

# Temperaturmessung bei induktiv beheizten Erwärmungsanlagen

Measurement of temperature in inductive heating systems

Von Hasso Wittenbecher, Wolfgang Luckenbach

Eine der wichtigsten Maßnahmen bei der induktiven Erwärmung zur Qualitätssicherung ist das Messen der Materialtemperatur. Dies geschieht üblicherweise mit optischen Systemen, sogenannten Pyrometern. Es handelt sich hier um sehr hochwertige Geräte. Trotz sehr hoher Genauigkeit von ca. 0,3 % und Reproduzierbarkeit von ca. 0,1 % des Messwertes ist eine absolut richtige Temperaturmessung nicht möglich. Dieser Bericht soll die möglichen Einflussgrößen zeigen, um den Anwender in die Lage zu versetzen, die entsprechenden Temperaturfenster ordnungsgemäß einzustellen.

Measurement of material temperature is one of the most important quality-assurance provisions in inductive heating. It is normally accomplished using optical systems, so-called pyrometers. These are extremely high-cost instruments. Totally precise measurement of temperature is not possible, however, despite measuring instrument accuracies of around 0.3 % and repeatabilities of around 0.1 % of the reading. This article is intended to outline potential influencing factors, in order to enable the user to set the corresponding temperature window correctly.

## Einleitung

Die Induktions-Erwärmung bietet im Schmiedebereich, bei Umformprozessen oder im Vergütebereich sehr viele Vorteile gegenüber anderen Erwärmungsverfahren.

Eine genaue Dosierung der Energie ermöglicht konstante Werkstücktemperaturen. Funktionsbedingt sind die Aufheizzeiten konstant; sie betragen oft weniger als 1/4 der Zeit gegenüber der herkömmlichen Erwärmung durch Gas oder Öl. Gleichbleibende Temperatur und Erwärmungszeit ergeben reproduzierbare Bedingungen. Randentkohlung und Verzunderung sind gering.

## Das Prinzip der induktiven Erwärmung

Die Wärme wird nicht von außen zugeführt, sondern entsteht im Werkstück selbst. Während der Aufheizung befindet sich das Werkstück in einem elektromagnetischen Feld, welches von außen auf

das Werkstück einwirkt. Im Werkstück wird eine Spannung induziert, die einen Stromfluss zur Folge hat. Dieser Strom erzeugt im Werkstück aufgrund des Werkstückwiderstandes eine Wärme.

Durch die Optimierung von Wirkungsgraden wird bei der induktiven Erwär-

mung mit verschiedenen, meist höheren Frequenzen gearbeitet. Der Stromfluss im Werkstück ist aufgrund des sog. „Skin-Effektes“ natürlich nicht gleichmäßig. Der höchste Strom fließt an der Oberfläche. In Richtung Kern nimmt der Strom nach einer Exponentialfunktion ab. Die im Werkstück erzeugte Wärme ist etwa proportional dem Quadrat des induzierten Stromes.

Ohne Betrachtung der Wärmeleitung im Werkstück wird aufgrund der unterschiedlichen Wärmequellenverteilung natürlich auch unterschiedliche Temperatur im gesamten Werkstück herrschen.

Aufgrund der Wärmeleitung wird ein immerwährender Temperatenausgleich zwischen Oberfläche und Kern stattfinden. Durch Wärmestrahlung und Konvektion wird allerdings auch immer eine Temperaturabgabe an der Oberfläche des Werkstückes erfolgen.

Die Aufgabe einer induktiven Erwärmung besteht demnach darin, in einer vorgegebenen Zeit eine bestimmte Energie in das Werkstück einzubringen, was zu einem definierten Wärme-Inhalt im Werkstück führt.

**Bild 1:** Temperaturerfassung des induktiv beheizten Materials

**Fig. 1:** Detection of the temperature of the inductively heated material





Der Wärmeinhalt (Enthalpie) ist nur indirekt über die Temperatur nachweisbar. Im Falle einer optischen Temperaturmessung geschieht die Temperaturerfassung auf der Oberfläche des Werkstückes (**Bild 1**).

Ein Rückschluss auf die im Werkstück enthaltene Enthalpie lässt sich nicht alleine aus der Oberflächentemperatur ermitteln. Bei zwei gleichen Werkstücken können aufgrund von ungleichen Frequenzen, unterschiedlicher Einwirkdauer oder wechselnder Leistungsdichte bei gleicher gemessener Oberflächentemperatur unterschiedliche Temperaturen im inneren Bereich herrschen.

### Beispiel

Zwei Temperaturkurven, bei denen Oberflächentemperatur, Enthalpie und Kerntemperatur unter verschiedenen Aufwärmbedingungen dargestellt sind zeigen die **Bilder 2 und 3**. Trotz gleich gemessener Oberflächentemperatur von 1250 °C sind Kerntemperatur und damit die Enthalpie unterschiedlich

Mit heutigen Rechenverfahren sind allerdings sehr genaue Berechnungen möglich, so dass Anlagen für vorgegebene Parameter, wie Oberflächentemperatur, Kerntemperatur, Enthalpie u.s.w. optimal ausgelegt werden können. Diese Temperaturunterschiede - oder auch Enthal-

pieunterschiede - haben natürlich auch entsprechende Einflüsse auf Verformungsvorgänge oder auf Vergütungsvorgänge.

Hier ist der Hersteller der Induktions-Erwärmungsanlage gefragt, möglichst optimale Bedingungen zu schaffen, so dass die Oberflächentemperatur in etwa gleich der Kerntemperatur des Werkstückes ist.

### Optische Messung der Oberflächentemperatur

Die Temperaturmessung am Ausgang des Induktors ist eine sehr wichtige Aufgabe des gesamten Erwärmungsprozesses. Um zufrieden stellende Messergebnisse zu bekommen, sollte man sich sehr intensiv mit dieser Messmethode beschäftigen. Gemessen wird mit einem optischen System, einem so genannten Pyrometer.

Die vom Messobjekt ausgehende Infrarot-Strahlung wird über ein Linsen- und Blendensystem gebündelt auf einen Sensor übertragen, der einen Strom erzeugt. Mit zunehmender Temperatur wird die Strahlungsdichte höher und somit auch der vom Sensor erzeugte Strom. Daher ist das Temperaturmessgerät nichts anderes als ein Strahlendichtemesser. Dieser Strahlendichtemesser wird vor einem „Schwarzen Strahler“ im Herstellerwerk bei optimalen Bedingungen kalibriert. Sehr hochwertige Geräte erreichen dabei eine Genauigkeit von 0,3 % und eine Reproduzierbarkeit von 0,1 % des Messwertes. Die während der Kalibrierung herrschenden optimalen Bedingungen werden in der Praxis jedoch nur sehr selten angetroffen.

Bei der Temperaturmessung an Stahlteilen (**Bild 4**) wird grundsätzlich die Oberflächentemperatur erfasst. Den kälteren Kern von zum Beispiel Schmiederohrlingen „sieht“ man nur, wenn das Pyrometer auf die Mitte der Stirnfläche ausgerichtet wird. Bei stark verzünderten Teilen kann die Messung auf der Stirnfläche sinnvoll sein, da diese in der Regel nur gering verzündert ist.

Das Thema „Zunder“ ist ein generelles Problem bei der optischen Temperaturmessung. Der Zunder ist ein thermischer Isolator und in jedem Fall kälter, d. h. die gemessene Oberflächenstrahlung des Zunders ist nicht identisch mit der Temperatur des Trägermaterials. Um aber doch die Temperatur des zu verarbeitenden



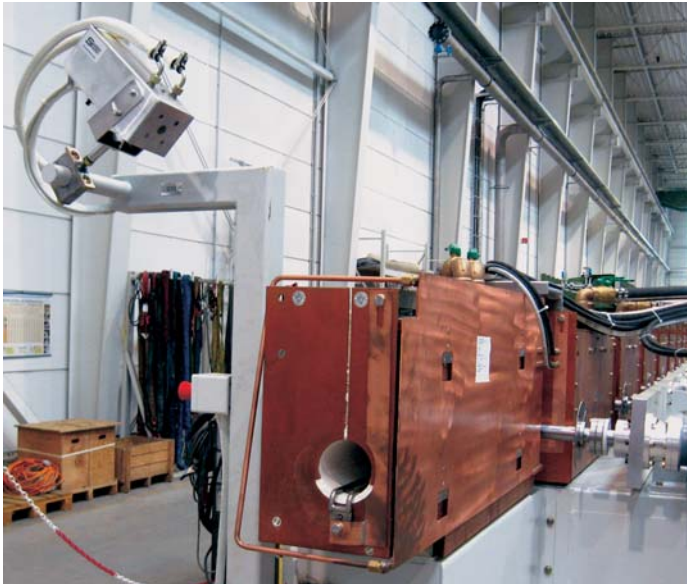
**Bild 2:** Aufheizzeit ca. 77s – Oberflächentemperatur 1250 °C

**Fig. 2:** Heating-up time approx. 77s; surface temperature approx. 1250 °C



**Bild 3:** Aufheizzeit ca. 117s – Oberflächentemperatur 1250 °C

**Fig. 3:** Heating-up time approx. 117s; surface temperature approx. 1250 °C



**Bild 4:**  
Anordnungsbeispiel  
eines Pyrometers

**Fig. 4:**  
Examples of pyro-  
meter arrangements

den Materials zu erhalten, müssen Pyrometer zum Einsatz kommen, die zwei ganz wichtige Kriterien erfüllen:

- die Messflecke der Pyrometer müssen sehr klein sein,
- die Erfassungszeit der Geräte sollte im  $\mu$ -Sekundenbereich liegen.

Wird nur eine dieser Forderungen erfüllt, reicht dies nicht aus. Ziel dieser Anforderung ist, Zunderaufbrüche zu erkennen und sicher zu erfassen. Dies stellt eine sehr hohe Anforderung an die Pyrometer dar, denn mit langen Bestrahlungszeiten des Detektors erreicht man kleine Messflecke. Kurze Bestrahlungszeiten ergeben normalerweise große Messflecke. Auch speziell hierfür entwickelte Speicher sorgen für zusätzliche Sicherheit bei der Messwerterfassung.

Die oftmals als Lösung für diese Probleme angepriesenen Quotientenpyrometer sind ungeeignet, da sie in der Regel langsamer sind, bei gleicher Entfernung ein größeres Messfeld benötigen und auch nicht, wie manchmal behauptet, durch den Zunder hindurch messen können.

Bei einigen Messaufgaben ist es sinnvoll, das Messobjekt zu scannen und den Maximalwert des jeweiligen Scans auszuwerten. Der Scanner sollte in seiner Scanfrequenz und seinem Scanwinkel einstellbar sein.

Selbst bei zunderfreier Oberfläche können auf dem kalten Messobjekt sichtbare dunkle Flecken, durch ihren höheren Emissionsfaktor Fehlmessungen verursachen. Da am Pyrometer ein für die zunderfreie Oberfläche zwar richtiger, für die

dunklen Stellen jedoch zu niedriger Emissionsfaktor eingestellt wurde, erzeugen die dunklen Stellen eine höhere Temperaturanzeige und diese Teile werden dann als zu heiß oder überhitzt ausgedeutet. Eine für den Betreiber der Anlage unerwünschte und teure Angelegenheit.

Um optimale Messergebnisse zu erzielen, sollte eine enge und gute Zusammenarbeit mit dem Herstellerwerk sichergestellt sein.

## Temperaturmessung in der Praxis

Gehen wir einmal von optimalen Voraussetzungen aus, d.h. der Vorschub des Werkstückes und damit die Aufenthaltsdauer im magnetischen Feld ist für alle Werkstücke absolut gleich. Während der Heizzeit ist die Leistungsversorgung konstant, d.h. keinerlei Spannungsschwankungen im Mittelfrequenzbereich.

Es stellt sich die Frage, ob mit absolut gleichen Temperaturen im Werkstück bei der Messung gerechnet werden kann. Die Antwort ist eindeutig nein.

Viele Parameter haben einen Einfluss auf die Temperaturmessung, wie z.B. Gescherte Blöcke im Schmiedebetrieb. Toleranzen im Durchmesser gehen hier quadratisch in das Gewicht ein. Durchmesserschwankungen im Bereich von 1 % bewirken eine Gewichtsänderung des Werkstückes um ca. 2 %.

Unter den genannten Voraussetzungen - gleiche Energieeinbringung - wird sich jetzt eine um ca. 2 % geänderte Temperatur einstellen. Das heißt, dass sich jede

Änderung des Durchmessers in einer Veränderung der Temperatur niederschlägt. Werkstoffänderungen, d.h. Legierungsänderungen innerhalb einer Charge werden ebenfalls zu Temperaturunterschieden führen.

Aufgrund von unterschiedlichen geometrischen Formen des Werkstückes kann sich zudem auch eine unterschiedliche Wärmequellenverteilung einstellen und es kann damit zu unterschiedlichen Temperaturen kommen.

Kantenüberhitzung und Varianten in den inneren Strukturen, wie zu Beispiel Risse, können ebenfalls starken Einfluss auf die gemessene Temperatur nehmen.

Einen Einfluss auf die Endtemperatur hat die Temperatur des kalten Materials. Hier gibt es auch z.T. extreme Schwankungen. Sei es Sommer oder Winter, sei es Normalmaterial oder Umlaufmaterial oder alleine drinnen oder draußen gelagertes Material. Eine unterschiedliche Eingangstemperatur wird man in gewissen Grenzen auch im Bereich der Ausgangstemperatur messen.

Weitere Einflüsse auf die gemessene Temperatur sind z.B. im Messbereich entstehende Dämpfe, Umgebungstemperaturen, Luftströmungen im Bereich der Messung usw.

Eine absolut genaue Energieeinbringung der Energie seitens der induktiven Erwärmungsanlage ist nicht realisierbar. Trotz genauester Spannungsregelung, die leistungsbestimmend ist und genauester Vorschubregelung, bei denen Fehler ausgeregelt werden, wird es hier zu geringfügigen Ungenauigkeiten kommen.

## Optimale Materialtemperatur für anschließende Umformprozesse

Jede einzelne Messung hat also eine Vorgeschichte, die zu beachten ist. Um zum Beispiel eine sichere Qualitätskontrolle im Schmiedebereich zu leisten, wird jedes Teil gemessen und auch sehr oft protokolliert.

Es wird üblicherweise eine obere und eine untere Temperatur für Qualitätsteile festgelegt. Oberhalb der Gut-Temperatur gibt es ein weiteres Temperaturfenster, welches durch die „zu warm Temperatur“ begrenzt wird. Materialien in diesem Bereich werden ausgeschieden und als Um-



lauf deklariert. Alle Materialien, die oberhalb der „zu warm Linie“ liegen, werden als verbrannt ausgeschieden und dürfen nicht mehr dem Prozess zugeführt werden.

Ebenso gibt es unterhalb des Gut-Fensters einen weiteren Bereich für Materialien, die zu kalt sind. Auch diese Materialien werden üblicherweise in den Umlauf gebracht und können noch einmal neu dem Erwärmungsvorgang erneut zugeführt werden.

Die Sortierung geschieht über entsprechende Materialweichen, die von dem Pyrometer indirekt gesteuert werden.

Bei der Festlegung der Temperaturfenster müssen alle Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Willkürliche Festlegungen von zu kleinen Temperaturfenstern sind zu vermeiden, da ansonsten die Gesamteffizienz der Linie in einen unwirtschaftlichen Bereich absacken kann.

Da die Einflussfaktoren bekannt sind oder berechenbar gemacht werden können, ist man in der Lage, die Temperaturfenster derart auszulegen, und dass ein

optimaler Betrieb der Anlage möglich ist. Zur Sicherung der Qualität wird allerdings öfters versucht, die Temperaturwerte in dem Bereich Maschinenfähigkeit oder Prozessfähigkeit unterzubringen. Ohne genaue Kenntnisse, was Maschinenfähigkeit oder Prozessfähigkeit aussagen, werden hier allerdings oft grobe Fehler gemacht.

Man benutzt das Gut-Temperaturfenster auch als Grenze für den cmk-Wert mit dem Ergebnis, dass selbst wenn alle Messwerte innerhalb des Fensters liegen, ein gewünschter cmk-Wert von z.B. 1,33 nicht realisiert werden kann.

Wenn – wie im Schmiedebetrieb allgemein üblich – jedes Teil gemessen, aussortiert und sogar protokolliert wird, ist eine Maschinenfähigkeitsmessung, die sich auf Temperaturwerte bezieht, nicht sinnvoll.

## Fazit

Im Bereich der induktiven Erwärmung ist die Materialtemperatur ein wesentlicher Qualitätsfaktor. Sie bestimmt hauptsäch-

lich den Materialfluss. Eine absolute Temperaturgenauigkeit kann nicht erreicht werden. Die Einflussfaktoren auf die Temperatur sind bekannt und zum großen Teil berechenbar. Die einzustellenden Temperaturfenster müssen entsprechend ausgelegt werden.

## Autoren:

**Dipl.-Ing.  
Hasso Wittenbecher**  
SMS Elotherm GmbH,  
Remscheid

Tel.: 02191 / 891302  
E-mail: hasso.wittenbecher@  
sms-elotherm.de



**Wolfgang Luckenbach**  
SensorTherm GmbH,  
Frankfurt / Main

Tel.: 0700 / 73676784  
E-mail: info@sensortherm.de

