werden unterschieden:

1. Laserstrahl mit Versatz zur optischen Achse

Einfachste Ausführung, insbesondere für Geräte mit geringer optischer Auflösung (für große Messobjekte). Der Laserpunkt zeigt ungefähr die Messfleckmitte an (außer im Nahbereich).

2. Koaxialer Laserstrahl

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.

3. Doppellaser

Doppellaser mit ihren 2 Zielpunkten sind in der Lage, über einen großen Messentfernungsbereich den Messfleckdurchmesser anzuzeigen. Damit entfällt für den Anwender die gedankliche Berechnung bzw. Vorstellung des Messfleckdurchmessers und Messfehler werden vermieden.

4. Laserkreisvisier mit Versatz

Einfachste Lösung um zusätzlich zur Lage auch die Größe und Form der Messfläche zu zeigen. Ab einer Mindestentfernung befindet sich die Messfläche in jedem Fall innerhalb des Laserkreises. Um den Parallaxenfehler zu reduzieren, wird der Laserkreis vom Hersteller

größer ausgelegt als der eigentliche Messfleck ist. Der Laserkreis ist also für eine metrisch richtige Messung voll auszufüllen. Damit kann der Anwender die, für das Gerät eigentlich angegebene, geometrische Auflösung nicht voll ausnutzen, vergleiche rote Fläche mit Laserkreisfläche (unterbrochene Linie) in Abb. 14.

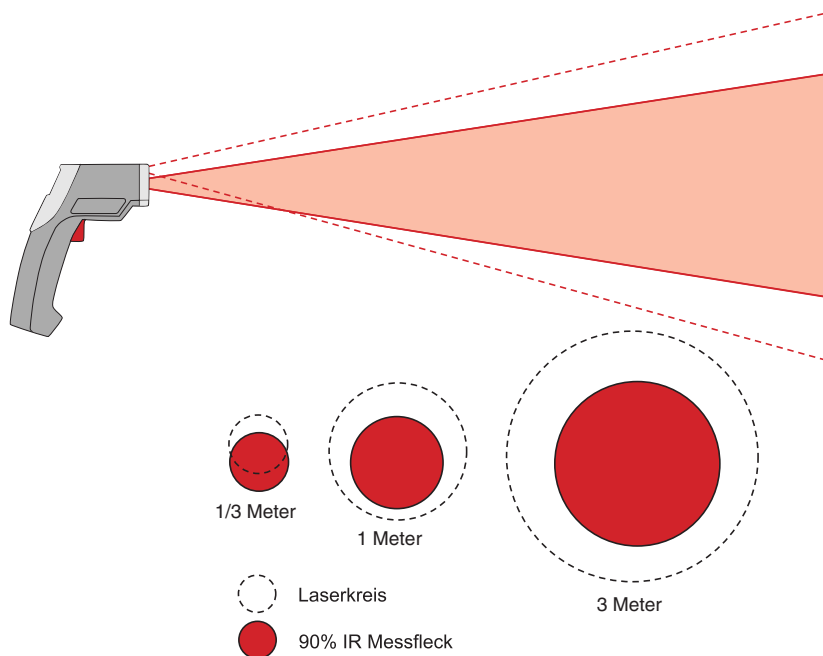


Abb. 14: Beim Laserkreisvisier mit Versatz ist die Kreismarkierung größer als der eigentliche Messfleck und liegt ab einer bestimmten Messentfernung innerhalb des Laserkreises.

5. Koaxiales 3-Punkt Präzisionslaservisier (True Dimension)

True Dimension ist ein Laservisiersystem, bei dem die beiden äußeren Laserpunkte exakt den Durchmesser des Messflecks unabhängig von Messentfernung und Messwinkel anzeigen. Die mittlere Markierung zeigt immer den Mittelpunkt des Messflecks. Im Scharfpunkt (kleinster Messfleckdurchmesser) stehen die Laservisierpunkte senkrecht übereinander (Abb. 15).

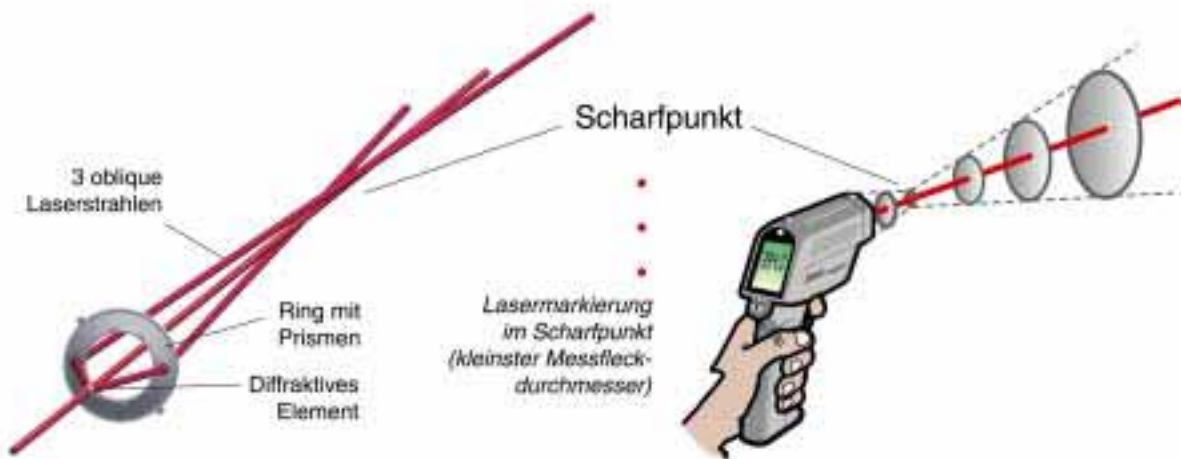


Abb. 15: Das Präzisionslaservisier hilft Messfehler zu vermeiden und der Anwender kann die volle Leistungsfähigkeit der Infraroptik ausnutzen.

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



Abb. 16: Geräte mit Laservisier erlauben eine punktgenaue Messung auch bei kleinen Messflecken

Zusammenfassung: Wie bei einem Fotoapparat bestimmt die Leistungsfähigkeit der Optik (z.B. Teleobjektiv), welche Größe von Messobjekten 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. Für ein leichteres Ausrichten sind die Optiken mit Durchsichtvisier, Laserpointern oder Laservisieren ausgestattet. 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.

2.4. 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 Prozesstechniken haben bei gleichzeitiger Senkung der Kosten die Systemstabilität, die Zuverlässigkeit, die Auflösung und die Geschwindigkeit 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 ändern ihre Temperatur in Abhängigkeit von der auftreffenden Strahlung. Die Temperaturänderung erzeugt ähnlich einem Thermoelement eine Spannung. Thermische Detektoren sind auf Grund der notwendigen Eigenerwärmung viel langsamer als Quantendetektoren. Viel langsamer bedeutet hier ms im Verhältnis zu ns oder μ s der letztgenannten Detektoren. Quantendetektoren werden vor allem bei Bildsystemen und Linescannern eingesetzt.

2.5. Anzeige und Schnittstellen

Wichtig für den Anwender sind die verfügbaren Schnittstellen und Arten der Messwertanzeige. Die bei einigen, insbesondere Handgeräten, direkt vorhandene Anzeige/Bedienfeld Kombination kann als Primärausgang des Messgerätes betrachtet werden. Analoge oder Digitalausgänge dienen der Ansteuerung von zusätzlichen Anzeigen in der Messwarte oder können zu Regelzwecken verwendet werden. Der direkte Anschluss von Datenschreibern, Druckern und Computern ist ebenso möglich.

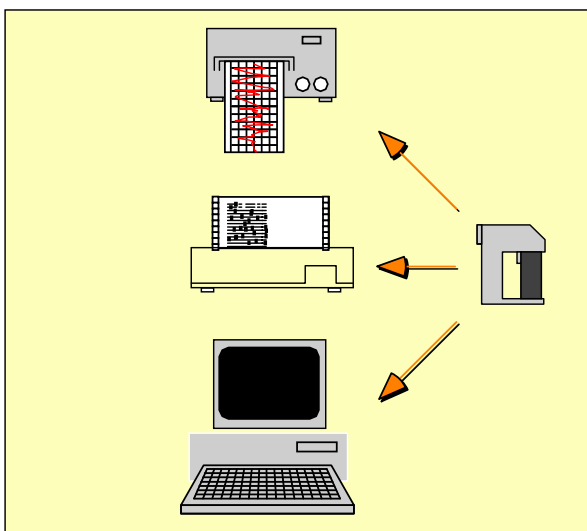


Abb. 17: Die Datenanschlüsse des IR-Thermometers können direkt an Messwertschreiber oder Drucker angeschlossen werden. Mit PC-Software lassen sich kundenspezifische Grafiken und Tabellen erstellen.

Industrielle Feldbussysteme spielen eine immer größere Rolle und erlauben dem Anwender mehr Flexibilität. Z. B. kann 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, wie zum Beispiel Emissionsgrad, Messbereich oder Grenzwerte, manuell am Sensor selbst vorgenommen werden. Da die Sensoren aber 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.

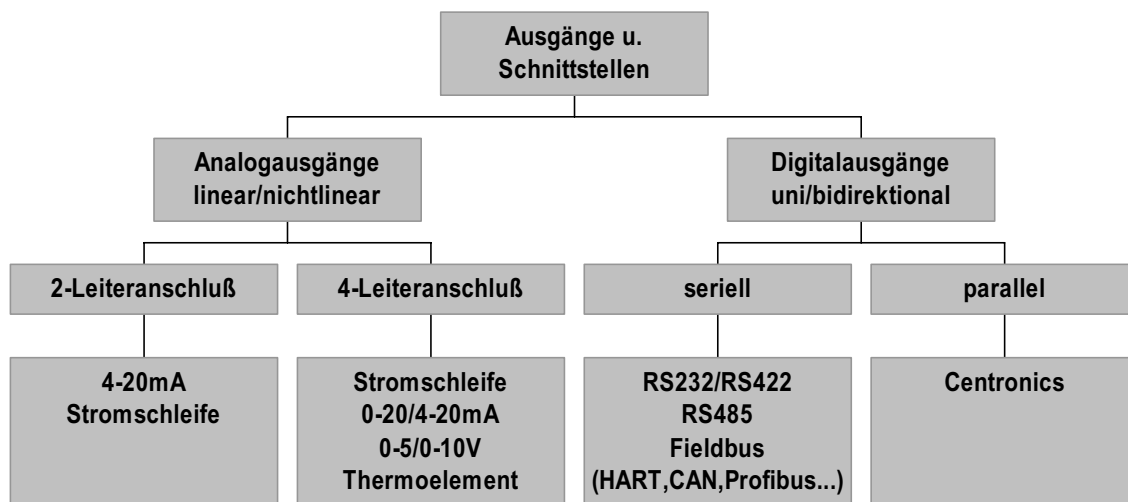


Abb. 18: Beispiele für Schnittstellen, wie sie gegenwärtig bei Infrarotmessgeräten zu finden sind (außer Centronics).

Die Adressierbarkeit von Pyrometern erlaubt den Betrieb von mehreren (in der Regel bis zu 32 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 PA) vornehmen. Die RS485 stellt dafür die meistverbreitete Hardwareplattform dar.

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

3. Spezialpyrometer

3.1. Pyrometer mit Glasfaseroptik

Für Einsatzfälle, bei denen mit starken elektrischen bzw. magnetischen Störfeldern gerechnet werden muss, werden Pyrometer mit Glasfaseroptiken eingesetzt. Dadurch ist man in der Lage, die empfindliche Elektronik außerhalb der gefährdeten Zone zu platzieren. Typische Anwendungen sind Induktionserwärmen und Induktionsschweißen. Da die Glasfaseroptiken selbst keinerlei Elektronik enthalten, lässt sich die Betriebstemperatur ohne Kühlung wesentlich nach oben hin erweitern. Standard sind 200°C und Höchstwerte bis 300°C sind möglich. Die Installations- und laufenden Betriebskosten pro Messstelle sind damit gering, da keine Wasserkühlung benötigt wird.

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.19: Modernes digital arbeitendes Glasfaserpyrometer.

3.2. Quotientenpyrometer

Es sind Spezialpyrometer (auch Zweifarben- oder Verhältnispyrometer genannt), die über 2 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 mathematische Quotientenbildung 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 damit zeitlich nacheinander, was bei sich schnell bewegenden Messobjekten zu Fehlern bei der Quotientenberechnung führen kann (Kanal 1 sieht eine andere Stelle vom Objekt als Kanal 2).
2. Aufteilung der Messstrahlung mittels Strahlteiler und zwei mit Filtern versehenen 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 des Kanals 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 ist 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 Antwortzeit 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 vom Objekt reduzierenden Effekt einsetzen. Moderne Geräte können diesen Effekt (Dämpfungsfaktor, Blockung oder engl. Attenuation) auf die eigenen 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. Bild 20 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 ‚Attenuation‘ Wert in Prozent berechnet und angezeigt.

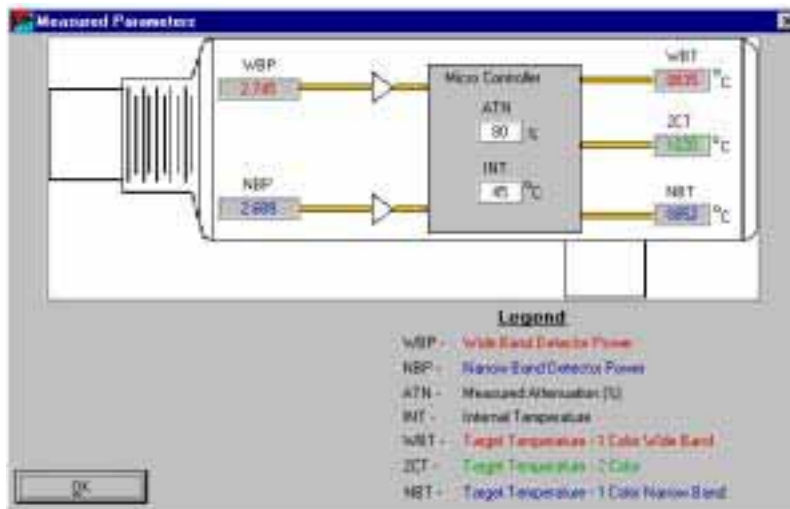


Abb. 20: Über die PC-Software eines Quotientenpyrometers ausgegebene Messdaten wie Objekttemperatur im Messkanal 1 (WBT), Objekttemperatur im Messkanal 2 (NBT) und die aus dem Quotienten berechnete Objekttemperatur (2CT). Gleichzeitig werden der Blockungsgrad in Prozent (ATN) und weitere Informationen angezeigt.

Zusammenfassung:

Quotientenpyrometer können die Temperatur 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. sich der Emissionsgrad während der Messung ändert

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

Tabelle 2

Folgende Materialien mit oxidiertem Oberfläche an Luft verhalten sich wie graue Strahler und können mit einem Slope (Emissionsgradverhältnis) von 1,00 gemessen werden:	
Eisen	Stahl
Kobalt	Edelstahl
Nickel	

Tabelle 3

Folgende Materialien mit glatter, reiner nicht oxidiertem Oberfläche sind so genannte nichtgraue Strahler und werden mit einem Emissionsgradverhältnis von 1,06 gemessen.	
Eisen	Stahl
Gusseisen	Edelstahl
Kobalt	Tantal
Nickel	Rhodium
Wolfram	Platin
Molybdän	

4. Literaturverzeichnis

- /1/ Walther, Herrmann: Wissensspeicher Infrarotmesstechnik, 1990,
Fachbuchverlag Leipzig
- /2/ Stahl, Miosga: Grundlagen Infrarottechnik, 1980,
Dr. Alfred Hütthig Verlag Heidelberg
- /3/ VDI/VDE Richtlinie, Technische Temperaturmessungen - Strahlungsthermometrie,
Januar 1995, VDI 3511 Blatt 4
- /4/ De Witt, Nutter: Theory and Practice of Radiation Thermometry, 1988,
John Wiley&Son, New York, ISBN 0-471-61018-6
- /5/ Wolfe, Zissis: The Infrared Handbook, 1978,
Office of Naval Research, Department of the Navy, Washington DC.

1 GERÄTEANFRAGE RAYTEK FAX: +49 (30) 4710251	Datum:
Anfrage von: Name: Telefon: Abt.: Firma: Straße oder PF: PLZ: Ort:	
Zu messendes Material/Oberfläche:	
Messentfernung (Min/Max):	
Messobjekt- bzw. Messfleckgröße:	
Längste mögliche Antwort-/Reaktionszeit:	
Geschätzter Umgebungstemperaturbereich am Ort des Sensors: Welche Temperaturänderungen pro Minute können auftreten:	
Gewünschte Schnittstellen für Datenausgabe:	
Anwendungsskizze:	

Die Raytek - Gruppe

Raytek 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. Vom Supermarkt um die Ecke, in dem es gilt, die Lagertemperatur von Gefriergut zu überprüfen, bis zur automatisierten Prozesssteuerung in der Industrie - die Temperatur ist eine wichtige Größe zur Sicherung der Qualität.

Die Raytek Geräte zeichnen sich durch ein optimales Preis-/Leistungsverhältnis aus und amortisieren sich bereits nach kurzer Einsatzzeit. Der Markterfolg unserer Produkte gestattet es uns, immer neue Märkte und Anwendungen zu erschließen und immer mehr potenzielle Nutzer von den Vorteilen der IR-Technologie zu überzeugen.

Raytek - das sind mehr als 40 Jahre Erfahrung in der Infrarot-Temperaturmessung. Durch Tochtergesellschaften und qualifizierte Distributoren in der ganzen Welt gewährleisten wir Flexibilität, Kundennähe, schnellen Service und individuelle Beratung vor Ort.

Worldwide Headquarters

Raytek Corporation
Santa Cruz, CA USA
Tel: 1 831 458 1110
Fax: 1 831 425 4561
info@raytek.com

Raytek China Company
info@raytek.com.cn

Raytek Japan, Inc.
info@raytekjapan.co.jp

Raytek do Brasil
info@raytek.com.br

Europazentrale

Raytek GmbH
Berlin, Germany
Tel: 49 30 4 78 00 84 00
Fax: 49 30 4 71 02 51
info@raytek.de

Raytek United Kingdom
ukinfo@raytek.com

Raytek France
info@raytek.fr

© 2003 Raytek GmbH
55514-1 Rev.B 12/2003

www.raytek.com

Infos - Neuheiten - alles zum Thema