

Labor: Elektrowärme

- Versuch 2 -

„Induktive Erwärmung“

1. Einleitung

Die induktive Erwärmung zeichnet sich insbesondere durch hohe Leistungsdichten und eine schnelle und zielgenaue Erwärmung aus, wie z.B. zum Oberflächenhärten oder zum durchgreifenden Erwärmen. Sie hat dadurch in den letzten Jahrzehnten eine besonders rasche Ausweitung erfahren und ist heutzutage aus den klassischen Anwendungsbereichen des industriellen Erwärmens nicht mehr wegzudenken. Alle elektrisch leitfähigen Werkstoffe sind für die induktive Erwärmung geeignet. Im Allgemeinen kommt die induktive Erwärmung bei Metallen und deren Legierungen zum Einsatz.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen zur induktiven Erwärmung kurz erläutert. Weiterführende Informationen können aus den Vorlesungsunterlagen „Elektrothermische Verfahren“ oder geeigneter Literatur entnommen werden.

2.1 Prinzip der induktiven Erwärmung

Die induktive Erwärmung beruht auf drei physikalischen Prinzipien:

1. Wird ein elektrischer Leiter von einem Wechselstrom durchflossen, so bildet sich um ihn herum ein magnetisches Wechselfeld der gleichen Frequenz aus.
2. Bringt man in dieses Magnetfeld einen weiteren elektrischen Leiter ein, so wird in ihm eine Spannung gleicher Frequenz induziert. Diese Spannung ruft im zweiten Leiter einen Strom I hervor, der in Gegenphase zu dem Strom im ersten Leiter steht.
3. Der vom Strom durchflossene zweite Leiter mit dem ohmschen Widerstand R erwärmt sich. Nach dem Joule'schen Gesetz entsteht in ihm in der Zeit t die Wärme $Q = I^2 \cdot R \cdot t$.

Zum induktiven Erwärmen wird nun für den ersten Leiter eine wassergekühlte Spule oder Leiterschleife mit möglichst geringem ohmschen Widerstand R verwendet, da natürlich auch hier Wärme entsteht. Diese Spule ist der sogenannte Induktor. Anstatt des zweiten Leiters wird ein elektrisch leitendes Werkstück in das Feld eingebracht.

Hieraus ergeben sich wesentliche Kennzeichen der induktiven Erwärmung:

1. Es handelt sich um ein unmittelbares Erwärmungsverfahren, da die Wärme direkt im Werkstück entsteht. Sie braucht nicht durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung oder Konvektion übertragen werden.
2. Nur elektrisch leitende Werkstoffe können auf diese Weise erwärmt werden.
3. Wie Tabelle 1 zeigt, können hohe Leistungen übertragen werden. Vor allem die Möglichkeit sehr hohe Leistungen bei einem hohen Wirkungsgrad und einem relativ einfachen Aufbau zu übertragen, macht die induktive Erwärmung im Vergleich zu anderen Erwärmungsarten so effektiv.

Tabelle 1: Leistungsdichten verschiedener Wärmeübertragungen

Erwärmungsart	Leistungsübertragung [W/cm ²]
Konvektion (Kühlrippen)	0,5
Strahlung (Elektroofen)	8,0
Wärmeleitung (Kochplatte)	20,0
Flamma (Gasbrenner)	1000,0
Induktion	30000,0

2.2 Induktionsgesetz

Die physikalische Grundlage für die Entstehung des Stromes im Werkstück bildet das Induktionsgesetz (4). Möchte man ein sich periodisch änderndes magnetisches Feld erzeugen, so erreicht man dies mit Hilfe einer wechselstromdurchflossenen Spule (vgl. Abbildung 1).

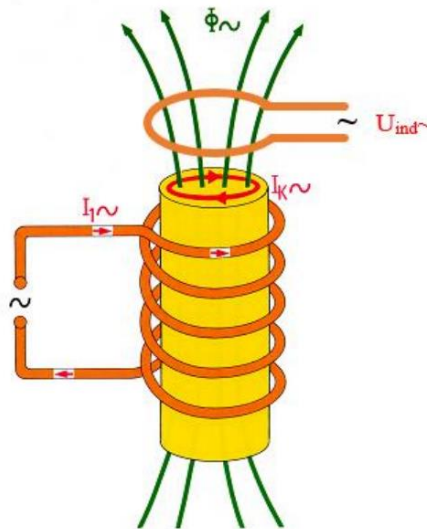


Abbildung 1: Induktionsgesetz

Besitzt die Spule w_1 Windungen und die Länge L , so entsteht in ihr die magnetische Feldstärke

$$H = I_1 \frac{w_1}{L} \quad (1)$$

und mit der magnetischen Feldkonstante $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ erhält man die magnetische Flussdichte über den Zusammenhang

$$B = \mu H \quad (2)$$

Jedes Flächenstück A im homogenen Feld im Inneren einer unendlich langen Spule wird nun vom magnetischen Fluss Φ durchsetzt.

$$\Phi = B \cdot A \quad (3)$$

Bringt man in das gleiche Feld eine zweite Spule mit einer Windungszahl w_2 die jeweils die Fläche A umfassen, so wird in ihr in jeder Windung die Induktionsspannung

$$U_{\text{ind}} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

induziert und man erhält insgesamt eine Spannung von

$$U = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (5)$$

Verbindet man die Enden der zweiten Spule (Kurzschluss), so fließt auch in ihr ein Strom. Dieser sogenannte Kurzschlussstrom erzeugt nun seinerseits ein Magnetfeld, das dem ursprünglichen Feld jederzeit entgegenwirkt. Dieser Zusammenhang wird Lenz'sche Regel genannt und kommt durch das Minuszeichen im Induktionsgesetz (4) zum Ausdruck.

2.3 Elektromagnetische Eindringtiefe

Wird in das innere Feld einer wassergekühlten Spule (Induktor) ein metallisches Werkstück (wie z.B. in Abbildung 2 ein Stahlrohr) eingebracht, so fließt in ihm ein Strom, der nach dem Joule'schen Gesetz das Werkstück erwärmt.

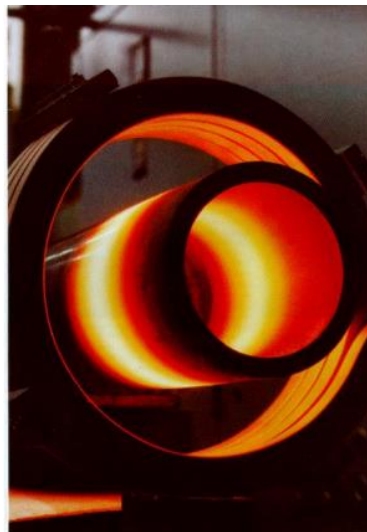


Abbildung 2: Induktive Erwärmung eines Stahlrohrs

Dieser Strom erzeugt ebenfalls ein magnetisches Wechselfeld, das dem ursprünglichen Feld jederzeit entgegenwirkt. Die Überlagerung der beiden Felder bewirkt, dass das resultierende Gesamtfeld vom Außenrand des Zylinders hin zum Mittelpunkt abnimmt. Mit dem Feld nimmt auch die Stromdichte nach innen immer weiter ab und ist am Mittelpunkt gleich Null. Die größte Stromdichte findet man am äußeren Rand des Zylinders. Dieses Phänomen wird als Skin-Effekt bezeichnet.

Die Stromdichte J nimmt unter der Annahme des unendlichen Halbraums von ihrem Maximalwert J_0 am äußeren Rand zum Werkstückinneren exponentiell ab. Die Stelle bzw. der x -Wert, bei dem die Stromdichte auf einen Wert von 37% bzw. $1/e$ ihres Maximums abgesunken ist, nennt man Eindringtiefe δ (8).

Abbildung 3 zeigt den Stromdichteverlauf in einem zylinderförmigen Werkstück:

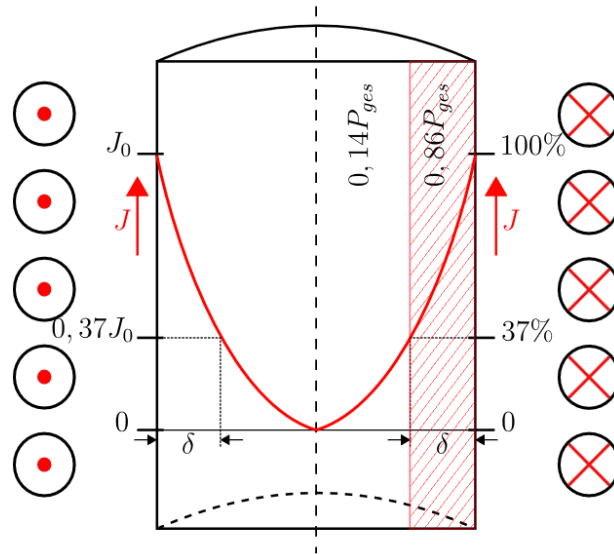


Abbildung 3: Stromdichteverlauf in einem zylindrischen Werkstück

An der Stelle $x = \delta$ gilt:

$$J(\delta) = J_0 \cdot e^{-1} \approx 0,37 \cdot J_0 \quad (6)$$

Die Eindringtiefe δ lässt sich mit folgender Formel bestimmen:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (7)$$

In Gleichung (7) sind:

ρ spez. Elektrischer Widerstand
 $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ magnetische Permeabilitätszahl
 f Frequenz

Die Eindringtiefe lässt sich somit bei gegebenem Werkstück über die Frequenz des Induktorstroms einstellen und stellt zugleich eine elementare Größe beim induktiven Erwärmen da. Mit ihr bestimmt man, ob ein Werkstück nur am Rand erwärmt wird, wie z.B. beim Randschichthärten, oder ob durchgreifend erwärmt wird, wie beim Durchhärten oder Schmelzen.

Physikalisch lässt sich das Verhalten bei unterschiedlichen Frequenzen folgendermaßen deuten: Bei hohen Frequenzen beeinflussen sich die von allen Seiten eintreffenden Wellenzüge nicht. Bei einer tiefen Frequenz treffen, besonders in der Werkstückmitte, Wellenzüge aufeinander, die aus entgegengesetzten Richtungen eindringen. Sie rufen Ströme in entgegengesetzten Richtungen hervor. Die resultierende Stromdichte ist kleiner. Abbildung 4 zeigt, wie der Wirkungsgrad mit dem Verhältnis Werkstückdurchmesser zu Eindringtiefe für verschiedene Werkstoffe ansteigt.

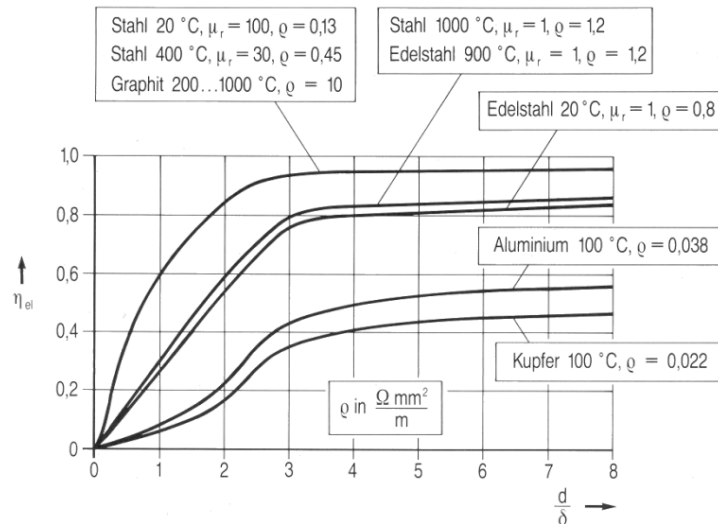


Abbildung 4: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von d/δ

Zum durchgreifenden Erwärmen wird am zweckmäßigsten ein Stromeindringmaß von ca. $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ des Werkstückdurchmessers angestrebt. Dann ist zum einen der Wirkungsgrad der Energieübertragung auf das Werkstück (Kopplung) hinreichend groß und zum anderen die Verteilung der Wärmequellen im Werkstück günstig.

Je nach gewähltem Werkstück und gewünschter Eindringtiefe wählt man also eine bestimmte Frequenz aus. Dabei reicht das Spektrum von unterhalb der Netzfrequenz bis hin zum Kurzwellenbereich und kann wie folgt unterteilt werden:

- Bis 60 Hz → Niederfrequenz
- 60 Hz bis 10 kHz → Mittelfrequenz
- 10 kHz bis 1 MHz ++ → Hochfrequenz

2.4 Generator

Für diesen Versuch steht ein Mittelfrequenz-Generator TIG 20/300 der Firma Hüttinger zur Verfügung. An den Generator können je nach Anforderung unterschiedliche Induktoren angebracht werden. Am Generator lässt sich im so genannten Zwischenkreis stufenlos eine Gleichspannung von 0 – 200 V anlegen (vgl. Abbildung 5). Ein an den Zwischenkreis gekoppelter Oszillator (Parallelschwingkreis mit vorgeschaltetem Wechselrichter), erzeugt daraus eine Wechselspannung m Ausgangskreis. Je nach Last, bestehend aus dem jeweiligen Induktor und dem Werkstück im Feld, fließt nun im Ausgangskreis ein Wechselstrom, dem im Zwischenkreis ein Gleichstrom von maximal 120 A entspricht. Die maximale Ausgangsleistung bzw. übertragbare Leistung beträgt 20 kW.



Abbildung 5: Bedienelemente am Hüttinger TIG 20/300

3 Versuchsdurchführung

In diesem Laborversuch sollen die Prinzipien zur Anpassung eines Induktors an einen Generator mit Schwingkreis angewendet werden. Dabei soll durch gezielte Variation der Kapazitäten und Induktivitäten des Schwingkreises, für einen bestehenden Induktor, die Schwingkreisgüte maximiert und damit eine möglichst optimale Anpassung erzielt werden. Weiter wird die Eindringtiefe für unterschiedliche Frequenzen untersucht.

3.1 Leistungsanpassung

Die Frequenz des Stromes und damit auch des Feldes wird über die Impedanz des Ausgangsschwingkreises (Abbildung 6) eingestellt.

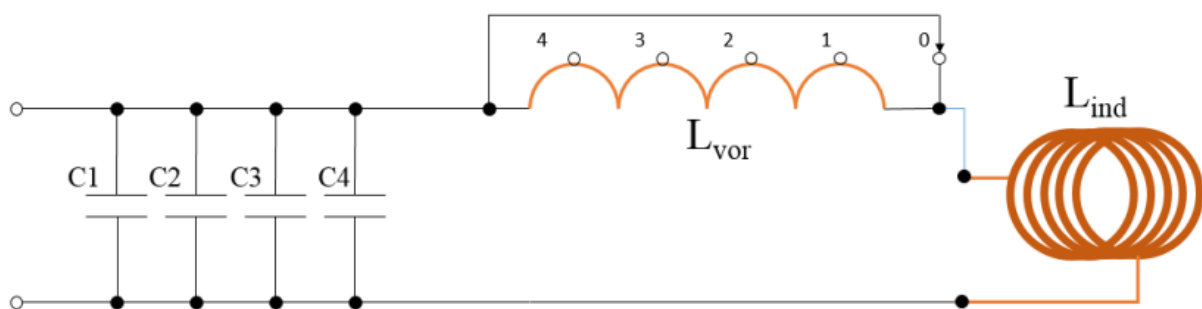


Abbildung 6: Ausgangsschwingkreis

Der Induktor (L_{ind} in Abbildung 6) hat eine bestimmte Impedanz. Die Gesamtimpedanz des Ausgangsschwingkreises kann auf zwei Arten beeinflusst werden:

1. Durch Zuschalten bzw. Herausnehmen von Kapazitäten parallel zum Induktor (C_1 bis C_4 in Abbildung 6)
2. Durch Vergrößern bzw. Verkleinern einer Induktivität in Reihe zum Induktor (L_{vor} in Abbildung 6 mit Abgriffen 0 - 4)

Einen Überblick über die Auswirkungen dieser Änderungen auf die Frequenz und den Ausgangsstrom gibt Tabelle 2:

Tabelle 2: Auswirkungen von geänderten Größen auf das Schwingkreisverhalten

Geänderte Größe		Effekt		
Kapazität C_{ges}	Induktivität L_{ges}	Frequenz f	Induktorstrom I	Schwingkreisimpedanz
+	=	-	+	-
-	=	+	-	+
=	+	-	-	+
=	-	+	+	-

Leistungsanpassung:

Neben der Frequenz nimmt man hier also auch Einfluss auf den Ausgangsstrom. Es ist darauf zu achten, dass der Ausschlag der Zeigergeräte für Strom und Spannung am Generator möglichst parallel erfolgt. Wenn die Impedanz zu groß, und somit der Strom zu klein wird, kann nicht mehr die größtmögliche Leistungsübertragung erreicht werden.

3.1 Aufzeichnen des Erwärmungsvorgangs

Im zweiten Teil der Versuchsdurchführung soll der Verlauf der Erwärmung eines Stahlzylinders hinsichtlich der Eindringtiefe untersucht werden. Dazu steht ein, mit unterschiedlich tiefen Bohrungen präparierter Stahlzylinder zur Verfügung. In diese Bohrungen können Mantelthermoelemente eingeführt werden, welche die Temperatur am Grund der Bohrung messen sollen. Die Anordnung kann der nachfolgenden Abbildung 7 entnommen werden.

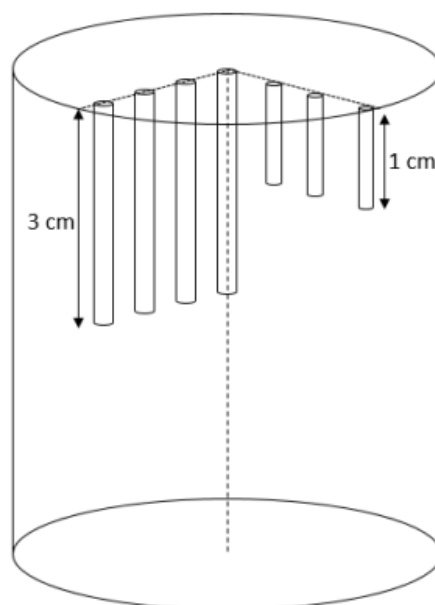


Abbildung 7: Werkstück

Der Zylinder soll nun induktiv erwärmt werden und dabei die Temperatur über die gesamte Erwärmungsdauer aufgezeichnet werden.

Schaltbild des Versuchs:

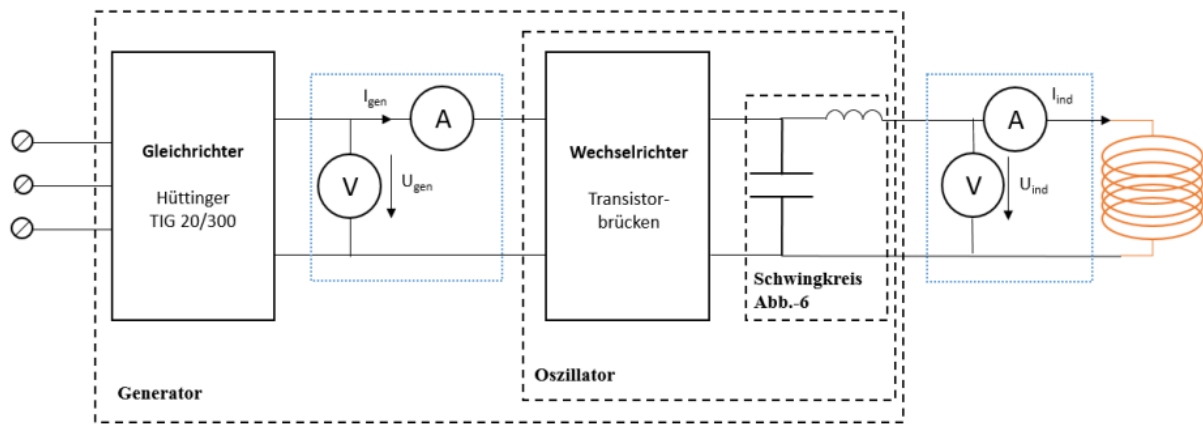


Abbildung 8: Schaltbild des Versuchs

Die aufgewendete Leistung setzt sich wie folgt zusammen:

$$P_{\text{Gen}} = U \cdot I = (P_{\text{Oszillator}} + P_{\text{Induktor}}) + P_{\text{Werkstück}} \quad (8)$$

Damit gilt für den Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{P_{\text{Nutz}}}{U \cdot I} = \frac{P_{\text{Werkstück}}}{P_{\text{Gen}}} \quad (9)$$

4. Aufgabenstellung

Kenndaten des Hüttinger-Umrichters:

Max. Leistung: 20 kW

Max Gleichstrom: 100 A

Max. Gleichspannung: 200 V

Kenndaten des Eisenwerkstücks:

spez. Widerstand (150°C): $\rho = 2,5 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$

rel. Magn. Permeabilität: $\mu_r = 30$

Durchmesser: $d = 73 \text{ mm}$

Aufgabe: berechnen Sie die jeweilige Eindringtiefe und das Verhältnis d/δ !

Frequenz f [kHz]	Eindringtiefe δ [mm]	$\frac{d}{\delta}$ [-]
10		
50		
100		
150		

Voreinstellungen am Schwingkreis:

Frequenz	Leistung	Einstellungen am Schwingkreis		Einstellungen am Generator
		C	L	Potentiometer
Depending on the workpiece		1 x 510 nF	Stufe 0	900

Werkstück 1: massives, zylinderförmiges Werkstück mit großem Durchmesser

Werkstück 2: massives, zylinderförmiges Werkstück mit kleinem Durchmesser

Werkstück 3: massives, viereckiges Werkstück

Aufgabe: Während der Erwärmung sind folgende Daten aufzunehmen:

Werkstück	Anzeigen am Generator					
	Freq	Spannung		Strom		Leistung
	kHz	[%]	[V]	[%]	[A]	kW
1						
2						
3						

Fragen:

Richtung der Erwärmung?

In welchem Bereich findet die Erwärmung innerhalb des Induktors statt?

Einfluss des Luftspalts bei runden Werkstücken?

Erwärmungsverlauf bei viereckigem Werkstück?

Aufgabe: Aufnahme: unterschiedliche Leistungen bei gleicher Frequenz:

V	Einstellungen am SK		Anzeigen am Generator				
	C	L	Potentiometer	Spannung	Strom	P _{Gen}	f
				[%]	[%]		
				[V]	[A]	[kW]	[kHz]
1	1 x 510 nF	Stufe 0	900				
2	1 x 510 nF	Stufe 4	660				

Aufgabe: Aufnahme: Unterschiedliche Frequenzen bei gleicher Leistung

V	Einstellungen am SK		Anzeigen am Generator				
	C	L	Potentiometer	Spannung	Strom	P _{Gen}	f
				[%] [V]	[%] [A]		
1	1 x 510 nF	Stufe 0	900				
2	1 x 510 nF	Stufe 4	660				

Fragen:

- Temperaturverläufe in den Bohrungen des Aluminiumzylinders?
- Ausgleichsvorgänge?
- Erwärmungsdauer auf 150 °C?
- Leistung- /Frequenzabhängigkeit?
- Eindringtiefe aus Messungen bestimmen?