

# Infrarot-Temperaturmessung

## Theorie und Applikationen John Merchant, Sales Manager, Mikron Instrument Company, Inc.

### Übersicht

Infrarot-Thermometer für die kontaktlose Temperaturmessung sind hochentwickelte Sensoren, die in Forschung und Industrie breite Verwendung erlangt haben. Dieser Aufsatz beschreibt in verständlicher Weise die Theorie, auf der dieses Meßprinzip basiert und wie diese Theorie helfen kann, mit den verschiedenen Applikations-spezifischen Parametern umzugehen, denen potentielle Anwender gegenüberstehen.

### Einführung

Infrarot-Thermometer messen die Temperatur, indem sie die Infrarotstrahlung messen, die alle Materialien und Objekte mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt (0° Kelvin) abgeben. In der einfachsten Bauform bündelt eine Linse die IR-Energie auf den Detektor, der die Energie in ein elektrisches Signal umwandelt. Nach Kompensation der Umgebungstemperatur kann dieses Signal dann angezeigt werden. Diese Konfiguration ermöglicht die Messung der Temperatur aus einer gewissen Entfernung und ohne Kontakt mit dem Meßobjekt. Damit eignet sich das Infrarot-Thermometer für Meßaufgaben, in denen Thermolemente oder andere Fühler nicht eingesetzt werden können oder ungenaue Ergebnisse liefern. Einige typische Beispiele sind die Messung bewegter Objekte, Messungen in starken elektromagnetischen Feldern, Messung von Objekten, die sich im Vakuum oder anderen abgeschlossenen Umgebungen befinden sowie Anwendungen, in denen eine schnelle Ansprechzeit gefordert ist.

Erste Entwürfe für Infrarot-Thermometer existieren seit dem 19ten Jahrhundert. Einige Konzepte wurden von Charles A. Darling (1) in seinem Buch "Pyrometry" vorgestellt, das 1911 veröffentlicht wurde.

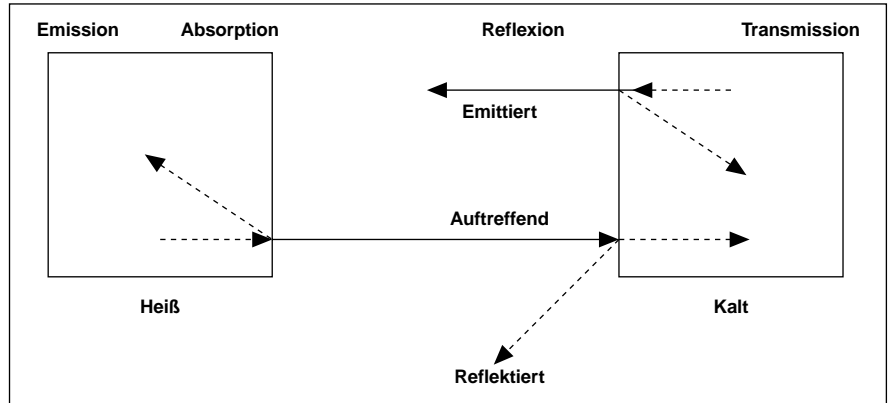


Abbildung 2. Wärmeaustausch durch Strahlung

Es dauerte bis 1930, bevor die Technologie verfügbar war, diese Konzepte in die Praxis umzusetzen. Seit dieser Zeit fand eine kontinuierliche Weiterentwicklung dieser Instrumente statt, in deren Verlauf ein umfangreiches Wissen und Applikationserfahrung gesammelt werden konnte. Heute hat sich dieses Konzept als Standard-Meßverfahren durchgesetzt und wird in Industrie und Forschung eingesetzt.

### Meßprinzip

Wie bereits erwähnt, strahlen alle Körper mit einer Temperatur über 0°K Infrarot-Energie ab. Infrarot-Strahlung ist der Teil des elektromagnetischen Spektrums, der zwischen dem sichtbaren Licht und den Radiowellen liegt. Die Wellenlänge von IR-Strahlung reicht von 0,7 µm bis 1000 µm, wie in Abbildung 1 dargestellt. In der Praxis eignen sich aus diesem Frequenzbereich jedoch nur die Wellenlängen von 0,7 bis 20 µm zur Messung der Temperatur. Derzeit stehen keine Detektoren zur Verfügung, die empfindlich genug sind, um die geringen Energiemengen zu messen, die oberhalb einer Wellenlänge von 20 µm abgestrahlt werden.

IR-Strahlung ist zwar für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar, dennoch ist es hilfreich, sich diese Strahlung als sichtbares Licht vorzustellen, um ein Verständnis des Funktionsprinzips und der in Applikationen auftretenden Fragen zu gewinnen. In vielen Aspekten verhält sich IR-Strahlung auch tatsächlich wie sichtbares Licht. IR-Strahlung bewegt sich in einer geraden Linie von der Strahlungsquelle weg und kann durch Objekte im Strahlenweg reflektiert oder absorbiert werden. Von den meisten Objekten, die für das menschliche Auge nicht durchsichtig sind, wird die IR-Strahlung zum Teil reflektiert und zum Teil vom Objekt absorbiert. Von der absorbierten Energie wird wiederum ein Teil intern reflektiert und ein Teil wieder abgestrahlt. Dies gilt auch für Objekte, die für das menschliche Auge durchsichtig sind, wie Glas, Gase und dünne, transparente Kunststoff-Folie, zusätzlich dazu dringt jedoch auch ein Teil der Strahlung durch das Objekt hindurch. Abbildung 2 illustriert diese Abläufe. Insgesamt tragen diese Abläufe zu dem bei, was wir als Emissionsfaktor eines Objekts oder Materials bezeichnen.

Materialien, die Infrarot-Strahlung weder reflektieren noch für diese durchlässig sind, werden als Schwarzkörper bezeichnet. Ein natürlicher Schwarzkörper ist nicht bekannt. Für die Theorie und zur Berechnung anderer Objekte hat ein Schwarzkörper einen Emissionsfaktor von 1,0. Die beste Annäherung an einen echten Schwarzkörper erhält man in der Praxis durch eine IR-undurchlässige Kugel mit einer kleinen, zylindrischen Eintrittsöffnung, wie sie in Abbildung 3 dargestellt ist. Die Innenfläche eines derartigen Objekts hat einen Emissionsfaktor von 0,998.

Unterschiedliche Materialien und Gase haben auch unterschiedliche Emissionsfaktoren und strahlen daher bei einer gegebenen Temperatur IR-Strahlung mit einer unterschiedlichen Intensität ab.

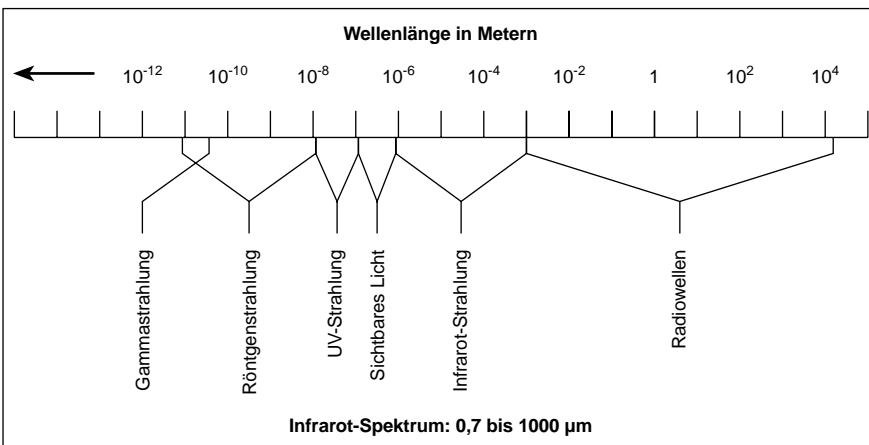


Abbildung 1. Elektromagnetisches Spektrum

Dies ist allgemein keine Funktion der Farbe, sofern das Material der Farbe keinen deutlichen Unterschied zum Material des Objekts aufweist. Ein Beispiel für einen Fall, wo dies zutrifft, ist Metalleffekt-Lack, der größere Mengen von Aluminiumpartikeln enthält. Die meisten Farben haben den gleichen, vom Farbton unabhängigen Emissionsfaktor. Aluminium hingegen hat einen sehr stark abweichenden Emissionsfaktor, so daß sich auch für den Metalleffekt-Lack ein anderer Emissionsfaktor ergibt.

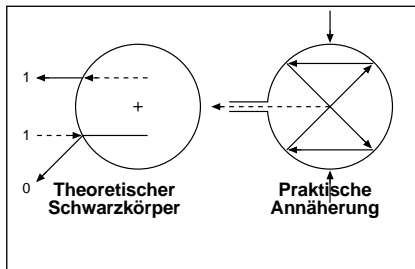


Abbildung 3. Emissionsfaktor

Wie beim sichtbaren Licht auch gilt für IR-Strahlung, daß eine Oberfläche um so mehr Energie reflektiert, je stärker sie poliert ist. Die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst den Emissionsfaktor also ebenfalls. Bei der Temperaturmessung ist dies besonders bei Objekten, die IR-undurchlässig sind und einen niedrigen Emissionsfaktor haben, von großer Bedeutung. Ein Objekt aus poliertem Edelstahl hat einen wesentlich kleineren Emissionsfaktor als das gleiche Objekt mit einer rauhen Oberfläche. Das raue Objekt weist nach der maschinellen Bearbeitung, z. B. nach dem Abdrehen, viele kleine Rillen und Unebenheiten auf, die das Reflexionsvermögen des Werkstücks deutlich mindern.

Neben der Zusammensetzung und der Oberflächenstruktur eines Objekts wirkt sich ein dritter Faktor indirekt auf den Emissionsfaktor aus, der Spektralbereich des Sensors. Er hat keinen direkten Einfluß auf das Objekt, aber darauf, wie der Sensor das vom Objekt abgestrahlte Spektrum wahrnimmt. Wie bereits angeführt, werden lediglich Wellenlängen im Bereich von 0,7 bis 20 µm zur Temperaturmessung genutzt. Dieser Bereich wird je nach Sensor auf einen kleinen Ausschnitt begrenzt, z. B. 0,7 bis 1,06 µm oder 4,8 bis 5,2 µm. Diese Begrenzung hat praktische Gründe, auf die später näher eingegangen wird.

### Theoretische Grundlagen

Die Gleichungen und Formeln, auf denen die Temperaturmessung basiert, sind seit längerer Zeit bekannt und bewährt. Es ist nicht sehr wahrscheinlich, daß der Anwender die Formeln in der täglichen Arbeit mit IR-Thermometern einsetzen muß. Die Kenntnis dieser Grundlagen ermöglicht jedoch ein besseres Verständnis, wie sich bestimmte Variablen und Parameter gegenseitig beeinflussen.

Die wichtigsten Formeln sind:

1. Kirchhoff-Gesetz  
Wenn sich ein Objekt im thermischen Gleichgewicht befindet, ist die Menge der zugeführten Energie gleich der der abgegebenen.  
$$a = e$$
2. Stefan-Boltzmann-Gesetz  
Je größer die Temperatur eines Objekts ist, um so mehr IR-Strahlung emittiert das Objekt.  
$$W = \epsilon \sigma T^4$$
3. Wien'sches Verschiebungsgesetz  
Die Wellenlänge, bei der das Maximum der Energiestrahlung liegt, verschiebt sich mit zunehmender Temperatur zum kurzwelligen Bereich.  
$$\lambda_{max} = 2,89 \times 10^3 \mu\text{m/K/T}$$
4. Planck'sche Gleichung  
Diese Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen Wellenlänge, Temperatur und Strahlungsenergie.

$$W_{\lambda} = C_1 e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-5}$$

### Konzeption und Bauformen von Infrarot-Thermometern

Ein Infrarot-Thermometer besteht grundsätzlich aus folgenden Funktionsblöcken, wie in Abbildung 4 dargestellt:

- Eine Linse, die die vom Objekt abgestrahlte Energie bündelt.
- Ein Detektor, der die Strahlungsenergie in ein elektrisches Signal umsetzt.
- Eine Einstellung für den Emissionsfaktor, um das Thermometer auf die Eigenschaften des Meßobjekts abzustimmen.
- Eine Umgebungstemperatur-Kompensation, die verhindert, daß die Temperatur des Thermometers mit in das Ausgangssignal eingeht.

Über viele Jahre hinweg folgten die meisten kommerziell verfügbaren IR-

Thermometer diesem Konzept. Sie waren in ihren Einsatzmöglichkeiten begrenzt und boten, rückblickend betrachtet, keine zufriedenstellenden Meßergebnisse. Nach damaligen Maßstäben waren sie jedoch durchaus adäquat und sehr robust.

Moderne IR-Thermometer bauen auf diesem Grundkonzept auf, sind jedoch im Laufe der Zeit wesentlich verfeinert worden. Wichtigste Unterschiede sind die Verwendung einer Vielzahl unterschiedlicher Detektortypen, selektives Filtern des IR-Signals, Linearisierung und Verstärkung des Detektor-Signals sowie standardisierte Temperatur-Ausgangssignale wie 4–20 mA oder 0–10 V DC. Abbildung 5 zeigt ein Blockdiagramm eines modernen Infrarot-Thermometers.

Der wohl bedeutendste Fortschritt in der IR-Temperaturmessung wurde mit der Einführung selektiver Filter für die IR-Strahlung erreicht. Dies ermöglichte den Einsatz empfindlicherer Detektoren und stabilerer Signalverstärker. Während frühe IR-Thermometer auf ein breites IR-Spektrum angewiesen waren, um ein nutzbares Detektor-Ausgangssignal zu erhalten, reicht modernen Detektoren eine Bandbreite von 1 µm völlig aus. Die Notwendigkeit zur Einengung des Spektrums und zur Auswahl bestimmter Wellenlängen ergibt sich daraus, daß oft durch ein Medium hindurch gemessen werden muß, dessen Temperatur jedoch nicht mit in die Messung eingehen soll. Weiterhin ist es häufig notwendig, die Temperatur von Objekten oder Gasen zu messen, die über einen weiten Bereich des IR-Spektrums durchlässig sind. Einige Beispiele für eine selektive Begrenzung des Spektrums sind:

- 8 - 14 µm: Einflüsse der Luftfeuchte werden auch über größere Entfernungen hinweg ausgeschlossen.
- 7,9 µm: Ermöglicht die Messung von dünnen Kunststoff-Folien, die über weite Bereiche IR-durchlässig sind.
- 3,86 µm: Interferenzen mit CO<sub>2</sub> und Wasserdampf in Flammen und Verbrennungs-Abgasen werden wirkungsvoll unterdrückt.

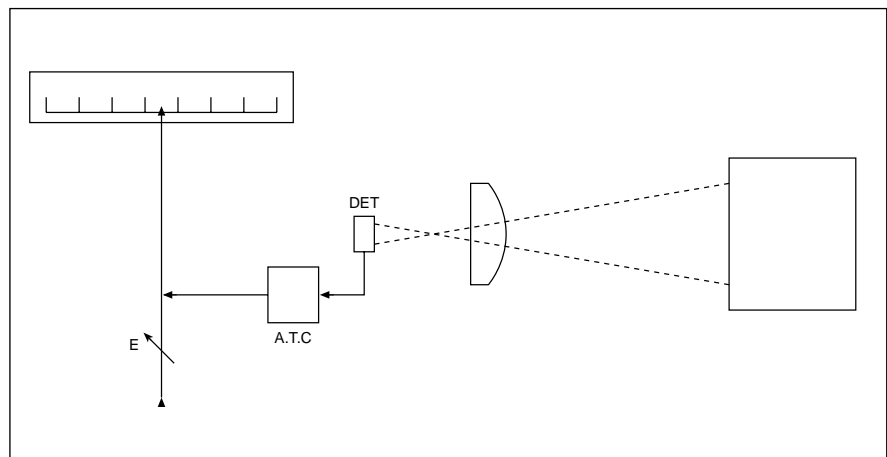


Abbildung 4. Blockdiagramm eines Infrarot-Thermometers

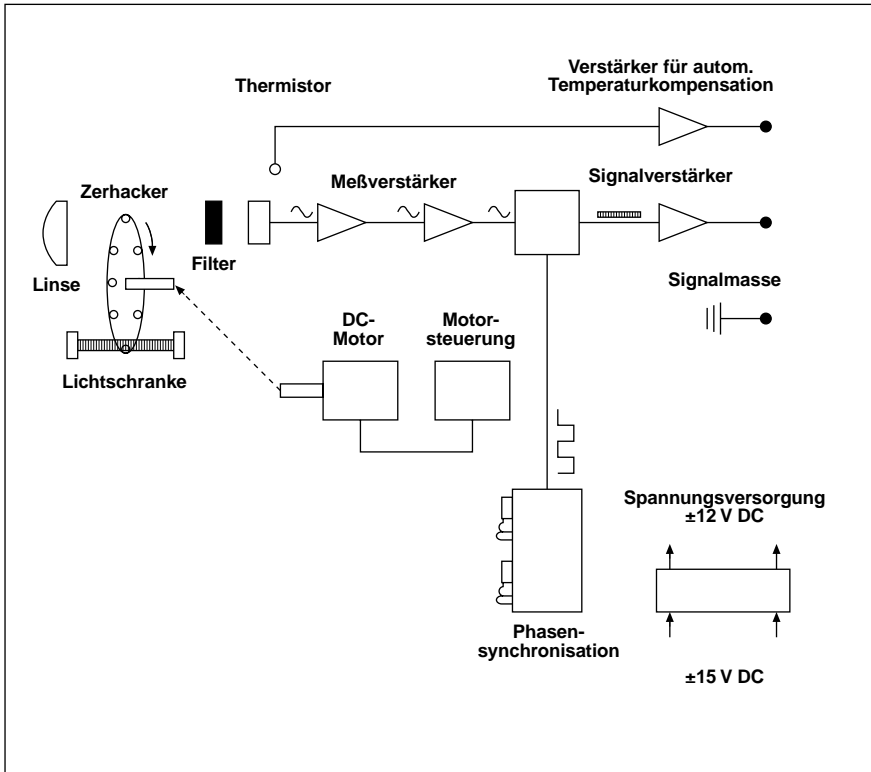


Abbildung 5. Blockdiagramm eines modernen IR-Thermometers

engen Spektralbereich weniger durch Änderungen im Emissionsfaktor des Meßobjekts beeinflusst werden.

Aus den vorhergehenden Absätzen wurde deutlich, daß der Emissionsfaktor ein besonders wichtiger Parameter der Infrarot-Temperaturmessung ist. Solange der Emissionsfaktor des Meßobjekts nicht genau bekannt und in der Messung berücksichtigt ist, bleibt es sehr unwahrscheinlich, daß die erhaltenen Meßwerte genau sind. Zur Bestimmung des Emissionsfaktors gibt es im wesentlichen zwei Möglichkeiten. Entweder kann der Emissionsfaktor Tabellenwerken entnommen oder durch eine Vergleichsmessung ermittelt werden. Dabei wird das Meßobjekt mit einem Thermoelement oder anderen Temperaturfühler gemessen, um anschließend den Emissionsfaktor am IR-Thermometer so einzustellen, daß es die gleiche Temperatur anzeigt. Glücklicherweise stellen Hersteller von Infrarot-Thermometern sowie Forschungseinrichtungen umfangreiche Tabellenwerke zur Verfügung, so daß es nur selten notwendig ist, den Emissionsfaktor in Versuchen zu bestimmen. Als Faustregel kann gelten, daß die meisten undurchsichtigen, nicht-metallischen Materialien einen hohen und relativ stabilen Emissionsfaktor von 0,85 bis 0,9 haben. Für die meisten nicht-oxidierten metallischen Werkstoffe liegt der Emissionsfaktor in einem Bereich von 0,2 bis 0,5, mit Ausnahme von Gold, Silber und Aluminium. Die Temperatur dieser Metalle ist folglich mit Infrarot-Thermometern nur schwer zu messen.

Während es fast immer möglich ist, den Emissionsfaktor des Materials zu bestimmen, treten dann Probleme auf, wenn das Material keinen konstanten Emissionsfaktor hat, sondern dieser sich mit der Temperatur ändert. Dies gilt für die meisten Metalle, jedoch auch für einige andere Werkstoffe wie Silizium oder hochreine, monokristalline Keramiken. In einigen Applikationen, in denen dieses Phänomen auftritt, läßt sich das Problem durch die im folgenden beschriebene Verhältnismessung lösen.

### Verhältnismessung

Ausgehend davon, daß der Emissionsfaktor eine vitale Bedeutung für die genaue Messung der Temperatur mit Infrarot-Thermometern ausübt, ist es nicht überraschend, daß die Forschung danach strebt, Sensoren zu entwickeln, die die Temperatur unabhängig von dieser Variablen messen können. Ein verbreiteter und bewährter Ansatz hierzu ist die Verhältnis- oder Mehrfarbenmessung. Dieses Verfahren ist den bisher beschriebenen Infrarot-Thermometern nicht unähnlich, mißt jedoch anstelle des absoluten Energiebetrages einer Wellenlänge das Verhältnis der Energie an zwei verschiedenen Wellenlängen. Das Wort "Mehrfarbenmessung" leitet sich aus der alten Vorstellung her,

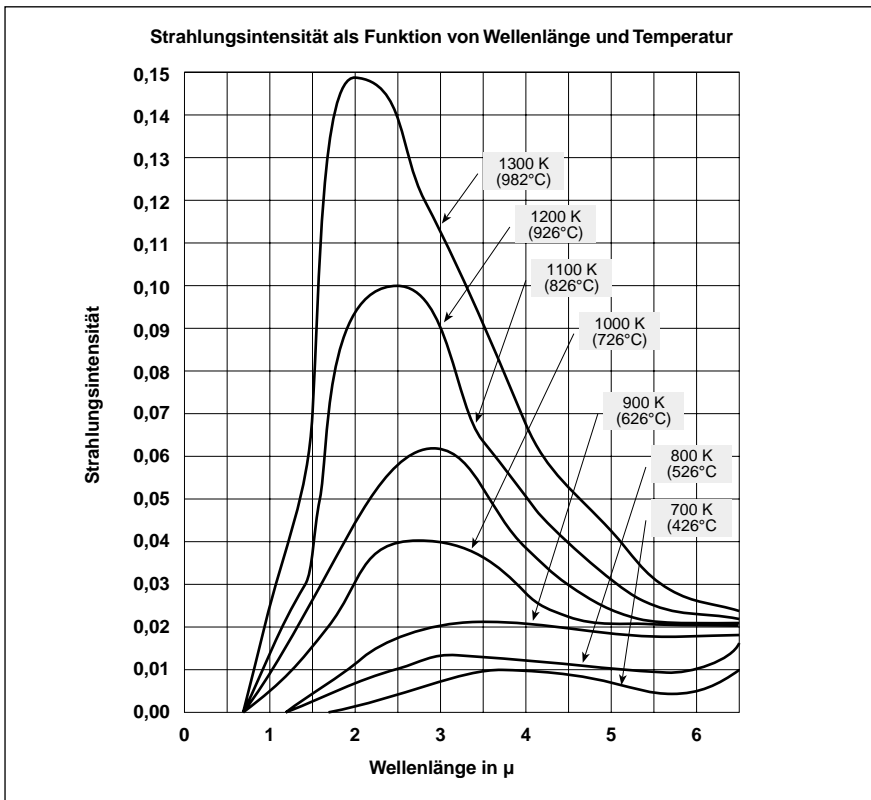


Abbildung 6. Anwendung des Planck'schen Gesetzes auf einen Schwarzkörper

Bei der Wahl der für die Messung am besten geeigneten Wellenlänge kommt dem Temperaturbereich eine wichtige Rolle zu. Aus der Planck'schen Gleichung ergibt sich, wie in Abbildung 6 für einen Schwarzkörper dargestellt, daß sich das Maximum der Strahlungskurve mit zunehmender Temperatur zum kurzwelligen Bereich hin verschiebt. Auch in Applikationen, in denen an sich keine

selektive Auswahl eines Spektralbereichs erforderlich ist, kann es vorteilhaft sein, den Spektralbereich auf einen Ausschnitt so nahe wie möglich an 0,7 µm einzuschränken. Ein Vorteil beruht darauf, daß der effektive Emissionsfaktor eines Objekts bei kürzeren Wellenlängen am höchsten ist. Weiterhin wirkt sich diese Begrenzung günstig auf die Genauigkeit aus, da Sensoren mit einem

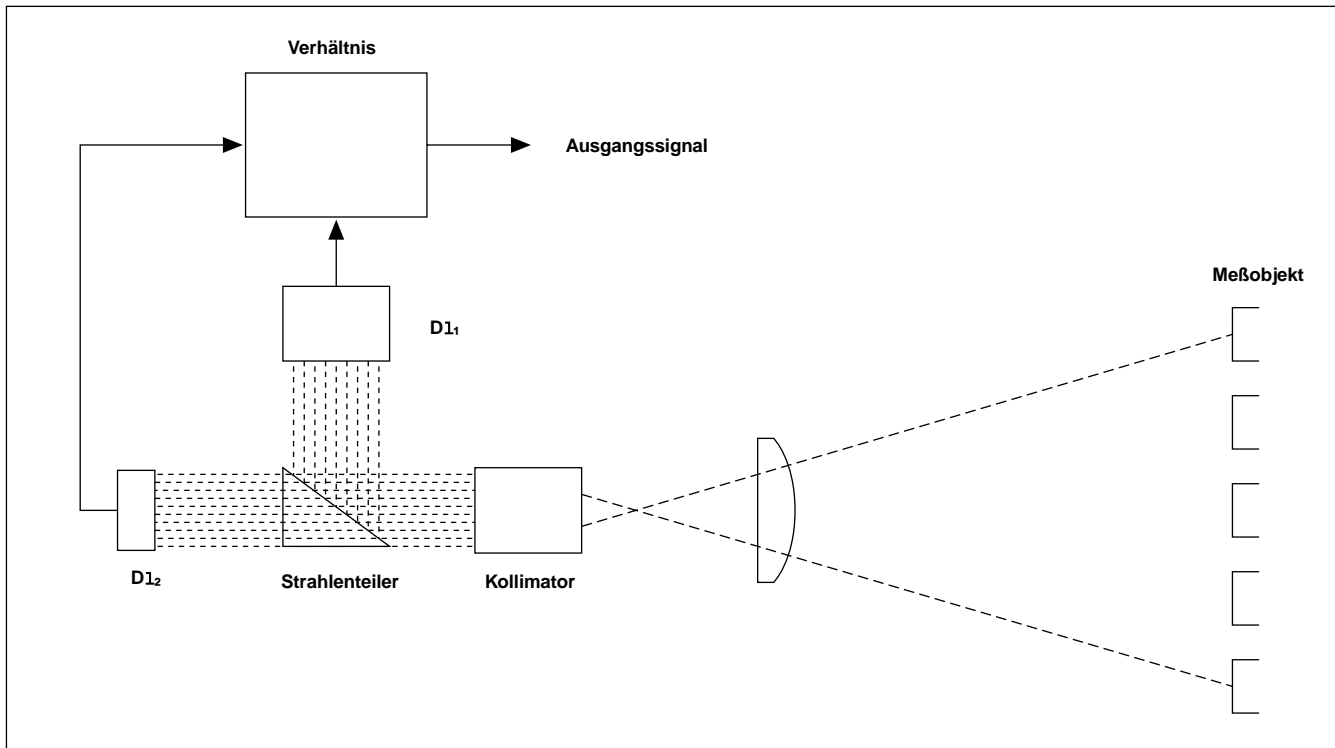


Abbildung 7. Verhältnismessung

sichtbare Farben mit der Temperatur zu verbinden. Diese Vorstellung, und somit auch die Bezeichnung ist inzwischen etwas überholt, aber noch immer gebräuchlich.

Die Effektivität dieses Konzepts beruht darauf, daß Änderungen in den Oberflächeneigenschaften des Meßobjekts oder Hindernisse, die sich in der Sichtlinie zum Meßobjekt befinden, von den beiden Detektoren gleich wahrgenommen werden. Daher bleibt das Verhältnis zwischen den Sensor-Ausgangssignalen gleich, und somit auch die gemessene Temperatur. Abbildung 7 zeigt eine vereinfachte Darstellung eines nach diesem Prinzip arbeitenden Thermometers.

Durch die Messung des Verhältnisses anstelle des Absolutwerts können unter den oben beschriebenen Bedingungen Ungenauigkeiten vermieden werden, die aufgrund eines unbekanntes oder sich ändernden Emissionsfaktors, Hindernissen in der Sichtlinie sowie eines unvollständig ausgefüllten Sichtfeldes entstehen.

Somit eignet sich dieses Verfahren für Applikationen, die mit anderen Meßtechniken nicht oder nur schwierig zu lösen wären, z. B. die Erhitzung von Metallen in Induktionsöfen, Temperaturmessung in Zementöfen oder die Messung durch ein Fenster hindurch, das im Laufe des Prozesses beschlägt wie dies bei der Vakuumschmelze von Metallen der Fall ist. Dabei ist jedoch zu beachten, daß diese dynamischen Änderungen von beiden Sensoren gleich wahrgenommen werden müssen, d. h. die Änderungen müssen alle Wellenlängen gleichermaßen betreffen.

Dies ist nicht immer gegeben. Materialien, deren Emissionsfaktor sich bei allen Wellenlängen gleichmäßig ändert, werden als Graukörper bezeichnet. Dementsprechend werden Materialien, bei denen sich der Emissionsfaktor bei unterschiedlichen Wellenlängen verschieden stark ändert, als Nicht-Graukörper bezeichnet. Diese Einschränkung im Bezug auf die gleichmäßige Dämpfung aller Wellenlängen gilt auch für Hindernisse, die sich zwischen Sensor und Meßobjekt befinden. Nicht alle Beeinträchtigungen des Sichtfelds dämpfen das IR-Spektrum gleichförmig.

Wenn sich im Sichtfeld ein Medium befindet, dessen Partikelgröße mit einer der zur Messung verwendeten Wellenlängen übereinstimmt, wird das Verhältnis ebenfalls verfälscht. Derartige statische Fehlerquellen lassen sich durch eine entsprechende Verschiebung des Verhältnisses kompensieren. Diese Kompensation wird häufig als "Slope" oder Steigung bezeichnet. Der korrekte Wert für die Steigung muß im Allgemeinen experimentell ermittelt werden.

Trotz dieser Einschränkungen arbeitet die Verhältnismessung in einer Reihe von Applikationen ausgesprochen gut. In einigen Anwendungen stellt dieses Verfahren die beste, wenn nicht die einzig sinnvolle Lösung zur Messung der Temperatur dar.

### Zusammenfassung

Die Infrarot-Temperaturmessung ist eine ausgereifte Technologie, die kontinuierlich optimiert und für weitere, neue Anwendungen adaptiert wird. Sie bewährt sich täglich in den verschie-

densten Industriezweigen ebenso wie in der Forschung. Bei richtigem Verständnis der ihr zugrunde liegenden Technologie und Berücksichtigung aller relevanten Applikationsparameter führt dieses Meßverfahren in der Regel zu den gewünschten Ergebnissen, sofern das Instrument sorgfältig installiert wurde. Sorgfältig bedeutet in diesem Zusammenhang, daß der Sensor innerhalb seiner Spezifikationen betrieben wird und daß ausreichende Vorkehrungen getroffen wurden, um die Optik frei von Verunreinigungen und Ablagerungen zu halten. Ein Kriterium bei der Auswahl eines Thermometer-Herstellers sollte daher die Verfügbarkeit von Schutz- und Installationszubehör sein. Ebenso sollte berücksichtigt werden, in welchem Umfang dieses Zubehör eine schnelle Demontage und ggf. einen Austausch des Sensors zuläßt. Wenn diese Richtlinien beachtet werden, arbeiten moderne Infrarot-Thermometer in vielen Fällen zuverlässiger als Thermolement- oder Pt100-Fühler.

### Literatur

1. **Darling, Charles R.:** "Pyrometry. A Practical Treatise on the Measurement of High Temperatures", E. & F. N. Spon Ltd., London 1911.

Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Autors, John Merchant, Sales Manager, MIKRON INSTRUMENT COMPANY, INC.