

1. Physikalische Grundlagen der Induktionstechnik

1.1 Prinzip der induktiven Erwärmung

Alle Werkstoffe, die den elektrischen Strom leiten, lassen sich induktiv erwärmen. Im allgemeinen werden alle Arten von Metallen induktiv erwärmt. Die induktive Erwärmung selbst beruht darauf, dass bei einem Metallkörper in einem magnetischen Wechselfeld ein elektrischer Strom induziert wird. Dieser Stromfluss bewirkt die Erwärmung des Metalls.



Nach dem Joule'schen Gesetz wird durch den Strom über den Widerstand des Metalls eine Leistung erzeugt. Diese Leistung wird in Heizleistung umgesetzt.

$$\text{Leistung } P = R \text{ (Widerstand)} * I^2 \text{ (Strom im Quadrat)}$$

Dieser Strom fließt nun eine bestimmte Zeit „t“ durch den Metallkörper. Damit wird in dieser Zeit die elektrische Energie W in eine Wärmemenge Q umgewandelt.

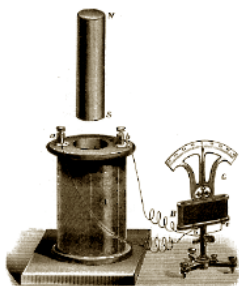
$$W \text{ (Energie)} = R * I^2 * t$$

$$\text{es gilt: } W = Q \text{ (Wärmemenge)}$$

Damit wird deutlich, dass die Induktion ein **unmittelbares Wärmeverfahren** darstellt. **Die Wärme entsteht im Werkstück selbst** und nicht von außen durch Wärmeleitung oder Wärmestrahlung.

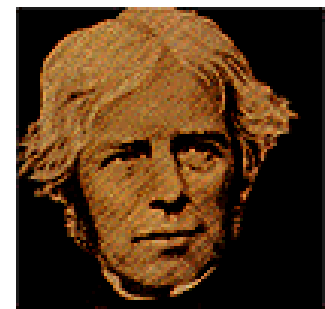
Die Grundlagen dazu kommen aus den Entdeckungen des Herrn Faraday und den Gesetzen, die auch **Lenz'sche Regeln** genannt werden.

Wirkt auf einen Leiter (Werkstück) ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld, so wird in diesem Leiter eine induzierte Spannung erzeugt. Diese Spannung führt dann zu dem Stromfluss, welcher der magnetischen Erzeugung entgegen wirkt.



Versuchsaufbau (1831)

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$



M. Faraday

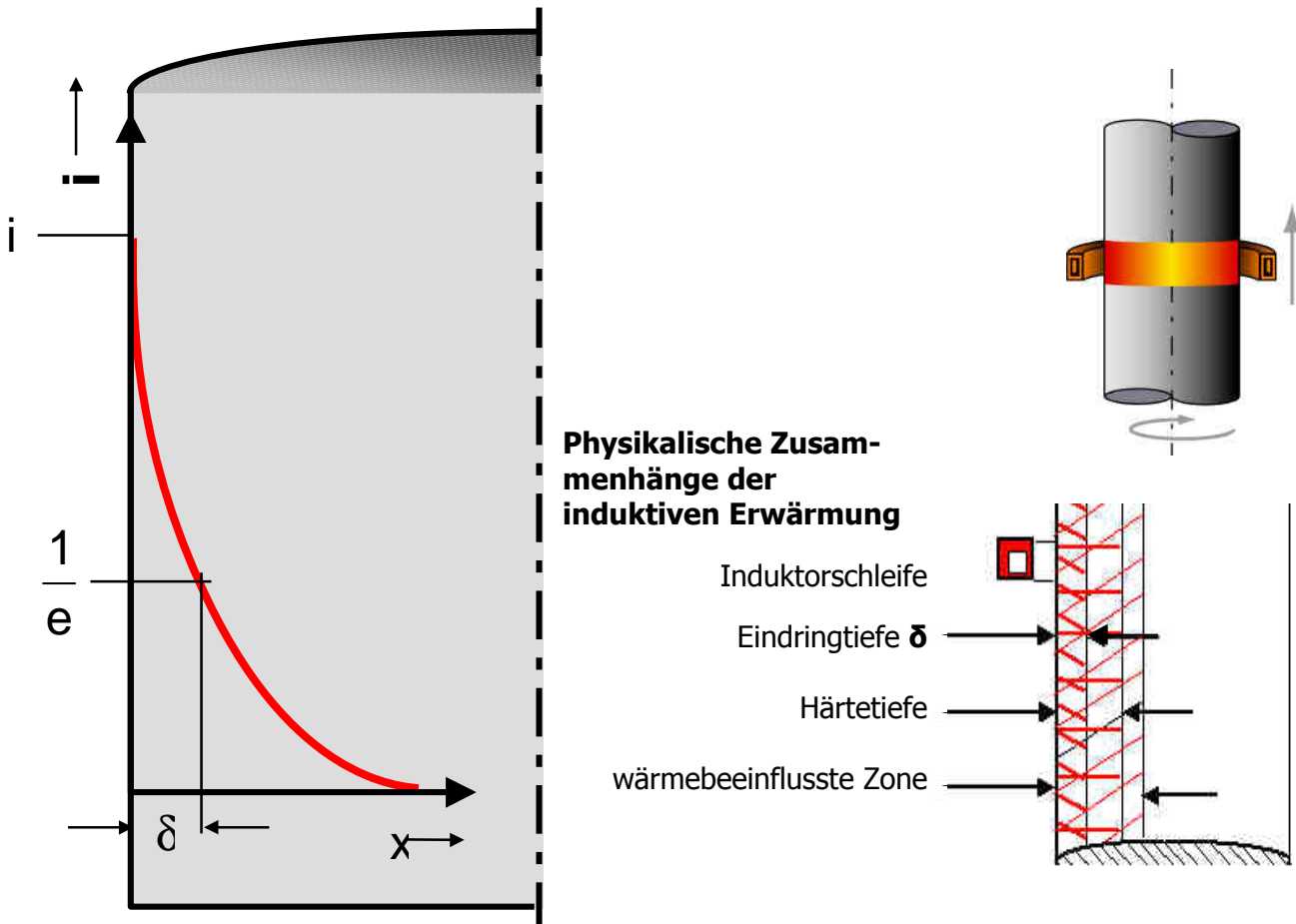
$$\begin{aligned} e &= \text{induzierte elektromotorische Kraft} \\ d\Phi &= \text{Änderung des magnetischen Flusses} \\ dt &= \text{Zeitdauer der Änderung} \end{aligned}$$

1.2 Stromeindringmaß in Abhängigkeit von der Frequenz

Die Art und Weise, wie der induktive Strom im Werkstück wirkt ist abhängig von der „Geschwindigkeit“ mit der das Wechselfeld sich dauernd ändert. Das Maß der Änderung nennt man Frequenz mit der Einheit Hertz (Hz). 50 Hz bedeutet z.B. 50 Richtungswechsel pro Sekunde.

Das **Stromeindringmaß δ** (Delta) beschreibt die „Dicke“ der Randschicht, in welcher der Strom hauptsächlich fließt. Diese Eigenschaft wird auch **Eindringtiefe** genannt.

Die Eindringtiefe beschreibt mathematisch den Wert, an dem die Stromdichte von der Oberfläche aus gesehen noch 37% des Oberflächenwertes beträgt.

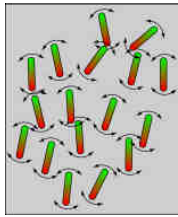


- Wie tief der Strom wirken kann, hängt zum Ersten von der Frequenz ab. Je höher die Frequenz, desto geringer wird das Eindringmaß.
- Die Eindringtiefe hängt aber auch noch von dem Material und der augenblicklichen Temperatur selbst ab. Hier ist die Abhängigkeit von der Permeabilität ($\mu = \mu_0 \mu_r$) und dem spezifischen elektrischen Widerstand ($\rho = \rho_0 \rho_r$) zu beachten.

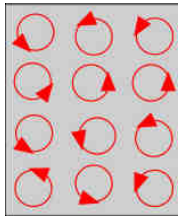
Als Näherungsformel gilt :
$$\delta \approx 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}$$

- Zuletzt sind dann natürlich auch die Legierungsbestandteile des Materials und die Qualität der Vorbehandlung (Gefügestruktur) entscheidend verantwortlich für die Ausbildung der erreichbaren Härtezone.

Die magnetischen Eigenschaften der Metalle haben eine starke Auswirkung auf die benötigte Energie (Leistungseinbringung über die Zeit).



Zu Beginn wirken überwiegend die Ummagnetisierungsverluste (Hystereseverluste).

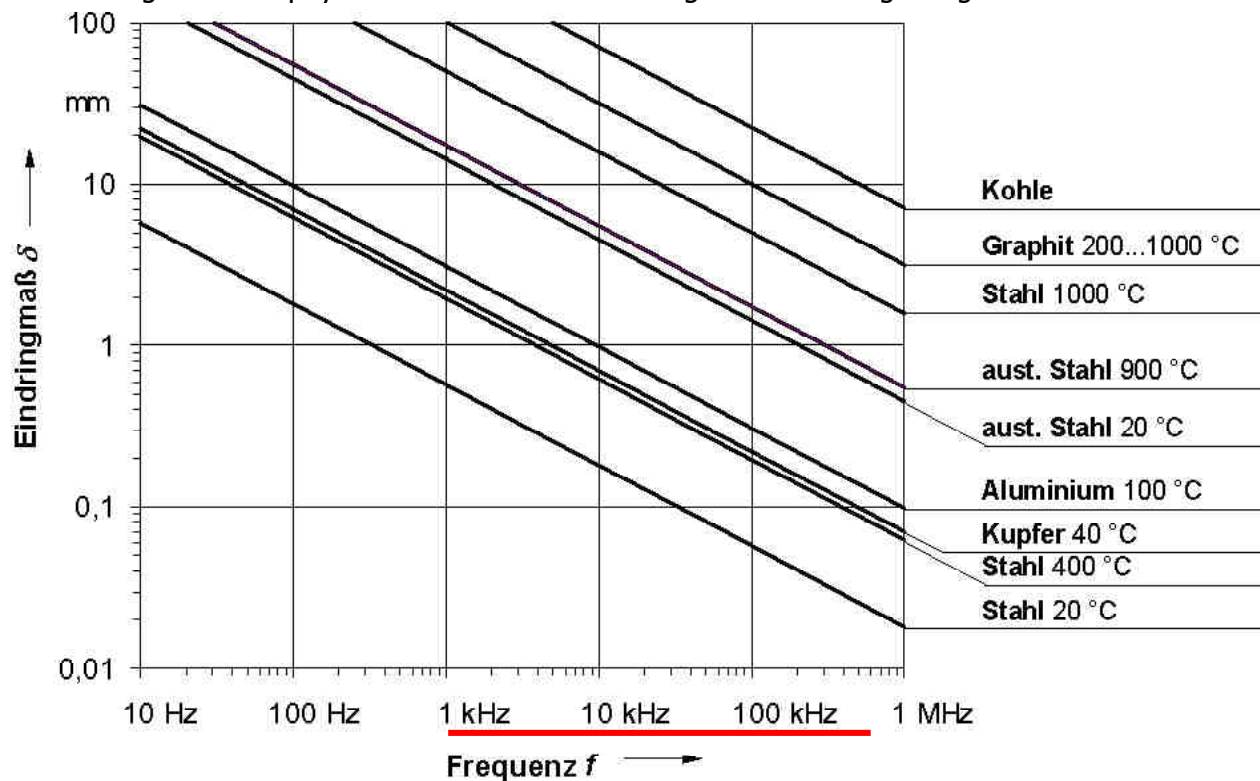


Ab dem Curiepunkt (600 - 770 °C) wirken nur noch die Wirbelstromverluste (Joulesche Verluste).

Austenitische Stahlsorten („Edelstahl“) sind unmagnetisch !

1.3 Frequenz / Eindringtiefe - Diagramm

Die vorab genannten physikalischen Fakten können grafisch wie folgt dargestellt werden:



Farblich gekennzeichnet hier der üblicherweise genutzte Frequenzbereich bei der Induktionserwärmung (2 kHz - 800kHz).

1.4 Berechnung der Eindringtiefe am Beispiel Stahl

Bei Stahl um die 950°C beträgt die Permeabilität $\mu=1$ und der spez. Widerstand $\rho=1,2$.
 Bei Stahltemperaturen um 400°C beträgt die Permeabilität $\mu=30$ und $\rho(ro)=0,45$.

Daraus ergeben sich unter Anwendung der Formel „ $\delta \approx 503 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu * f}}$ “ folgende Richtwerte:

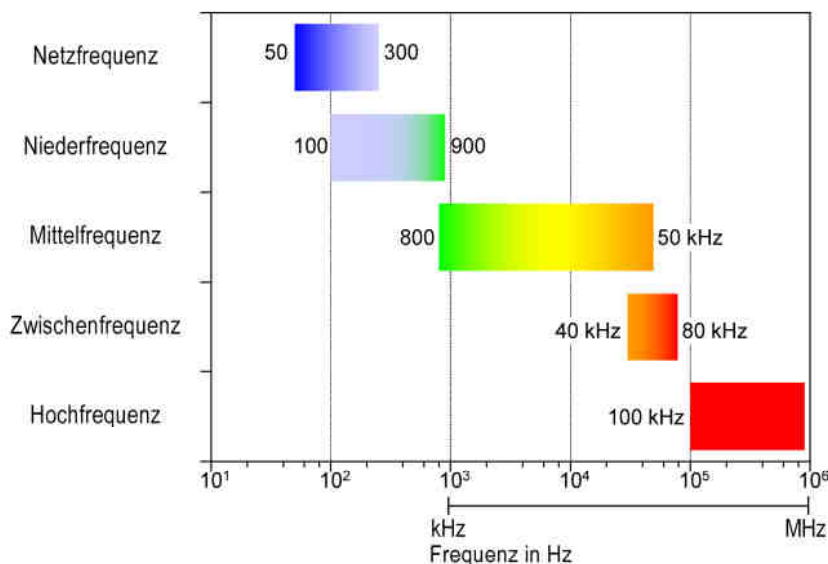
Frequenz in kHz	Eindringtiefe bei 950°C	Eindringtiefe bei 400°C
1	18,0	11,0 mm
4	9,0	5,6 mm
10	6,0	3,6 mm
20	4,1	2,5 mm
100	1,8	1,2 mm
400	0,9	0,5 mm
700	0,7	0,3 mm

Das Zusammenspiel von magnetischen und elektrischen Einflüssen führt zu einem optimalen Verhältnis zwischen Durchmesser des Werkstückes und Eindringtiefe (je nach Frequenz). Dieses Verhältnis beträgt $D / \delta > 4$. Daraus folgt, dass man in zu dünne Werkstücke nur schwer Energie einkoppeln kann. Wirtschaftlich vertretbare Grenzen ergeben sich in etwa wie folgt:

kleinster, noch wirtschaftlich zu erwärmender Durchmesser für Stahl	GENERATORFREQUENZ zu Durchmesser				
	1 kHz	3 kHz	10 kHz	200 kHz	450 kHz
Grad Celsius					
540°C (spannungsarm Glühen)	9mm	5mm	3mm	0,6mm	0,4mm
875°C (Härten)	69mm	38mm	18mm	4,8mm	3,2mm

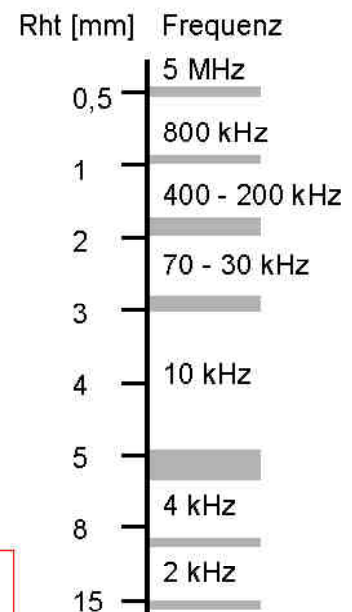
1.5 Benennung der Frequenzbereiche und empfohlene Frequenzen

Einteilung der Frequenzbereiche (willkürlich)



Bei Gesamtflächenhärtung können für Rht bis ca. 10 mm Frequenzen von ca. 10 kHz eingesetzt werden!

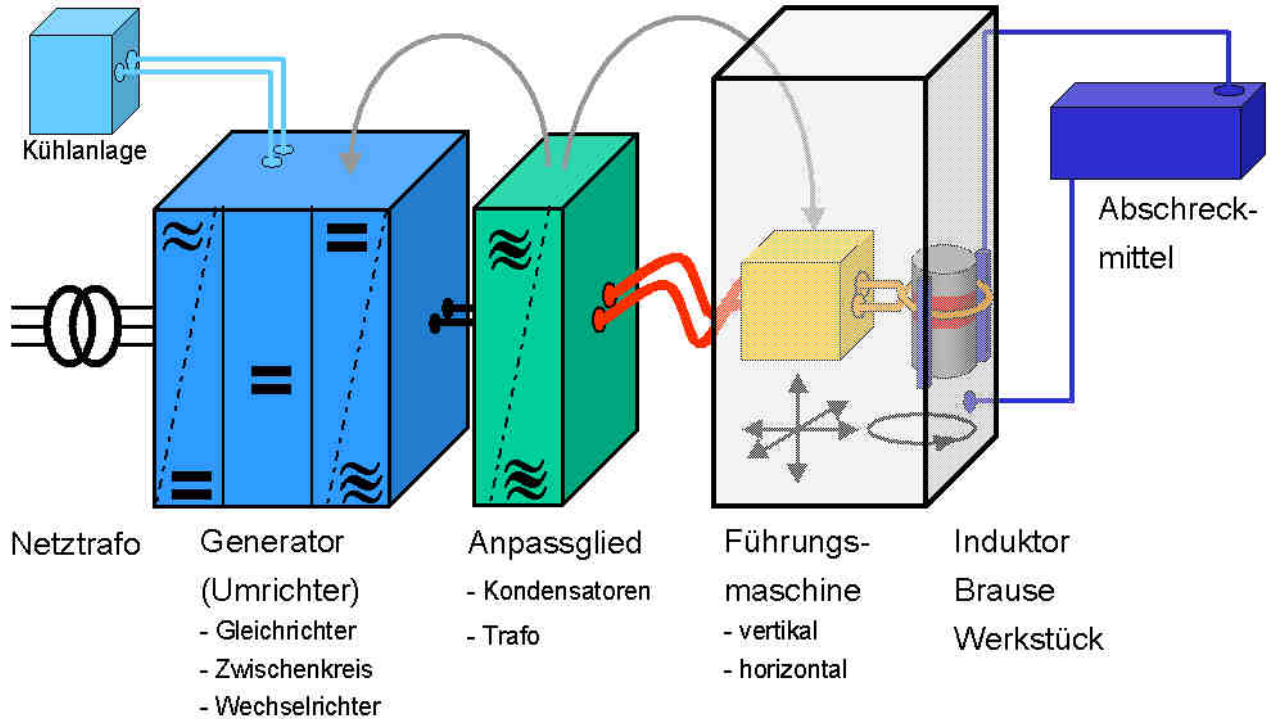
Für Vorschubhärtung empfohlene Frequenzen



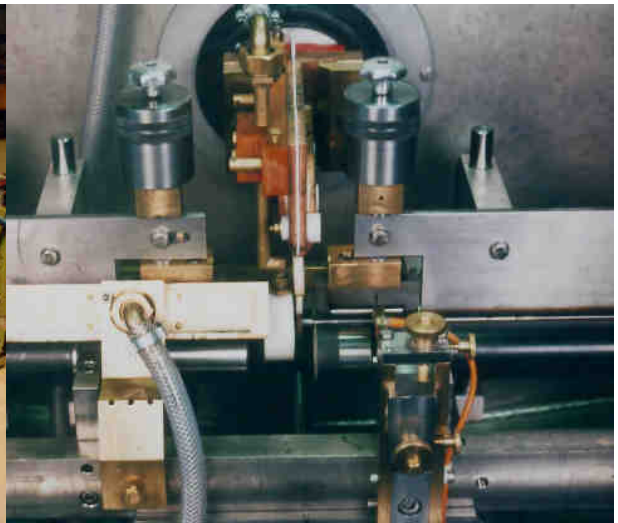
2. Aufbau einer Induktionsanlage

2.1 Grundaufbau

Gemäß den Anforderungen an das Werkstück ist es notwendig, die richtige Maschinenart und Generatortyp für einen optimalen Härteprozess bereitzustellen. Bedingt durch den hohen Energiebedarf sind die Generatoren und natürlich auch die Induktoren wassergekühlt. Das Abschreckmedium ist meist ein Wasser / Polymer- Gemisch für kontrollierte Abkühlgeschwindigkeiten.



2.2 Induktionshärteanlagen in der Praxis



Vertikalhärteanlagen mit versch. Generatoren

Ausschnitt Horizontalhärteanlage

3. Härte in Abhängigkeit der kritischen Abschrecktemperatur

3.1 Werkstoffeigenschaften und Härtegefüge, das ZTU-Diagramm

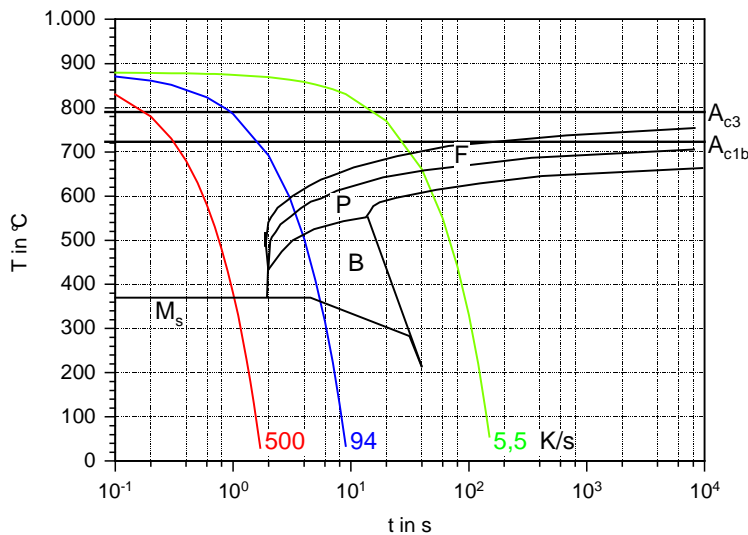
Für jeden Werkstoff beschreibt das ZTU- Diagramm die Temperaturzustände. Zuerst erfolgt die Erwärmung auf Austenitisierungstemperatur. Danach wird das Teil mit Wasser, Abschreckmedium (Polymer), Öl, Stickstoff oder an Luft abgeschreckt. Dabei durchläuft der Werkstoff verschiedene Umwandlungsphasen. Die zeitliche Abfolge dieser Phasen haben eine entscheidende Bedeutung auf das Endergebnis.

Solange bei der Abkühlung nicht der Bereich der Perlitphase (P) und Bainit-Phase (B) durchlaufen wird (rote Kurve), entsteht das gewünschte Martensitgefüge. Ist die Abkühlgeschwindigkeit zu gering, entstehen unterschiedliche Mischgefüge.

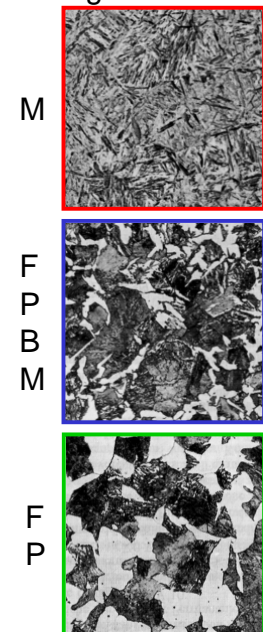
ZTU-Diagramm - Variation Abkühlraten



C45 (1.0503)



Gefügebestandteile



Quellen: Rose A.; Peter W.: Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, Band 1
Hougardy H.P.: Umwandlung und Gefüge unlegierter Stähle

© EFD Induction GmbH

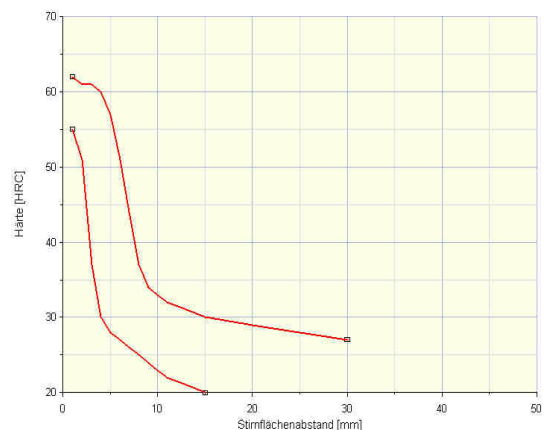
STH/02-

3.2 Maß für die Härte, die Stirnabschreckkurve

Als Anhaltswert kann die aus der klassischen Härtetechnik bekannte Stirnabschreckkurve herangezogen werden. Der Stirnabschreckversuch nach Jominy liefert Aussagen über die Härtebarkeit eines Stahls mit Wasserstrahlabschreckung. Die Stirnabschreckkurve zeigt den möglichen Härteverlauf im Werkstück vom abgeschreckten Rand zum Kern. Details entnehmen Sie bitte der DIN EN ISO 642.

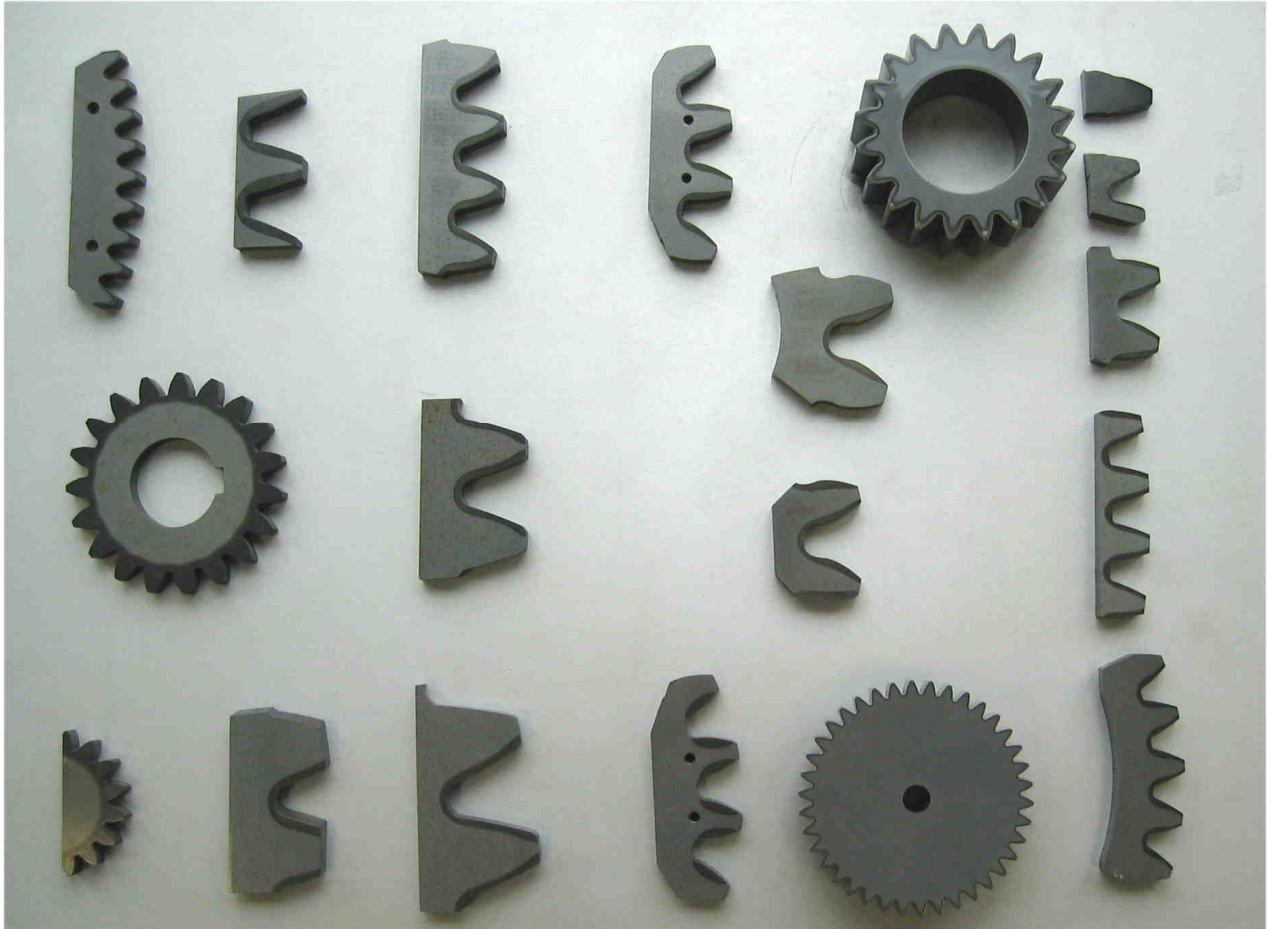
Das nebenstehende Bild zeigt den Verlauf für C45 (Werkstoff-Datenbank Dr. Sommer, NaviMat).

In der Induktionspraxis sollte berücksichtigt werden, dass zur **Minderung der späteren Rissgefahr** ein **Anlassprozess** notwendig ist, der die **Endhärte** noch etwas **minimiert**.



4. Härtezonen, ein paar Beispiele

Je nach Geometrieform und eingesetzter Härtetechnik ergeben sich die möglichen Härteprofile.



Unterschieden wird bei der Härtung in 2 Hauptgruppen.

Standhärtung mit Forminduktor für die komplette Härtefläche. Üblich mit Werkstückrotation (Gesamtflächenhärtung)

Vorschubhärtung. Die Härtezone entsteht durch gezielter Erwärmung entlang des Werkstücks. Üblich mit Werkstückrotation.

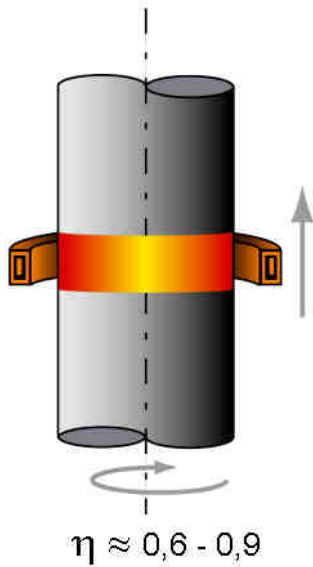


Darüber hinaus gibt es, abgeleitet aus diesen Grundverfahren, verschiedenste Varianten wie Zahnlücken- Zahnflankenhärtung, Umfang- Vorschub- und Kurvenhärtung usw.

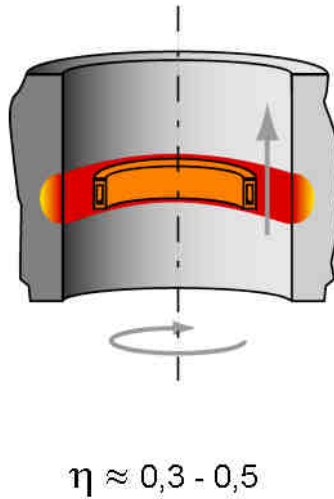
5. Induktorbauformen in Theorie und Praxis

Abschließend noch einen kleinen Auszug der vielfältigen Induktorbauformen

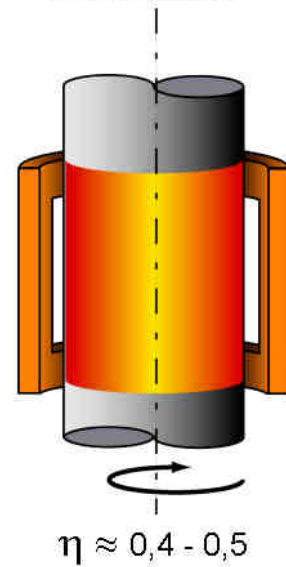
Ringinduktor Innenfeld



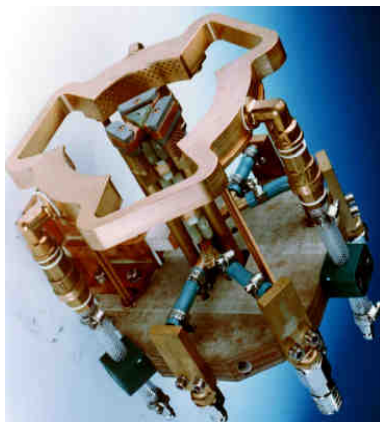
Ringinduktor Aussenfeld



Gesamtflächeninduktor
Linearinduktor



η = Wirkungsgrad



← **Härtekopf für Gelenkgehäuse**
Forminduktor mit Feldkonzentratoren
Abschirmbrausen außen

Multifrequenz - Generator
Konturgetreues Härten mit
Hoch- und Mittelfrequenz
zeitgleich auf einen Induktor ⇒

