

WS/SS	Universität Hannover Institut für Elektrowärme	Name:	
19...	Elektrowärmelabor II	Matr.-Nr.:	
Versuch W3		Dat.:	Gr.:
Induktionstiegelofen		Testat:	
Versuchsleiter:			

Inhaltsverzeichnis

- 1 Allgemeine Grundlagen
- 2 Aufgabenstellung

1 Allgemeine Grundlagen

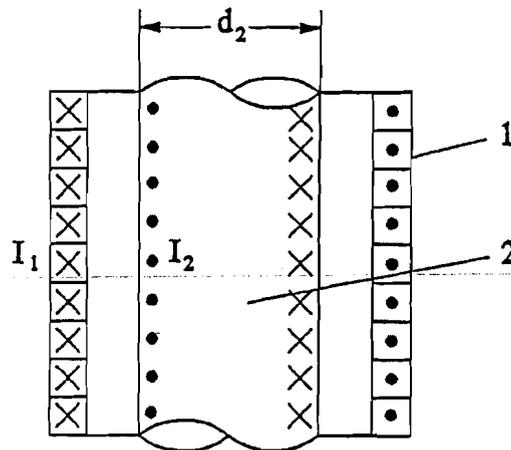


Bild 1: Prinzip der induktiven Erwärmung

Fließt in einer Spule 1 der Wechselstrom I_1 der Frequenz f , so erzeugt dieser ein elektromagnetisches wechselfeld, das in den Einsatz 2 eindringt mit der Eindringtiefe

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \kappa}}$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

κ = elektrische Leitfähigkeit des Einsatzmaterials

Dieses eindringende Wechselfeld erwärmt den Einsatz, indem es im Einsatz den Wirbelstrom I_2 erzeugt, der dem treibenden Spulenstrom I_1 zeitlich mehr oder weniger stark entgegengerichtet ist (je nach Einsatzmaterial). Diese Betrachtungsweise setzt allerdings voraus, daß der Einsatz elektrisch aus einem leitendem Zylinder der Wanddicke δ bestehend aufgefaßt wird, in dem der Strom I_2 fließt. Es sei also $\delta \ll d_2$. Es gelten also die Transformatorgleichungen für sekundären Kurzschluß.

$$\underline{U} = \underline{I}_1 (R_1 + j\omega L_1) + \underline{I}_2 j\omega M$$

$$0 = \underline{I}_1 j\omega M + \underline{I}_2 (R_2 + j\omega L_2)$$

mit dem Übersetzungsverhältnis der Ströme I_2/I_1

$$p = \frac{-j\omega M}{R_2 + j\omega L_2}$$

p ist eine komplexe Zahl und wird erst dann eine reelle Größe wenn $R_2=0$. Dies wäre der Fall, wenn ein supraleitender Einsatz vorläge, oder geschlossener Transformator im Kurzschluß mit supraleitender Sekundärwicklung. Beim eisengeschlossenen Transformator darf diese Idealisierung meistens gemacht werden, in unserem Fall des widerstandsbehafteten Einsatzes jedoch nicht. Mit wachsendem R_2 wird p kleiner. Ein weiterer Unterschied zum eisengeschlossenen Transformator besteht in der Gegeninduktivität M . Sie gibt an, wieviel vom magnetischen Wechselfluß der Primärspule bezogen auf den Primärstrom die Sekundärseite als Nutzfluß durchsetzt

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{I_1}$$

wobei $\Psi_{12} = n_2 \phi_{12}$

und wieviel Spannung auf der Sekundärseite induziert wird

$$e_2 = - \frac{d\Psi_{12}}{dt} = - \frac{dI_1}{dt} \cdot M_{12}$$

Ebenso gilt die Betrachtungsweise von der Sekundärseite aus

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{I_2}$$

wobei $\Psi_{21} = n_1 \phi_{21}$

$$e_1 = - \frac{d\Psi_{21}}{dt} = - \frac{dI_2}{dt} \cdot M_{21}$$

Beim idealisierten eisengeschlossenen Transformator gilt nun, daß der gesamte die Primärwicklung durchsetzende magnetische Fluß auch die Sekundärwicklung durchsetzt, also:

$$\phi_1 = \phi_{12}$$

Weiter gilt:

$$n_1 \phi_1 = \Psi_1 = L_1 I_1 \quad \text{und} \quad n_2 \phi_{12} = \Psi_{12} = M_{12} I_1$$

oder von der Sekundärwicklung her betrachtet

$$\rightarrow \frac{L_1}{n_1} = \frac{M_{12}}{n_2}$$

multipliziert man die beiden letzten Gleichungen miteinander und berücksichtigt, daß $M_{12} = M_{21} = M$, so ergibt sich

$$M = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

Dies gilt beim Lufttransformator nicht mehr, da sich dort der Primärfluß aufteilt in einen Nutzfluß ϕ_{12} , der den Sekundärteil durchsetzt und einen Streufluß $\phi_{1\sigma}$ der zwischen Primär- und Sekundärteil hindurchgeht.

Also:

$$\phi_1 = \phi_{12} + \phi_{1\sigma} \neq \phi_{12}$$

d.h. die Gegeninduktivität M wird kleiner und es gilt nun:

$$\frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} = k < 1$$

wobei k den Kopplungsfaktor darstellt. Je kleiner der Kopplungsfaktor wird, desto größer wird der Streufaktor

$$\sigma = 1 - k^2$$

Mit wachsendem Streufaktor wird also über die kleiner werdende Gegeninduktivität p ebenfalls kleiner.

Auf der folgenden Seite ist das Zeigerbild dargestellt.

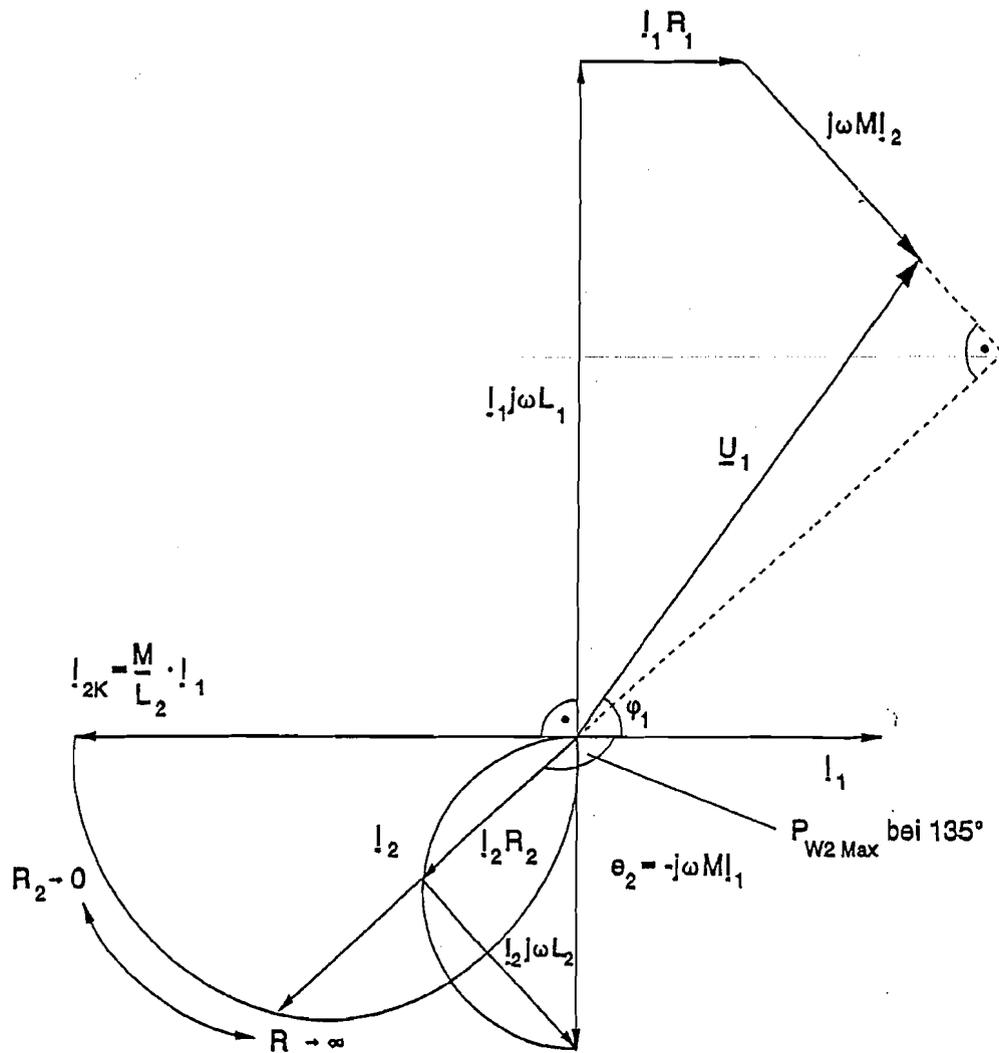


Bild 2: Zeigerbild des Induktionsrinnenofens

Man erkennt deutlich das Maximum der im Einsatz umgesetzten Wirkleistung $P_{W2} = U_{R2} \cdot I_2$ bei einem Phasenwinkel von 135° zwischen I_1 und I_2 . Dieser Betriebsfall liegt vor, wenn

$$R_2 = \omega L_2$$

wobei $R_2 = f_1(\text{Geometrie, Frequenz, Material})$
 $\omega L_2 = f_2(\text{Geometrie, Frequenz})$

$$\text{Mit } |p^2| = p \cdot p^* = \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (p^2 \text{ ist immer reell})$$

$$\text{wird } \underline{U}_1 = \left[R_1 + p^2 R_2 + j\omega (L_1 - p^2 L_2) \right] \cdot \underline{I}_1$$

$$\text{oder } \underline{U}_1 = \underline{I}_1 \cdot (R_{\text{gesamt}} + j\omega L_{\text{gesamt}})$$

Bei Lufttransformatoren mit gutleitendem Einsatz ist der Streuteil immer besonders groß, so daß man sehr starkes induktives Verhalten der Anordnung erhält, d.h. der Zeiger I_2 rutscht in die Nähe von I_{2K} . Damit aber wird $|I_2|$ relativ unabhängig vom Einsatzmaterial, und die im Einsatz verbrauchte Wirkleistung wird in erster Näherung proportional dem Wechselstromwiderstand des gedachten stromführenden Hohlzylinders der Dicke δ .

$$P_w = |I_2|^2 \cdot R_{2\sim} = |I_2|^2 \cdot \frac{\pi(d_2 - \delta)}{l \cdot \delta} \cdot \rho ; \quad l = \text{Zylinderlänge}$$

Mit

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \kappa}} , \quad \kappa = \frac{1}{\rho} , \quad d_2 \gg \delta , \quad \text{und } I_2 \approx \text{const}$$

wird

$$P_w \sim \sqrt{\rho \mu_r}$$

wenn die Abmessungen der verschiedenen Einsätze gleich bleiben und Frequenz und Spannung nicht verändert werden. - Ändern sich zusätzlich Spannung und Frequenz, so wird

$$I_2 \approx \frac{U_2}{\omega L_\sigma} \quad \text{da Streuinduktivität } L_\sigma \gg \frac{R_{2\sim}}{\omega}$$

und es ergibt sich

$$P_w = |I_2|^2 \cdot R_{2\sim} \sim U_2^2 \sqrt{\frac{\rho \mu_r}{f^3}}$$

An folgender Anordnung soll experimentiert werden.

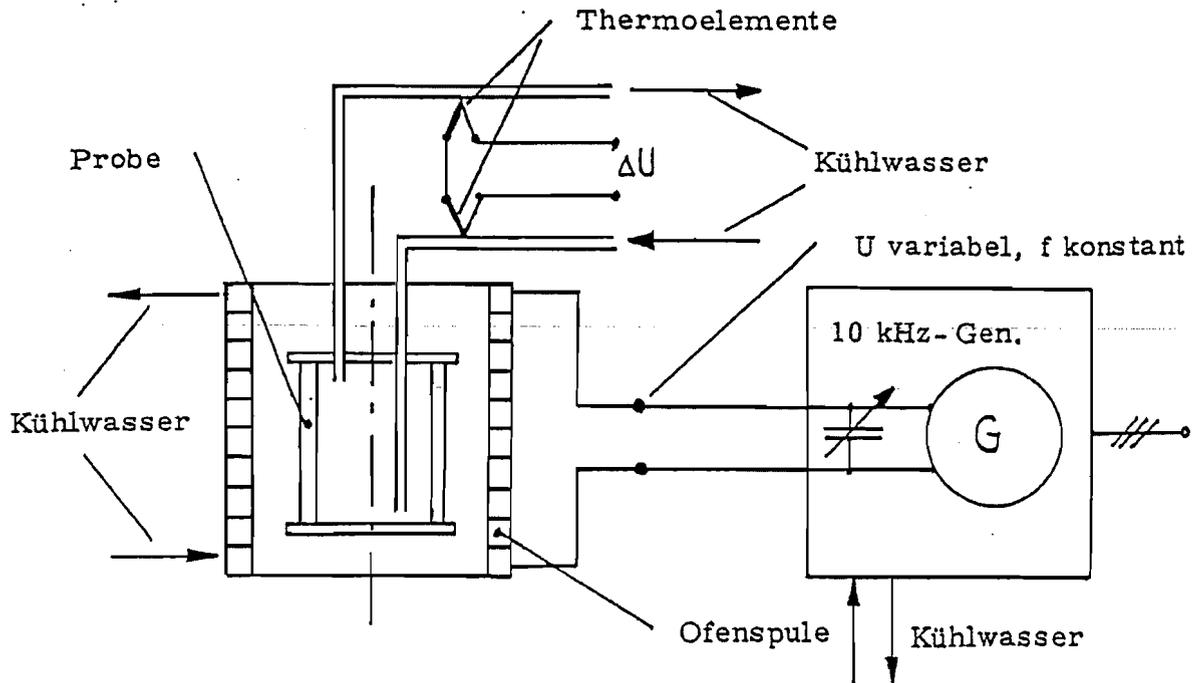


Bild 3: Versuchsanordnung

2 Aufgabenstellung:

- 1) Proben aus Kupfer, Aluminium, Messing und Eisen sind bezüglich der aufgenommenen Leistung kalorimetrisch zu untersuchen und miteinander zu vergleichen.
- 2) Das Verhältnis der aufgenommenen Wirkleistungen bei den einzelnen Proben ist rechnerisch zu überprüfen, entsprechend $P_w \sim U_2^2 \sqrt{\rho \mu_r}$
- 3) Ein Hohlzylinder aus Stahl ist mit konstanter Ofenspannung $U \approx 200V$ bis zur Endtemperatur zu erwärmen. Die Temperatur ist als Funktion der Zeit mit Hilfe eines Schreibers darzustellen.

- 4) Der Zylinder aus 3) ist mit konstanter Leistung $P_2 \approx 7\text{kW}$ auf seine Endtemperatur zu bringen.

Da die wassergekühlten Abstimmungskondensatoren ebenfalls Wirkleistung verbrauchen, die auf dem Leistungsmesser mit angezeigt wird, muß vorher bei Leerlauf die Abhängigkeit dieser Verlustleistung von der Ofenspannung bestimmt werden. Die Ofenspannung ist dann so zu regeln, daß die angezeigte Leistung der Summe aus der konstanten Leistung und der spannungabhängigen Verlustleistung der Kondensatoren ist. Aufheiz- und Abkühlvorgang sind graphisch darzustellen.

Fragen:

Warum entsteht bei Punkt 3) ein stark ausgeprägter Knick in der Kurve?

Warum entsteht trotz konstanter Leistung Leistung beim Aufheizen des Stahlzylinders unter Punkt 4) keine regelmäßige Temperatur-Zeit-Funktion, was fällt bei der Abkühlkurve auf?