

Grundlagen der Infrarot-Temperaturmessung

W. R. Barron, Williamson Corporation

Die Grundlagen der IR-Temperaturmeßtechnik sind eine zwingende Voraussetzung, um genaue Meßsysteme spezifizieren zu können. Leider wird diesem Thema häufig nicht die notwendige Zeit gewidmet, und die kontaktlose Temperaturmessung wird fälschlicherweise als ungenau abgetan.

Theorie und Grundlagen

Die Temperaturmessung kann in zwei Kategorien unterteilt werden: berührend und kontaktlos. In der Praxis sind Thermoelemente und Pt100-Fühler die am häufigsten eingesetzten Vertreter der ersten Gruppe. Sie müssen das Meßobjekt berühren und messen prinzipiell die eigene, dem Objekt angegliche Temperatur. Dies führt zu einem relativ langsamen Ansprechverhalten. Kontaktlos arbeitende Sensoren messen die von einem Objekt abgestrahlte IR-Energie, bieten schnelle Ansprechzeiten und werden oft zur Messung bewegter Objekte sowie von Objekten eingesetzt, die sich in einem Vakuum befinden oder aus anderen Gründen unzugänglich sind. Die Kosten für diese Sensoren sind relativ hoch, jedoch in einigen Fällen durchaus vergleichbar mit den Kosten entsprechender berührender Sensoren.

Die Infrarot-Strahlung wurde 1666 von Sir Isaac Newton entdeckt, als er das Sonnenlicht durch ein Prisma leitete und in die Regenbogenfarben auftrennte. Im Jahre 1880 tat Sir William Herschel den nächsten Schritt, indem er die relative Energie der einzelnen Farben ermittelte. Er entdeckte auch die Energie jenseits des sichtbaren Spektrums. Anfang 1900 definierten Planck, Stefan, Boltzmann, Wien und Kirchhoff die Aktivitäten des elektromagnetischen Spektrums weiter und stellten quantitative Daten und Gleichungen zur Beschreibung der IR-Energie auf.

Diese Forschung ermöglicht es uns, die Infrarot-Energie unter Verwendung von Emissionskurven eines Schwarzkörpers zu definieren (s. Abb. 1). Aus der dargestellten Kurve läßt sich ersehen, daß alle Objekte mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts Energie abstrahlen. Die Energiemenge wächst proportional zur vierten Potenz der Temperatur. Dieses Konzept bildet die Grundlage für die IR-Temperaturmessung. Mit dem Emissionsfaktor tritt jedoch eine Variable in diese physikalische Gesetzmäßigkeit ein. Der Emissionsfaktor ist ein Maß für das Verhältnis der thermischen Strahlungen, die ein Graukörper und ein Schwarzkörper bei gleicher Temperatur abgeben. Als Graukörper wird ein Objekt bezeichnet, das bei allen Wellenlängen

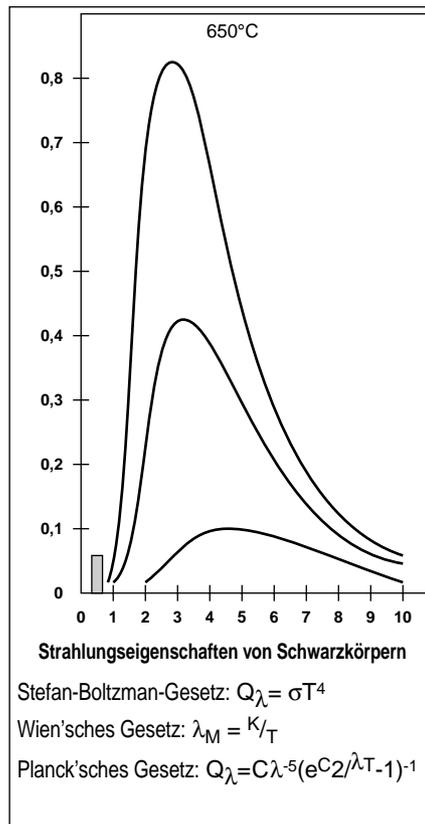


Abbildung 1: Strahlungsverteilung

Die Kurve stellt die Energie dar, die ein Schwarzkörper in einem Temperaturbereich von 315° bis 650° abstrahlt. Wie ersichtlich ist, liegt der überwiegende Teil jenseits des sichtbaren Bereichs.

den gleichen Emissionsfaktor hat. Ein Nicht-Graukörper ist ein Objekt, dessen Emissionsfaktor sich mit der Wellenlänge ändert, z. B. Aluminium.

$$E = \frac{L_{GK}}{L_{SK}}$$

Aus dem Energieerhaltungssatz folgt, daß die Summe der Koeffizienten von durchstrahlender, reflektierter und emittierter (absorbierter) IR-Energie gleich 1 sein muß.

$$t_{\lambda} + r_{\lambda} + a_{\lambda} = 1$$

Weiterhin gilt, daß der Emissionsfaktor gleich dem Absorptionsfaktor ist:

$$E_{\lambda} = a_{\lambda}$$

Daher gilt:

$$E_{\lambda} = 1 - t_{\lambda} - r_{\lambda}$$

Dieser Koeffizient läßt sich in die Planck'sche Gleichung als Variable einsetzen, die die Eigenschaften einer Oberfläche relativ zur Wellenlänge beschreibt. Da die meisten Objekte undurchlässig sind, kann die Gleichung wie folgt vereinfacht werden:

$$E_{\lambda} = 1 - r_{\lambda}$$

Ausnahmen hierzu bilden Materialien wie Glas, Kunststoffe oder Silikon. In Verbindung mit den entsprechenden selektiven Filtern ist es jedoch möglich, diese Objekte in einem Bereich zu messen, in dem sie für IR-Strahlung undurchlässig sind.

Über Emissionsfaktorbedingte Fehler herrscht bisweilen einige Verwirrung. Im wesentlichen sind nur vier Punkte wichtig:

- IR-Sensoren sind von Natur aus farbenblind.
- Wenn das Objekt optisch reflektierend ist (wie etwa ein Spiegel), wird nicht nur die emittierte Strahlung gemessen, sondern auch die reflektierte.
- Wenn das Objekt durchsichtig ist, muß ein entsprechender IR-Filter verwendet werden. Glas beispielsweise ist bei Wellenlängen von 5 µm undurchlässig.
- In 90 Prozent aller Applikationen ist eine absolut genaue Temperaturmessung nicht notwendig. Reproduzierbarkeit und Drift-freier Betrieb sind entscheidend.

Für glänzende Oberflächen kann der Emissionsfaktor am Instrument manuell oder automatisch eingestellt werden, um den Meßfehler zu korrigieren. In den meisten Applikationen ist dies sehr einfach möglich. In den Fällen, wo der Emissionsfaktor nicht konstant ist, kann das Problem durch Messung auf zwei oder mehreren Wellenlängen gelöst werden.

Konstruktive Aspekte

IR-Thermometer werden in einer Vielzahl von Konfigurationen hergestellt, die sich in Optik, Elektronik, Technologie, Größe und Gehäuse unterscheiden. Allen gemein ist jedoch die Signalverarbeitungskette, an deren Anfang ein IR-Signal und an deren Ende ein elektronisches Ausgangssignal steht. Diese allgemeine Meßkette beginnt mit einem optischen System aus Linsen und/oder Lichtwellenleitern, Filtern und dem Detektor.

Dynamische Signalverarbeitungsfunktionen werden in vielfältigen Formen kombiniert, können jedoch als Verstärkung, thermische Stabilisierung, Linearisierung und Signalumformung zusammengefaßt werden.

Normales Fensterglas eignet sich für kurze Wellenlängen, Quarz für den mittleren Bereich und Germanium- oder

Zinksulfid für den Bereich von 8 bis 14 µm. Für den Bereich von 0,5 bis 5,0 µm können auch Lichtwellenleiter eingesetzt werden.

Aus Applikations-technischer Sicht ist das Sichtfeld das wesentliche Merkmal der Optik, d.h. wie groß ist der Meßfleck bei einer gegebenen Entfernung? Ein weit verbreitetes Linsensystem hat eine Meßfleck-Größe von 2,6 cm bei einer Arbeitsentfernung von 40 cm. Theoretisch verdoppelt sich mit der Entfernung auch die Größe des Meßflecks, die tatsächliche Größe des Meßflecks bzw. die gemessene Fläche hängt jedoch vom Instrument ab und ist eine Frage der Konstruktion und Qualität, also auch der Kosten. Andere optische Konfigurationen reichen von sehr kleinen Meßflächen mit einem Durchmesser von 0,8 mm für Nahbereichs-Messungen bis hin zu weitreichenden Optiken, die auf eine Entfernung von 100 Metern einen Meßfleck von 8 cm abbilden. An dieser Stelle ist anzumerken, daß die Entfernung keine Auswirkungen auf die Genauigkeit haben sollte, wenn das Sichtfeld vollständig vom Meßobjekt ausgefüllt ist. Bei einem Verfahren zur Bestimmung des Sichtfelds wird die Signaldämpfung gegenüber dem Durchmesser aufgetragen. Als Grenzwert gilt eine Abnahme der Energie um 1 Prozent, obwohl auch bei halber Leistung oder 63,2% einige Daten zur Verfügung stehen.

Ein weiterer Aspekt der Optik ist das Anvisieren des Meßobjekts. Nur wenige Sensoren sind mit einer Zielvorrichtung ausgestattet. Die Linse ist fest zur Fläche ausgerichtet und mißt die Oberflächentemperatur. Dies gilt vor allem für stationäre Sensoren, die auf ausreichend große Objekte ausgerichtet sind und wo eine punktgenaue Messung nicht erforderlich ist. Bei kleineren Meßobjekten, die mit kurzen Brennweiten gemessen werden, sowie bei Instrumenten, die auf Messungen in größeren Abständen ausgelegt sind, verfügt das Instrument häufig über Zielvorrichtungen wie Kimmen, Visiere oder einen Laserstrahl, der den Meßpunkt anzeigt.

Als selektive Filter in Hochtemperatur-Applikationen (> 650°C) werden häufig Filter für kurze Wellenlängen eingesetzt, während bei niedrigen Temperaturen unter -45°C Filter mit langer Wellenlänge eingesetzt werden. Dies deckt sich mit der Verteilungskurve für Schwarzkörper und bietet eine Reihe von technologischen Vorteilen. So wird beispielsweise für die Messung hoher Temperaturen bei einer kurzen Wellenlänge ein thermisch sehr stabiler Silizium-Detektor eingesetzt, wobei der Meßfehler aufgrund der Messung im kurzwelligeren Bereich minimiert wird. Andere Beispiele für selektive Filter sind die zur Messung von Kunststoff-Folien (3,43 µm und 7,9 µm), Glas (5,1 µm) oder Flammen (3,8 µm) eingesetzten Filter.

Die Empfindlichkeit des Sensors wird durch den Einsatz einer Reihe verschiedener Detektoren optimiert. Wie aus Abbildung 2 ersichtlich ist, bieten Bleisulfid-Detektoren die höchste und Thermosäulen die geringste Empfindlichkeit. Die meisten Detektoren arbeiten entweder nach dem photoelektrischen Prinzip (auftreffende IR-Strahlung bewirkt ein Spannungssignal) oder basieren auf der Photoleitfähigkeit (auftreffende IR-Strahlung ändert den Widerstand). Als Nebeneffekt dieser schnellen und hochempfindlichen Detektoren muß ein gewisser Drift der Temperatur in Kauf genommen werden, der jedoch durch eine Reihe von schaltungstechnischen Maßnahmen kompensiert werden kann. Beispiele hierfür sind die Temperaturkompensation mit Thermistoren, Temperaturregelung, Zerhacker (AC/DC-Ausgangssignal) oder thermische Isolierung. Ein Drift-freier Betrieb ist ohne weiteres erreichbar und eine Frage des Kostenrahmens.

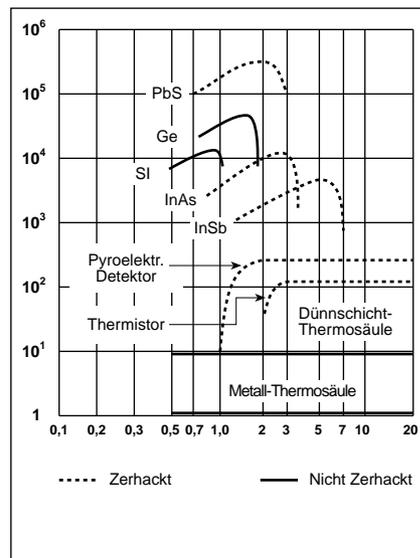


Abbildung 2: Zur Optimierung des Ansprechverhaltens von IR-Sensorsystemen muß die Spektralkurve des Detektors sowie dessen Kennlinien berücksichtigt werden.

Die Elektronik des IR-Thermometers linearisiert das Ausgangssignal des Detektors, das in einer Größenordnung von 0,1 bis 1 mV liegt. Dieses Signal wird tausendfach verstärkt und diversen anderen Verarbeitungsschritten unterzogen, um letztlich ein lineares Spannungs- oder Strom-Ausgangssignal zu erhalten. Dabei zeichnet sich ein Trend zum 4-20 mA-Signal ab, da dieses am wenigsten stör anfällig ist.

Das Signal kann auch digitalisiert und auf eine Schnittstelle ausgegeben oder einem Regler, Anzeiger oder Schreiber zugeführt werden. Als zusätzliche Funktionen verfügen IR-Thermometer je nach Ausstattung über Alarmer, einstellbare Min/Max-Puffer für intermittierende Messungen, einstellbare Meßintervalle

und Ansprechzeiten sowie Sample-and-Hold-Funktionen.

Im Durchschnitt verfügen IR-Thermometer über Ansprechzeiten im Bereich von 300 ms, obwohl mit Siliziumdetektoren Zeiten im 10 ms-Bereich realisierbar sind. In der Praxis sind Ansprechzeit und Empfindlichkeit bei vielen Instrumenten einstellbar, um Signalstörungen effektiv zu bedämpfen. Es ist nicht notwendig, immer die schnellstmöglichen Ansprechzeiten zu nutzen. Es gibt jedoch Applikationen wie beispielsweise Induktionsöfen, wo Ansprechzeiten in einer Größenordnung von 10 bis 50 ms erforderlich sind. Diese lassen sich mit der Infrarot-Meßtechnik gut erzielen.

Monochromatische Messung: Temperaturmessung auf einer einzelnen Wellenlänge

Bei der Temperaturmessung auf einer einzelnen Wellenlänge wird die von einer Oberfläche auf einer vorgegebenen Wellenlänge abgestrahlte Energie gemessen. Die Bauformen dieser Instrumente reichen von tragbaren Fühlern mit einfacher externer Anzeige bis hin zu ausgeklügelten tragbaren Instrumenten, bei denen die Temperatur in ein Sichtfenster eingeblendet wird, durch das das Objekt anvisiert wird. Daneben stehen Speicher- und Druckfunktionen zur Verfügung. Das Spektrum stationärer Online-Sensoren reicht von einfachen kleinen Detektoren mit externer Elektronik bis hin zu robusten und komplexen Baugruppen mit integriertem PID-Regler. Lichtwellenleiter, Laser-Zielvorrichtung, Wasserkühlung, Bildschirm und Scanner-Systeme sind Optionen, die in der Prozeßüberwachung und Regelung Verwendung finden. Hinsichtlich der Größe, Leistungsfähigkeit, Robustheit, Flexibilität und Signalverarbeitung gibt es große Unterschiede.

Bei der Projektierung und Auslegung von Applikationen sind Sensorkonfiguration, Filter, Temperaturbereich, Optiken, Ansprechzeit und Emissionsfaktor wichtige Kriterien, die eingehend berücksichtigt werden müssen.

Der Sensor kann als tragbares Instrument, als schlichter 2-Draht-Transmitter, als robuste Meßstation oder als Scanner ausgeführt sein. Optische Zielvorrichtungen, Laser-Positionierung, Lichtwellenleiter-Optiken, Wasserkühlung, Ausgabefunktionen und externe Anzeigen stellen einen Ausschnitt der verfügbaren Optionen dar. Die Notwendigkeit dieser Optionen mag etwas subjektiv sein, muß jedoch bei der Planung berücksichtigt werden. In vielen einfacher gelagerten Anwendungen, etwa bei der Messung von Bahn-Temperaturen, ist ein preisgünstiger Sensor oft ausreichend. In komplexeren Applikationen wie zum Beispiel einer Vakuumkammer oder

kleinen Meßflächen bietet ein ausgefeilterer Sensor häufig Vorteile.

Die Auswahl des IR-Spektralbereichs und des Temperaturbereichs ist immer in Verbindung mit der spezifischen Applikation zu sehen. Aus den in Abbildung 1 gezeigten Spektralkurven läßt sich ersehen, daß kurze Wellenlängen besser für hohe Temperaturen geeignet sind, während niedrige Temperaturen eher im längerwelligen Bereich gemessen werden sollten. Wenn transparente Meßobjekte wie Glas oder Kunststoff-Folien zu messen sind, ist ein schmalbandiger, selektiver Filter erforderlich. So hat Polyäthylen-Folie einen CH-Absorptionsbereich von 3,43 µm, an dem sie für IR-Strahlung undurchlässig ist. Durch Ausfiltern dieser Wellenlänge wird die Bestimmung des Emissionsfaktors und somit die Messung stark vereinfacht. Analog dazu zeigen viele Glas-artigen Materialien einen undurchlässigen Bereich bei 4,6 µm, und ein schmalbandiger Filter für 5,1 µm ermöglicht eine genaue Messung der Oberflächentemperatur von Glas. Umgekehrt gestattet ein Sensor mit einem Filter im Bereich von 1 bis 4 µm eine Messung durch ein Glasfenster hindurch, etwa für Vakuum- oder Druckkammern. Eine weitere Option zur Messung in Kammern besteht im Einsatz von Lichtwellenleitern, die durch eine druckdichte Durchführung in der Kammer installiert sind.

Optik und Ansprechzeit sind zwei Sensoreigenschaften, die in den meisten Applikationen nahezu unbedeutend sind, da ein Standard-Sichtfeld von ca. 2,7 cm auf eine Entfernung von 40 cm und eine Ansprechzeit von ca. 1 Sekunden völlig ausreichend sind. Wenn die Applikation eine Messung von kleinen oder schnell bewegten Objekte erforderlich macht, können Sensoren mit einem kleinen (3 mm) oder sehr kleinen (0,8 mm) Meßfleck eingesetzt werden, die jedoch Mehrkosten mit sich bringen. Im umgekehrten Fall, bei Messungen auf eine größere Entfernung ist ebenfalls eine spezielle Optik erforderlich, da die Größe des Meßflecks bei einer Standard-Optik zu stark zunehmen würde. In einigen Anwendungen wird hierfür auch eine ratiometrische Messung mit zwei Wellenlängen eingesetzt. Lichtwellenleiter schließlich bieten ein hohes Maß an Flexibilität, da die Elektronik separat angeordnet sein kann, außerhalb ungünstiger Umgebungsbedingungen. Da LWL unempfindlich gegen elektrische Störungen sind und ggf. Zugangs- oder Platzprobleme lösen können, stellen sie ein reizvolles Hilfsmittel zur Lösung anspruchsvoller Aufgaben dar.

Die meisten Sensoren verfügen über eine einstellbare Ansprechzeit im Bereich von 0,2 bis 5 Sekunden, wobei typischerweise eine mittlere Zeit gewählt wird. Bei einer kurzen Ansprechzeit kann der Meßwert durch Rauschen und andere Störungen beeinträchtigt werden,

während eine zu lange Ansprechzeit zu Lasten der Empfindlichkeit geht.

Wenn in einer Applikation ein Sensor mit schnellen Ansprechzeiten eingesetzt wird, müssen auch die übrigen Komponenten des Regelkreises entsprechende Verarbeitungs- bzw. Stellgeschwindigkeiten erlauben. Das dynamische Verhalten des Systems kann wie folgt definiert werden:

$$T = 1,1 = \sqrt{t_1^2 + t_2^2 \dots + t_n^2}$$

mit

T: Gesamtansprechzeit

Bei näherer Betrachtung des Elements "Zeit" läßt sich die Prozeßdynamik in zwei Gruppen unterteilen. Abweichungen von einem stabilen Zustand, die genau ausgeregelt werden müssen, bilden die erste Gruppe. Als Beispiel sei hier ein Prozeß mit Induktionsofen genannt. Die zweite Gruppe sind typischerweise Chargenprozesse, in denen schrittweise Änderungen oder Rampenfunktionen teilweise auch sehr schnell ablaufen. Diese Dynamik erfordert eine genaue Betrachtung der System-Ansprechzeit sowie des Sichtfelds des Sensors.

In vielen Fällen ist der Emissionsfaktor des Meßobjekts kein signifikanter Einflußfaktor. Mit einem entsprechenden schmalbandigen Filter kann für die meisten Materialien ein konstanter Emissionsfaktor im Bereich von 0,90 ± 0,05 erreicht werden. Bei einer Einstellung des Emissionsfaktors bei einer Wellenlänge von 0,9 µm wird eine Genauigkeit von 3 bis 5°C oder 1 bis 2% erhalten. Dieser Fehler wirkt groß, ist aber in der Praxis durchaus akzeptabel, da die Reproduzierbarkeit wichtiger für die Regelung ist. Wenn beispielsweise ein Produkt auf 205°C aufgeheizt wird, der Sensor eine Temperatur von 200°C anzeigt und bei einem Sensormesswert von 196 bis 204°C eine gute Produktqualität erzielt wird, kann der Sollwert von 200°C für die Regelung verwendet werden. In den wenigsten Fällen muß eine Rückführbarkeit der Kalibrierung auf NIST-Standards gegeben sein, um qualitativ hochwertige Produkte herzustellen.

Wenn in einer Applikation eine präzise Messung und Dokumentation der tatsächlichen Temperatur erforderlich ist, können die Instrumente gegen die entsprechenden Standards kalibriert werden. Weiterhin besteht dann die Notwendigkeit, den Meßfehler aufgrund des Emissionsfaktors des Meßobjekts genau zu definieren, um ggf. Ansatzpunkte für eine Verbesserung dieses Fehlers zu finden. Wenn eine glänzende Walze gemessen wird, wäre z.B. die erste Empfehlung, nicht die Walze, sondern das über diese Walze geführte Produkt zu messen. Als zweiter Schritt kann die Einstellung des Emissionsfaktors am Instrument anhand einer Vergleichsmessung erfolgen. Als dritter Lösungsansatz kann die Messung mit einem

Mehrfarb-Pyrometer in Betracht gezogen werden, das die IR-Strahlung auf mehreren Wellenlängen mißt.

Die mit einer Wellenlänge arbeitende IR-Temperaturmessung stellt also eine vielseitige und doch einfache Technologie dar, die in tausenden von Applikationen genutzt wird, in denen die Regelung der Produkttemperatur essentiell für eine gleichbleibende Produktqualität ist.

Verhältnismessung: Temperaturmessung mit zwei Wellenlängen

Für anspruchsvollere Applikationen, in denen eine absolute Genauigkeit gefordert ist und in denen das Produkt im Verlaufe des Prozesses physikalische oder chemische Veränderungen erfährt, sollte die Temperaturmessung durch Messung zweier oder mehrerer Wellenlängen in Betracht gezogen werden. Dieses auf dem Verhältnis zwischen mehreren Temperaturmessungen basierende Konzept ist seit den frühen 50er Jahren bekannt und bietet heute die Möglichkeit Temperaturen, auch niedrige, effizient und preisgünstig zu messen.

Bei diesem Meßverfahren wird die auf zwei verschiedenen Wellenlängen abgestrahlte Energie gemessen. Wenn der Emissionsfaktor bei beiden Wellenlängen gleich ist, kann die Temperatur unmittelbar abgelesen werden. Mit derartigen Instrumenten kann auch dann eine korrekte Temperaturmessung erfolgen, wenn ein Teil des Sichtfelds durch kältere Materialien wie Staub, Maschendraht oder Fenster verdeckt ist.

Die theoretischen Grundlagen für dieses Verfahren sind relativ einfach und werden im folgenden dargestellt. Die Planck'sche Gleichung wird dort für zwei verschiedene Wellenlängen herangezogen, um das Verhältnis der beiden Temperaturen zu bilden.

$$R = \frac{L_{\lambda_1}}{L_{\lambda_2}} = \frac{e_{\lambda_1} \cdot C_1 \cdot \lambda_1^{-5} \cdot e^{-C_2/\lambda_1 T}}{e_{\lambda_2} \cdot C_1 \cdot \lambda_2^{-5} \cdot e^{-C_2/\lambda_2 T}}$$

$$R = \frac{e_{\lambda_1}}{e_{\lambda_2}} \cdot \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right]^{-5} \cdot e^{[-C_2/T] \cdot (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}$$

$$R = \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right]^{-5} \cdot e^{[-C_2/T] \cdot (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_r} + \frac{1}{C_2} \ln \left(\frac{e_{\lambda_1}/e_{\lambda_2}}{\lambda_1 - \lambda_2} \right)$$

Wenn $e_{\lambda_1} = e_{\lambda_2}$ ist, dann ist $T = T_r$.

mit

R: Verhältnis der Spektralstrahlung

T_r: Temperatur-Verhältnis

eλ: Emissionsfaktor bei Wellenlänge

Wenn die Emissionsfaktoren an beiden Wellenlängen gleich sind (Graukörper),

kann der Emissionsfaktor aus der Gleichung eliminiert werden. Damit ist das gebildete Verhältnis direkt proportional zur Temperatur.

Dieses Konzept kann auch in einer Grafik verdeutlicht werden, in der ein kleiner Ausschnitt der Spektralkurve eines Schwarzkörpers dargestellt wird und die Verhältnisse bei verschiedenen Emissionsfaktoren gemessen werden (s. Abbildung 3). Am Beispiel von schmalbandigen Filtern für 0,7 µm und 0,8 µm läßt sich zeigen, daß das Verhältnis bis zu einem Emissionsfaktor von 0,1 einen konstant Wert von 1,428 hat.

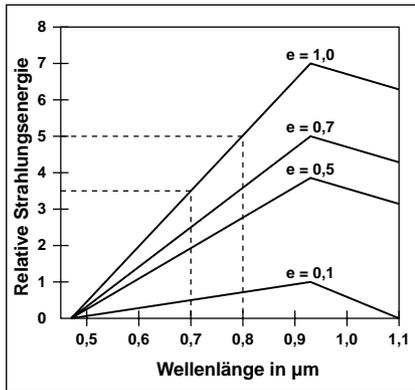


Abbildung 3: Das Verhältnis-System eliminiert automatisch Meßfehler, indem das Verhältnis der Energie berechnet wird, die vom Objekt auf zwei benachbarten Wellenlängen abgestrahlt wird.

Entsprechend wirken sich auch alle anderen "grauen" Einflüsse, die von der Wellenlänge her nicht selektiv sind, nicht auf das Verhältnis aus. Hierzu zählt auch die Änderung der Objektgröße, wie sie bei Drähten oder geschmolzenem Glas auftritt, selbst wenn das Objekt kleiner als das Sichtfeld wird. Am Beispiel des Schwarzkörpers wird dies deutlich: wenn der Schwarzkörper das Sichtfeld nur zur Hälfte ausfüllt, nimmt die gemessene IR-Strahlung zwar um 50% ab, das Verhältnis der beiden Wellenlängen bleibt jedoch konstant. Ein anderes Beispiel ist die Verdunkelung eines Meßfensters durch Staub, Rauch oder Beschlagen. Solange das zwischen Objekt und Sensor tretende Medium nicht selektiv bestimmte Wellenlänge bedämpft, bleibt das Verhältnis konstant, und somit auch die vom Thermometer gemessene Temperatur.

Natürlich sind auch diesem Verfahren Grenzen gesetzt, die beachtet werden müssen. Die Verhältnismessung eignet sich nicht für Nicht-Graukörper wie z. B. Aluminium. Ebenso kann es nicht zur Messung durch nicht-graue Fenster oder heißes Pyrex eingesetzt werden. Außerdem besteht bei diesem Verfahren die Tendenz, Hintergrund-Temperaturen aufzunehmen und zu messen, wenn diese größer als die Temperatur des Meßobjekts ist.

Verhältnis-Thermometer werden in vielen Applikationen in den unterschied-

lichsten Industriezweigen sowie in der Forschung eingesetzt und gelten als einfache, flexible Sensoren, mit deren Hilfe der Meßfehler bei der Messung von Graukörpern reduziert werden kann.

Abbildung 4 zeigt ein Beispiel verschiedener Produkte, deren Emissionsfaktor sich mit der Temperatur ändert. Graphit beispielsweise wird häufig spontan so eingeschätzt, daß es einen hohen und konstanten Emissionsfaktor habe. Das Gegenteil trifft zu – der Emissionsfaktor nimmt über einen Bereich von 20°C bis 1100°C von 0,4 auf 0,65 zu. Um eine genaue Messung und Regelung der Produkttemperatur zu erzielen, sollten für Graukörper-Materialien und hohe Temperaturen Verhältnis-Thermometer eingesetzt werden.

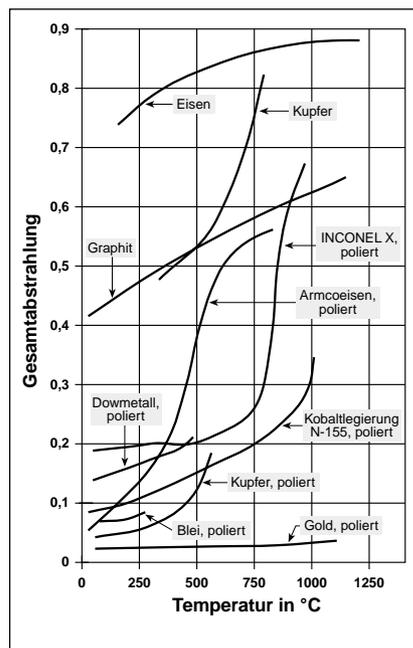


Abbildung 4: Bei vielen Materialien ändert sich der Emissionsfaktor mit der Temperatur. Diese Abbildung zeigt einige gebräuchliche Materialien.

Für Nicht-Graukörper-Materialien, deren Emissionsfaktor sich mit der Wellenlänge ändert, gibt es Mehrfarb-Thermometer, die die Energie einer ganzen Reihe von Wellenlängen messen. Derartigen Applikationen geht eine eingehende Analyse der Oberflächeneigenschaften des betroffenen Produkts voraus. So muß der Zusammenhang von Emissionsfaktor, Temperatur, Wellenlänge und Oberflächenchemie untersucht werden. Mit diesen Daten können Algorithmen aufgestellt werden, die die Abstrahlung auf verschiedenen Wellenlängen in einen aussagefähigen Zusammenhang zur Temperatur stellen.

Zusammenfassung

Abbildung 5 zeigt noch einmal die wesentlichen Elemente einer Applikation. Wichtigster Aspekt hierbei ist die Oberfläche des zu messenden Objekts. Bei der Auswahl des geeigneten Instruments müssen die Größe des

Meßobjekts, Temperaturbereich, Emissionsfaktor, spektrale Empfindlichkeit, Ansprechzeit und Prozeßdynamik berücksichtigt werden, soweit letztere sich auf das Sichtfeld auswirkt. Daneben sind zur Auswahl des optimal geeigneten Instruments auch die Umgebungsbedingungen in Betracht zu ziehen, z. B. die Anwesenheit von Flammen, IR-Heizstrahlern, Induktionsöfen, sowie auch die Beschaffenheit der Atmosphäre (Staub, verunreinigte Fenster, Rauch, Hitze usw.).

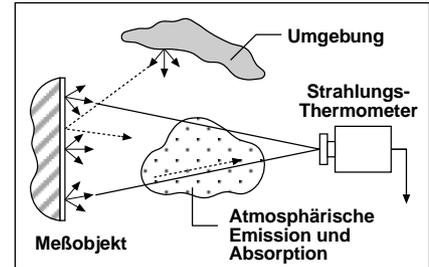


Abbildung 5: Bei der Auswahl eines Instruments zur kontaktlosen Messung der Temperatur sind nicht nur Meßobjekt und dessen Emissionsfaktor, sondern auch die Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen.

Hinsichtlich der Leistungsdaten läßt sich allgemein sagen, daß die Kalibriergenauigkeit üblicherweise in einem Bereich von 0,5 bis 1% und die Reproduzierbarkeit in einem Bereich von 0,25 bis 0,75% liegt. Für den Sensor selbst ist ein Preisbereich ab 800,00 DM bis hin zu 10.000,00 DM zu veranschlagen. In den meisten Applikationen dürfte der Preis jedoch eine untergeordnete Rolle spielen, da sich die Sensorkosten bei richtiger Konzeption und Installation innerhalb weniger Monate amortisieren, oft sogar in einem Zeitraum von nur 1 bis 2 Monaten.

Abdruck aus Sensors Magazine mit freundlicher Genehmigung der Helmers Publishing, Inc. 174 Concord St. Peterborough, NH 03458