

Vorteil von Hybrid-Erwärmung und neuen Induktorkonzepten bei der Schmiedeerwärmung

von **Helmut Krammer, Markus Langejürgen**

Die Induktionstechnik erlaubt es, auf kleinem Bauraum eine kompakte, saubere, gut steuerbare und reproduzierbare Erwärmung bis hin zu sehr hohen Anwendungstemperaturen zu realisieren. Trotzdem werden klassische Ofenkonzepte mit fossilen Brennstoffen immer dann eingesetzt, wenn eine hohe geometrische Werkstückvielfalt erwärmt werden muss. Wenn keine hohen Anforderungen an die Dynamik des Prozesses und ein gleichmäßiger Betrieb gefordert sind, können auch der geringere Primärenergieverbrauch und die reduzierten Kosten interessant sein. In diesem Artikel wird gezeigt, wie die beiden oft im Wettbewerb stehenden Konzepte vorteilhaft miteinander kombiniert werden und so ein Gesamtprozess entsteht, der eine deutliche Energie- und Kosteneinsparung erlaubt. Mit diesem Hybridbetrieb wird die Induktion im hohen Temperaturbereich betrieben. Dies erlaubt dann den Einsatz eines neu entwickelten Spulenkonzepes, das sowohl mit der hybriden Erwärmung, aber auch der reinen Induktionserwärmung deutliche Vorteile gegenüber bisherigen Konzepten aufweist.

Advantage of hybrid heating and new inductor concepts in forge heating

Induction technology is a compact, clean, easily controllable and reproducible heating technology up to very high application temperatures with small space requirements. Nevertheless, conventional furnace concepts with fossil fuels are always used when a high geometric variety of workpieces has to be heated. Unless high process dynamics and smooth operation are required, lower primary energy consumption and reduced costs may be of interest. This article shows how the two often competing concepts can be advantageously combined to create an overall process that allows significant energy and cost savings. In hybrid heating, the induction is operated in the high temperature range. This then allows the use of a newly developed coil concept, which has clear advantages over previous concepts both with hybrid heating and with standard induction heating.

Der Ersatz von fossilen Brennstoffen (Erdöl und Erdgas) für die Metallerwärmung auf Umformtemperatur für das Schmieden oder Walzen wird in Zeiten der Energiewende immer wichtiger. Als Übergangstechnik können hybride Erwärmungssysteme mit wahlweisem Einsatz von fossiler oder elektrischer Energie einen Weg in eine CO₂-freie Zukunft aufzeigen. Die Realisierung von hybriden Erwärmungsanlagen scheidet jedoch oftmals an den Betriebskosten.

Hybride Anlagen können nur dann sinnvoll eingesetzt werden, wenn die Gesamtkosten einen wirtschaftlichen

Betrieb sicherstellen. Induktive Erwärmungen, wie z. B. für Knüppel, erreichen dabei als vor- oder nachgeschaltetes Aggregat bei geringstem Bauraum eine hohe Leistungsdichte und können innerhalb kürzester Zeit zugeschaltet werden.

Bei einem Einsatz vor dem konventionellen Ofen wird aufgrund der Erwärmung unterhalb der Curie-Temperatur der höchste elektrische Wirkungsgrad erreicht. Auch ist die Aufstellung vor Ort meist einfacher realisierbar. Auf den ersten Blick ist dies somit die ideale Position, um mittels Induktion eine hybride Anlage zu realisieren.

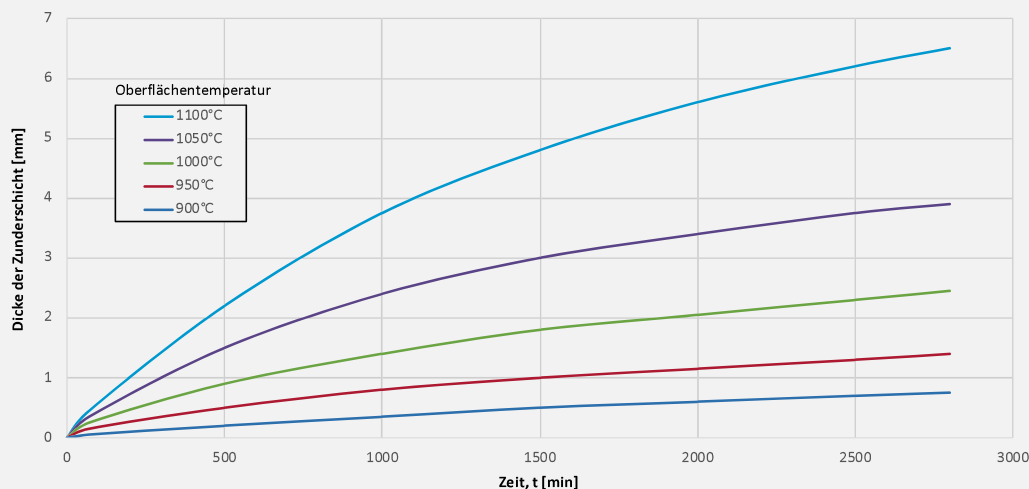


Bild 1: Zunderwachstum nach JCM [1]

Für die Gesamtbetrachtung dürfen jedoch die Zunderverluste als wesentlicher Kostenfaktor nicht außer Acht gelassen werden. Bei einer idealen Betriebsweise sollte der Ofen das Material nur auf ca. 700 bis 900 °C erwärmen, sodass im konventionellen Aggregat der Zunderanfall möglichst klein gehalten wird.

Der Hintergrund ist, dass das Zunderwachstum eine Funktion von Zeit und Temperatur darstellt [1]. Während bei Temperaturen unter 900 °C kein nennenswerter Zunderverlust auch für lange Verweilzeiten auftritt, erfolgt das Wachstum bei 1.100 °C um ein Vielfaches schneller (Bild 1).

Die Enderwärmung auf Umformtemperatur wird dann vorteilhaft über eine nachgeschaltete Induktion sichergestellt. Der Zunderanfall in der Induktion ist aufgrund der kurzen Erwärmungszeit ebenfalls vernachlässigbar gering. Zusätzlich kann dank der Induktion eine unterschiedliche Endtemperatur je nach Materialgüte bei gleichbleibender Ofentemperatur eingestellt werden. Auf- und Abheizphasen eines Ofens, welche Zeit und Energie kosten, können vermieden werden. Somit lässt sich die Umformtemperatur von Knüppel zu Knüppel variabel wählen. Energetisch ist dies ein Vorteil, da nicht mehr durchgängig auf die Maximaltemperatur erwärmt werden muss.



Bild 2: Konzept Elo-ICE

Motivation für ein neues Induktor-konzept

Eine Induktionsanlage besitzt immer eine wassergekühlte Kupferspule, die nur bei geringem Abstand zum Werkstück einen hohen elektrischen Wirkungsgrad besitzt. Im Bereich der Block- und Stangenerwärmung werden Induktionsspulen üblicherweise mit einem Feuerfest-Beton vergossen, sodass ein mechanischer und thermischer Schutz der Spule entsteht. Durch den direkten Einbau der wassergekühlten

Kupferwicklung in den feuerfesten Beton wird eine sehr effektive Kühlung für die Auskleidung erzeugt, die allerdings eine relativ niedrige Auskleidungstemperatur und somit hohe thermische Verluste zur Folge hat. Durch Alterung und Infiltrationen sowie Zunder lässt aber die mechanische Schutzwirkung nach. Außerdem ist ein feuerfester Beton im Hinblick auf die thermische Isolation nicht das optimale Material. Es entsteht ein starker Temperaturunterschied zwischen dem heißen Werkstück und der gekühlten Spule, was dazu führt, dass der thermische Wirkungsgrad der Induktionsspule im oberen Temperaturbereich nicht ideal ist.

An dieser Stelle setzt das neue Elo-ICE (Inductor Concept Efficiency)-System der SMS Elotherm GmbH an (Bild 2). Dank der optimierten Isolation können Energie- und Kosten eingespart werden, was auch die Attraktivität von hybriden Anlagen wesentlich steigert. Möglich wird diese hohe Einsparung durch eine bis zu 75 %-ige Reduzierung der thermischen Verluste.

Elo-ICE System als Neuentwicklung

Bei der Neuentwicklung des Elo-ICE-Systems bestand die Herausforderung darin, die Temperaturdifferenz zwischen Werkstück und der Auskleidung möglichst gering zu halten, damit der Wärmestrom und damit der Wärmeverlust zur wassergekühlten Induktionsspule minimiert werden kann.

Wie Bild 3 zeigt, strahlt ein 1.250 °C heißes Werkstück an seiner Oberfläche etwa 200 kW/m² gegen eine 20 °C kalte Umgebung ab. Der gleiche Körper würde an eine 1.000 °C heiße Umgebung nur noch unter 100 kW/m² abgeben. Gleichzeitig bedingt eine so heiße Auskleidung aber, dass eine thermische Entkopplung gegenüber der kalten Kupferspule notwendig wird.

Eine weitere Forderung ist es, die Wandstärke der Auskleidung und damit den Abstand zwischen Induktionsspule und Werkstück so zu minimieren, dass der elektromagnetische Wirkungsgrad der induktiven Wärmeübertragung möglichst hoch wird.

All dies konnte durch ein hybrides, feuerfestes Kompositsystem realisiert werden. Dieses besteht aus neuen Werkstoffen, die auch bei filigranen Formen noch extrem hohe Festigkeiten aufweisen. Neuartig ist ebenfalls, dass sich die unterschiedlichen Werkstoffe miteinander verbinden lassen und so ein mehrschichtiger koaxialer Aufbau mit exakt aufeinander abgestimmten Dimensionen und Eigenschaften entsteht. So lassen sich an der inneren, dem Werkstück zugewandten Seite verschleißfeste Eigenschaften realisieren, während zur kalten Kupferspule eine gute thermische Isolation erreicht wird. Vergleicht man nun die beiden Feuerfestsysteme hinsichtlich der inneren Temperaturverteilung, ergibt sich das folgende Bild. Links in **Bild 4** sind die ca. 40 °C der wassergekühlten Kupferspule als feste Temperatur angenommen. Die blaue Linie repräsentiert die konventionelle Auskleidung in gegossener Form. Die Temperatur baut sich linear über der Auskleidung ab. Der Temperaturgradient ist gleichmäßig und relativ steil. Dadurch bilden sich aufgrund der Wärmedehnung interne Spannungen aus, die langfristig und gerade bei thermischer Wechselbelastung den Verschleiß beschleunigen. Dies ist bedingt durch den monolithischen Aufbau und die üblicherweise verwendeten hochfesten, aber spröden Werkstoffeigenschaften der feuerfesten Gießmassen.

Die rote Kurve zeigt den Verlauf der Temperatur für die neu entwickelte Induktorauskleidung. Durch Vergleich der rechten, also dem Werkstück zugewandten Seite, sieht man, dass die Auskleidungstemperatur hier mehr als 200 °C höher liegt. Aus den weiter oben dargestellten Gründen reduzieren sich die Abstrahlverluste des Werkstücks. Nach Bild 3 ist die Verlustleistung bei 1.200 °C Auskleidungstemperatur und 1.250 °C Werkstücktemperatur nur noch 25 kW/m². Ein Vergleich mit 1.000 °C Oberflächentemperatur der konventionellen Auskleidung ergibt über 100 kW/m² und liegt damit etwa 4 mal so hoch.

Ein Vorteil ist auch, dass der Temperaturgradient in der mechanisch hochfesten Verschleißschicht gering ist und somit thermische Spannungen reduziert werden.

Die thermische Isolation besteht aus poröserem Material und ist weniger anfällig für Verschleiß. In Kooperation mit Partnern ist es der SMS Elotherm gelungen, eine Induktor-Auskleidung zu entwickeln, die als vorgegossenes Formteil ähnliche Festigkei-

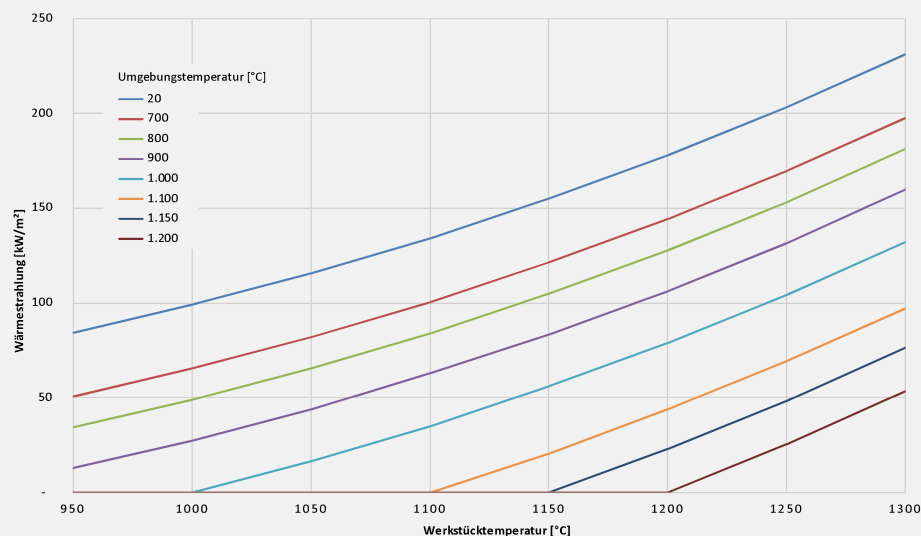


Bild 3: Energieverluste bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen

ten erreicht wie eine konventionell gegossene Auskleidung, jedoch bei reduzierter Wandstärke und optimierten thermischen Eigenschaften.

Für die Verifikation dieser Ergebnisse wurde ein Induktor mit dieser Auskleidung versehen und ein baugleicher in konventioneller Bauweise gefertigt. In beiden Varianten wurde im Versuch ein 1 m langer Stahlknüppel auf 1.300 °C aufgewärmt und danach die thermischen Verluste während der Abkühlung kalorimetrisch gemessen. In diesem 1:1 Vergleich bestätigen sich die theoretischen Untersuchungen. Während bei 1.250 °C der Induktor in konventioneller Ausführung 35 kW thermische Verluste abführt, zeigten sich beim Elo-ICE etwa nur 8 kW (**Bild 5**).

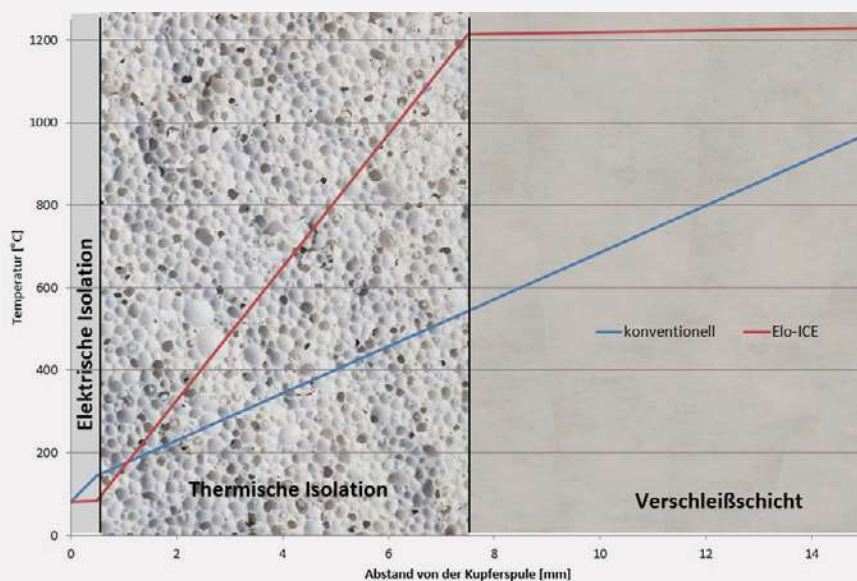


Bild 4: Vergleich der Wärmedurchgangsberechnungen

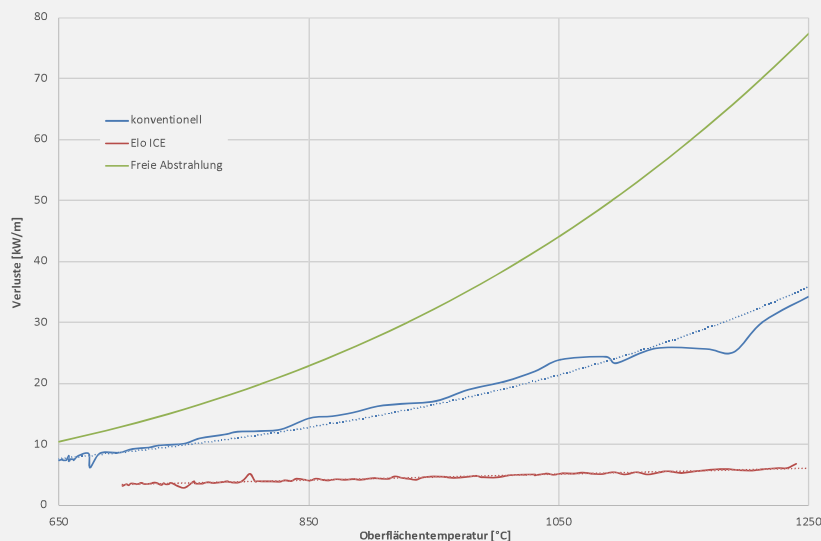


Bild 5: Messung der Verlustleistung

Da auch bereits der konventionelle Induktor eine Isolationswirkung besitzt, ist zur Orientierung auch noch der theoretische Verlust ohne Isolation in grün eingefügt.

Beispiel

Das neu entwickelte Elo-ICE-System (**Bild 6**) hat im Vergleich zur herkömmlichen Auskleidung in vergossener Ausführung nur etwa ein Viertel der thermischen Verluste. Besonders interessant ist dieser Aspekt daher für große Querschnitte ab etwa 80 mm Durchmesser bzw. Kantenlänge.

Als Beispielrechnung soll ein 80 mm Rundmaterial dienen. Die Absolutwerte der Energieeinsparung sind etwa ab 1.000 °C Werkstücktemperatur nennenswert. Daher werden in dieser Beispielrechnung drei Induktoren mit einer Länge von 1.000 mm am Auslauf der Erwärmungsstrecke betrachtet.

Die Werkstückfläche pro Induktor beträgt somit ca. 0,25 m².

Typischerweise ist die Oberfläche des Werkstücks in diesem Bereich der Anlage bereits auf 1.250 °C und somit soll auch in diesem Beispiel von diesen konstanten Bedingungen ausgegangen werden. Ein konventionell gefertigter Induktor hätte damit eine Verlustleistung von $P = 0,25 \text{ m}^2 \cdot 100 \text{ kW/m}^2 = 25 \text{ kW}$. Im Fall von Elo-ICE ergibt sich der günstigere Wert von $P = 0,25 \text{ m}^2 \cdot 25 \text{ kW/m}^2 = 6,25 \text{ kW}$.

Die nominelle Einsparung pro Induktor beträgt somit 18,75 kW. Aufgrund des elektrischen

Wirkungsgrades der Induktionstechnik muss man diese Einsparung an thermischer Energie noch auf die Netzseite umrechnen. Bei einem typischen elektrischen Gesamtwirkungsgrad von 70 % ergibt sich eine Einsparung am Netz von mehr als 80 kW bezogen auf die drei betrachteten Induktoren.

Bei einer Anlage mit einem Durchsatz von 6 t/h und 2.100 kW Leistung beträgt diese Einsparung etwa 4 % bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch.

Wird die Anlage im Teillastbereich betrieben, z. B. mit nur 4 t/h steigt die Reduzierung sogar auf fast 6 %.

Setzt man einen Strompreis von 0,1 €/kWh an ergeben sich damit 8 €/h Einsparungen. Dieser absolute Wert ist annähernd unabhängig davon, ob die Anlage im Teillastbetrieb oder unter Vollast arbeitet.

Unter Berücksichtigung von 6.000 Betriebsstunden pro Jahr ergeben sich für den Betreiber Energieeinsparungen von 48.000 € pro Jahr. Dies gilt natürlich unabhängig davon, ob es sich um eine hybride Anlage mit einer Induktion im Heißbereich handelt oder eine ausschließlich induktiv beheizte Erwärmung.

Das energiesparende Elo-ICE-System besticht auch dadurch, dass die Instandhaltung des Induktors deutlich servicefreundlicher und schneller gestaltet werden kann, da zeitaufwändige und mühsame Ausbruchsarbeiten an konventionellem feuerfestem Beton entfallen und damit auch mögliche Beschädigungen an der Induktionsspule.

LITERATUR

- [1] Influence of time and temperature stabilization reaching on scale-growth kinetics of low alloyed steel, K. Adamaszek, Z. Jurasz, Researchgate.net

AUTOREN



Helmut Kramer
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
02191 / 891-250
h.kramer@sms-elotherm.com



Dr.-Ing. Markus Langejürgen
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
02191 / 891-218
m.langejuergen@sms-elotherm.com



Bild 6: Elo-ICE im Einsatz