

Optimale induktive Erwärmung für Umformung

Ing. Jindřich Calta

Entwicklungsingenieur bei ROBOTERM s r.o., Chotěboř, Tschechische Republik

jindrich.calta@roboterm.cz

Dieser Artikel wurde im Oktober 2020 in der Zeitschrift „Kovárenství“, Nr. 72, ISSN 1213-9289 publiziert.

Abstract

Die richtige Wahl des Induktionserwärmers und die richtige Einstellung des Erwärmungsprozesses sind nötige Bedingungen für die beste Gleichmäßigkeit der Erwärmung und maximale Effizienz. Der Artikel beschreibt die Ursachen der unerwünschten Erscheinungen wie Überhitzung des Materials, übermäßige Verzunderung und gegenseitiges Kleben/Schweißen von Schmiederohlingen. Weiter werden empfohlene Frequenzen und Erwärmungszeiten angeführt für die beste Qualität der Erwärmung des Kohlenstoffstahls. Es werden verschiedene Möglichkeiten der Anordnung der kontinuierlichen Erwärmung beschrieben: einstufige Erwärmer, mehrstufige Erwärmer, Induktoren für Schnellerwärmung und Induktoren mit der verkürzten Spule.

Schlüsselwörter: Induktive Erwärmung, Wirkungsgrad der Erwärmung, Erwärmungszeit, Temperaturgleichmäßigkeit, mehrstufige Erwärmung

1 Vorwort

Bei der induktiven Erwärmung entsteht die Wärme direkt im Werkstück, indem das Werkstück in die Spule hineingelegt wird, durch deren Wicklung der Wechselstrom fließt. Das ist ein großer Vorteil der induktiven Erwärmung im Vergleich zur indirekten Erwärmung, wo die Wärme durch die Oberfläche zugeführt werden muss. Alles in der Umgebung des Werkstückes kann kalt bleiben, deshalb hat die induktive Erwärmung niedrige Temperaturverluste. Mit der induktiven Erwärmung können beliebige elektrisch leitfähige Materialien erwärmt werden. Nichtleitende Materialien können mithilfe der Induktion in leitenden Tiegeln erwärmt werden. Besonders geeignet ist die induktive Erwärmung für ferromagnetische Materialien, weil dabei der hohe Wirkungsgrad erreicht wird. Der Werkstück kann fest, flüssig oder Plasma sein. Der nächste Vorteil der induktiven Erwärmung ist die Möglichkeit der schnellen Durchwärmung des Materials in die Tiefe, was bei der Schmiedeerwärmung ausgenutzt wird. Die Möglichkeit der einfachen Mechanisierung und Automatisierung reduziert den Bedarf an der menschlichen Arbeit. Durch diese Vorteile steigt die Ausnutzung der induktiven Erwärmung in den letzten Jahren in verschiedenen industriellen Bereichen, sowie in den Schmieden, wo diese Technologie unverzichtbar ist.

Damit die optimale Durchwärmung und Effizienz erreicht werden kann, müssen die Frequenz und die Erwärmungszeit in entsprechenden Grenzen liegen. Diese Parameter hängen eng mit der Erwärmer- und Induktorkwahl, Abmessungen des Blockes und Taktzeit ab. In der Praxis kommt leider oft vor, dass der Erwärmer nicht optimal läuft, was mit dem schlechteren Wirkungsgrad und anderen unten beschriebenen negativen Erscheinungen verbunden ist.

2 Wirkungsgrad der induktiven Erwärmung

2.1 Energiebilanz der induktiven Erwärmung

Weil die Wärme direkt im Werkstück entsteht, hat die induktive Erwärmung besseren Wirkungsgrad im Vergleich zu anderen Erwärmungstechnologien. Durch den Durchfluss des elektrischen Stroms kommt bei der induktiven Erwärmung zu elektrischen Verlusten. Durch die Wärmestrahlung des Werkstückes, Strömung der

umliegenden Luft und bzw. den Kontakt des Werkstückes mit anderen Teilen (vor allem Gleitschienen) kommt es zu Wärmeverlusten. Weitere Verluste entstehen im Transformator, Frequenzumrichter, Kondensatoren und Zuleitungsleitern. Die Verluste in der Induktionsspule sind deutlich höher, weil die Spule in der Regel durch einen längeren Leiter gebildet wird und durch die Spule hoher Strom durchfließt. Die Wärmeverluste können grundsätzlich den Erwärmungswirkungsgrad beeinflussen, wenn sich das Werkstück auf hohe Temperaturen erwärmt, was gerade bei der Erwärmung für Schmieden geschieht.

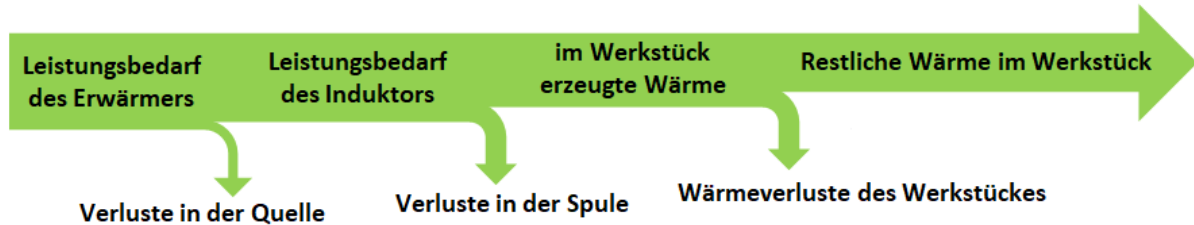


Bild 1 - Energiebilanz der induktiven Erwärmung

Verluste in der Quelle liegen bei der induktiven Schmiedeerwärmung bei 5 % des gesamten Leistungsbedarfs und sind nur wenig von der Einstellung des Erwärmungsprozesses und den Eigenschaften des gewählten Induktors abhängig. Vernachlässigen wir die Verluste in der Quelle, können wir den gesamten Wirkungsgrad des Erwärmungsprozesses η als das Produkt des elektrischen η_e und des thermischen Wirkungsgrades η_t bestimmen.

$$\eta = \eta_e \cdot \eta_t \quad (1)$$

2.2 Elektrischer Wirkungsgrad

Der elektrische Wirkungsgrad gibt die Fähigkeit an die Energie aus dem Induktor in das Werkstück zu übertragen. Die Verluste in der Spule, die von der Form der Spule und der Nähe des Werkstückes abhängen, sind eingeschlossen. Die Verluste in der Nähe vom Induktor (z.B. die unerwünschte Erwärmung anderer Teile) können vernachlässigt werden. Der elektrische Wirkungsgrad wird dann mit der Proportion definiert:

$$\eta_e = \frac{\text{im Werkstück erzeugte Wärme}}{\text{im Werkstück erzeugte Wärme} + \text{Verluste in der Spule}} \quad (2)$$

Der elektrische Wirkungsgrad kann mithilfe der Computersimulation oder in einfachen Fällen auch mit mathematischen Formeln berechnet werden. Für eine lange Spule und ein zylindrisches Werkstück lässt sich der elektrische Wirkungsgrad ungefähr mit der Formel [1] ausrechnen:

$$\eta_e = \frac{1}{1 + \frac{D + \delta_1}{d - \delta_2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \cdot \mu_r}}} \quad (3)$$

wo sind:

D Innendurchmesser der Induktionsspule [mm]

d Durchmesser des Werkstückes [mm]

δ_1 Eindringtiefe der Spule [mm]

δ_2 Eindringtiefe des Werkstückes [mm]

ρ_1 Elektrischer Widerstand des Spulenmaterials [$\mu\Omega\text{m}$]

ρ_2 Elektrischer Widerstand des Werkstückmaterials [$\mu\Omega\text{m}$]

μ_r Relative Permeabilität des Werkstückmaterials [-]

Die meiste Wärme im Werkstück entsteht in der Oberfläche und sinkt exponentiell in der Richtung zur Mitte (sog. Skineffekt) [1-3]. Die Eindringtiefe δ , in der 86,5 % gesamter Wärme entsteht, lässt sich mithilfe der

Formel (4) berechnen, oder man kann den praktischen Onlinerechner der Eindringtiefe auf der Webseite der Firma ROBOTERM benutzen.

$$\delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_r}} \quad (4)$$

wo sind:

δ Eindringtiefe [mm]

f Frequenz [Hz]

ρ Elektrischer Widerstand [$\mu\Omega\text{m}$]

μ_r relative Permeabilität [-]

Der elektrische Wirkungsgrad sinkt bei der Erhöhung der Proportion D/d , weil die Bindung des magnetischen Feldes zum Werkstück sinkt. [1, 2] Aus diesem Grund wird nicht empfohlen nur einen Induktor für verschiedene Durchmesser der Werkstücke einzusetzen. Folgender Graph zeigt den Rückgang des Wirkungsgrades bei der Erwärmung des Werkstückes vom verschiedenen Durchmesser in dem langen Induktor, der für max. Durchmesser 80 mm ausgelegt ist.

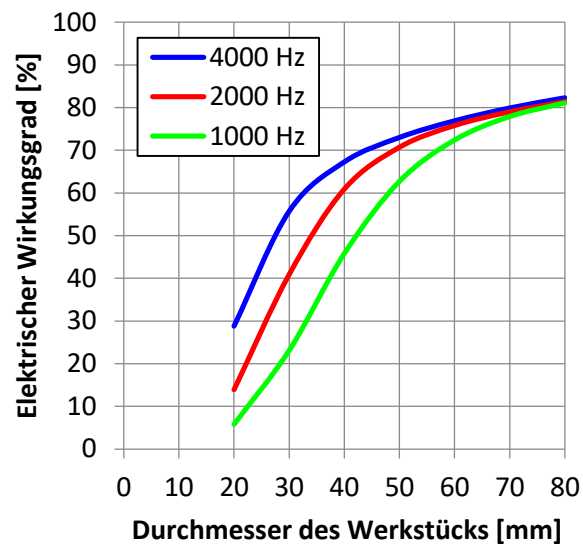


Bild 2 - Elektrischer Wirkungsgrad der Erwärmung eines zylindrischen Werkstückes in einer langen Spule mit dem Durchmesser 130 mm, Kohlenstoffstahl 1000 °C

Der Wirkungsgrad sinkt auch mit der Senkung der Frequenz und der Erhöhung der Eindringtiefe, weil sog. Durchstrahlung entsteht. Dabei durchkommt die elektromagnetische Welle durch das Material ohne ihm ihre Energie zu übergeben. [2] Der Rückgang des Wirkungsgrads mit der wachsenden Eindringtiefe zeigt folgender Graph.

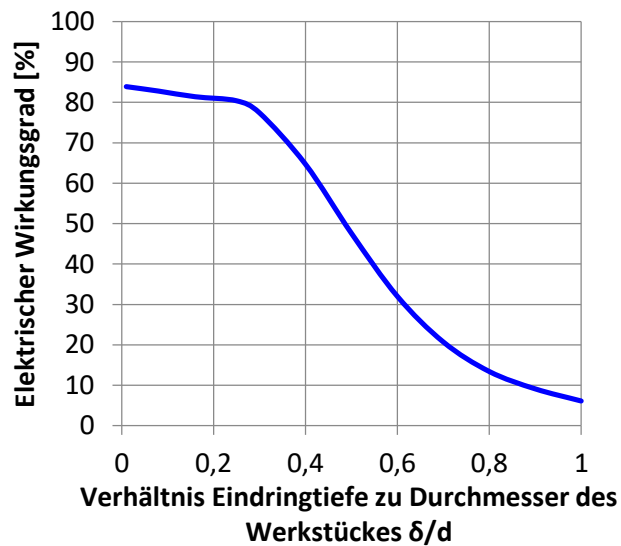


Bild 3 - Elektrischer Wirkungsgrad in der Abhängigkeit des Verhältnisses Eindringtiefe zu Durchmesser des Werkstückes, Kohlenstoffstahl 1000 °C, Durchmesser des Werkstückes 80 mm, Durchmesser der Spule 130 mm

Bei der Umformung muss das Werkstück so gleichmäßig wie möglich durchwärmt werden. Die niedrige Frequenz vertieft die Eindringtiefe und hilft der schnelleren Durchwärmung, senkt jedoch den elektrischen Wirkungsgrad. Die hohen Frequenzen verlängern die nötige Erwärmungszeit und verringern dadurch den thermischen Wirkungsgrad. Deshalb wird einen Kompromiss bei der Frequenzwahl gemacht, um die gewünschte Durchwärmung bei gutem elektrischem Wirkungsgrad zu erreichen. Für die Erwärmung des Kohlenstoffstahls auf die Temperatur 1200 °C lassen sich folgende Abmessungen des Werkstückes für den wirtschaftlichen Betrieb empfehlen:

Tabelle 1 - Empfohlene Frequenzen der Erwärmung des magnetischen Kohlenstoffstahls

Frequenz [Hz]	Durchmesser des Werkstückes [mm]	Seite des quadratischen Querschnitts [mm]
50	200-600	180-550
250	90-250	80-225
500	65-180	60-160
1000	50-140	45-125
2000	35-100	30-80
4000	22-65	20-60
8000	16-50	15-45
10000	15-40	14-35
20000	10-30	9-25

2.3 Thermischer Wirkungsgrad

Die Wärmeverluste hängen von allem von der Temperatur des Werkstückes ab, weniger auch von den wärmedämmenden Eigenschaften des Induktors. Bei den Erwärmungen auf niedrige Temperaturen (zirka unter 800 °C) haben mehreren Anteil die Verluste in der Spule. [1] Bei der Erwärmung auf höhere Temperaturen zeigen sich deutlich die Verluste durch die Ausstrahlung des Werkstückes, die mit der vierten Potenz der thermodynamischen Temperatur (Stefan-Boltzmann-Gesetz) wachsen. Die Verluste durch die Konvektion sind dagegen vernachlässigbar. Bei den längeren Erwärmungszeiten auf die Schmiedetemperatur gegen 1200°C können die Wärmeverluste viel größer sein als die elektrischen Verluste in der Spule.

Das erwärmte Werkstück im Induktor strahlt die Wärme an die Ausmauerung ab, die sich erwärmt und strahlt wieder ans Werkstück ab. Es geht also um gegenseitige Abstrahlung, bei der mit gegenseitigen Emissionsgrad gerechnet werden muss. Die Verlustwärme geht durch die Ausmauerung und manchmal durch andere Isolierungsschichten in die gekühlte Spule, wo sie zusammen mit der Wärme aus den elektrischen Verlusten in der Spule durch das Kühlwasser abgeleitet wird. Ein Teil der Wärme wird durch die Gleitschienen abgeleitet, die im direkten Kontakt mit dem Werkstück sind. Die Wärmeverluste in den Schienen erreichen 2 – 8 % [2].

Je länger das Werkstück erwärmt wird, desto größer sind die Wärmeverluste. Das Bild 4 zeigt den möglichen Rückgang des thermischen Wirkungsgrades in der Abhängigkeit von der Erwärmungszeit. Um den besten thermischen Wirkungsgrad zu erreichen, ist es notwendig die Erwärmungszeit zu minimalisieren. Sie muss jedoch genügend lang sein, damit die Mitte des Werkstückes genügend durchwärmt wird.

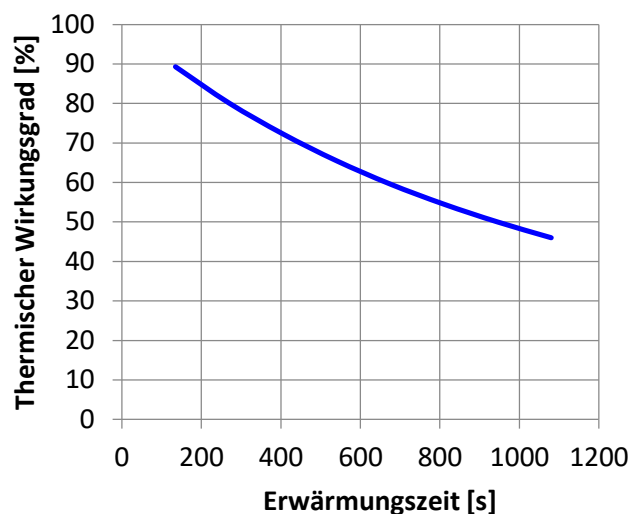


Bild 4 - Rückgang des Thermischen Wirkungsgrades mit der längeren Erwärmungszeit, Kohlenstoffstahl, Endtemperatur 1250 °C, Durchmesser des Werkstückes 60 mm, Durchmesser der Spule 112 mm, gegenseitige Emissionsgrad 0,7

Der thermischer Wirkungsgrad kann auch durch die wärmedämmenden Eigenschaften des Induktors beeinflusst werden: Dicke der Ausmauerung, Wärmeleitfähigkeit der Ausmauerung, Reflexionsfähigkeit der Ausmauerung, bzw. andere Isolierungsschichten. Je größer ist der Durchmesser des Werkstückes und je länger ist die Erwärmungszeit, desto wichtiger ist die Wärmeisolierung. Die voll im Feuerbeton vergossenen Spulen haben sehr lange Lebensdauer, der Wärmeübergang der Wärme aus dem Feuerbeton in die Spule ist jedoch höher. Je niedriger ist die Wärmeleitfähigkeit des Feuerbetons, desto schlimmer ist die Festigkeit (die Porosität steigt). Deshalb wird ein Kompromiss zwischen den wärmedämmenden und mechanischen Eigenschaften des Induktors gewählt.

Die Wärmeisolierung lässt sich durch die Vergrößerung der Ausmauerungsstärke verbessern. Dadurch erhöht sich jedoch der Durchmesser der Spule und sinkt der elektrische Wirkungsgrad. Bei der Erwärmung des Werkstückes mit dem Durchmesser kleiner als zirka 55 mm sind die Erwärmungszeiten kurz und elektrischer Wirkungsgrad hat größere Bedeutung, deshalb ist es passend, die Ausmauerungsstärke und den Spulendurchmesser auf die Werte zu minimalisieren, die noch genügend lange Lebensdauer des Induktors sichern, denn zu dünne Ausmauerung seine Lebensdauer verkürzt. Bei größeren Durchmessern steigt die Bedeutung der Wärmedämmung und es gibt ein optimaler Durchmesser der Spule, der gesamte Wirkungsgrad des Induktors ist jedoch nur wenig von der Änderung des Spulendurchmessers, denn die Veränderungen des elektrischen und thermischen Wirkungsgrades kompensieren sich gegenseitig. Allgemein gilt, dass bei der Erwärmung auf die Schmiedetemperaturen die Erwärmungszeit auf den gesamten Wirkungsgrad den größten Einfluss hat, erst dann kommt der Durchmesser der Spule.

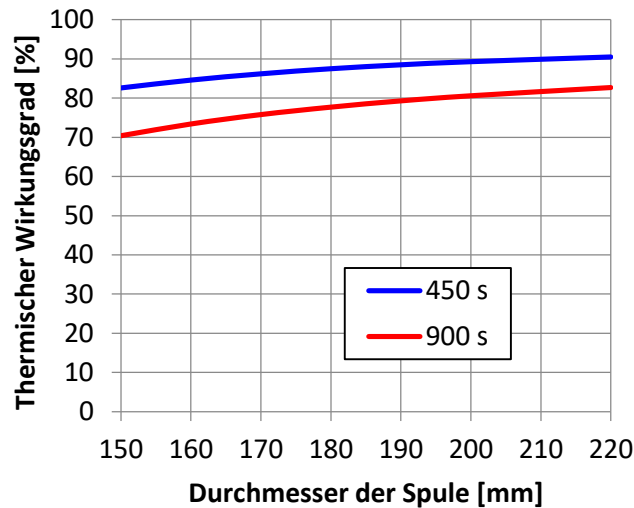


Bild 5 – Thermischer Wirkungsgrad in der Abhängigkeit von dem Durchmesser der Spule für verschiedene Erwärmungszeiten des Kohlenstoffstahls auf die Temperatur 1250 °C, Durchmesser des Werkstückes 100 mm

3 Erwärmungszeit und Temperaturprofil Kern – Oberfläche

Die Gleichmäßigkeit der Zieltemperatur ist eines der wichtigsten Kriterien bei der Beurteilung der Erwärmungsqualität in Schmieden. In der Praxis wird die Temperatur des erwärmten Werkstückes mit dem Pyrometer kontaktlos gemessen. Die Temperatur der Oberfläche beschreibt jedoch die Qualität der Erwärmung nur wenig. Die Messung der Temperatur innerhalb des Werkstückes ist ziemlich kompliziert, deshalb ist es sehr passend, die computergestützte Simulation zu benutzen, die die gesamte Zeitentwicklung des Temperaturprofils Kern – Oberfläche ausrechnet.

Unter Einfluss des Skineffektes entsteht mehr Wärme in der Oberfläche des Werkstücks und in die Mitte kommt durch die Leitung. Die Eindringtiefe, in der die meiste Wärme entsteht, hängt von der Frequenz ab. Hohe Frequenzen verursachen kleine Eindringtiefe und verlängern die nötige Erwärmungszeit. Niedrige Frequenzen vergrößern Eindringtiefe und verkürzen die nötige Erwärmungszeit. Zu niedrigeren Frequenzen verursachen die Durchstrahlung und senken den Wirkungsgrad der Erwärmung. Es muss genügend lange Zeit gewählt werden, damit sich der Kern gut durchwärmt. Die zu lange Zeit führt auf der anderen Seite zum niedrigen Wirkungsgrad, höheren Verzunderung und Überhitzung unter der Oberfläche. [3, 4].

3.1 Temperaturprofil Kern – Oberfläche und seine Entwicklung in Zeit

Der typische Temperaturenverlauf einer einstufigen kontinuierlichen Erwärmung des Kohlenstoffstahls zeigt das Bild 6. Am Anfang der Erwärmung hat der magnetische Stahl eine sehr kleine Eindringtiefe und die dünne Oberflächenschicht erwärmt sich schnell auf 800 °C, wo sie ihre magnetischen Eigenschaften verliert und Eindringtiefe verlängert sich. Dann folgt der langsame Anstieg der Oberflächentemperatur. Elektromagnetische Wellen dringen mehr in die Tiefe ein und die meiste Energie wird für die Veränderungen des Kristallgefüges verbraucht. Nach der Überwindung der Phasenumwandlungen steigt die Oberflächentemperatur schneller. Am Ende der Erwärmung zeigen sich deutlicher die Verluste durch Abstrahlung. Die Oberfläche erwärmt sich langsamer und das Maximum der Temperatur schiebt sich unter die Oberfläche des Teils. Der Wärmeunterschied Kern-Oberfläche sinkt. Nach der Vollendung der Erwärmung verschiebt sich das Maximum der Temperatur wegen der Abkühlung allmählich in die Mitte des Teils.

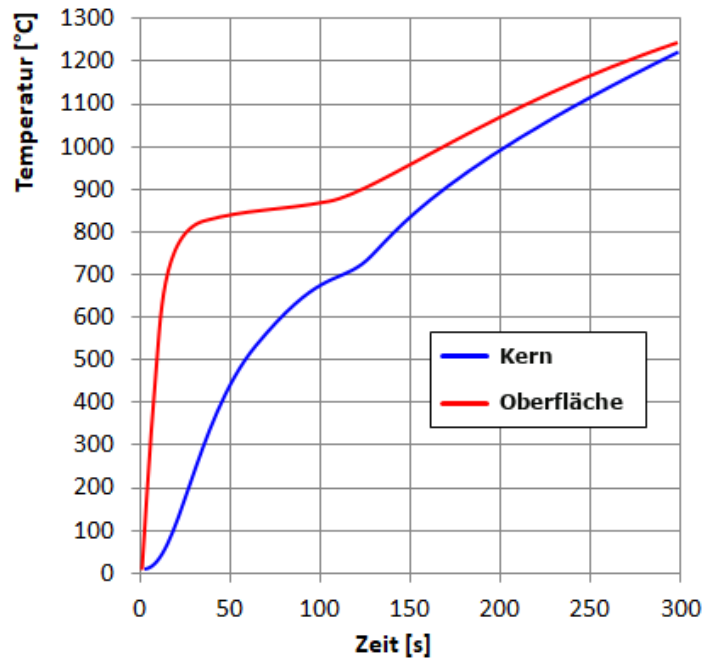


Bild 6 – Entwicklung der Temperatur bei der Erwärmung des magnetischen Rundstahls, Durchmesser 80 mm

Der Graf auf dem Bild 7 zeigt, wie die Erwärmungszeit die Endverteilung der Temperatur des Rundstahls mit dem Durchmesser von 60 mm bei der Erwärmung der Oberfläche auf die Temperatur 1200 °C beeinflusst. Bei kurzen Erwärmungszeiten ist der Kern kälter als die Oberfläche, bei längeren Erwärmungszeiten ist es umgekehrt. Wegen großer Wärmeverluste durch die Abstrahlung liegt das Maximum der Temperatur unter der Oberfläche. Die gestrichelten Linien zeigen die Temperatur nach 8 sec natürlicher Abkühlung. Rechnen wir mit der Abkühlung, bedeutet die kürzere Erwärmungszeit gleichmäßigere Temperatur.

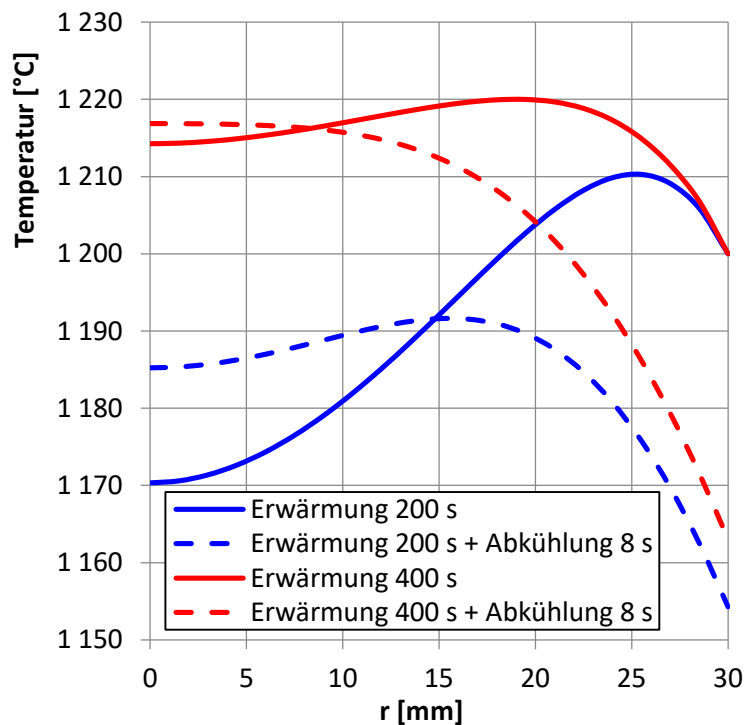


Bild 7 – Temperaturprofil am Ende der Erwärmung des Rundstahls, Durchmesser 60 mm, Frequenz 2000 Hz

3.2 Erwärmungszeit

Die optimale Erwärmungszeit ist so lang, wenn am Ende der Erwärmung die Oberfläche um ein paar Zehnen Grad wärmer ist als der Kern. Nach der Beendigung der Erwärmung kühlt die Oberfläche wegen der Abstrahlung heftig ab und der Temperaturunterschied Kern-Oberfläche kann sich in ein paar Sekunden wenden. Zu kurze Erwärmungszeit führt zum ungenügend erwärmten Kern, und erhöht dadurch den Verformungswiderstand und den Verschleiß der Umformungsmaschinen. In der Praxis kommt häufiger zu lange Erwärmungszeit vor, die einige ernsthafte Nachteile hat [3, 4]:

1) Überhitzung und Verbrennung des Materials

Die lange Erwärmungszeit zusammen mit der hohen Zieltemperatur erhöht das Risiko der Überhitzung oder Verbrennung des Materials unter der Oberfläche. Die Temperatur unter der Oberfläche kann um bis mehrere Zehnen °C höher sein als die Angabe am Pyrometer. Bei der Verbrennung des Materials kommt zur lokalen Anschmelzung der Korngrenzen, was unwiederbringlich die mechanischen Eigenschaften (Ziehfähigkeit, Festigkeit) verschlechtert. Zur Überhitzung und Verbrennung kann es auch bei der Umformung kommen, wenn die Temperatur wegen der Deformationsarbeiten weiter steigt.

2) Verzunderung

Die lange Erwärmungszeit verursacht die Entkohlung, die Oxidation unter der Oberfläche und die erhöhte Verzunderung. Das ist mit dem Verlust des Materials und der Energie verbunden. Die Zunder verursachen die Maßungenauigkeit, die Verunreinigung der Anlage, die Verkürzung der Lebensdauer der Umformungs- und Bearbeitungswerkzeuge. Die Zunder verhindern die richtige Messung der Temperatur mit dem Pyrometer, was die Stabilisierung des Erwärmungsprozesses verschlimmert. Die Zunder haben negativen Einfluss auf die Lebensdauer des Induktors. Sie erhöhen den Verschleiß der Gleitschienen. Der Staub von den Zundern dringt in die Mikrorisse der Ausmauerung ein und beschleunigt ihre Vergrößerung, was schließlich zum Kurzschluss führt.

3) Rückgang des Wirkungsgrads

Die Wärmeverluste bei der Erwärmung auf die Schmiedetemperatur gegen 1200 °C beeinflussen deutlich den gesamten Wirkungsgrad. Je länger ist die Erwärmungszeit, desto mehr Energie wird durch die Oberfläche ausgestrahlt. Die übermäßig lange Erwärmung kann den gesamten Wirkungsgrad bis um ein paar Zehnen der Prozent senken.

4) Kleben/Schweißen von Schmiederohlingen

Zum unerwünschten Kleben der Schmiederohlinge kommt infolge der hohen Temperatur und des Druckes der Vorschubsvorrichtung [4]. Je länger ist die Erwärmungszeit, desto höher ist die maximale Temperatur unter der Oberfläche. Der Druck zwischen den Rohlingen im Induktor sinkt schrittweise mit der Entfernung von der Vorschubsvorrichtung. Wenn die Erwärmungszeit lange ist, werden die hohen Temperaturen schon am Anfang des Induktors erreicht, wo der Druck zwischen den Rohlingen am größten ist.

Die empfohlenen minimalen Erwärmungszeiten des magnetischen Rundstahls auf die Schmiedetemperatur gegen 1200°C sind in der folgenden Tabelle. Für den quadratischen Querschnitt muss die Zeit mit 1,25 multipliziert werden, für den flachen Stahl mit 2. Die angeführten Zeiten wurden durch die Simulation der kontinuierlichen Erwärmung mit der konstanten Leistung ausgerechnet, wo am Ende der Erwärmung die Oberfläche um 50 °C wärmer ist als der Kern. Die Doppelzeit lässt sich akzeptieren. Bei längeren Zeiten ist passend die Maßnahmen zu ergreifen, die die Erwärmungszeit verkürzen können: Taktzeitverkürzung, Frequenzerhöhung, Einsatz des Induktors mit der kürzeren Spule, Einsatz des Erwärmers mit der niedrigeren Leistung und dem kürzeren Induktor.

Tabelle 2 - Empfohlene minimale Erwärmungszeit für magnetischen Rundstahl

Durchmesser	Frequenz	Zeit	Frequenz	Zeit	Frequenz	Zeit
20 mm	4000 Hz	18 s	10000 Hz	22 s	20000 Hz	27 s
30 mm	3000 Hz	40 s	4000 Hz	44 s	6000 Hz	49 s
40 mm	2500 Hz	73 s	3000 Hz	77 s	5000 Hz	90 s
50 mm	1500 Hz	103 s	2500 Hz	120 s	4000 Hz	138 s
60 mm	1000 Hz	135 s	2000 Hz	167 s	3000 Hz	189 s
70 mm	1000 Hz	189 s	1500 Hz	215 s	2000 Hz	235 s
80 mm	800 Hz	235 s	1000 Hz	252 s	1500 Hz	286 s
90 mm	700 Hz	292 s	1000 Hz	325 s	1500 Hz	370 s
100 mm	700 Hz	365 s	1000 Hz	410 s	1500 Hz	460 s
120 mm	500 Hz	485 s	700 Hz	540 s	1000 Hz	600 s
140 mm	500 Hz	675 s	700 Hz	745 s	1000 Hz	820 s
160 mm	300 Hz	762 s	500 Hz	895 s	800 Hz	1020 s
200 mm	200 Hz	1100 s	300 Hz	1250 s	500 Hz	1440 s
300 mm	150 Hz	2380 s	300 Hz	2870 s	500 Hz	3200 s

Bei dem kontinuierlichen einstufigen Erwärmer mit der konstanten Längsverteilung der Leistung hängt die Erwärmungszeit eines Werkstückes vom Taktzeit und der Länge des Werkstückes ab nach folgender Gleichung:

$$\text{Erwärmungszeit} = \frac{\text{Länge der Spule}}{\text{Länge des Werkstückes}} \cdot \text{Taktzeit} \quad (5)$$

Wenn die Länge des Werkstückes und die Taktzeit durch die Umformungstechnologie bestimmt sind, kann die gewünschte Erwärmungszeit nur durch die Änderung der Länge der Spule erreicht werden. Das muss schon bei der Wahl, bzw. dem Entwurf des Induktors gelöst werden. Eine andere Lösung ist der mehrstufige Erwärmer, der die Leistung längs der Erwärmungsanlage ungleichmäßig verteilen kann [3-5].

4 Ein Beispiel aus der Praxis

Die Schmiede erwärmt die Werkstücke aus Kohlenstoffstahl in dem einstufigen kontinuierlichen Erwärmer mit folgenden Parametern der Erwärmung:

- Durchschnitt des Werkstückes 36 mm
- Länge des Werkstückes 95 mm
- Länge der Spule 3 m
- Taktzeit 14 s
- Frequenz 2050 Hz
- Zieltemperatur der Oberfläche 1280 °C
- Leistung des Umrichters (Leistungsbedarf des Induktors) 152 kW
- Induktor mit der Nennleistung 630 kW für Durchschnitte 31 – 40 mm
- Erwärmer mit der Nennleistung 630 kW für Durchschnitte 35 – 80 mm

Laut der Gleichung (5) ist die wirkliche Erwärmungszeit 442 s. Die empfohlene Erwärmungszeit (Tabelle 2) wird ungefähr achtfach überschritten, was auf den schlechten thermischen Wirkungsgrad zeigt. Die

Frequenz 2050 Hz liegt an der unteren Grenze des empfohlenen Bereichs (Tabelle 1). Aus der Gleichung (4) lässt sich die Eindringtiefe δ für den unmagnetischen Stand 12,3 mm ausrechnen. Das Verhältnis δ/d ist gleich 3,4. Das zeigt auf den reduzierten elektrischen Wirkungsgrad (Bild 3). Besser wäre die höhere Frequenz, denn bei dieser so langen Erwärmungszeit nur eine kleine Eindringtiefe für die Durchwärmung reicht.

Nähere Informationen bietet die Computersimulation an. Für diesen Fall ergibt sich der gesamte Wirkungsgrad der Erwärmung nur 31 %. Zugleich zeigt sich, dass sich das Temperaturmaximum am Ende der Erwärmung im Kern des Werkstückes befindet und die Oberflächentemperatur um 36°C übersteigt. Es kommt also zur starken Überhitzung des Kernes.

Die grundlegende Ursache des reduzierten Wirkungsgrads und der Erwärmungsqualität ist hier der unpassend gewählte Erwärmer und Induktor, die für viel höhere Leistung ausgelegt sind. Die zu lange Erwärmungszeit kann mit dem Einsatz des Induktors mit der kürzeren Spule verkürzt werden. Wenn die Spule nur 1 Meter lang ist, d.h. ein Drittel der ursprünglichen Länge, verringert sich die Erwärmungszeit dreimal und der gesamte Wirkungsgrad steigt laut der Simulation auf 53 %, was der Ersparnis von 63 kW entspricht. Bei dem Einsatz eines speziellen Induktors und Erwärmers lassen sich die Parameter der Erwärmung voll optimieren. Durch die nächste Verkürzung der Erwärmung, durch die Erhöhung der Frequenz und die Verringerung des Spulendurchmessers kann laut der Simulation der gesamte Wirkungsgrad von 66 % erreicht werden, was der Ersparnis von 81 kW entspricht. Der Vorteil ist auch die gleichmäßigere Durchwärmung, kleinere Verzunderung und höherer Leistungsfaktor.

5 Längsverteilung der Leistung der kontinuierlichen Erwärmung

Firma ROBOTERM bietet für die Optimierung der Erwärmung verschiedene Lösungen zur ungleichmäßigen Verteilung der Leistung längs der Induktionsanlage. Es handelt sich um mehrstufige Erwärmer (Bild 9), Induktoren für Schnellerwärmung (Bild 10) und Induktoren mit der verkürzten Spule (Bild 11).

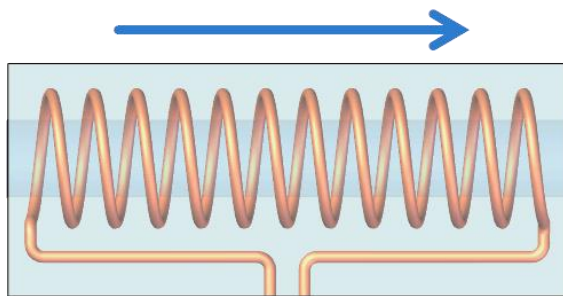


Bild 8 - Standardinduktor

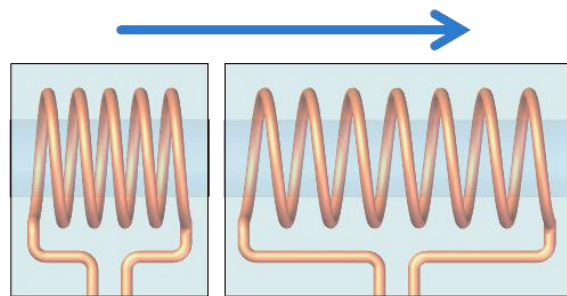


Bild 9 - Zweistufige Erwärmung

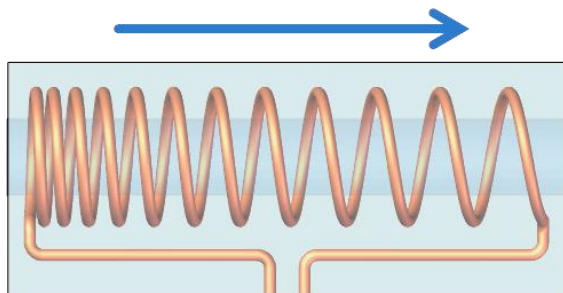


Bild 10 - Induktor für Schnellerwärmung

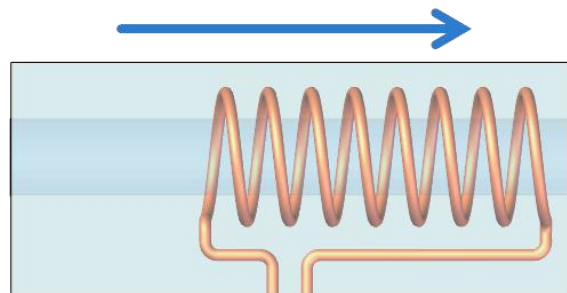


Bild 11 - Induktor mit der verkürzten Spule

Die mehrstufigen Erwärmer haben zwei oder mehrerer Induktoren mit selbständigen Quellen in einer Reihe. Bei diesen Erwärmern kann die Leistung längs der Induktionsanlage beliebig verteilt werden. So lässt sich die Taktzeit ändern und dabei das optimale Endtemperaturprofil Kern-Oberfläche einhalten. Bei niedrigen

Durchsätzen erwärmt nur der letzte Induktor. Bei hohen Durchsätzen erwärmt der erste Induktor mit voller Leistung und die weiteren Induktoren halten die Temperatur in der Oberfläche, während die Wärme in den Kern geleitet wird. Mehrstufige Erwärmer sind also überall dort geeignet, wo ein großer Umfang der Leistungen gefordert wird.

Bei den Erwärmern mit einer Quelle, die wegen ihrer Einfachheit und ihres niedrigen Preises verbreitet sind, können die Induktoren mit der verkürzten Spule und Induktoren für Schnellerwärmung eingesetzt werden. Vorteilhaft ist ein schneller Induktoraustausch, besonders bei den Erwärmern mit quer verschiebbaren Induktoren, wo der Austausch ganz automatisch erfolgen kann. Die Länge der Spule kann für die optimale Erwärmungszeit und die gewünschte Leistung entworfen werden.

Die Induktoren mit der verkürzten Spule können das Problem mit der zu langen Erwärmungszeit in dem einstufigen Erwärmer lösen. Ein Vorteil ist auch, dass bei der Erwärmung in der langen Spule meistens nicht zum Rückgang des Leistungsfaktors kommt wie bei der Erwärmung mit der reduzierten Leistung im Standartinduktor. Die Spule sollte jedoch vielfach länger als die Länge des Schmiederohlinges sein, sonst erhöht sich die Temperaturungleichmäßigkeit in der Längsrichtung.

Die Induktoren für Schellerwärmung haben die Spule mit ungleichmäßig verteilter Windung. Die größte Dichtung der Windung ist am Anfang des Induktors, wodurch die nötige Erwärmungszeit minimalisiert werden kann. Die Induktoren für Schellerwärmung können das Problem mit dem ungenügend durchwärmten Kern des Werkstückes lösen und ermöglichen die niedrige Taktzeit im Vergleich zur Erwärmung im Standartinduktor. Ein Nachteil des Induktors für Schnellerwärmung ist eine große Menge der ungenügend erwärmten Rohlinge beim Start des Erwärmers, der voll von kalten Rohlingen ist. Die Schnellerwärmung ist nicht für zerbrechliche und schlecht leitende Materialien geeignet (z.B. Stähle mit hohem Kohlenstoffgehalt), weil der hohe Temperaturgradient am Anfang der Erwärmung ihre Rissbildung verursachen kann.

6 Schlusswort

Die Erwärmungszeit und Leistungsverteilung längs der Induktionsanlage grundsätzlich beeinflussen die Qualität und Effizienz der Erwärmung. Die optimale Erwärmungszeit kann mit dem mehrstufigen Erwärmer oder auch mit dem einstufigen erreicht werden, wenn sein Induktor direkt für die gewünschte Leistung entworfen ist. Die angeführten empfohlenen Erwärmungszeiten können sowohl bei dem Entwurf einer neuen Induktionsanlage als auch für die Auswertung der Erwärmungsqualität in den einstufigen Erwärmern in den Schmiedewerkstätten ausgenutzt werden. Der Ersatz des Induktors oder des ganzen Erwärmers kann in einigen Fällen eine bedeutende Ersparnis, Erhöhung der Erwärmungsqualität und der Lebensdauer der Anlage bedeuten.

Benutzte Literatur:

- [1] Rudnev, V.; Loveless, D.; Cook, R.; Black, M.: *Handbook of induction heating*, 2003, ISBN 0824708482
- [2] Šmejkal, M.: *Optimální postup při indukčním ohřevu*. Kovářství. 2007, č. 30, s. 12-15. ISSN 1213-9829.
- [3] Rudnev, V.; Brown, D.; Van Tyne, Ch.; Clarke, K.: *Intricacies for the successful induction heating of steels for modern forge shop*. Proc. of the 19th Int'l Forging Congress, Chicago, IL, September 2008
- [4] Rudnev, V.: *Induction heating of steel billets: causes of billet sticking/fusing problem and its prevention*, in *heat processing 4*, 2019, p. 57-60
- [5] E. Rapoport, Y. Pleshivtseva, *"Optimal Control of Induction Heating Processes"*, 2006, ISBN 9780849337543