

Präzise berührungslose Temperaturmessung von blanken Metallen

von **Albert Book**

Die Messung von blanken Metallen bei niedrigen Temperaturen ist für die berührungslose Temperaturmessung aufgrund der sehr geringen Wärmestrahlung und der variierenden Strahlungseigenschaften von Metallen nach wie vor eine anspruchsvolle Messaufgabe.

Der folgende Artikel beschreibt die physikalischen Grundlagen, die verschiedenen Messmethoden, die neuesten technischen Entwicklungen und die Rahmenbedingungen für eine zuverlässige Messung.

Physikalische Grundlagen

Ein Pyrometer erfasst die von dem Messobjekt abgestrahlte Wärmestrahlung bzw. Infrarotstrahlung und ermittelt daraus anhand der Planck'schen Formel die Temperatur. Die Höhe der Strahlung hängt neben der Temperatur in hohem Maße auch von der Strahlungseigenschaft sprich dem Emissionsgrad des Messobjektes ab. Der Emissionsgrad ist eine relative Größe und ergibt sich aus dem Verhältnis der Strahlungsenergie eines realen Strahlers zu der eines idealen oder auch sogenannten „Schwarzen Strahlers“. Für nicht transparente Objekte gilt der Zusammenhang zwischen dem Emissionsgrad ϵ und dem Reflexionsgrad ρ von $\epsilon + \rho = 1$. Gute Wärmestrahler mit einem hohen Emissionsvermögen besitzen ein geringes Reflexionsvermögen und umgekehrt. Alle nicht transparenten Nichtmetalle besitzen in der Regel einen hohen Emissionsgrad $> 80\%$. Daher bereiten nichtmetallische Messobjekte bei der berührungslosen Temperaturmessung weniger Probleme. Bei Metallen hingegen variiert der Emissionsgrad sehr stark von $< 10\%$ bei hochglänzenden Metallen bis zu $> 80\%$ bei oxidierten, beschichteten oder glühenden Metallen. Außerdem kann sich der Emissionsgrad mit der Temperatur ändern. Darüber hinaus ist der Emis-

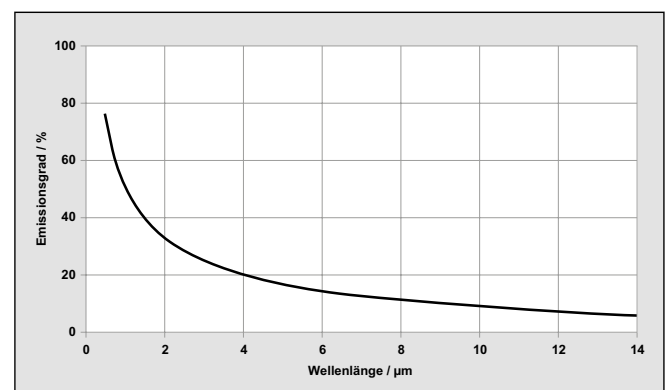


Bild 1 Der Emissionsgrad von Metallen verringert sich mit zunehmender Wellenlänge.

sionsgrad von Metallen von der Wellenlänge der Strahlung abhängig. Er steigt mit kürzerer Wellenlänge (**Bild 1**).

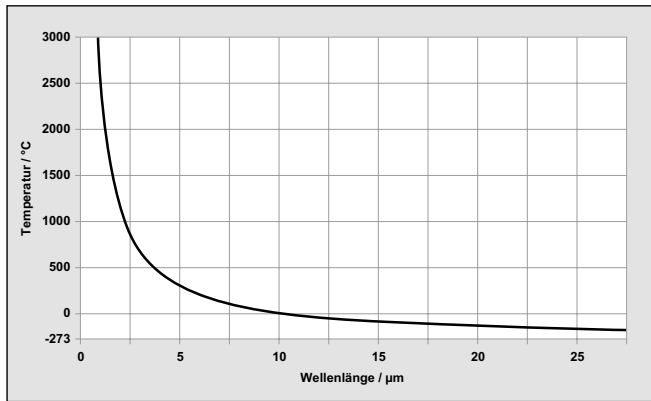


Bild 2 Das Wiensche Verschiebungsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und dem Strahlungsmaximum.

Nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz ändert sich in Abhängigkeit der Temperatur die Schwerpunktwellenlänge, bei der das Messobjekt die maximale Strahlung emittiert (**Bild 2**). Je niedriger die Temperatur ist, desto langwelliger ist das Maximum der Strahlung. Um ab Raumtemperatur messen zu können, sind daher langwellig messende Pyrometer mit einer spektralen Empfindlichkeit von 8-14 μm erforderlich. Blanke Metalle sind in diesem Wellenlängenbereich wie Bild 1 zeigt jedoch schlechte Wärmestrahler. Ein Großteil der vom Pyrometer empfangenen Strahlung resultiert daher aus der Hintergrundstrahlung der Messumgebung, die von der Oberfläche des Messobjektes reflektiert wird. Zudem reagiert ein langwellig messendes Pyrometer mit großen Schwankungen des Messwertes, wenn sich der Emissionsgrad der metallischen Oberfläche ändert.

Um überhaupt zuverlässige Messwerte an blanken Metallen erzielen zu können, ist daher ein Pyrometer mit einer kurzen Wellenlänge notwendig, bei der ein metallisches Objekt ausreichend Wärmestrahlung emittiert. Mit kürzerer Wellenlänge steigt aus physikalischen Gründen die Messbereichsanfangstemperatur. Auswertbare Messsignale lassen sich mit Geräten mit einer Wellenlänge von 2,8 μm ab ca. 50 °C erzielen, wenn der Strahlungsdetektor auf rund 25 °C gehalten wird.

Messverfahren

Bisher werden zur direkten Messung von Metallen bei niedrigen Temperaturen häufig kurzweilig messende Geräte mit

einem fotoelektrischen PbS-Sensor mit einer Wellenlänge von 2,4 μm eingesetzt. Diese Sensoren haben eine hohe Empfindlichkeit. Nachteil ist, dass PbS-Sensoren um bis zu 4 % pro °C Änderung der Eigentemperatur driften. Um überhaupt ein stabiles Messsignal zu erzielen, müssen die Sensoren im Wechsellichtverfahren betrieben werden. Dabei rotiert eine Scheibe vor dem Sensor. Die Scheibe besitzt eine reflektierende Oberfläche sowie eine Öffnung. Bei der Rotation der Scheibe sieht der Sensor abwechselnd die Objektstrahlung durch die Öffnung und die reflektierte Eigenstrahlung einer geräteinternen Referenzfläche mit bekannter Temperatur. Bei Verwendung von sich kontinuierlich drehenden Komponenten in einem Messgerät stellt sich natürlich die Frage nach der Lebensdauer und dem Wartungsaufwand, insbesondere wenn die Geräte in industriellen, rauen Produktionsbedingungen bei hohen Umgebungstemperaturen zum Einsatz kommen.

Ein weiterer Nachteil des Wechsellichtverfahrens ist tendenziell eine längere Ansprechzeit. Dies begrenzt die Einsatzmöglichkeit für Messungen an sich schnell bewegenden Objekten.

Alternativ werden zur Messung von Metallen bei niedrigen Temperaturen Geräte mit thermischen Gleichlichtsensoren und einer Wellenlänge von 8-14 μm angeboten, die ohne bewegte Teile aufgebaut sind. Thermische Strahlungsempfänger besitzen jedoch im Vergleich zu fotoelektrischen Detektoren eine geringere Strahlungsempfindlichkeit. Die daher notwendige hohe Signalverstärkung erfordert eine längere Zeit für die Signalverarbeitung, um das Signalauschen für ein stabiles Messsignal hinreichend zu reduzieren. Dies schränkt den Einsatz zur Messung an schnell bewegten Objekten ein. Aufgrund des geringen Detektorsignals reagieren Geräte mit thermischem Gleichlichtdetektor empfindlicher auf kurzzeitige Schwankungen der Umgebungstemperatur. Wenn zudem die Messköpfe klein sind und damit eine geringe Masse besitzen, wirkt sich ein empfindliches Thermoschockverhalten z.B. in Produktionsanlagen, bei denen das warme Objekt periodisch vom Pyrometer erfasst wird, in Form eines starkes Überschwingen in der Messwertanzeige aus. Nur durch aufwendige Kompensationsmaßnahmen lässt sich dieser Einfluss minimieren.

Um den Einfluss der Umgebungstemperatur zu kompensieren und die Stabilität des Messsignals zu verbessern, wird das Wechsellichtverfahren teils auch bei langwellig messenden Pyrometern mit thermischen Strahlungsempfängern angewandt. Diese Geräte weisen physikalisch bedingt bei geringen Strahlungsintensitäten im Vergleich zu kurzweilig messenden Geräten ein größeres Rauschen auf. Als Konsequenz kann der Messwert am Messbereichsanfang bei kurzer Mess-

zeit durchaus um bis zu 20 °C schwanken. Von einem Präzisionsmessgerät kann dann sicherlich nicht mehr gesprochen werden.

Eine weitere oft verwendete Maßnahme zur Signalsteigerung ist die Verwendung einer Optik mit geringer Auflösung, um die Messfläche zu vergrößern. Mit diesen Geräten ist der Einsatz an kleinen Messobjekten oder aus größerer Messentfernung nur bis zu gewissen Grenzen möglich.

Durch eine große Linsenöffnung am Pyrometer ließe sich die Menge der empfangenen Strahlung deutlich erhöhen. Allerdings sind dazu hochwertige Präzisionslinsen erforderlich, um die optischen Abbildungsfehler gering zu halten. Stattdessen sind die Geräte teils mit einer einfachen Fixfokus-Optik mit einem kurzen Fokusabstand ausgestattet. Um optische Messfehler zu minimieren reduzieren, müssen die Geräte bei kleinen Messobjekten genau im spezifizierten Fokusabstand f montiert werden. Wenn der Messabstand a bereits nur wenige Millimetern vom Fokuspunkt abweicht, nimmt der Durchmesser des Messfeldes stark zu. Dann besteht die Gefahr, dass das Pyrometer auch die kalte Hintergrundstrahlung außerhalb des Messobjektes erfasst und eine zu niedrige Temperatur anzeigt (**Bild 3**). Der Einsatz eines Pyrometers mit einer Fixfokus-Optik schränkt daher die Flexibilität in der Wahl des Montageortes und des Messabstandes ein.

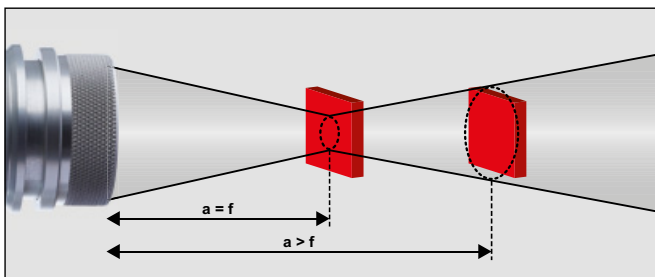


Bild 3 Um Fehlmessungen zu vermeiden, ist ein Pyrometer im Fokusabstand zu betreiben.

Bei der Auswahl von Geräten ist ein großes Augenmerk auf die technischen Spezifikationen wie Ansprechzeit, Messverfahren, Temperaturkoeffizient, optische Auflösung und Temperaturauflösung (NETD) zu legen und diese im Detail zu vergleichen. Leider werden die technischen Daten in den Dokumenten der Hersteller nicht immer angegeben. Daher empfiehlt es sich, diese zu hinterfragen, um später im praktischen Einsatz keine un schönen Überraschungen zu erleben.

Alternative Messverfahren

Eine Möglichkeit, mit einem langwellig messenden Gerät z.B. dennoch die Temperatur des Bandes in einer Bandbeschichtungsanlage zu erfassen, ist die Messung im Spalt zwischen dem Band und der Führungsrolle. Die Mehrfachreflexion der Wärmestrahlung wirkt sich wie eine Erhöhung des Emissionsgrades (**Bild 4**) aus.

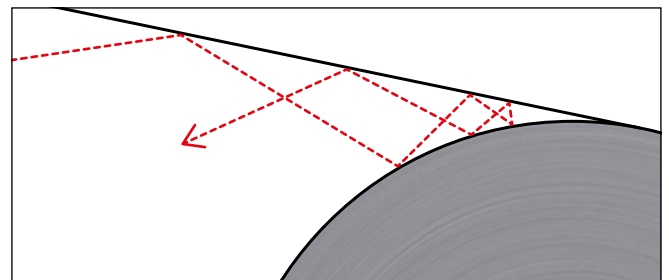


Bild 4 Die Mehrfachreflexion der Strahlung zwischen dem Blech und der Walze wirkt wie eine Emissionsgraderhöhung.

Um in einem ausreichenden Sicherheitsabstand die Geräte montieren und dennoch in dem engen Rollenspalt hinein messen zu können, werden Geräte mit einer hohen optischen Auflösung und einer parallaxefreien Visiereinrichtung (Laserpilottlicht, Durchblickvisier oder Videokamera) zur optimalen Ausrichtung der Geräte eingesetzt. Bei der Messung des Bandes am Haspel einer Bandbeschichtungsanlage ändert sich die Position des Spaltes abhängig vom Durchmesser des Coils. Um korrekte Messwerte zu erfassen, wird vor dem Pyrometer ein Schwenkspiegel montiert, der das Messfeld periodisch ablenkt (**Bild 5**). Pro Scan wird der maximale Temperaturwert ermittelt. Die Spalt-Messmethode wird erfolgreich eingesetzt, ist jedoch mit einem gewissen Montageaufwand verbunden und auf bestimmte Messposition in der Produktionsanlage beschränkt.

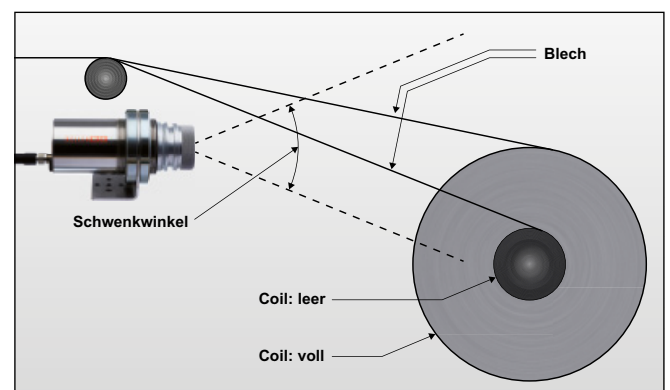


Bild 5 Abhängig vom Durchmesser des Coils verschiebt sich die Position des Rollenspaltes am Haspel.

Eine andere messtechnische Lösung verwendet einen halbkugelförmigen Goldspiegel. Der Spiegel wird so positioniert, dass sich das Metallband im Krümmungspunkt des Spiegels befindet. Auch hier entsteht durch die Mehrfachreflexion eine Signalerhöhung. Die Einschränkung dieser Lösung besteht darin, dass der Messabstand zum Band sehr gering und genau einzuhalten ist. Diese Messmethode funktioniert nur zufriedenstellend, solange der Spiegel nicht verschmutzt ist. Außerdem besteht unter rauen Industriebedingungen die Gefahr der Beschädigung der reflektierenden Oberfläche, die üblicherweise mit Gold beschichtet ist. Daher scheitert der erfolgreiche Einsatz dieser Methode oft an der praktischen Umsetzbarkeit.



Bild 6 Bügel mit einem Teflonband zur Messung an blanken Walzen.

Des Weiteren wird zur Messung der Temperatur von metallisch blanken Walzen eine indirekte pyrometrische Messmethode mit Hilfe eines Emissionsgradwandlers eingesetzt. Dabei wird vor dem Pyrometer ein Teflonband montiert, das auf einem federnden Bügel befestigt ist (**Bild 6**). Das Teflonband wird auf die Walze gedrückt. Das Pyrometer erfasst die Strahlung auf der Rückseite des Bandes, das einen hohen Emissionsgrad besitzt. Nachteilig sind der mechanische Aufwand für die Montage und das Verschleiß des Teflonbandes.

Neuste technische Entwicklungen

Wünschenswert wären Geräte, die sich einfach an einer beliebigen Stelle in der Produktionsanlage einsetzen lassen und aus sicherer Entfernung die Temperatur des Messobjektes direkt bestimmen können. Dies setzt jedoch voraus, dass die Geräte in der Lage sind, die sehr geringe Infrarotstrahlung zu erfassen und auswerten zu können.

Dazu ist ein gewisser optischer Aufwand notwendig, damit ausreichend abgestrahlte Energie des Messobjektes von der

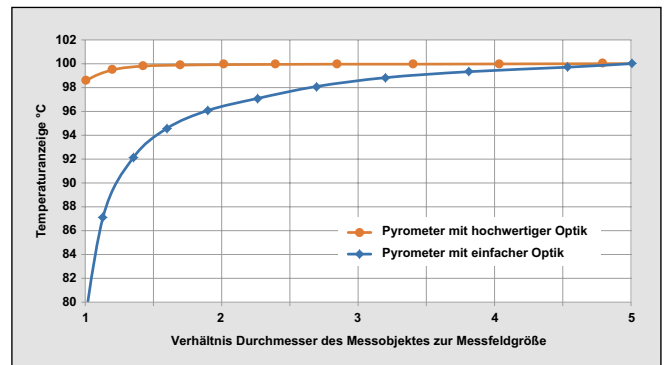


Bild 7 Vergleich der Änderung der Temperaturanzeige bei Änderung der Objektgröße für zwei Pyrometer mit qualitativ unterschiedlicher Optik.

Optik empfangen wird und zum Sensor gelangt. Je größer die Optik, desto mehr Strahlungsenergie wird vom Pyrometer empfangen. Allerdings steigt mit dem Durchmesser der optischen Komponenten auch der Aufwand zur Reduzierung der optischen Abbildungsfehler. Daher sind hochwertige fehlerkorrigierte Objektive und ein komplexer mechanischer Aufbau der Optik notwendig, um die Abbildungsfehler zu minimieren. Nur so lässt sich erreichen, dass der Messwert sich nicht in Abhängigkeit des Messabstandes und der Messentfernung ändert. Diese Abhängigkeit wird als Size-of-Source Effect bezeichnet. In Grafik (**Bild 7**) sind die SSE-Kurven für zwei optisch qualitativ unterschiedliche Geräte bezogen auf das Verhältnis der Objektgröße zur Größe des Messfeldes dargestellt. Bei dem Gerät mit der einfachen Optik muss das Messobjekt mehr als 2,5-mal so groß wie das Messfeld des Pyrometers sein, damit der optisch bedingte Messfehler unter 2 % liegt.

Eine große lichtstarke Optik ist wiederum mit einer geringen Schärfentiefe verbunden. Um Messfehler durch eine unscharfe Abbildung zu vermeiden, ist der Fokusabstand bei der Montage genau einzuhalten. Vorteilhaft sind daher Geräte mit einer durch den Benutzer fokussierbaren Optik. Diese Geräte sind im Vergleich zu Pyrometern mit Fixfokus-Optik flexibel einsetzbar und einfach an die gegebene Montagebedingung anpassbar.

Auch ist ein hoher elektronischer Aufwand zu betreiben, um die kleinen Messsignale zu verstärken und auswerten zu können sowie den Einfluss der Umgebungstemperatur zu kompensieren.

Durch den Einsatz von rauscharmen Verstärkern, hochauflösenden Analog-Digitalwandlern, leistungsfähigen Prozessoren für die Signalverarbeitung sowie durch komplexe, mathematische Algorithmen für die Linearisierung und Kompensation der Umgebungstemperatur können heute mit modernen, kurzweilig



Bild 8
Mit modernen Gleichlicht-Pyrometern lassen sich Temperaturmessungen von blanken Metallbändern in einer Beschichtungsanlage ab 75 °C messen.

messenden Geräten auf Gleichlichtbasis stabile und zuverlässige Messergebnisse erzielt werden (**Bild 8**). Die Geräte messen in Millisekunden und sind daher auch an schnell bewegten Objekten einsetzbar. Eine hohe optische Auflösung ermöglicht die Messung aus großer Messentfernung und von kleinen Objekten ab 2 mm z.B. beim der induktiven Wärmebehandlung.

Neben stationären Pyrometern werden auf Basis dieser Technologie auch tragbare

Pyrometer mit einer Schwerpunkt-Wellenlänge von 2,4 μm angeboten, um einfach und schnell Temperaturkontrollen an den verschiedensten Messstellen durchführen zu können.

Rahmenbedingungen für die Messung niedriger Temperaturen an metallischen Objekten

Die direkte Messmethode hat die Einschränkung, dass die Objekttemperatur mindestens 25 °C über der Geräteinnentemperatur liegen muss, um eine ausreichende Strahlung zu erfassen. Mit höherer Umgebungstemperatur und kleinerem Emissionsgrad steigt die minimal mögliche Messtemperatur (**Bild 9**). Die Angabe des Messbereichsanfangs wird von den Herstellern teils auf einen schwarzen Strahler mit einem Emis-

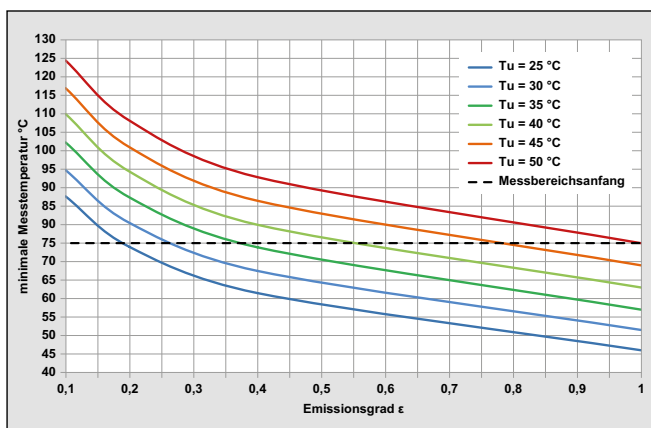


Bild 9 Minimale Messtemperatur in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und des Emissionsgrades.

sionsgrad von 100 % bezogen oder die Rahmenbedingungen erst gar nicht angegeben. Bei der Messung an realen Objekten mit einem niedrigen Emissionsgrad liegt die minimal messbare Temperatur dann deutlich über dem spezifizierten Wert. Wie im Bild 9 zu sehen ist, steigt beispielsweise der Messbereichsanfang bei einem Objekt mit einem Emissionsgrad von 10 % und einer Umgebungstemperatur von 50 °C auf 125 °C.

Für eine zuverlässige Messung von niedrigen Temperaturen an blanken Metallen ist es dennoch notwendig, dass die Messstelle von der Störstrahlung aus der Umgebung abgeschattet wird. Bereits das normale Tageslicht besitzt, im Vergleich zu der geringen Wärmestrahlung des Messobjektes, noch störende Strahlungsanteile im infraroten Messbereich des Pyrometers. Daher kann häufig auf die Verwendung eines Sichtrohres nicht verzichtet werden. Ein einfaches Sichtrohr ist nur bedingt geeignet, da das Rohr selbst wiederum als Strahler fungieren kann. Das Sichtrohr muss kälter als das Messobjekt sein und aus einem strahlungsarmen Material wie Edelstahl oder Aluminium bestehen. Um eine ausreichende Abschattung zu erzielen, ist der Durchmesser des Rohres mindestens 6 mal größer als der Abstand des Rohrendes zum Messobjekt zu wählen.

Fazit

Modernen Gleichlicht-Pyrometern mit einer lichtstarken Optik sowie neuester Sensorik und Elektronik sind in der Lage, eine stabile Messung von niedrigen Temperaturen an Metallen durchzuführen. Voraussetzung ist, dass die Rahmenbedingungen bei der Auswahl der Messstelle und des Montagezubehörs beachtet werden. Die Stabilität des Messergebnisses wird jedoch letztendlich von den physikalisch bedingten Oberflächeneigenschaften bestimmt.



Autor

Dipl.-Ing. Albert Book
KELLER HCW GmbH · Germany
Infrared Thermometer Solutions
Tel. +49 54 51 85 320
albert.book@keller-msr.de
www.keller-msr.de/pyrometer