

Verfahren und Neuheiten zur Temperaturmessung beim induktiven Erwärmen

von **Albert Book**

In induktiven Erwärmungsprozessen wird die Temperatur mittels Pyrometer erfasst. Bei der Auswahl der Geräte ist zwischen Spektral- und Quotienten-Pyrometern zu entscheiden. Der folgende Bericht erläutert die Unterschiede der beiden Messverfahren hinsichtlich der messtechnischen, optischen und bedienertechnischen Auswirkungen auf die Messung. Zudem werden technische Neuheiten der Geräte vorgestellt.

In der heutigen Schmiedeindustrie ist die moderne Induktionstechnik als Verfahren zum Erwärmen beim Wärmeschmieden von Stahl weit verbreitet. Vor der Umformung wird der Stahl auf Temperaturen zwischen 1000 °C und 1250 °C erhitzt. Die benötigte Temperatur hängt vom Kohlenstoffgehalt des Stahls sowie von weiteren Legierungselementen im Werkstoff ab. Wärmeschmieden erfordert sowohl über die Länge als auch über den Querschnitt des Werkstücks eine gleichmäßige Wärmeverteilung. Die Blöcke werden auf eine Temperatur oberhalb der Rekristallisationstemperatur erhitzt. Bei thermischen Umformprozessen gibt es unterschiedliche Verfahren zum Erwärmen des Werkstücks. Dazu zählen Induktion, Gas- und Ölfeuerung, Infrarotstrahlung und elektrische Widerstandsheizung. Das induktive Erwärmen bietet jedoch deutliche Vorteile. Die Aufheizung erfolgt sehr schnell, ist homogen und lässt sich genau regeln.

Bedeutung der Temperaturmessung

Überwiegend werden Werkstücke aus Stahl zum Wärmeschmieden induktiv erwärmt. Doch wird die Induktionserwärmung auch bei Metallen wie Titan, Aluminium, Kupfer, Messing, Bronze und Nickel zur Umformung eingesetzt. Legierte Stähle derselben Güte besitzen nicht unbedingt dieselben chemischen Zusammensetzungen. Beispielsweise weisen Massenstahl und niedriglegierter Stahl einen Kohlenstoffanteil von etwa 0.05% auf. Unterschiede im Kohlenstoffgehalt können Abweichungen von 90 °C in der Solidustemperatur des Stahls bewirken. Somit kann es vorkommen, dass angesichts unterschiedlicher Zusammensetzungen, Stähle derselben Güteklasse sich in der optimalen Schmiedetemperatur unterscheiden.

Im Laufe der Jahre führten Prozessverbesserungen in der Stahlerzeugung zu einer Verringerung der Streubreite. Heutzutage werden nahezu gleichbleibende chemische Zusammensetzungen erzielt. Variiert dennoch die chemische Zusammen-



Bild 1 Schleuse zum Aussortieren der Blöcke mit zu niedriger oder hoher Temperatur

setzung eines bestimmten Stahls, erfordert dies eine äußerst genaue Temperaturkontrolle. Um sicherzustellen, dass die optimale Schmiedetemperatur erzielt wird, muss ein Schmiedebetriebe etwaige chemisch bedingte Abweichungen in den physikalischen Eigenschaften beachten und seine Prozessführung darauf abstimmen.

Einflussfaktoren der Blocktemperatur

Die Temperatur des erwärmten Werkstücks wird sowohl durch die eingebrachte Energiemenge als auch durch die Fördergeschwindigkeit bestimmt. Die Heizleistung regelt den elektrischen Strom, der durch die Induktionsspule fließt. Über die Spule wird elektrische Energie in thermische Energie umgewandelt und erwärmt die Blöcke. Auch die Vorschubgeschwindigkeit, mit der die Blöcke durch die Erwärmungsstrecke gefördert werden, bestimmt die Temperatur des Werkstücks. Weitere temperaturbestimmende Anlagenparameter sind der Lochdurchmesser des Spulenkastens und die Kühlung des Induktors, die ebenfalls für eine effiziente Prozesssteuerung von großer Bedeutung sind.

Pyrometrische Temperaturmessung

In induktiven Erwärmungsanlagen werden berührungslos und verschleißfrei arbeitende Pyrometer oder Infrarot-Thermometer eingesetzt. Pyrometer erfassen die von einem Objekt abgestrahlte Infrarotstrahlung und ermitteln daraus anhand des Planck'schen Strahlungsgesetzes die Temperatur.

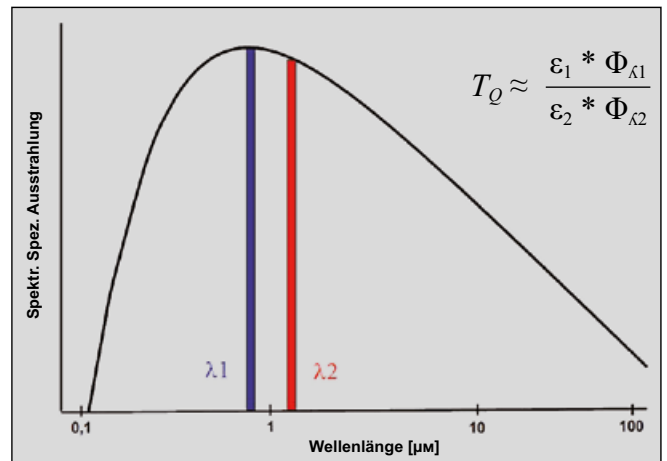


Bild 2 Quotienten-Pyrometer messen an zwei Wellenlängen die Strahlung und ermitteln aus dem Verhältnis die Temperatur

In Millisekunden wird die Temperatur des vorbeilaufenden Werkstücks unmittelbar hinter dem Induktor aus sicherer Entfernung erfasst. Die Temperatur wird als Regelgröße für die Prozesssteuerung oder nur zum Aussortieren von Blöcken verwendet, deren Temperatur außerhalb des zulässigen Bereiches liegt (**Bild 1**).

Messverfahren der pyrometrischen Temperaturermittlung

Bei der berührungslosen Temperaturmessung kann zwischen Spektral-Pyrometern und Quotienten (Zweifarb-)Pyrometern ausgewählt werden. Spektral-Pyrometer erfassen die Infrarot-Strahlung bei einer Wellenlänge. Quotienten-Pyrometer messen die Strahlung bei zwei Wellenlängen. Aus dem Verhältnis der beiden Strahlungsintensitäten wird die Temperatur bestimmt (**Bild 2**).

Beide Verfahren kommen bei der induktiven Erwärmung zur Anwendung. Die Auswahl hängt von der angestrebten Messgenauigkeit, der gewünschten Flexibilität des Gerätes, der Bedienerfreundlichkeit und nicht zuletzt von den Kosten ab.

Unterschiede und Einflüsse der Messverfahren auf die Temperatur

Einfluss durch Staub, Rauch, Dampf

Bei einer neutralen Schwächung der Infrarot-Strahlung durch Zwischenmedien im Sichtfeld wie Staub, Dampf oder Rauch bleibt beim Quotienten-Pyrometer das Strahlungsverhältnis

konstant. Die Messung wird dadurch nicht beeinträchtigt. Selbst bei einem Schwächungsgrad von 90 % liefert das Quotienten-Pyrometer noch sichere Messwerte. Bei einem Spektral-Pyrometer führt eine Signalschwächung unmittelbar zu einer Fehlmessung.

Einfluss bei Verschmutzung der Linse

Eine Scheibe zum Schutz der Optik oder ein Schauglas eines Ofens haben bei einem Quotienten-Pyrometer keine Auswirkung auf die Messung. Auch eine Verschmutzung der Pyrometerlinse, der Schutzscheibe oder des Sichtfensters beeinflussen ebenfalls nicht den Messwert. Bei Verwendung eines Spektral-Pyrometers ist die Transmissionseigenschaft des Glases direkt oder über den Emissionsgrad zu berücksichtigen, um die korrekte Temperatur zu ermitteln. Eine Verschmutzung führt bei einem Spektralpyrometer zu einer Signalschwächung und damit zu einer Minderanzeige der Temperatur.

Überwachung der Signalschwächung

Sollte eine Schwächung der Infrarot-Strahlung durch störende Zwischenmedien oder eine Verschmutzung auftreten, bieten moderne Quotienten-Pyrometer die Möglichkeit zur Überwachung der Signalintensität. Bei Erreichen einer kritischen Schwelle wird ein Alarm ausgelöst. Dies erhöht die Betriebssicherheit und erspart die routinemäßigen Wartungskontrollen. Mit einem Spektral-Pyrometer ist eine Signalüberwachung nicht realisierbar.

Messung an kleinen Messobjekten

Bei einem Spektral-Pyrometer muss das Messobjekt stets größer als der Messfleck des Pyrometers sein. Da ein Spektral-Pyrometer den Mittelwert der Strahlung über das Messfeld erfasst, wird ansonsten bei einem kleineren Messobjekt vor einem kalten Hintergrund immer eine zu niedrige Temperatur gemessen.

Ist bei einem Quotienten-Pyrometer der Messfleck vom Messobjekt nicht voll ausgeleuchtet (Teilausleuchtungseffekt), wirkt dies wie eine neutrale Schwächung der Infrarotstrahlung. Daher liefert ein Quotienten-Pyrometer auch noch korrekte Messwerte, wenn das Objekt um bis zu 80 % kleiner als das Messfeld des Pyrometers ist. Der Grad der Teilausleuchtung ist vom Emissionsgrad und der Temperatur des Messobjektes abhängig. Idealerweise sollte dabei die Position des Objektes im Sichtfeld beliebig sein und den Temperaturwert nicht beeinflussen. Jedoch gibt es diesbezüglich Qualitätsunterschiede zwischen den am Markt angebotenen Geräten. Bei Pyrometern mit einem einfachen optischen Aufbau, einer geringeren Fehlerkorrektur der Linse und günstigen Sensoren kann bei konstanter

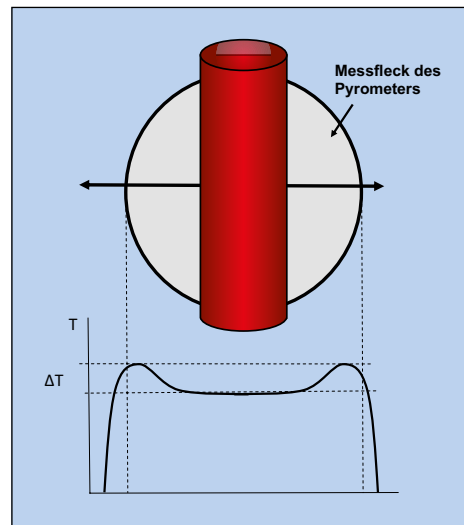


Bild 3
Fehlerhafter Temperaturanstieg bei einfachen Quotienten-Pyrometern, wenn sich der Block im Randbereich des Messflecks befindet

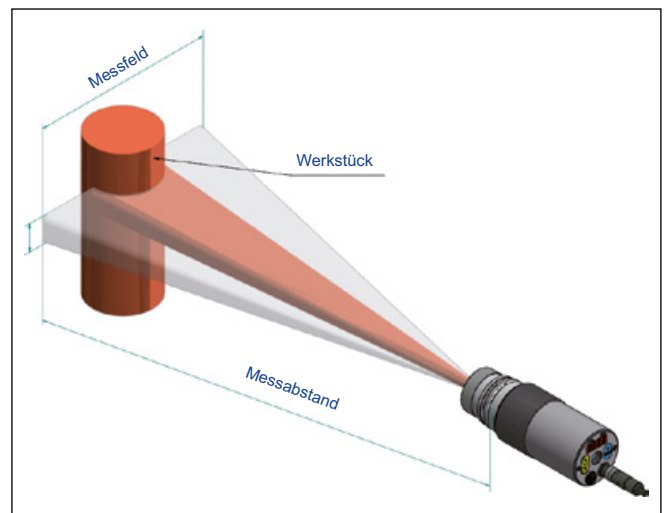


Bild 4 Ein Quotienten-Pyrometer mit rechteckigem Messfeld ist selbst bei schwankendem Messobjekt sehr einfach auszurichten

Blocktemperatur der Messwert um bis zu 20 - 30 °C ansteigen, wenn sich der Block im Randbereich des Messfeldes befindet (**Bild 3**).

Gerade wenn Blöcke gemessen werden, deren Durchmesser kaum größer als das Messfeldes des Pyrometers ist, muss ein Spektral-Pyrometer sehr genau auf das Messobjekt ausgerichtet werden. Ein Quotienten-Pyrometer ist diesbezüglich wesentlich einfacher zu handhaben, da es aufgrund des Teilausleuchtungseffektes deutlich unempfindlicher auf die Ausrichtung reagiert. Neuerdings werden am Markt Quotienten-Pyrometer mit einem rechteckigen Messfeld angeboten. Diese Geräte lassen sich noch einfacher auf das Messobjekt ausrichten, da sie eine größere Schwankungsbreite der Position des Messobjektes zulassen (**Bild 4**).

Einfluss der Messentfernung und Objektgröße auf die Temperatur

Ein weiterer Unterschied zwischen Spektral- und Quotienten-Pyrometern ist der Einfluss bei Änderung der Messentfernung und der Objektgröße auf den Messwert.

Bei einem Spektral-Pyrometer muss der Fokusabstand sehr genau eingehalten werden, um die richtige Temperatur zu ermitteln. Teils werden in induktiven Erwärmungsanlagen Spektral-Pyrometer mit einer Fixfokus-Optik eingesetzt. Bei der Festlegung des Montageortes ist zu beachten, dass der Messabstand genau eingehalten wird. In der Praxis kommt es jedoch vor, dass anlagenbedingt der exakte Fokusabstand nicht realisierbar ist oder dass bei Geräten mit einer verstellbaren Optik die Messentfernung falsch eingestellt wird. Noch problematischer wird es, wenn auf einer Anlage Blöcke mit unterschiedlichen Durchmessern verarbeitet werden. Da sich damit auch gleichzeitig der Messabstand ändert, erfolgt die Messung teilweise im defokussierten Zustand.

Der Messfehler, der entsteht wenn das Pyrometer im defokussierten Bereich betrieben wird, ist von der Größe des Messobjektes und der Qualität der Optik des Pyrometers abhängig. Gerade wenn der Messfleck des Pyrometers nur geringfügig größer als das Messobjekt ist, kann dies bei einem Spektral-Pyrometer zu erheblichen Messfehlern führen. In der Grafik (**Bild 5**) ist dargestellt, wie stark sich die Temperatur in Abhängigkeit der Größe des Blockdurchmessers beispielhaft für eine Blocktemperatur von 1000 °C ändern kann. Verdoppelt sich beispielsweise der Durchmesser von 16 mm auf 32 mm, ändert sich die Temperaturanzeige bei einem Gerät mit einer hochwertigen Optik um lediglich 1 °C. Hingegen steigt bei einem Pyrometer mit einem einfachen optischen Aufbau der Messwert um 6 °C.

Bezogen auf die wahre Temperatur von 1000 °C ergibt sich bei einem Blockdurchmesser von 16 mm für das hochwertige Gerät ein Messfehler von 1,2 °C. Das optisch einfache Gerät weicht hierbei um 10 °C von der wahren Temperatur ab.

Bei einem Quotienten-Pyrometern sind die Messabweichungen bei Änderung des Messabstandes, der Objektgröße oder wenn das Gerät außerhalb des Fokusbereiches betrieben wird bis zu gewissen Grenzen vernachlässigbar.

Optische Spezifikation und Auswirkung auf die Temperatur

Der optische Einfluss eines Pyrometer auf die gemessene Temperatur wird durch den sogenannten „Size of Source Effect“ (SSE) spezifiziert.

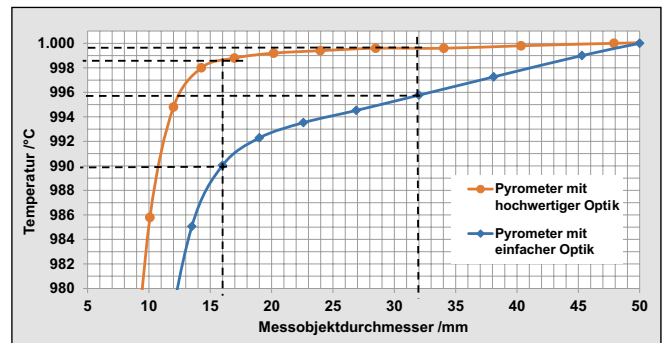


Bild 5 Einfluss auf die Temperatur bei Änderung der Objektgröße

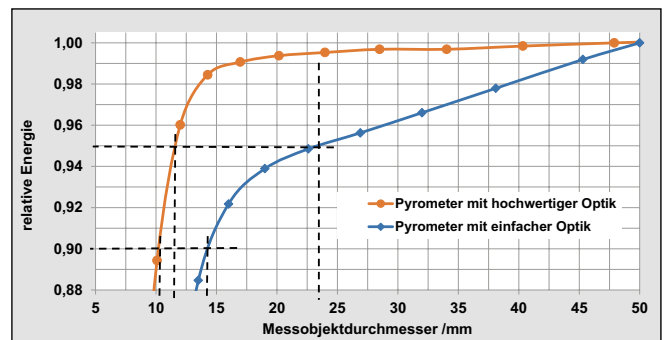


Bild 6 Vergleich der SSE-Kurve zweier Pyrometer mit hochwertiger und einfacher Optik

An der SSE-Kurve eines Pyrometers ist Qualität der Optik und die spezifizierte Größe des Messflecks bezogen auf die empfangene Energie abzulesen. Um tatsächlich die optischen Eigenschaften von Pyrometern vergleichen zu können, sind die SSE-Kurven der Geräte zu vergleichen. Wird zur Spezifikation der Messfleckgröße eines Pyrometers als Bezugsgröße 90 % der maximal empfangbaren Energie angenommen, beträgt beispielsweise der Messfleck der hochwertigen Optik $\varnothing 10$ mm und für ein einfacheres Gerätes $\varnothing 14$ mm (**Bild 6**). Bezogen auf 95 % der relativen Energie ergibt sich ein Messfleck von $\varnothing 11,5$ mm bzw. bei der einfacheren Optik von bereits $\varnothing 23$ mm. Bei der Spezifikation des Durchmessers des Messflecks durch den Hersteller wird bei optisch einfachen Geräten daher oft der Trick angewandt, die Angaben auf einen kleineren prozentualen Wert der relativen Energie zu beziehen, um so einen vermeintlich kleineren Messfleck in den Datenblättern angeben zu können.

Die Position und Größe des Messflecks wird durch ein Pilotlicht oder ein Durchblick-Visier gekennzeichnet. Neuerdings werden am Markt Pyrometer angeboten, die mit einer integrierten Videokamera als Visierhilfe ausgestattet sind (**Bild 7**).

Das Videobild erleichtert die Kontrolle erheblich, da dadurch die Messstelle und Ausrichtung jederzeit vom Leitstand aus sichtbar sind. Die TBC (Target Brightness Control) Funktion der



Bild 7 Neuartiges Pyrometer mit integrierter Videokamera und TBC-Funktion

Kamera ermittelt die Lichtstärke exakt im Messfeld des Pyrometers, so dass das Messobjekt immer in optimaler Belichtung abgebildet wird.

Zusätzlich zur Messfeldmarkierung wird im Monitorbild die gemessene Temperatur eingeblendet und ersetzt damit eine externe Digitalanzeige. In seltenen Fällen werden Laser als Visierhilfe eingesetzt. Diese haben den Nachteil, dass zwar die Position jedoch nicht die Größe des Messflecks abgebildet wird.

Bei Pyrometern mit einfachen Linsen sind die optischen Abbildungsfehler (Aberration) nur für den sichtbaren Bereich korrigiert. Für die infrarote Messwellenlänge entspricht dann die Messfleckmarkierung im Durchblickvisier nicht der wahren Größe und dem tatsächlichen Fokusabstand des Messfeldes. Daher besteht die Gefahr, dass das Pyrometer im defokussierten Bereich betrieben wird.

Optisch bedingte Messunsicherheiten spielen beim Einsatz von Pyrometern oft die wesentlichere Rolle bei der Betrachtung des Messfehlers. Beim der Auswahl der Geräte wird jedoch hauptsächlich nur die Prospektangabe des messtechnischen Fehlers verglichen.

Quotienten-Pyrometer reagieren auf optische Einflüsse in der Regel unempfindlicher als ein Spektral-Pyrometer.

Einfluss der Oberfläche und des Materials

Ein weiterer Unterschied zwischen einem Spektral- und Quotienten-Pyrometer besteht in dem Einfluss des Emissionsgrades der Messoberfläche auf die Temperatur. Bei einem Spektral-Pyro-

meter wirkt sich ein falsch eingestellter Emissionsgrad unmittelbar auf die Temperatur aus. In der Praxis ändert sich der Emissionsgrad abhängig vom Material und der Oberfläche. Dadurch sind Messfehler unvermeidbar. Die Größe des Einflusses ist jedoch von der gewählten Wellenlänge des Pyrometers abhängig. Sie sinkt mit kürzerer Messwellenlänge (**Bild 8**).

Bei der Auswahl des Pyrometers sind aus physikalischen Gründen Geräte mit einer schmalbandigen und kürzeren Messwellenlänge von $\leq 1 \mu\text{m}$ vorzuziehen, um den Einfluss des Emissionsgrades so gering wie möglich zu halten. Allerdings ist bei kurzweilig messenden Pyrometern eine höhere Anfangstemperatur von 500 – 600 °C zu berücksichtigen.

Quotienten-Pyrometer haben den Vorteil, dass sich neutrale Emissionsgradänderungen nicht auf die Messtemperatur auswirken. Daher wird beim Einsatz von Quotienten-Pyrometern der Material- und Oberflächeneinfluss unberücksichtigt gelassen.

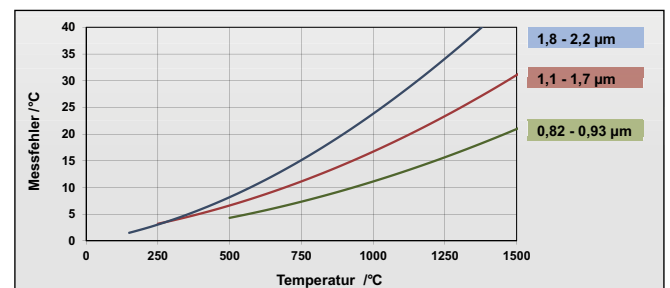


Bild 8 Messfehler von Spektral-Pyrometern unterschiedlicher Messwellenlängen bei einer Änderung des Emissionsgrades um 10%

Nutzung der Temperaturinformation

Die in Europa eingesetzten Erwärmungsanlagen sind üblicherweise mit einer Temperaturmessung ausgestattet. Bei Abweichung regelt eine Steuerung die Prozessparameter und steuert das Aussortieren von Blöcken mit zu niedriger oder zu hoher Temperatur. In den technisch weniger entwickelten Ländern sind vielfach noch Anlagen mit Flammenerwärmung im Einsatz. Hier ist eine genaue Temperaturmessung nicht möglich. Daher werden diese alten Anlagen nach und nach auf induktive Erwärmung umgestellt. Die Nachrüstung der Temperaturerfassung erfolgt häufig direkt durch den Kunden als autarke Lösung unabhängig von der Anlage. Für diesen Zweck werden intelligente Digitalanzeigen eingesetzt, die in Verbindung mit dem sehr schnell messenden Pyrometer die Temperatur der Blöcke automatisch erfassen. Die Anzeige

steuert über Schaltrelais die Schleusenventile zur Aussortierung der zu heißen und kalten Blöcke. Je nach Konfiguration ist auch eine getrennte Sortierung möglich. Neuerdings werden auf dem Markt Anzeigen angeboten, die die Anzahl der korrekten und fehlerhaften Blöcke zählen und protokollieren können. Kabelgebunden per PC oder noch einfacher drahtloser per Bluetooth-Schnittstelle und Smartphone können die Daten ausgelesen werden. Erst durch die Erfassung der fehlerhaften Werkstücke wird es in Anlagen mit autarker Temperaturerfassung möglich, bei Auffälligkeiten in den Produktionsprozess einzugreifen.

Fazit

Eine präzise Temperaturerfassung in modernen Induktionserwärmungsanlagen ist die Voraussetzung für eine optimale und wirtschaftliche Prozessführung.

Spektral-Pyrometer liefern bei konstanten Produktionsbedingungen wie Objektgröße, Messabstand, Material, Oberfläche und sofern das Objekt um mindestens 3-5 mal so groß ist wie der Messfleck des Pyrometers gute Messergebnisse. Voraussetzung ist, dass die Geräte mit einem hochwertigen optischen System ausgestattet sind, um die optischen Fehler zu minimieren. Durch die Wahl eines kurzweilig messenden Gerätes lässt sich der Einfluss des Materials und der Oberfläche reduzieren.

Sind eine hohe Messsicherheit und ein einfaches Handling bezüglich der Ausrichtung und Fokussierung angestrebt, sind Quotienten-Pyrometer vorzuziehen. Insbesondere, wenn sich die Produktionsbedingungen ändern oder wenn Dampf, Staub oder Verschmutzungen zu erwarten sind, ist das Quotienten-Messverfahren der spektralen Messung klar überlegen.

Letztendlich spielt sicherlich auch der je nach Ausstattung um 50 – 100 % höhere Preis des Quotienten-Pyrometers eine Rolle bei der Auswahl des einzusetzenden Pyrometers.



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