

# Sichere und verschleißfreie Temperaturmessung in induktiven Erwärmungsanlagen

von **Ralf Körholz**

Bei der induktiven Wärmebehandlung ist die Temperatur der wichtigste Prozessparameter. Jedoch ist die korrekte und langzeitstabile Ermittlung der Temperatur oft nicht so einfach möglich. Eine kontaktbehaftete Messung mittels Thermoelemente ist im laufenden Produktionsprozess an bewegten Teilen oder Induktoren nicht wirklich praktikabel durchführbar. Infrarot-Thermometer, die aus der Wärmestrahlung des Messobjektes berührungslos die Temperatur ermitteln, sind ideal für die Messaufgabe geeignet. Voraussetzung ist jedoch die richtige Auswahl und der korrekte Einsatz der Geräte. Der folgende Artikel beschreibt die Voraussetzungen und die neuesten technischen Entwicklungen für eine sichere, korrekte und langzeitstabile Temperaturmessung mittels Pyrometer in induktiven Erwärmungsanlagen.

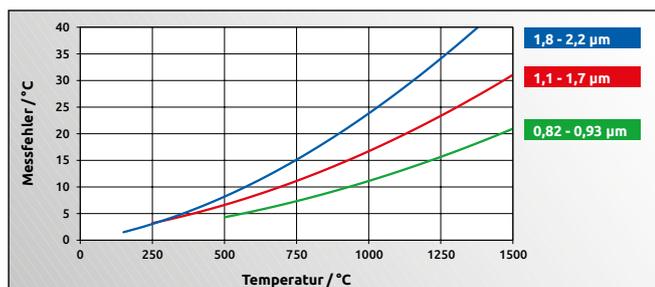
Obwohl die Temperatur in induktiven Erwärmungsprozessen mit die entscheidende Prozessgröße ist, um konstante und reproduzierbare Produktionsbedingungen zu schaffen, werden aufgrund der Schwierigkeiten in der Erfassung der korrekten Temperatur nur bedingt Messgeräte eingesetzt. Stattdessen wird die Regelung über die Leistung des Induktors, die Vorschubgeschwindigkeit und die Zeit gesteuert.

Eine berührende Messung mittels Thermoelemente ist in Induktionsanlagen mit einer Reihe von Problemen verbunden und daher in der Praxis nicht anwendbar, da sich das Messobjekt oder der Induktor bewegt. Bei kleinen Produktionsteilen oder Heizzonen lässt sich bei einer Kontaktmessung eine ungewollte Wärmeableitung nicht verhindern. Für schnelle Aufheizprozesse ist die Reaktionszeit von Thermoelementen zu langsam. Auch wären aufwendige mechanische Lösungen notwendig, um den Kontaktfühler zur Messung an das Werkstück heran zu führen. Zudem führen Alterungseffekte der Thermoelemente mit der Zeit zu einem fehlerhaften Temperaturwert, da der Messwert durch Diffusionsprozesse langsam wegdriftet. Eine langzeitstabile sichere Temperaturmessung ist damit nicht gewährleistet.

Daher sind berührungslos, verschleißfrei und driftfrei messende Infrarot-Thermometer grundsätzlich ideal geeignet, um in induktiven Wärmebehandlungsanlagen die Temperatur zu messen. Bei der berührungslosen Temperaturmessung wird die von der Messstelle abgestrahlte Infrarotstrahlung vom Pyrometer erfasst und in einen Temperaturwert umgerechnet. Allerdings ist die Infrarottemperaturmessung komplexer als die Kontaktmessung, da die abgestrahlte Energie von dem Material und der Oberfläche abhängig ist. Wenn bei gleicher Einstellung ein Spektralpyrometer die Strahlung eines Messing- und eines Stahlbolzens erfasst, zeigt das Gerät bei der Messung an Messing eine niedrigere Temperatur an, da Messing schlechtere Strahlungseigenschaften sprich einen kleineren Emissionsgrad als Stahl besitzt. Am Pyrometer wird dies durch die Einstellung des Emissionsgrades korrigiert. Doch es stellt sich bei der pyrometrischen Temperaturmessung immer die

Frage nach dem Emissionsgrad der Messoberfläche und wie konstant ist er selbst bei gleichen Materialien jedoch unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit? Wie bei der Kontaktmessung gibt es natürlich auch bei der berührungslosen Temperaturmessung das Problem, dass sich die Heizzone nicht zwingend an der gleichen Stelle befindet. Beispielsweise kann ein Draht schwanken und sich somit die Position periodisch verändern. Trotz der sonstigen Vorteile der Infrarotmessung wird aufgrund dieser Schwierigkeiten in Induktionsanlagen wohl eher aus Unsicherheit und Unkenntnis zum Teil auf eine Temperaturmessung verzichtet und stattdessen rein über die zugeführte Energie, die Vorschubgeschwindigkeit und die Zeit die Anlage gesteuert, um konstante Produktionsbedingungen zu schaffen. Eine wirkliche Kontrolle oder sogar ein Nachweis über die Einhaltung der vorgegebenen Bearbeitungstemperatur ist dann nicht gewährleistet. Werden jedoch die richtigen Infrarot-Thermometer ausgewählt und die heutigen Möglichkeiten der modernen Geräte genutzt, lassen sich die Probleme der pyrometrischen Messung lösen und Pyrometer erfolgreich für eine korrekte Erfassung der Temperatur einsetzen.

Bei der optischen Temperaturmessung werden sowohl Geräte mit dem Einkanal- als auch mit dem Zweikanalmessverfahren eingesetzt. Einkanal- oder Spektralpyrometer erfassen bei einer Wellenlänge die Infrarotstrahlung und berechnen daraus die Temperatur. Störende Signaländerungen, wie unterschiedlich strahlende Messobjekte, Messung an Objekten, die kleiner als das Messfeld sind, Oxidation auf der Messoberfläche oder Staub und Dampf im Sichtfeld wirken sich unmittelbar als Störgröße auf den Messwert aus. Die Fehlmessung ist umso größer, je langwelliger und breitbandiger die Messwellenlänge des Pyrometers ist (**Bild 1**). Moderne Zweikanal- oder Quotientenpyrometer sind mit einem Doppelsensor in Sandwich Bauweise ausgestattet. Damit erfassen sie die Strahlung zeitgleich und bei bewegten Objekten auch ortsgleich an zwei Wellenlängen. Aus den beiden spektralen Signalen wird der Quotient gebildet. Dieser verhält sich bei Abgleich vor einem



**Bild 1** Messfehler von Spektral-Pyrometern unterschiedlicher Messwellenlängen bei einer Änderung des Emissionsgrades um 10%

Kalibrierstrahler proportional zur Temperatur. Wenn die Signale der beiden Kanäle gleichermaßen durch die beschriebenen Störungen geschwächt werden, bleibt der Quotientenmesswert konstant und zeigt weiterhin die korrekte Temperatur an. Dies funktioniert selbst bei einer Signalschwächung von bis zu 90 %. Wirkt die Schwächung jedoch selektiv d.h. für die beiden Wellenlängen unterschiedlich, führt dies bei einem Quotientenpyrometer zu teils erheblichen Messabweichungen.

Physikalisch bedingt ändert sich bei Metallen die Strahlungseigenschaft, sprich der Emissionsgrad in Abhängigkeit der Objekttemperatur, des Materials sowie durch Oxidation oder Zunderbildung. Bei Stahl ist der Emissionsgrad zum einen deutlich höher und zum anderen der Störeinfluss deutlich geringer als bei NE-Metallen wie Messing, Kupfer oder Aluminium (**Tabelle 1**).

Material	Emissionsgrad / %
Stahl	84 - 87
Messing	25 - 35
Kupfer	50 - 60
Aluminium	15 - 25

**Tabelle 1** Emissionsgrad von verschiedenen Metallen

Da die Quotientenmessmethode Schwankungen des Emissionsgrades bis zu einem gewissen Grad kompensieren kann, liefert ein Quotientenpyrometer bei der Messung an Eisen und Stahl genauere Messwerte und ist daher besser geeignet, als ein Spektralpyrometer. Moderne Quotientenpyrometer mit einer scharf abbildenden und hochauflösenden Optik sind in der Lage, zwischen sauberen und oxid- und schlackebehafteten Oberflächen zu unterscheiden. Bewegt sich das Messobjekt an dem Pyrometer vorbei, wird mittels dieser CSD-Filterfunktion (Clean Surface Detection) die korrekte Temperatur der oxid- und zunderfreien Stellen ermittelt. Auch sind moderne Geräte durch leistungsstarke Mikroprozessoren heute in der Lage, völlig autark heiße Objekte zu erkennen und die Messung automatisch durchzuführen. Am Ende der Messung wird der gefilterte Messwert am Display des Gerätes angezeigt und über den Ausgang übertragen. Mittels integrierter Schaltkontakte lassen sich beispielsweise bei der Bolzenerwärmung direkt über das Gerät zu heiße und zu kalte Teile auszusortieren (**Bild 2**).

Bei Bundmetallen ist im Unterschied zu Eisen und Stahl der wellenlängenabhängige Einfluss so groß, dass der Messfehler mit einem Quotientenpyrometer deutlich höher werden kann,



**Bild 2** Aussortierung zu heißer und zu kalter Bolzen

als bei einem kurzweilig messenden Spektralpyrometer. Ändert sich beispielsweise der Emissionsgrad bei der Messung an Messing zwischen 25 – 35 %, ergeben sich bei einer Objekttemperatur von 900 °C folgende Messabweichungen (**Tabelle 2**):

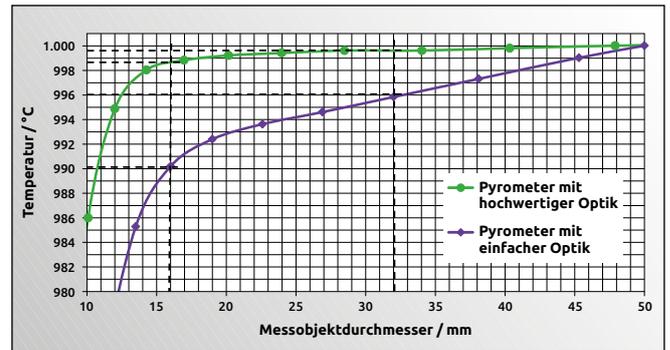
Gerätetyp	Wellenlänge $\lambda$	Abweichung
Spektralpyrometer	1,1 – 1,7 $\mu\text{m}$	$\pm 29$ K
	0,82 – 0,93 $\mu\text{m}$	$\pm 10$ K
Quotientenpyrometer	0,95 $\mu\text{m}$ / 1,55 $\mu\text{m}$	$\pm 26$ K
	0,95 $\mu\text{m}$ / 1,05 $\mu\text{m}$	$\pm 23,5$ K

**Tabelle 2** Vergleich der Messabweichungen von Spektral- und Quotientenpyrometern

Daher sollte für die Messung an NE-Metallen ein kurzweilig und schmalbandig messendes Spektralpyrometer eingesetzt werden, um den Messfehler zu minimieren.

Da es sich bei Pyrometern um eine optische Temperaturmessung handelt, sind neben den elektrischen auch die möglichen optischen Messfehler zu beachten. Um die optisch bedingten Messabweichungen zu minimieren, sind insbesondere bei kleinen Objekten, die kaum größer als das Messfeld des Pyrometers sind, Geräte mit einer hochauflösenden und qualitativ hochwertigen Optik notwendig. Die Geräte sind im Fokusabstand zu montieren bzw. bei Geräten mit fokussierbarem Objektiv ist der Fokusabstand passend einzustellen. Allerdings kommt es in der Praxis vor, dass Produkte mit unterschiedlichen Abmessungen auf einer Anlage erwärmt werden und dadurch der Messabstand variiert. Erfahrungsgemäß wird der Messabstand oder der Fokus der Geräte nicht verändert, so

dass die Geräte teils außerhalb des Fokusabstandes betrieben werden. Abstands- und objektgrößenabhängige Messfehler können durch den Einsatz von optisch hochwertigen Geräten mit einem kleinen Size-of-Source Effekt stark reduziert werden, wie aus der Grafik (**Bild 3**) abzulesen ist.



**Bild 3** Vergleich des optisch bedingten Messfehlers für zwei qualitativ unterschiedliche Pyrometer

Die Grafik zeigt die SSE Kurven für zwei Geräte mit qualitativ unterschiedlichen Optiken. Wenn sich die Objektgröße beispielsweise von 16 mm auf 32 mm verdoppelt, ändert sich die Temperaturanzeige bei dem Gerät mit dem hochwertigen Objektiv von 998,8 °C auf 999,7 °C d.h. um lediglich 0,9 K. Im Vergleich dazu steigt bei einem Strahlungsthermometer mit einem einfachen optischen Aufbau der Messwert von 990 °C auf 995,8 °C also um 5,8 K. Bezogen auf die wahre Temperatur von 1000 °C ergibt sich bei einem Objektdurchmesser 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. D.h. allein der optische Einfluss verursacht bei dem einfachen Gerät eine Messunsicherheit von 1 %.

Mittels eines LED-Pilotlichtes, eines Durchblickvisiers oder einer integrierten Videokamera werden die Ausrichtung, die Fokussierung sowie die Größe des Messfeldes überprüfen. Weniger geeignet sind Laser als Pilotlicht, da der Laserpunkt im Gegensatz zum LED-Lichtfleck nur die Mitte des Messfeldes und nicht die exakte Größe anzeigt. Da bei hohen Temperaturen die Objekte rot glühen, sind neuartige Geräte mit grünem LED-Licht besser geeignet, da ein roter Leuchtpunkt am heißen Objekt schwerer erkennbar ist.

Um bei der Messung mit einem Spektralpyrometer den Einfluss durch Zunder und Oxidation auf der Oberfläche so gering wie möglich zu halten, sollten die Geräte bei Durchlauföfen unmittelbar am Ofenausgang montiert werden und senkrecht auf die Seite des Objektes messen.



**Bild 4** Panorama-Pyrometer mit rechteckigem Messfeld zur sicheren Temperaturmessung bei schwankender Position des Messobjektes oder des Induktors

Bei der Messung von Metallen bei niedrigeren Temperaturen  $< 400\text{ °C}$  kann sich bei Materialien mit einem hohen Reflexionsgrad Sonnenlicht oder künstliches Licht auf dem Objekt spiegeln und zu einer fehlerhaften Mehranzeige führen. Für derartige Anwendungen sind spezielle Geräte mit einem Blocking-Filter einzusetzen, um den Streulichteinfluss zu unterbinden.

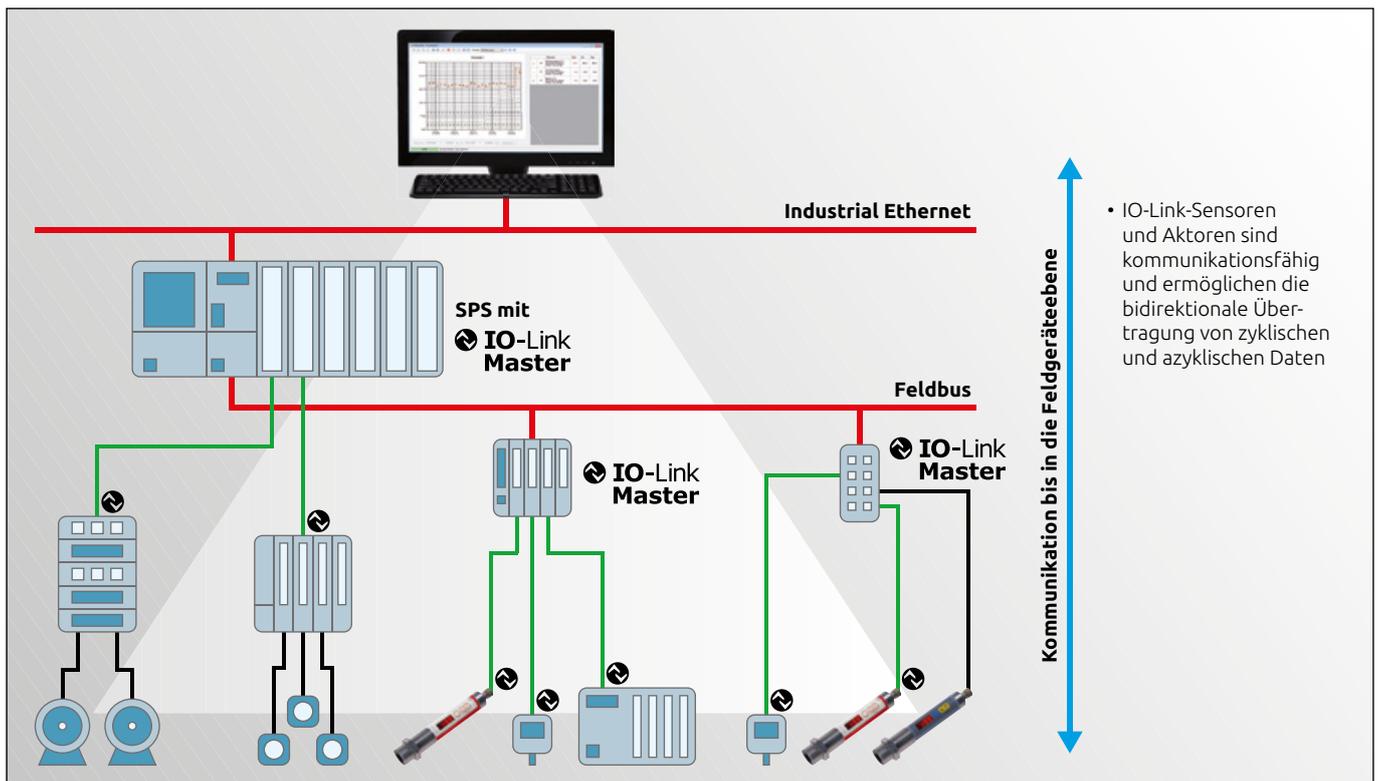
Zur Messung an kleinen Objekten, bei variablem Hot Spot oder bei schwingenden Drähten sind neuste Panorama-Pyrometer mit rechteckigem Messfeld ideal geeignet, um stabile

Messwerte zu erzielen. Solange sich das Messobjekt innerhalb des Messfeldes bewegt, wird ein korrekter Messwert ermittelt (**Bild 4**).

Im Zuge der Einführung der Industrie 4.0 und damit der Möglichkeit zur Auswertung zusätzlicher Messdaten, der Nutzung von Überwachungsfunktionen sowie der Fernbedienbarkeit intelligenter Sensoren, löst die digitale Signalübertragung mehr und mehr die reine Analogwertübertragung  $0(4)\text{-}20\text{ mA}$  ab. Die neue IO-Link Schnittstellentechnologie entwickelt sich aufgrund der hohen Übertragungsgeschwindigkeit, der einfachen und störsicheren Verkabelung per Schraubverbinder und der universellen Einsatzmöglichkeit in allen namhaften vom Markt verwendeten Feldbussystemen mehr und mehr zum Standard in der Maschinen- und Anlagensteuerung (**Bild 5**).

## Fazit

Durch entwicklungstechnische Fortschritte in der berührungslosen Temperaturmesstechnik in den letzten Jahren konnten Lösungen für die Probleme der berührungslosen Temperaturmessung gefunden und damit erhebliche Verbesserungen zur korrekten Temperaturmessung in Wärmebehandlungsprozessen erzielt werden. Bei der Auswahl der richtigen Geräte



**Bild 5** Neuartige IO-Link Schnittstelle zur Einbindung in allen namhaften Feldbussystemen

und Nutzung der verfügbaren Funktionalitäten in den Geräten lässt sich in induktiven Erwärmungsprozessen heutzutage die Temperatur sicher und genauer erfassen, um darüber direkt statt rein über die Energie, Zeit oder Vorschubgeschwindigkeit die Anlage zu regeln.



### **Autor**

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ralf Körholz  
KELLER HCW GmbH · Germany  
Infrared Thermometer Solutions  
Tel. +49 54 51 85 381  
ralf.koerholz@keller-msr.de  
[www.keller-msr.de/pyrometer](http://www.keller-msr.de/pyrometer)