

# Übertrager

Versuch Nr.

# 7

## Erforderliche Geräte

Anzahl	Bezeichnung, Daten	GL-Nr.
1	Oszilloskop	281
1	Dreheisen-Strommesser	181
1	Vielfachmessgerät	124
1	Teslameter mit Flachsonde	208
1	Regeltrenntrafo 100V, 1A	209
1	Netzgerät 5V, 1A	195
1	Widerstandsdekade 1Ω/Schritt	11
1	Widerstandsdekade 10Ω/Schritt	12
1	U-Eisenkern mit Joch, Halterung und Auflageplättchen 2mm	
1	Primärspule 300 Wdg.	
1	Sekundärspule 600 Wdg.	
1	Widerstand 16kΩ	
1	Kondensator 10μF	
1	Steckbrett	
2	Koaxialkabel 1m, BNC / 2 Bananenstecker	

Datum:

Name:

Versuch durchgeführt:

---

# 1 Theoretische Grundlagen

## 1.1 Beschreiben und Berechnen des magnetischen Feldes, Durchflutungsgesetz

Das magnetische Feld äußert sich ähnlich wie das Gravitationsfeld oder das elektrische Feld in Kraftwirkungen. Die magnetische Induktion oder magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  ist definiert aus der Kraft  $\vec{F}$ , die auf eine mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  bewegte Punktladung  $Q$  wirkt entsprechend

$$\vec{F} = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

Die Kraft  $\vec{F}$  heißt Lorentzkraft. Die vektoriellen Größen und die Punktladung  $Q$  in Gleichung (1) sind in Bild 1 dargestellt.

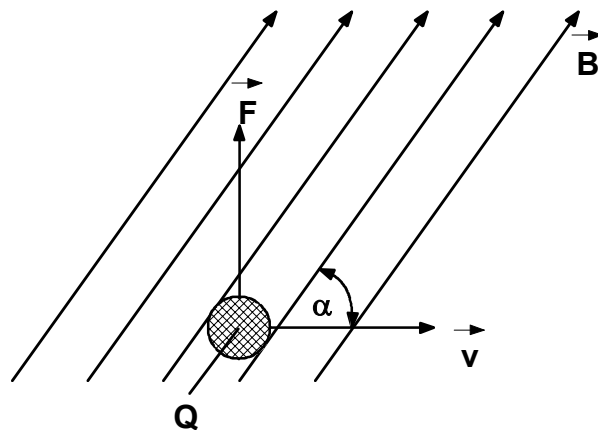


Bild 1 Zum Entstehen der Lorentzkraft  $\vec{F}$ , die auf eine mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  im magnetischen Feld der Induktion  $\vec{B}$  bewegte Punktladung  $Q$  wirkt

Der Betrag  $|\vec{F}|$  der Lorentzkraft ergibt sich zu

$$|\vec{F}| = |Q| \cdot |\vec{v}| \cdot |\vec{B}| \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

wobei  $\alpha$  der Winkel zwischen den Vektoren  $\vec{v}$  und  $\vec{B}$  ist. Der Vektor  $\vec{F}$  steht senkrecht auf den Vektoren  $\vec{v}$  und  $\vec{B}$ . Die Vektoren  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$  und  $\vec{F}$  bilden für  $Q > 0$  ein Rechtssystem, siehe Bild 2.

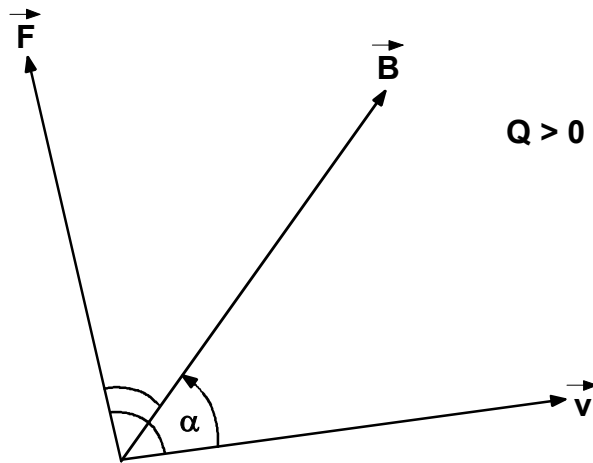


Bild 2 Die Vektoren  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$  und  $\vec{F}$  bilden für  $Q > 0$  ein Rechtssystem

Das Messprinzip des Hallgenerators, der im vorliegenden Versuch eingesetzt wird, beruht auf der Definitionsgleichung (1) der Induktion  $\vec{B}$  und ist in der Anleitung zu Versuch 8 des Grundlagenlabors I erläutert. Die Ursache der Induktion  $\vec{B}$  sind bewegte Ladungen. Im homogenen Raum erhält man die von einem Leiterelement  $\vec{ds}$  mit dem Gleichstrom  $I$  verursachte Induktion  $\vec{dB}$  an einem Ort, der vom Leiterelement die Entfernung  $\vec{r}$  hat, zu

$$\vec{dB} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{I}{r^2} \cdot \left( \vec{ds} \times \frac{\vec{r}}{r} \right) \quad (3)$$

wobei  $\mu$  die Permeabilität des homogenen Raums ist, siehe Bild 3.

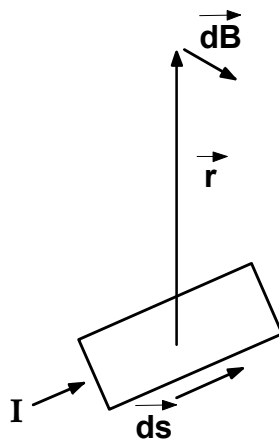


Bild 3 Induktion  $\vec{dB}$ , die vom Leiterelement  $\vec{ds}$  mit dem Gleichstrom  $I$  am Ort  $\vec{r}$  verursacht wird

Die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  ist der Quotient aus Induktion  $\vec{B}$  und Permeabilität  $\mu$ , d.h.

$$\vec{H} = \vec{B} / \mu \quad (4)$$

Im homogenen Raum hängt  $\vec{H}$  nur von den felderzeugenden Strömen ab und nicht von  $\mu$ . Nach dem Durchflutungsgesetz ist in einem beliebigen, von Strömen durchflossenen Raum das Wegintegral der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$  längs eines geschlossenen Weges gleich der Summe  $\theta$  aller Ströme, die von dem geschlossenen Weg umfasst werden, d.h.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \sum_{v=1}^N k_v \cdot I_v = \theta \quad (5)$$

wobei rechtswendig umschlossene Ströme mit  $k_v = 1$  und linkswendig umschlossene Ströme mit  $k_v = -1$  gewichtet werden. Die Summe aller Ströme heißt Durchflutung  $\theta$ .

Die skalare Größe

$$\Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (6)$$

die als magnetischer Fluss bezeichnet wird, ist ein Maß für die resultierende Wirkung des magnetischen Feldes in einer Fläche  $A$ .

Der Vektor  $d\vec{A}$  zeigt in Richtung der Flächennormalen auf der Außenseite des Flächenelements, und der Betrag des Vektors  $d\vec{A}$  ist gleich der Fläche des Flächenelements.

## 1.2 Magnetisches Feld in ferromagnetischen Stoffen

Bei ferromagnetischen Stoffen ist der Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$  und der magnetischen Induktion  $\vec{B}$  nichtlinear und im Allgemeinen nicht eindeutig. Der Zusammenhang zwischen den skalaren Größen  $B$  und  $H$  wird durch Hysteresekurven beschrieben, siehe Bild 4.

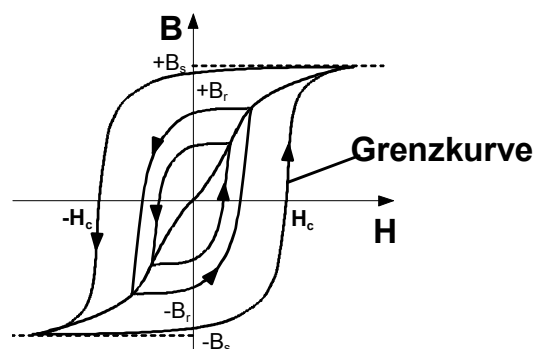


Bild 4 Hysteresekurve eines ferromagnetischen Materials

Für betragsmäßig sehr große Werte von  $H$  ist man im Bereich der magnetischen Sättigung des Materials. Im Sättigungsbereich nimmt der Betrag von  $B$  bei weiter wachsendem Betrag von  $H$  nur noch geringfügig zu. Der spezielle Verlauf der Hysteresekurve bei Aussteuerung bis in die Sättigung ist charakteristisch für das jeweilige Material und heißt Grenzkurve. Wichtige Kenngrößen der Grenzkurve sind die Sättigungsinduktion oder Sättigungsflussdichte

$$B_s = B(H \rightarrow \infty) \quad (7)$$

die Remanenzinduktion oder Remanenzflussdichte

$$B_r = B(H=0) \quad (8)$$

und die Koerzitivfeldstärke

$$H_c = H(B=0) \quad (9)$$

Wird das Material nicht bis in die Sättigung angesteuert, ergeben sich ebenfalls Hysteresekurven, die innerhalb der Grenzkurve liegen.

Die Form der Hystereseschleife ist je nach Material stark unterschiedlich. Stoffe mit geringer Koerzitivfeldstärke  $H_c$  nennt man magnetisch weich, da sie ihre magnetische Polarisierung leicht verlieren. Reines Eisen ist magnetisch weich. Magnetisch weiche Stoffe werden eingesetzt, wenn die Magnetisierung den Änderungen der Erregung gut folgen soll. Stoffe mit hoher Koerzitivfeldstärke  $H_c$ , etwa für  $H_c > 10^4 \text{ A/m}$ , nennt man magnetisch hart, da sie ihre Magnetisierung erst durch starke Gegenfelder verlieren. Sie dienen zur Herstellung von Dauermagneten. Gehärteter Stahl ist magnetisch hart.

Ferrimagnetische Substanzen oder Ferrite bestehen aus zusammengesinterten Oxiden von Eisen, Nickel, Mangan, Zink und Kadmium. Die Ferrite haben im Gegensatz zu den ferromagnetischen Metallen einen sehr hohen spezifischen elektrischen Widerstand. Da wegen des hohen elektrischen Widerstands bei Ferriten Wirbelströme praktisch nicht auftreten, werden sie vor allem bei höheren Frequenzen als Kerne für Spulen verwendet.

### 1.3 Ohmsches Gesetz des magnetischen Kreises

Ausgegangen wird von einem ferromagnetischen Rahmen mit der effektiven Weglänge  $l_e$ , der von  $n$  Windungen einer Spule umschlossen ist, siehe Bild 5.

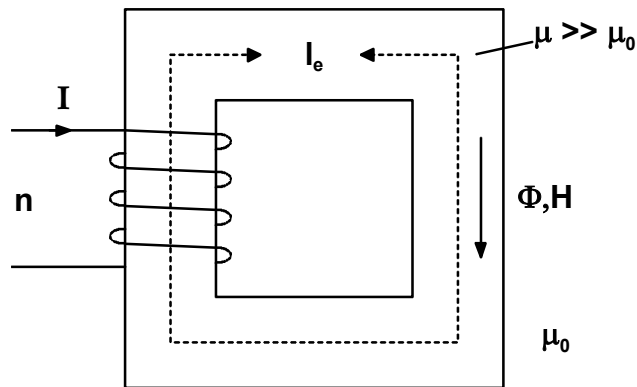


Bild 5 Ferromagnetischer Rahmen, der von  $n$  Windungen umschlossen ist

Da die Permeabilität im Rahmen sehr viel größer ist als die der Umgebung, kann in guter Näherung davon ausgegangen werden, dass die Induktionslinien vollständig im Rahmen verlaufen. Dann ergibt sich durch Anwenden des Durchflutungsgesetzes (5)

$$\oint_{l_e} \vec{H} \cdot d\vec{s} = H \cdot l_e = I \cdot n \quad (10)$$

Für den magnetischen Fluss im Rahmen folgt mit (6)

$$\Phi = B \cdot A = \mu \cdot H \cdot A = \frac{\mu \cdot A}{l_e} \cdot I \cdot n = \frac{\mu \cdot A}{l_e} \cdot \theta \quad (11)$$

Der im Rahmen auftretende magnetische Fluss  $\Phi$  ist proportional zu seiner Ursache, der Durchflutung  $\theta$ . Der Proportionalitätsfaktor hängt nur ab vom Material und der Geometrie des magnetischen Kreises. Analog zum Ohmschen Gesetz  $I = U \cdot G$ , das in ähnlicher Weise über den elektrischen Leitwert die Verknüpfung von Ursache (elektrische Spannung  $U$ ) und Wirkung (elektrischer Strom  $I$ ) im elektrischen Kreis beschreibt, wird die Größe

$$\Lambda = \frac{\mu \cdot A}{l_e} \quad (12)$$

als magnetischer Leitwert des Rahmens bezeichnet. Der Kehrwert des magnetischen Leitwerts ist der magnetische Widerstand

$$R_m = \frac{1}{\Lambda} \quad (13)$$

des Rahmens. Das ohmsche Gesetz des magnetischen Kreises lautet allgemein

$$\Phi = \theta \cdot \Lambda = \theta / R_m \quad (14)$$

Die Anordnung nach Bild 5 aus magnetischem Rahmen und stromdurchflossener Spule kann durch das Ersatzschaltbild nach Bild 6 beschrieben werden.

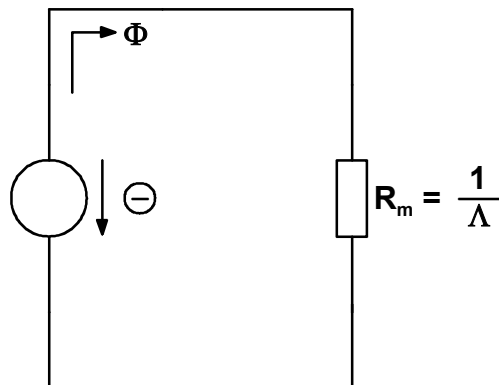


Bild 6 Ersatzschaltbild des magnetischen Rahmens mit stromdurchflossener Spule

In Tabelle 1 sind zueinander analoge Größen des elektrischen Stromkreises und des magnetischen Kreises gegenübergestellt.

Tabelle 1 Analoge Größen des magnetischen und elektrischen Kreises

Magnetischer Kreis	Elektrischer Stromkreis
Magnetischer Fluss $\Phi$	Elektrischer Strom $I$
Magnetischer Widerstand $R_m$	Elektrischer Widerstand $R$
Magnetischer Leitwert $\Lambda$	Elektrischer Leitwert $G$
Durchflutung $\theta$	Quellenspannung $U$

Bei Rahmen mit einem schmalen Luftspalt der Breite  $\delta$ , der senkrecht zu den Induktionslinien verläuft, siehe Bild 7, ist das magnetische Feld im Luftspalt nahezu homogen.

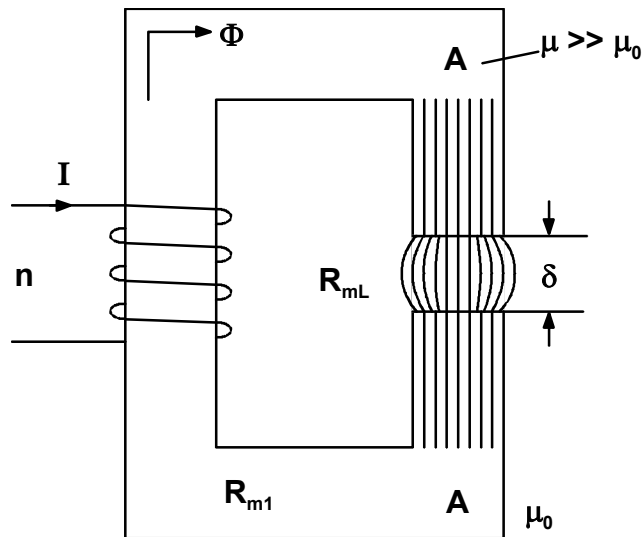


Bild 7 Magnetischer Rahmen mit Luftspalt

Der magnetische Teilwiderstand

$$R_{mL} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot A} \quad (15)$$

Das Ersatzschaltbild des magnetischen Rahmens mit Luftspalt ist in Bild 8 dargestellt.

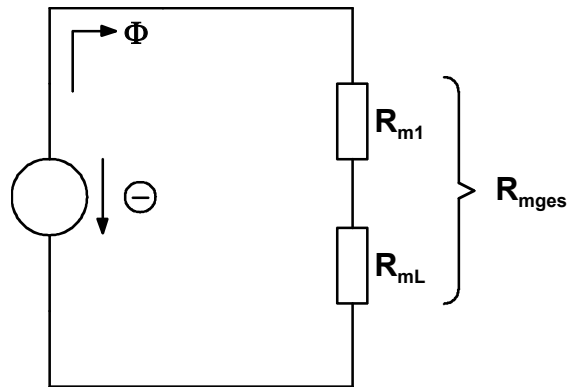


Bild 8 Ersatzschaltbild des magnetischen Rahmens mit Luftspalt

Der gesamte magnetische Widerstand des Rahmens mit Luftspalt ergibt sich zu

$$R_{mges} = R_{m1} + R_{mL} \approx R_{mL}, \quad \text{da wegen } \mu \gg \mu_0 \quad R_{mL} \gg R_{m1} \quad (16)$$



## 1.4 Induktionsgesetz

Ändert sich der mit einer Leiterschleife verkettete magnetische Fluss  $\Phi$ , so wird nach dem Induktionsgesetz in der Leiterschleife die Spannung

$$u_0 = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (17)$$

induziert, siehe Bild 9.

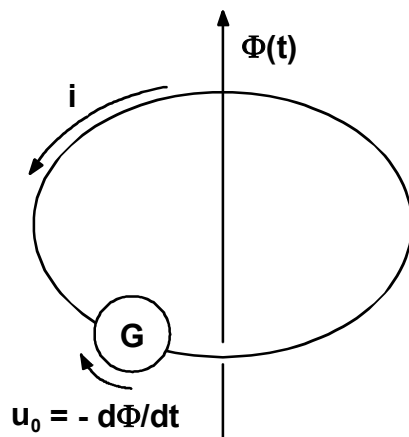


Bild 9 Leiterschleife mit verkettetem magnetischem Fluss  $\Phi$  und induzierter Spannung  $u_0$

Die Induktionswirkung kann ersatzweise beschrieben werden durch eine ideale Spannungsquelle mit der Quellspannung  $u_0$ . Bei der Vorzeichenwahl in (17) sind die Zählpfeile von  $d\Phi/dt$  und  $u_0$  so festgelegt, dass eine positive Feldänderung linkswendig von der induzierten Spannung umschlossen wird. Die Spannung  $u_0$  bewirkt einen Strom

$$i = \frac{u_0}{R} \quad (18)$$

unter der Voraussetzung des Verbraucherzählpfeilsystems, wobei  $R$  die als reell angenommene Impedanz der Leiterschleife ist. Dieser Strom wirkt mit seinem ihn umgebenden Magnetfeld der Flussänderung entgegen.

Werden mehrere Leiterschleifen vom gleichen, zeitlich veränderlichen magnetischen Fluss durchsetzt, addieren sich die induzierten Spannungen eines jeden Umlaufs, und zwar mit entsprechendem Vorzeichen je nach Wicklungssinn zu

$$u_0 = \sum_{v=1}^n - \frac{d\Phi_v}{dt} = - \frac{d\psi}{dt} \quad (19)$$

Der gesamte magnetische Fluss  $\psi$  heißt Spulenfluss oder Induktionsfluss. Werden  $n$  Windungen mit gleichem Wicklungssinn vom gleichen magnetischen Fluss durchsetzt, so gilt für den Spulenfluss

$$\psi = n \cdot \Phi \quad (20)$$

und für die induzierte Spannung

$$u_0 = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (21)$$

## 1.5 Induktivität und Selbstinduktion

Die Induktivität einer Spule ist definiert zu

$$L = \left| \frac{\psi}{i} \right| \quad (22)$$

wobei  $i$  der Spulenstrom und  $\psi$  der von diesem Strom erzeugte Spulenfluss ist. Sind wie in Bild 5 alle Windungen vom gleichen magnetischen Fluss  $\Phi$  durchsetzt, so ergibt sich aus (20), (14) und (10)

$$L = \left| \frac{\psi}{I} \right| = \left| \frac{n \cdot \Phi}{i} \right| = \left| \frac{n \cdot \theta \cdot \Lambda}{i} \right| = \left| \frac{n \cdot n \cdot i \cdot \Lambda}{i} \right| = n^2 \cdot \Lambda \quad (23)$$

der Zusammenhang zwischen Induktivität  $L$  und magnetischem Leitwert  $\Lambda$ . Der magnetische Leitwert  $\Lambda$  ist die auf die Windungszahl  $n = 1$  bezogene Induktivität.

Soll durch eine widerstandsfreie Spule mit der Induktivität  $L$  der Strom  $i(t)$  fließen, muss man an die Klemmen der Spule die Spannung

$$u(t) = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (24)$$

legen. Dabei wird das Verbraucherzählpfeilsystem vorausgesetzt.

## 1.6 Gegeninduktivität und Gegeninduktion

Die Gegeninduktivität  $M$  zweier Stromkreise ist definiert zu

$$M = \left| \frac{\Psi_{12}}{i_1} \right| = \left| \frac{\Psi_{21}}{i_2} \right| \quad (25)$$

wobei  $i_{1/2}$  der Strom des Stromkreises 1 bzw. 2 und  $\psi_{21}$  bzw.  $\psi_{12}$  der vom Strom  $i_2$  bzw.  $i_1$  im Stromkreis 1 bzw. 2 erzeugte Spulenfluss ist. Sind alle Windungen der beiden Spulen vom gleichen magnetischen Fluss  $\Phi$  durchsetzt, siehe Bild 10, so ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Gegeninduktivität  $M$  und dem magnetischen Leitwert  $\Lambda$  zu

$$M = \left| \frac{\psi_{12}}{i_1} \right| = \left| \frac{n_2 \cdot \Phi}{i_1} \right| = \left| \frac{n_2 \cdot \theta_1 \cdot \Lambda}{i_1} \right| = \left| \frac{n_2 \cdot n_1 \cdot i_1 \cdot \Lambda}{i_1} \right| = n_1 \cdot n_2 \cdot \Lambda . \quad (26)$$

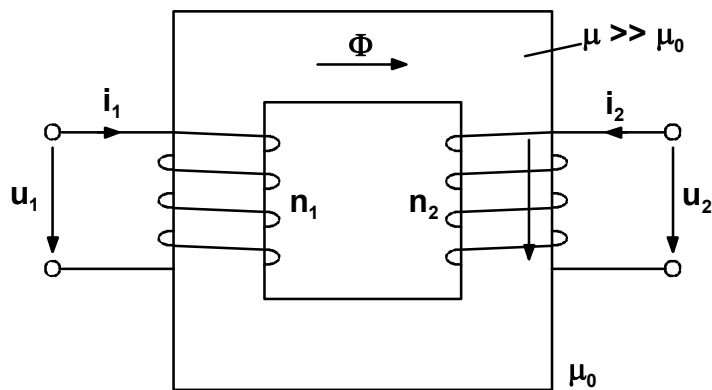


Bild 10 Magnetischer Rahmen mit zwei Spulen

Im streuungsfreien Fall gilt somit

$$M = \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (27)$$

Mit Streuung gilt

$$M < \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (28)$$

Bei der Anordnung in Bild 10 verursacht ein sich ändernder Strom  $i_1$  durch den mit Spule 2 gekoppelten Fluss eine Spannung

$$u_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (29)$$

Dieser Vorgang wird als Gegeninduktion bezeichnet.

## 1.7 Übertrager

Ein Übertrager oder Transformator besteht aus zwei magnetisch miteinander gekoppelten Spulen, siehe Bild 10, der Primärspule 1 und der Sekundärspule 2. Selbstinduktions- und Gegeninduktionsspannung überlagern sich, so dass beim Wicklungssinn und der Zählpfeilwahl entsprechend Bild 10

$$u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (30a)$$

und

$$u_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (30b)$$

gilt. Bei sinusförmigen Wechselvorgängen mit der Kreisfrequenz  $\omega$  gilt für die zu den Zeitverläufen  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  gehörenden komplexen Amplituden  $\hat{u}_1$ ,  $\hat{u}_2$ ,  $\hat{i}_1$ ,  $\hat{i}_2$  analog

$$\hat{u}_1 = j\omega L_1 \cdot \hat{i}_1 + j\omega M \cdot \hat{i}_2 \quad (31a)$$

und

$$\hat{u}_2 = j\omega M \cdot \hat{i}_1 + j\omega L_2 \cdot \hat{i}_2 \quad (31b)$$

Die Gleichungen (30) und (31) heißen Transformatorgleichungen,  $L_1$  heißt Primärinduktivität und  $L_2$  Sekundärinduktivität. Das Schaltzeichen des Übertragers ist in Bild 11 dargestellt.

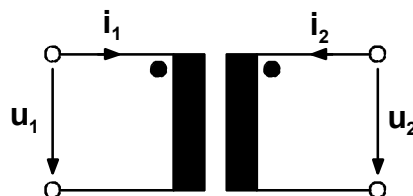


Bild 11 Schaltzeichen des Übertragers

Die beiden Punkte kennzeichnen den Wicklungssinn.

Der ideale Übertrager ist verlustfrei und streuungsfrei. Verlustfrei bedeutet, dass keine Verluste im Draht, im Kern oder im Isoliermaterial auftreten, d.h. der ohmsche Widerstand der Spulenwindungen ist Null und der magnetische Widerstand des Kerns ist wegen  $\mu \rightarrow \infty$  ebenfalls Null. Die resultierende Durchflutung muss dann Null sein, d.h.

$$n_1 \cdot i_1 + n_2 \cdot i_2 = 0 \quad (32)$$

da andernfalls im Kern unendlicher magnetischer Fluss entstehen würde. Für den idealen Übertrager gilt

$$-\frac{i_2}{i_1} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2} = \ddot{u} \quad (33)$$

$\ddot{u}$  heißt Übersetzungsverhältnis. Das Schaltzeichen des idealen Übertragers ist in Bild 12 angegeben.

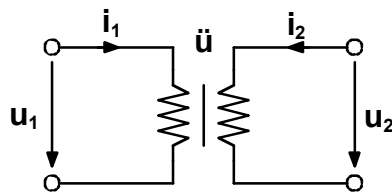


Bild 12 Schaltzeichen des idealen Übertragers

Ersatzschaltbilder für den Übertrager müssen die Transformatorgleichungen (30) und (31) erfüllen. Für den verlustfreien, streuungsbehafteten Übertrager gilt das in Bild 13 angegebene Ersatzschaltbild.

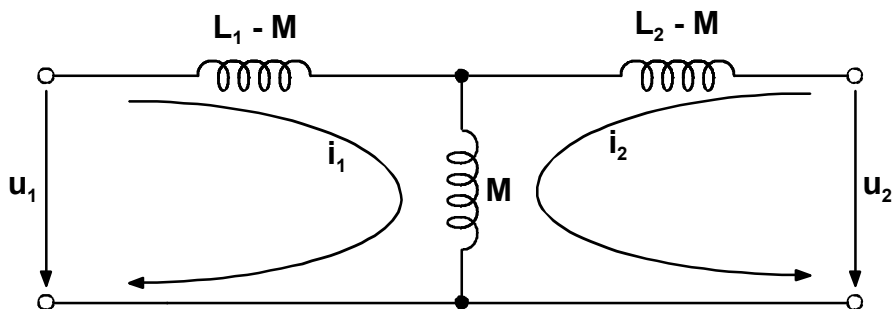


Bild 13 Ersatzschaltbild des verlustfreien, streuungsbehafteten Übertragers

Bei diesem Ersatzschaltbild sind die Primär- und Sekundärseite des Übertragers galvanisch verbunden. Das Ersatzschaltbild kann dann eingesetzt werden, wenn diese galvanische Verbindung beim Einsatz des Übertragers gegeben ist.

Ein Ersatzschaltbild des verlustfreien, streuungsbehafteten Übertragers, das die galvanische Trennung berücksichtigt, ist in Bild 14 dargestellt.

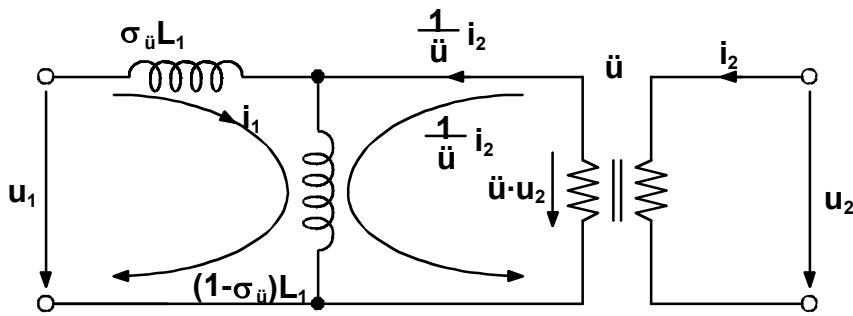


Bild 14 Ersatzschaltbild des verlustfreien, streuungsbehafteten Übertragers ohne galvanische Kopplung

Für den Streufaktor  $\sigma_{\ddot{u}}$ , der ein Maß ist für den Anteil des Feldes, der nicht beiden Spulen gemeinsam ist, gilt

$$0 \leq \sigma_{\ddot{u}} = 1 - \frac{M^2}{L_1 \cdot L_2} \leq 1 \quad (34)$$

$\sigma_{\ddot{u}} = 0$  bedeutet, dass keine Streuung vorliegt und  $\sigma_{\ddot{u}} = 1$ , dass keine Kopplung zwischen den beiden Spulen besteht. Die Induktivität  $\sigma_{\ddot{u}} \cdot L_1$  in Bild 15 heißt Streuinduktivität.  $(1 - \sigma_{\ddot{u}}) \cdot L_1$  ist die Hauptinduktivität. Das Übersetzungsverhältnis ist

$$\ddot{u} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2} \cdot (1 - \sigma_{\ddot{u}})} \quad (35)$$

Daraus folgt für die Gegeninduktivität

$$M = (1 - \sigma_{\ddot{u}}) \cdot L_1 \cdot \frac{1}{\ddot{u}} \quad (36)$$

und für die Sekundärinduktivität

$$L_2 = (1 - \sigma_{\ddot{u}}) \cdot L_1 \cdot \frac{1}{\ddot{u}^2} \quad (37)$$

## 2 Weiterführende Literatur

- [1] Moeller, Franz; Fricke, Hans; Frohne, Heinrich; Vaske, Paul:  
 Grundlagen der Elektrotechnik  
 Teubner Verlag, Stuttgart, 1986  
 Fachbereichsbibliothek: ELT 320/052

- [2] Paul, Reinhold; Paul, Steffen:  
 Elektrotechnik  
 Springer Verlag, Berlin 1996  
 Fachbereichsbibliothek: ELT 320/082
- [3] Stöckl, Melchior; Winterling, Karl-Heinz:  
 Elektrische Messtechnik  
 Teubner Verlag, Stuttgart, 1987  
 Fachbereichsbibliothek: ELT 350/012
- [4] Schrüfer, Elmar:  
 Elektrische Messtechnik  
 Hanser Verlag, München, 1995  
 Fachbereichsbibliothek: ELT 350/069

### 3 Fragen und Aufgaben

Nachstehende Fragen und Aufgaben dienen Ihrer Selbstkontrolle. Falls Sie ohne Zuhilfenahme des ersten Abschnitts die Lösung nicht finden können, sollten Sie die betreffenden Kapitel nochmals durcharbeiten. Aufgaben, auf die im folgenden vierten Abschnitt Bezug genommen wird, werden zur Auswertung der Versuchsergebnisse benötigt und sollten daher in jedem Fall vorher gelöst werden, damit die für die Messungen zur Verfügung stehende Zeit nicht unnötigerweise geschmälert wird.

1. Erklären Sie die Begriffe magnetische Feldstärke, magnetische Flussdichte, magnetischer Fluss und Permeabilität!  
 Welche Zusammenhänge bestehen zwischen Ihnen?
2. Wie lauten das Durchflutungs- und das Induktionsgesetz?
3. Wie sind Induktivität und Gegeninduktivität im allgemeinen Fall definiert?
4. Berechnen Sie den magnetischen Widerstand  $R_m$  eines geschlossenen Eisenkerns ( $\mu_r = 1.500$ ) mit folgenden Daten:
 

effektiver magnetischer Querschnitt	$A = 8,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
effektive magnetische Länge	$l_E = 0,35 \text{ m}$
5. Welche Gegeninduktivität  $M$  besteht näherungsweise zwischen zwei auf diesen Kern gewickelten Spulen von  $w_1 = 300$  und  $w_2 = 600$  Windungen?
6. Beantworten Sie die Fragen 4 und 5 unter der Voraussetzung, dass der Eisenkern an einer Stelle durch einen Luftspalt der Länge  $l_L = 2 \text{ mm}$  unterbrochen wird!
7. Welche Möglichkeiten zum Messen des magnetischen Flusses bzw. der Flussdichte sind Ihnen bekannt?

8. Geben Sie ein Ersatzschaltbild an für einen verlustfreien Übertrager mit Streuung!
9. Was versteht man unter einem idealen Übertrager?
10. Geben Sie die primäre Eingangsimpedanz  $Z_1$  eines verlustfreien Übertragers allgemein als Funktion von Primärinduktivität  $L_1$ , Sekundärinduktivität  $L_2$ , Gegeninduktivität  $M$  und dem sekundärseitigen Belastungswiderstand  $Z_2$  an!
11. Welches  $Z_1$  erhält man speziell für
  - a)  $Z_2 \rightarrow \infty$  (Leerlauf)
  - b)  $Z_2 = 0$  (Kurzschluss)?
12. Zeigen Sie, dass für die dargestellte Schaltung bei sinusförmigem Verlauf von  $u_1(t)$  und für  $\hat{u}_1 \gg \hat{u}_2$  näherungsweise

$$u_2(t) = A \cdot \int_{-\infty}^t u_1(\tau) d\tau + B \quad (38)$$

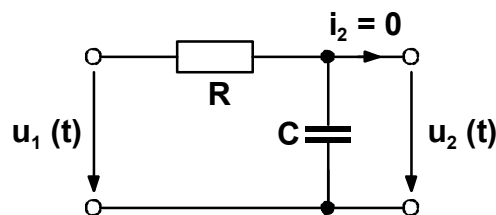


Bild 15

gilt, und geben Sie den Faktor  $A$  an,

- a) allgemein als Funktion von  $R$  und  $C$ ,
- b) zahlenmäßig für  $R = 16\text{k}\Omega$  und  $C = 10\mu\text{F}$ !

## 4 Versuchsanleitung

### 4.1 Hinweise zu den Geräten

Als Wechselstromquelle wird der Regeltrenntrafo GL 209 verwendet. Die Sekundärspannung ist zwar vom Netz getrennt, der maximal einstellbare Wert liegt jedoch bei ca. 150V. Die angebrachte Skala zeigt lediglich den Drehwinkel  $\varphi$  in Grad, die Spannung ist  $U/V \approx 0,6\varphi/^\circ$ .

Der Regeltrafo muss daher **vorsichtig** bedient werden, damit die Versuchsschaltung nicht überlastet wird, Kurzschlüsse und Fehlschaltungen sind **unbedingt** zu vermeiden!



## **Spannungsführende Teile der Schaltung dürfen nur berührt werden, wenn der Einstellknopf auf Null steht!**

Zum direkten Messen der magnetischen Flussdichte  $B$  steht das Halleffekt-Teslameter GL 208 zur Verfügung. Als Messfühler dient eine an das Anzeigegerät angeschlossene Sonde, die an der Spitze den auf ein Keramikplättchen aufgebrachten eigentlichen Messwertaufnehmer (Hallgenerator) trägt. Dieser wird bei Nichtgebrauch durch ein aufgestecktes Schutzrohr vor mechanischer Beschädigung gesichert. Während der Messung ist darauf zu achten, dass die Sonde weder gebogen noch in sich verdreht wird, was durch eine geeignete Auflage des Anschlusskabels erreicht werden kann.

Das Anzeigegerät besitzt einen Stufenschalter mit folgenden Positionen:

- OFF** Das Gerät ist ausgeschaltet.
- CAL** Der Zeigerausschlag wird zum Kalibrieren mit dem Drehknopf **CAL** auf den Punkt 0,4 der Skala 0 ... 1 gebracht. Diese Einstellung bleibt für alle Messungen bestehen.
- ON** Das Gerät zeigt den Mittelwert  $\bar{B}$  der Flussdichte am Ort der Hallsonde an, und zwar die auf der Sondenfläche senkrecht stehende Komponente. Der Ausschlag erfolgt nach rechts, wenn der Feldstärkevektor von der rot markierten Seite des Keramikplättchens nach außen zeigt.
- REV** Entspricht der Stellung **ON** bei entgegengesetzter Polarität.
- AC** Der Gleichrichtwert  $|\bar{B}|$  wird angezeigt bei sinusförmigem, gleichanteil-freiem Verlauf von  $B$ . Zur Anzeige gelangt das  $2/\pi$ -fache des Spitzenwerts.

Nach dem Kalibrieren wird in der Stellung **ON** oder **REV** die Sonde an einen möglichst feldfreien Ort gebracht (ca. 1m Entfernung) von allen stromführenden Leitungen). Dann wird mit dem Drehknopf **ZERO** die Anzeige im empfindlichsten Bereich auf Null eingestellt.

Das Dreheiseninstrument GL 181 wird zur Strommessung, das Gleichrichterinstrument GL 124 zur Spannungsmessung verwendet. Es soll stets spannungsrichtig gemessen werden, da der Strommesser GL 181 einen relativ hohen Innenwiderstand hat. Achten Sie darauf, dass die Instrumente nicht überlastet werden!

## 4.2 Kalibrieren des Oszilloskops zur Strommessung

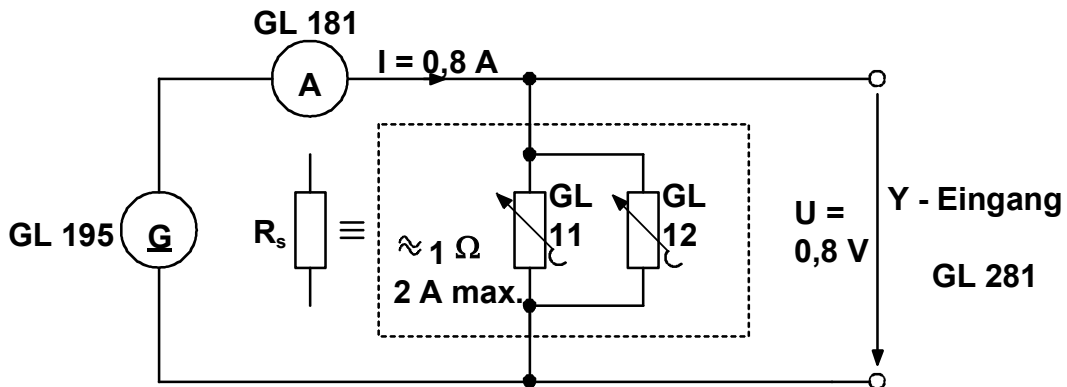


Bild 16

Bauen Sie obige Schaltung auf! Schalten Sie das Oszilloskop GL 281 auf interne X-Ablenkung, gleichspannungsgekoppelte Y-Ablenkung mit  $0,2\text{V/Teil}$ ! Stellen Sie das Netzgerät GL 195 so ein, dass der Strom  $I = 0,8\text{A}$  fließt, und gleichen Sie die Dekade GL 11/12 so ab, dass die Auslenkung am Oszilloskop 4 Teile beträgt! Der Dekadenwiderstand muss mindestens  $10\Omega$  betragen, da die Dekade sonst überlastet wird! Zusammen mit dem Drahtwiderstand  $1\Omega$  und den Verbindungsleitern bildet die Dekade nun einen kalibrierten Shunt  $R_s$  zum Oszilloskop. Diese Kombination muss für die nächsten Versuche unverändert bestehen bleiben.

## 4.3 Messen von Flussdichte und Gegeninduktivität eines Übertragers

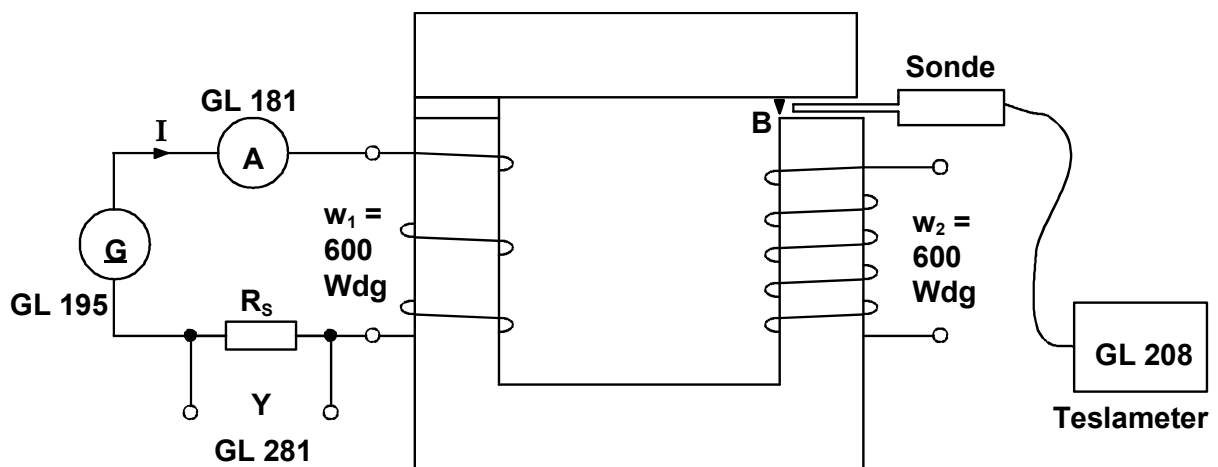


Bild 17

Bauen Sie die dargestellte Schaltung mit Übertrager auf! Letzterer erhält durch ein Zwischenstück aus Isolierstoff am oberen Ende der Sekundärspule einen Luftspalt von 2mm. Als Höhenausgleich wird auf das obere Ende des U-Kerns ein 2mm dickes Eisenplättchen aufgelegt.

Messen Sie bei  $I = 0,8A$  die Flussdichte  $B$  im Luftspalt! Vergleichen Sie den gemessenen Wert mit dem aus den Eigenschaften des magnetischen Kreises berechneten Wert (Aufgaben 4, 5)! Ermitteln Sie in beiden Fällen die Gegeninduktivität  $M$  des Übertragers sowie die magnetischen Feldstärken im Eisen  $H_E$  und im Luftspalt  $H_L$ !

	B/T	M/H
aus Messung		
aus Rechnung		

Feldstärke  $H_E =$  A/m,  $H_L =$  A/m

#### 4.4 Messen der Flussdichte bei Wechselstrommagnetisierung

Ersetzen Sie das Netzgerät GL 195 durch den Regeltrenntrafo GL 209! Beachten Sie die in Abschnitt 4.1 gegebenen Sicherheitsvorschriften!

Stellen Sie die Ausgangsspannung so ein, dass die Amplitude des Primärstroms  $i_1$  den Wert  $\hat{i}=0,8A$  annimmt, und messen Sie die Amplitude  $\hat{B}$  der Flussdichte im Luftspalt, und bestimmen Sie die Gegeninduktivität  $M$ !

$\hat{B} =$  T,  $M =$  H.

Schalten Sie das abgebildete RC-Glied an die Sekundärwicklung und oszillographieren Sie die Spannungen  $u_2$  und  $u_3$ !

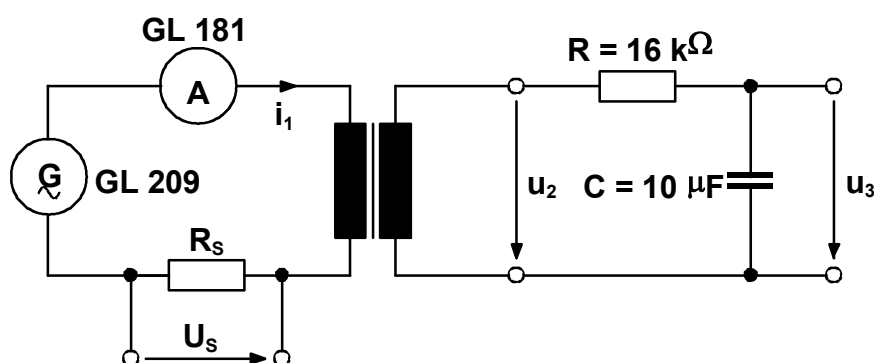


Bild 18

Bestimmen Sie die Amplituden dieser Spannungen und vergleichen Sie mit den berechneten Werten (Aufgaben 4, 5 und 12)!

	$\hat{u}_2 / \text{V}$	$\hat{u}_3 / \text{V}$
aus Messung		
aus Rechnung		

Schalten Sie nun die Spannung  $u_s$  am Shunt  $R_s$  auf den X-Eingang, die Spannung  $u_3$  auf den Y-Eingang und erklären Sie das entstehende Schirmbild!

Stellen Sie die Strahlhelligkeit des Oszilloskops sowie den Stellknopf am Regeltrafo auf Null und entfernen Sie die beiden Plättchen aus dem Magnetkern! Betrachten und interpretieren Sie nun wie oben, jedoch ohne Luftspalt, das Schirmbild bei verschiedenen Primärströmen  $\hat{i}_1 \leq 1,5 \text{A}$ ! Geben Sie folgende Materialgrößen des verwendeten Magnetkerns an ( $\hat{i}_1 = 2 \text{A}$ ):

Koerzitivfeldstärke  $H_c =$  A/m  
 Remanenzflussdichte  $B_r =$  T  
 Sättigungsflussdichte  $B_s =$  T.

Schalten Sie das Oszilloskop und das Teslameter aus!

#### 4.5 Messen der Induktivitäten des Übertragers

Durch Messen von Strom und Spannung sollen die Leerlauf- und Kurzschlussimpedanz  $Z_L$  bzw.  $Z_K$  der Primärseite (Index 1) und der Sekundärseite (Index 2) bestimmt werden. Unter der Voraussetzung vernachlässigbar kleiner Verluste erhält man die Induktivitäten  $L_1$ ,  $L_2$  und  $M$  des Übertragers (Aufgaben 10 und 11).

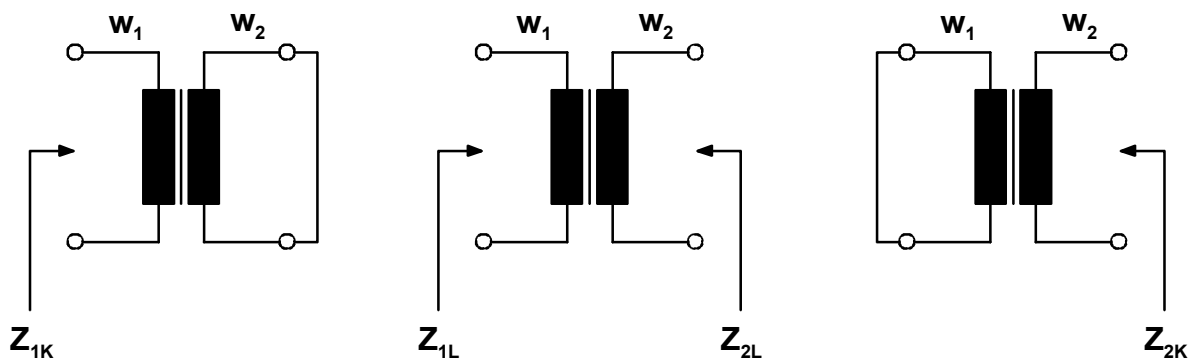


Bild 20

### a) Übertrager ohne Luftspalt

$$Z_2 \rightarrow \infty, \quad I_1 = 0,05\text{A}$$

$U_1 =$	V	$Z_{1L} =$	$\Omega$	$L_1 =$	H
---------	---	------------	----------	---------	---

$$Z_2 = 0, \quad I_1 = 0,25\text{A}$$

$U_1 =$	V	$Z_{1K} =$	$\Omega$	$M =$	H
---------	---	------------	----------	-------	---

$$Z_1 \rightarrow \infty, \quad I_2 = 0,05\text{A}$$

$U_2 =$	V	$Z_{2L} =$	$\Omega$	$L_2 =$	H
---------	---	------------	----------	---------	---

$$Z_1 = 0, \quad I_2 = 0,25\text{A}$$

$U_2 =$	V	$Z_{2K} =$	$\Omega$	$M =$	H
---------	---	------------	----------	-------	---

### b) Übertrager mit Luftspalt

$$Z_2 \rightarrow \infty, \quad I_1 = 0,25\text{A}$$

$U_1 =$	V	$Z_{1L} =$	$\Omega$	$L_1 =$	H
---------	---	------------	----------	---------	---

$$Z_2 = 0, \quad I_1 = 1\text{A}$$

$U_1 =$	V	$Z_{1K} =$	$\Omega$	$M =$	H
---------	---	------------	----------	-------	---

$$Z_1 \rightarrow \infty, \quad I_2 = 0,25\text{A}$$

$U_2 =$	V	$Z_{2L} =$	$\Omega$	$L_2 =$	H
---------	---	------------	----------	---------	---

$$Z_1 = 0, \quad I_2 = 0,1\text{A}$$

$U_2 =$	V	$Z_{2K} =$	$\Omega$	$M =$	H
---------	---	------------	----------	-------	---