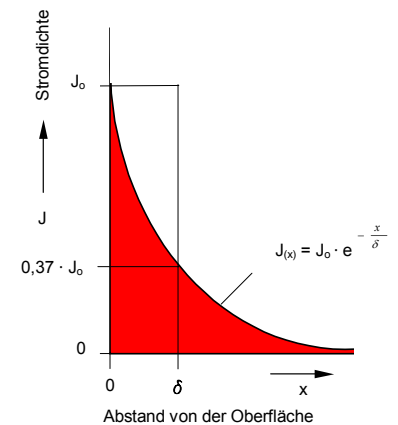


Die elektromagnetische Induktion als Basis der Funktionsweise jeden Transformators ist auch bei der induktiven Erwärmung physikalisches Prinzip. Eine Primärspule erzeugt durch einen Wechselstromfluß ein Magnetfeld. Dieses Magnetfeld induziert in eine Sekundärspule eine Spannung, die wiederum einen Wechselstromfluß zur Folge hat. Im Gegensatz zum Transformator sind die Stromverluste bei der induktiven Erwärmung in der Sekundärspule (Werkstück) gewünscht. Die Erwärmung entsteht also im Werkstück selbst ohne Berührung mit der Primärspule.

Die für die Erwärmung verantwortlichen Wechselströme, auch Wirbelströme genannt, fließen hauptsächlich am äußeren Rand des Werkstücks. Je nach Frequenz unterscheidet man zwischen Nieder-, Mittel- und Hochfrequenz:

- **Nieder**Frequenz (0,05 bis 0,5 kHz)
- **Mittel**Frequenz (0,5 bis 50 kHz)
- **Hoch**Frequenz

Um diese Verhältnisse in einem maßlichen Rahmen zu bringen, muß zunächst die Stromeindringtiefe definiert werden. Wie aus dem Bild ersichtlich, nimmt sie von ihrem Maximalwert an der Oberfläche zum Werkstückinneren hin rapide ab. Die Tiefe, bei der die Stromdichte auf 37 % = 1/e ihres Maximalwertes gesunken ist, bezeichnet man als Stromeindringtiefe δ . In dieser Schicht werden 86,4 % der eindringenden Energie in Wärme umgesetzt. Im nachfolgenden Bild sind diese Verhältnisse dargestellt:



Wärme entsteht direkt im Werkstück

Die Primärspule, Induktor oder Induktionspule genannt, wird meist mit einer oder mehreren Windungen ausgeführt. Die Intensität der Erwärmung ist dabei von

Je höher die Frequenz, desto mehr konzentriert sich der Stromfluß in der Werkstückoberfläche (Skinneffekt).

Niedrige Frequenzen werden für Durchwärmungen, z. B. Löten von kompakten Teilen, Durchhärtungen, Schrumpffügen usw. angewendet, höhere Frequenzen für oberflächliche Erwärmungen, z. B. Randschichthärten.

Die Stromdichte ist im wesentlichen von der Frequenz abhängig. Das folgende Bild zeigt sinngemäß die Stromdichteverteilung in einem Zylinder bei Hoch-, Mittel- und Niederfrequenz: Der Zylinderdurchmesser steht dabei in einem bestimmten Verhältnis zur Frequenz. Wird dieses Verhältnis unterschritten, geht die Energieübertragung gegen Null, d. h. die induzierten Ströme heben sich zunehmend gegenseitig auf.

Aus den mathematischen Zusammenhängen läßt sich eine einfache Formel zur Berechnung der Stromeindringtiefe δ ableiten:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}} \quad [mm]$$

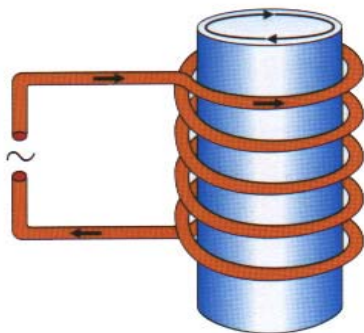
Hierin bedeuten:

- ρ = spezifischer elektrischer Widerstand $[\Omega \cdot mm^2 / m]$
- μ_r = relative Permeabilität
- f = Frequenz $[Hz]$

Damit sich die induzierten Ströme in der Mitte des Metallzylinders nicht aufheben und damit der Übertragungswirkungsgrad nicht gegen Null geht, sollte das Verhältnis des Durchmessers d des gegebenen Metallzylinders zur Strom-eindringtiefe δ folgende Werte aufweisen:

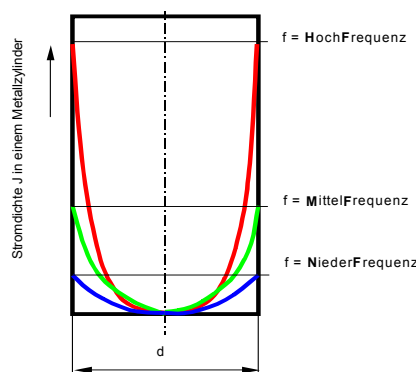
Für eine annähernd verlustarme Energieübertragung:

$$d / \delta \geq 6,$$



verschiedenen Faktoren abhängig, z. B.:

- ⇒ von einem starken elektromagnetischen Feld;
- ⇒ vom Werkstückwiderstand (Stahlwerkstoffe lassen sich sehr gut, Kupferwerkstoffe gut erwärmen);
- ⇒ von der magnetischen Kopplung des Induktors zum Werkstück (Werkstück im Innenfeld des Induktors ergibt einen besseren Übertragungswirkungsgrad als Werkstück im Außenfeld, z. B. Erwärmen einer Bohrung).



für eine optimale durchgreifende Erwärmung:

$$d / \delta = 3,5.$$

Als Anhaltswerte für die Stromeindringtiefen bei verschiedenen Werkstoffen, Frequenzen und Temperaturen sind in der folgenden Tabelle einige ausgewählte Werte angegeben:

Grundwerkstoff	ρ	20 kHz	300 kHz
Stahl, 200 °C	0,34	0,14	0,04
Stahl, 1000 °C	1,2	3,6	0,9
Kupfer, 20 °C	0,016	0,4	0,1
Kupfer, 700 °C	0,07	0,86	0,2
Messing, 20 °C	0,07	0,83	0,2
Messing, 700 °C	0,16	1,28	0,3
Aluminium, 300 °C	0,07	0,84	0,19
Aluminium, 550 °C	0,1	1,0	0,22

Eindringtiefen δ in mm bei verschiedenen Werkstoffen, Frequenzen und Temperaturen.

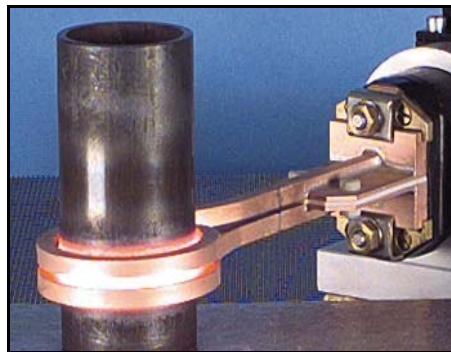
Welche hauptsächlich technischen Anwendungen sind nun mit der induktiven Erwärmungsmethode realisierbar?

Grundsätzlich lassen sich alle elektrisch leitenden Werkstoffe mit dieser Methode erwärmen. Die hauptsächlich Anwendungsgebiete sind nachfolgend aufgeführt:

- Weich-, Hart- und Hochtemperaturlöten
- Randschicht- und Volumenhärten
- Glühen zur Warmformgebung
- partielles Anlassen von gehärteten Werkstücken
- Schmelzen von Eisen- und NE-Metallen
- Schweißen, speziell von Längsnahtrohren
- Fügen und Lösen von Schrumpfverbindungen
- Vorwärmen zum Schweißen
- Spannungsfreiglühen nach Schweiß- oder Verformungsprozessen
- Erwärmen zum Be- und Entschichten
- Sintern von aufgespritzten Verschleißschichten

Gegenüber anderen Erwärmungsverfahren bietet die induktive Erwärmungsmethode entscheidende Vorteile :

- Durch die mögliche hohe Energiedichte sind **kurze Prozeßzeiten** und damit hohe Durchsätze zu erzielen
- Durch die Beschränkung des Energieeintrags auf die unmittelbar benötigte Erwärmungszone ist eine **hohe Energieeffizienz** erreichbar
- Durch die präzise Energiedosierung und hohe Reproduzierbarkeit des Erwärmungsprozesses ist eine **gleichbleibende Fertigungsqualität** erreichbar



Das Bild zeigt ein glühendes Werkstück, das von einem zweiwindigen Induktor umschlossen ist. Man erkennt den Anschluß des Induktors an einem Koaxialtransformator.

Der grundsätzliche Aufbau unserer transistorisierten HF- und MF-Generatoren ist dadurch gekennzeichnet, daß alle Geräte von 1,5 kW bis 100 kW (HF) und von 5 kW bis 200 kW (MF) in mobiler Bauweise mit einem mehrere Meter langen Kabelausgang ausgeführt sind. Je nach Anwendung sind auch mehrere Kabelausgänge üblich, die ein wechselseitiges Arbeiten ermöglichen.



30-kW-Mittelfrequenzgenerator Typ **eldec** MFG 30 DA in mobiler Bauform. Mit den beiden Kabelausgängen kann im Wechseltakt erwärmt, z. B. gelötet, werden. Es ist auch möglich, daß ein Ausgang zum Löten und der andere Ausgang über eine Kabelbox zum Fügen oder Lösen von Schrumpfverbindungen eingerichtet wird.

So ist nicht nur das wechselweise Löten oder Härten mit einer Anlage üblich. Ausgerüstet mit einem weiteren Kabelausgang kann auch zusätzlich z. B. das Fügen oder Lösen von Schrumpfverbindungen, wie im Elektromaschinenbau bei Reparaturarbeiten u. U. erforderlich, ermöglicht werden.



15-kW-Mittelfrequenzgenerator Typ **eldec** MFG 15 als Tischgerät. Auf dem Generator liegt der Koaxialhandtransformator mit angeklemmtem Induktor, der sowohl von Hand als auch maschinell geführt werden kann. Auf der Frontseite ist der Hauptschalter, je ein Anzeigeinstrument zum Ablesen der Ausgangsfrequenz und der Ausgangsleistung in Prozent der Nennleistung sowie ein Bediengerät angebracht.

eldec

Schwenk Induction GmbH
 Otto-Hahn-Strasse 14
 D-72280 Dornstetten
 Telefon: +49-7443-9649-0
 Fax: +49-7443-9649-31
 Internet: <http://www.eldec.de>
 e-Mail: mail@eldec.de

Außenstelle Berlin
 Parlerstraße 46
 D-12623 Berlin
 Telefon: +49-30-5662240
 Fax: +49-30-5665547
 e-Mail: peter@eldec.de