INGENIEUR-FERNSTUDIUM

SCHOLZ

AUFGABEN FUR DAS ELEKTRO-PRAKTIKUM

1

HERAUSGEBER
INGENIEURSCHULE FÜR
FEINWERKTECHNIK JENA

1006-01/62

Herausgeber:
Ingenieurschule für Feinwerktechnik
Jena

Aufgaben für das Elektropraktikum

Lehrbrief 1

von

Joachim Scholz

3. Auflage

1962

Zentralstelle für Fachschulausbildung
— Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie —
Dresden

Inhaltsverzeichnis

I. Durchführung des Praktikums

1. Organisation

Das Elektro-Praktikum bringt den Ingenieurschüler in unmittelbare Berührung mit elektrischen und elektronischen Geräten und Schaltungen. Er soll sich darin üben, diese Geräte anzuwenden, Fehlerquellen zu erkennen und die Vorschriften und Sicherheitsbestimmungen zu beachten. Sein selbständiges Denken und Handeln wird dabei weitgehend angeregt und geschult. Die Kenntnisse aus der Unterrichtsarbeit werden vertieft und gefestigt.

Die Arbeit jedes Ingenieurschülers im Elektro-Praktikum umfaßt je nach Fachrichtung etwa 2o bis 3o Aufgaben aus verschiedenen Gebieten der Elektrotechnik und zwei Exkursionen in Werke der elektrotechnischen Fertigung. Sie erstreckt sich gewöhnlich über zwei Studienjahre (im Direktstudium). Ihre erfolgreiche Durchführung ist eine Voraussetzung für die Zulassung zur Ingenieur-Abschlußprüfung!

Die Durchführung des Praktikums nimmt etwa folgenden Verlauf: Mindestens eine Woche vor dem jeweiligen Praktikumstage erfährt der Ingenieurschüler die Nummer der von ihm zu bearbeitenden Übung und bereitet sich anhand der Versuchsanleitung sorgfältig darauf vor. Am Praktikumstage stehen zur Durchführung der Übung etwa 2 1/2 Stunden Zeit zur Verfügung, während der die praktischen Messungen durchgeführt und die Meßergebnisse fertiggestellt werden (Diagramm oder Tabelle). Mit der Anfertigung des Übungsprotokolls kann begonnen werden. Das Protokoll ist zu Hause in selbständiger Arbeit zu Ende zu führen und am nächsten Praktikumstage dem Aufsichtführenden zur Durchsicht und Beurteilung auszuhändigen.

Am Ende jedes Semesters (bzw. nach Durchführung einer bestimmten Anzahl von Übungen) findet in den einzelnen Praktikumsgruppen ein Prüfungskolloquium über die durchgeführten Übungen statt, welches neben den Protokollen zur Beurteilung der Praktikumsarbeit jedes Ingenieurschülers dient.

2. Versuchsdurchführung

Nachdem sich der Ingenieurschüler anhand der Versuchsanleitung gründlich mit Theorie und Gegenstand der Übung vertraut gemacht hat (dies geschieht bereits zu Hause!), verschafft er sich zuerst einen Überblick über das bereitgestellte Gerät. Dieses ist anhand der Geräteaufstellung auf Vollständigkeit zu überprüfen. Etwaige Mängel sind dem Aufsichtführenden zu melden, unbekannte Geräte gegebenenfalls durch ihn zu erklären.

Zum Schaltungsaufbau sind die Geräte übersichtlich - z.B. dem Stromlaufplan entsprechend - anzuordnen, so daß die abzulesenden und zu bedienenden Geräte leicht zugänglich sind. Beim Schalten der Verbindungsleitungen ist zuerst der Hauptstromkreis mit Strommessern usw. zu schließen (im Schaltplan oft stärker ausgezogen). Nachträglich sind die Spannungspfade für Voltmeter usw. anzubringen. Dadurch wird die Schaltung übersichtlich und leicht zu überprüfen. Auf gute Kontaktgabe an allen Verbindungsstellen ist zu achten. Man beginnt am besten an der Spannungsquelle, wobei diese jedoch noch nicht eingeschaltet bzw. angeschlossen werden darf! Erst nach Überprüfung der Schaltung durch den Aufsichtführenden ist die Spannungsquelle anzuschließen und mit den Messungen zu beginnen. Das gleiche gilt, wenn die Schaltung im Verlauf der Übung verändert werden muß! Vor jedem Eingriff in die Schaltung ist unbedingt die Spannungsquelle abzuschalten!

Um einen Überblick über die auftretenden Werte zu erhalten, ist zuerst der gesamte vorgeschriebene Meßbereich unter ständiger Kontrolle aller Meßgeräte zu durchfahren (Vorsicht! Überschreiten des angegebenen Bereiches kann zur Zerstörung von kostbaren Geräten führen!) Danach ist das aufzunehmende Diagramm auf Millimeterpapier (bzw. die Tabelle) vorzubereiten und die Messung punktweise durchzuführen. Wenn irgend möglich sind keine Tabellen zu schreiben, sondern die Meßwerte sofort als Diagramm einzutragen. Der Abstand der Meßpunkte ist dem Kurvenverlauf entsprechend zu wählen, an Stellen starker Krümmung sind sie dicht zu legen. Im allgemeinen genügen bei stetigen Kurven 1o (bis max. 2o) Meßpunkte. Der Maßstab muß den vorher ermittelten Bereichsgrenzen entsprechen. Ist kein Diagramm zu zeichnen, so sind die Meßergebnisse in Tabellenform zusammenzustellen.

Das Ergebnis ist kritisch zu überprüfen, solange die Meßanordnung noch besteht, um abweichende Meßwerte nachmessen zu können. Danach ist das Protokoll aufzustellen. Es besteht aus einem vorgedruckten Deckblatt, welchem die Meßergebnisse auf besonderen Blättern beizufügen sind. Das Protokoll ist knapp zu halten, Nebenrechnungen usw. sind fortzulassen. Auf der Rückseite des Deckblattes ist die Auswertung der Übung vorzunehmen. Besonderer Wert ist auf eine kurze Erklärung (nicht Beschreibung!) der Versuchsergebnisse zu legen.
Nachfolgend das Muster eines Deckblattes (Seite 5).

3. Allgemeines Verhalten

Die Sicherheit aller im Elektro-Labor arbeitenden Personen, die Erhaltung wertvoller Geräte und die erfolgreiche Zusammenarbeit in Praktikumsgruppen machen eine Reihe von Vorschriften in den Praktikumsräumen erforderlich. Diese sind in der Raumordnung zusammengefaßt. Vor Beginn des Praktikums ist die Raumordnung zur Kenntnis zu nehmen und von jedem Praktikanten gegenzuzeichnen. Sie umfaßt etwa folgende Punkte:

1. Das Betreten der Praktikumsräume ist grundsätzlich nur bei Anwesenheit des Fachdozenten oder einer von ihm mit der Aufsichtführung beauftragten Person gestattet. Während der Durchführung des Praktikums ist der Zutritt nur in besonders dringenden Fällen gestattet, da das Praktikum dem Unterricht gleichzusetzen ist.

2. Das Bedienen von Schalttafeln und Sicherungskästen, sowie das Anschalten von Spannungsquellen ist nur unter unmittelbarer Aufsicht des Aufsichtführenden gestattet.

3. Bei der Anwendung elektrischer Geräte ist größte Vorsicht geboten. Beobachtete Schäden und Mängel sind sofort zu melden. Für den Ersatz eines durch Unvorsichtigkeit beschädigten Gerätes hat der Urheber des Schadens voll aufzukommen! Es ist streng verboten, Geräte und Zubehör von fremden Arbeitsplätzen zu entfernen!

4. Während der Durchführung der Praktikumsversuche ist besonders auf die Unfallgefahr durch Berührung spannungführender Teile zu achten. Die Schaltungen sind so anzuordnen, daß während der Messung die Wahrscheinlichkeit einer solchen Berührung auf ein Mindestmaß gesenkt wird. Vor Änderung einer Schaltung ist stets die Spannungsquelle abzuschalten. Metallische Schmucksachen an Hand und Unterarm sollen während der Versuchsdurchführung abgelegt werden.

   Im übrigen bleibt jeder Praktikant für seine Sicherheit und für die Sicherheit seiner Kollegen selbst verantwortlich, nachdem er vom Aufsichtführenden entsprechend belehrt worden ist!
   (Siehe auch VDE 0100)

Muster eines Protokoll-Deckblattes:

INGENIEURSCHULE FÜR FEINWERKTECHNIK
J e n a
Elektro - Praktikum

Versuchstag
....

Beobachter: (Hier Name des Praktikanten) Klasse: ......
Mitarbeiter: (Hier Name der am gleichen Versuch Beteiligten)

Ü b u n g Nr. (Nummer und Überschrift) ______________

Aufgaben:

(Hier ist nur die konkrete Aufgabenstellung, eventuell in gekürzter Form, anzugeben).

Schaltung:

(Der Stromlaufplan ist der **wirklichen Versuchsordnung entsprechend** zu zeichnen. Es sind **genormte Schaltzeichen** zu verwenden! (DIN 40700 bzw. 40710 - 19) Die Schaltelemente sind zu bezeichnen und (evtl. in gesonderter Liste) mit Größenangaben zu versehen!)

II. A u f g a b e n s t e l l u n g

A. G r u n d l a g e n v e r s u c h e

1. G l e i c h s t r o m

Ü b u n g Nr. 1.1: Widerstandsbestimmung aus Strom- und Spannungsmessung

Versuchsziel:

Übung im richtigen Schalten von Strom- und Spannungsmessern unter Berücksichtigung des Einflusses der Meßgerätewiderstände auf das Meßergebnis.

Grundlagen:

Schaltet man in einen Stromkreis zur Bestimmung einzelner elektrischer Größen zusätzlich Meßgeräte ein, so werden die ursprünglich vorhandenen Verhältnisse durch die Meßgerätewiderstände verändert. Um diese Veränderung von vorn herein gering zu halten, werden zum Beispiel Strommesser mit möglichst kleinem, Spannungsmesser mit möglichst großem Innenwiderstand hergestellt. Trotzdem müssen diese Widerstände in vielen Fällen bei der Auswertung der Meßergebnisse berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Übung sollen Verbraucherwiderstände durch gleichzeitige Strom- und Spannungsmessung bestimmt werden. Dazu muß sowohl der Strom durch den Verbraucher als auch die Spannung am Verbraucher möglichst genau gemessen werden. Für die Schaltung der Meßgeräte ergeben sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

a) Das Voltmeter wird vor das Amperemeter geschaltet (von der Spannungsquelle aus gesehen) (Bild 1).

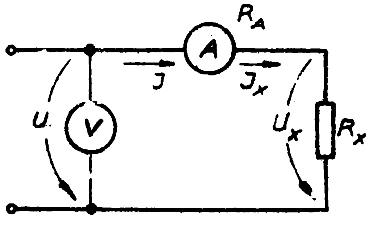


Bild 1

Bezeichnet man die gemessenen Werte mit U und J, die Werte am Verbraucher R_x mit U_x und J_x, so zeigt sich, daß

$$J_x = J$$

$$U_x = U - J \cdot R_A \qquad (1)$$

ist, wobei mit R_A der Widerstand des Amperemeters bezeichnet wird.

Mithin wird bei dieser Schaltung der gesuchte Strom richtig, die gesuchte Spannung jedoch um den Wert $J \cdot R_A$ (den Spannungsabfall am Amperemeter) zu groß gemessen. Ist R_A sehr klein gegenüber R_x, so läßt sich der Fehler vernachlässigen.

b) Das Voltmeter wird <u>hinter</u> das Amperemeter geschaltet (Bild 2).

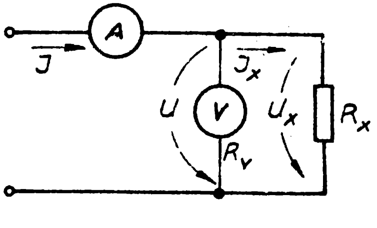


Bild 2

Mit obiger Bezeichnungsweise ergibt sich

$$U_x = U$$

$$J_x = J - \frac{U}{R_V} \qquad (2)$$

Dabei ist R_V der Widerstand des Voltmeters. Bei dieser Schaltung wird also die gesuchte Spannung richtig, der gesuchte Strom jedoch um den Wert $\frac{U}{R_V}$ (den Strom durch das Voltmeter) zu groß gemessen. Ist R_V sehr groß gegenüber R_x, so läßt sich der Fehler vernachlässigen.

Folgerung:

a) Ist $R_A \ll R_x$, so ist das Voltmeter vor das Amperemeter zu schalten!

b) Ist $R_V \gg R_x$, so ist das Voltmeter hinter das Amperemeter zu schalten!

Der auftretende Fehler läßt sich in diesen Fällen vernachlässigen (Starkstromtechnik).

c) Trifft beides nicht zu, so ist die günstigere Schaltung zu wählen und der Fehler entsprechend den Gln. (1) bzw. (2) zu berücksichtigen (Schwachstromtechnik)!

Aufgaben:

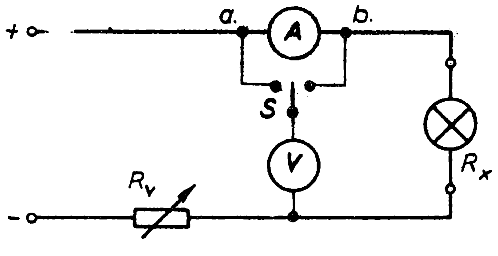


Bild 3
Versuchsanordnung

1. Nach Bild 3 sind die Widerstände zweier Glühlampen (6 V und 22o V) bei Schalterstellung a) und b) in kaltem Zustand zu bestimmen; das heißt, der Meßstrom ist so klein zu wählen, daß sich die Glühfäden nicht über Raumtemperatur erwärmen (J = o,5 ... 2 mA).

   a) Berechnung von R_x ohne Berücksichtigung der Gerätewiderstände.

   b) Berechnung von R_x unter Berücksichtigung der Gerätewiderstände nach den Gln. (1) bzw. (2).

   c) Bestimmung des prozentualen Fehlers bei a).

2. Die Widerstände der Glühlampen sind in heißem Zustand (bei Nennspannung) bei beiden Schalterstellungen zu bestimmen.

3. Aus den Ergebnissen von 1. und 2. ist die Temperatur der Glühfäden zu ermitteln.
(Wolfram: $\alpha = 0{,}0041 \ {}^{1}/{}_{^\circ C}$; $\beta = 10^{-6} \ {}^{1}/{}_{^\circ C^2}$)

Auswertung:

1. Begründen Sie kurz die Meßergebnisse der Aufgabe 1.

2. Erklären Sie, warum bei Aufgabe 2. zwischen den Ergebnissen der Messungen a) und b) praktisch kein Unterschied besteht.

3. Weisen Sie nach, daß (unter Voraussetzung einer konstanten Eingangsspannung) die Bestimmung von R_x auch dann nicht fehlerfrei ist, wenn die Meßgeräte einzeln nacheinander in den Stromkreis geschaltet werden!
Wird der Fehler dabei kleiner?

Ü b u n g Nr. 1.2: Strom-Spannungs-Kennlinien (Doppelversuch)

Versuchsziel:

Kennenlernen des Verhaltens einiger wichtiger Schaltelemente im elektrischen Stromkreis. Vertraut werden mit dem umfassenden Charakter des Widerstandsbegriffes und der Besonderheit des Ohmschen Gesetzes.

Grundlagen:

1. Passive Zweipole (Verbraucher)

Charakteristisch für das Verhalten eines elektrischen Verbrauchers im Stromkreis ist die Abhängigkeit des Stromes von der anliegenden Spannung, dargestellt als Strom-Spannungs-Kennlinie $J = f(U)$. Aus ihr kann man für jeden Wert der Spannung (bzw. des Stromes) den Widerstand

$$R = \frac{U}{J}$$

des Schaltelementes als Verhältnis von Abszisse zur Ordinate des betr. Punktes ablesen (vergl. Bild 1).

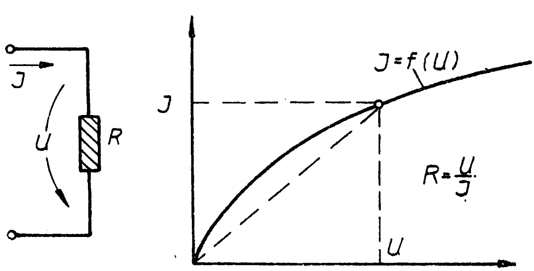


Bild 1
Passiver Zweipol.

Ist die Strom-Spannungs-Kennlinie eine Gerade durch den Nullpunkt, so ist der Wert des Widerstandes R für alle

Spannungs- bzw. Stromwerte konstant, das betr. Schaltelement genügt dem <u>Ohmschen Gesetz</u>. Das trifft bei gleichbleibenden äußeren Bedingungen für die weitaus häufigsten und wichtigsten Fälle, die metallischen Leiter, zu. Der Widerstand ändert sich jedoch bei Änderungen der Temperatur, des kristallinen Gefüges, der chemischen Zusammensetzung u.a.

Für Halbleiter, Flüssigkeiten, Gase und Vakuumstrecken gilt das Ohmsche Gesetz <u>nicht</u>. Besonders zur Berechnung von Stromkreisen mit derartigen "nichtlinearen" Schaltelementen benötigt man deren Strom-Spannungskennlinien, während die Berechnung von Stromkreisen mit "ohmschen" Widerständen einfach mittels linearer Gleichungen durchzuführen ist.

2. Aktive Zweipole (Spannungsquellen)

In ähnlicher Weise läßt sich auch das Verhalten von Spannungsquellen durch ihre Strom-Spannungs-Kennlinien darstellen, indem man den entnommenen Strom in Abhängigkeit von der Klemmenspannung aufträgt.

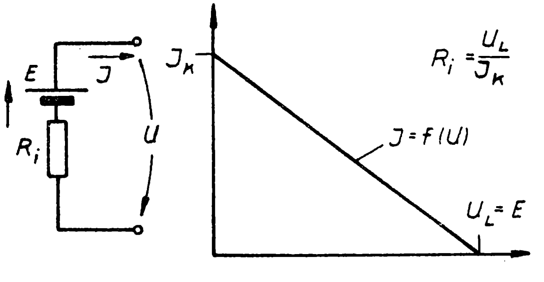


Bild 2
Aktiver Zweipol

Ist der Innenwiderstand und die Urspannung einer Spannungsquelle von der Belastung (Stromentnahme) unabhängig (konstant), so ist ihre Strom-Spannungs-Kennlinie eine fallende Gerade entsprechend der Gleichung

$$J = -\frac{1}{R_i} \cdot U + \frac{E}{R_i}$$

(vergl. Bild 2). Aus ihr lassen sich Leerlaufspannung U_l und Kurzschlußstrom J_k als Achsenschnittpunkte ablesen. Der Innenwiderstand R_i ergibt sich aus der Steigung der Kennlinie zu

$$R_i = \frac{U_l}{J_k}$$

Ist die Kennlinie keine Gerade, so lassen sich Urspannung und Innenwiderstand näherungsweise für jedes Kennlinienstück ermitteln, indem man dasselbe durch eine Gerade ersetzt. Zur Berechnung der Mittelwerte dient dann das Gleichungssystem

$$E = U_1 + J_1 R_i$$
$$E = U_2 + J_2 R_i$$

in welchem (U_1, J_1) und (U_2, J_2) die Endpunkte des betr. Kurvenstückes sind.

Aufgaben:

1. Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinien passiver Zweipole nach Bild 3:

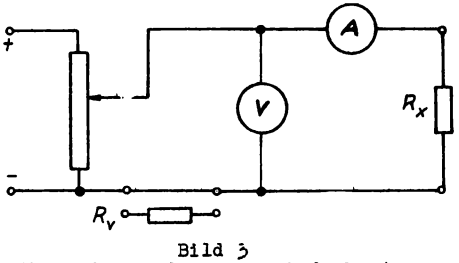


Bild 3
Versuchsanordnung zur Aufgabe 1

a) für eine Metallfadenlampe (o ... 2oo V) ("Kalt"leiter),
eine Kohlefadenlampe (o ... 2oo V) ("Heiß"leiter),
einen Eisen-Wasserstoff-Widerstand EW (Spannungsangabe beachten!);

b) für einen Halbleiter-Gleichrichter (Sperrichtung o ... 25 V, Durchlaßrichtung o ... 4 V),
eine Flüssigkeitsstrecke (von 4 V abwärts)
eine Gasstrecke (Glimmlampe). Diese letzte Kennlinie ist bis 22o V aufwärts und wieder zurück aufzunehmen (Vorwiderstand R_V einschalten!).

c) Aus allen unter a) und b) aufgenommenen Kennlinien ist punktweise der Widerstand zu ermitteln und (im gleichen Diagramm) über der Spannung aufzutragen.

2. <u>Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinien aktiver Zweipole</u> nach Bild 4:

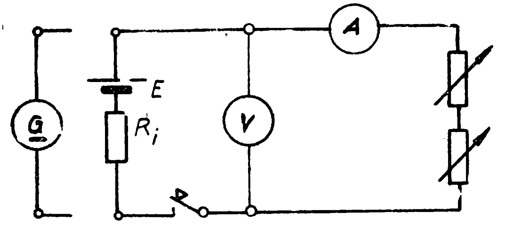


Bild 4
Versuchsanordnung zur Aufgabe 2

a) für ein Trockenelement. Durch Extrapolation des gemessenen Teils der Kennlinie sind Leerlaufspannung, Kurzschlußstrom und Innenwiderstand zu bestimmen.

b) für einen Nebenschluß-Generator

c) für einen Reihenschluß-Generator.

<u>Auswertung:</u>

1. Alle passiven Zweipole sind auf die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes zu untersuchen!

2. Die Kennlinien von Metall- und Kohlefadenlampe, sowie die Kennlinie der Flüssigkeitsstrecke sind zu erklären.

3. Die Kennlinien von EW und Glimmlampe sind miteinander zu vergleichen. Welche Anwendung könnten diese Geräte in technischen Schaltungen erfahren?

4. Der Verlauf der Kennlinie eines aktiven Zweipols (Trockenelement) ist durch Rechnung zu erklären.
   <u>Prägen Sie sich den Verlauf der verschiedenen Kennlinien gut ein!</u>

5. Für eine Zusammenschaltung des Trockenelementes und der gemessenen Flüssigkeitsstrecke ist graphisch der Arbeitspunkt zu bestimmen. Welcher Strom würde fließen?

Übung Nr. 1.3: Die Wheatstonesche Meßbrücke

Versuchsziel:

Vertraut werden mit einer der wichtigsten Anwendungen der Brückenschaltung.

Grundlagen:

Unter einer Brückenschaltung versteht man allgemein eine Anordnung von vier Schaltelementen (z.B. Widerständen) entsprechend Bild 1, welche im Prinzip aus zwei parallel liegenden Reihenschaltungen besteht.

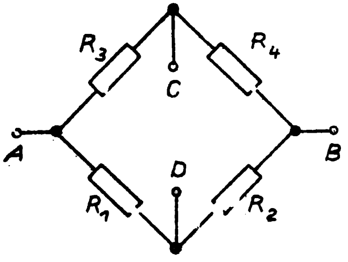


Bild 1
Allgemeine
Brückenschaltung

An den Klemmen A und B wird der einen Brückendiagonale eine speisende Spannung zugeführt. Die Spannung in der anderen Diagonale, also zwischen den Klemmen C und D, bezeichnet man als "Brückenspannung". Die Brücke heißt abgeglichen, wenn die Brückenspannung U_{CD} und damit auch der Brückenstrom Null ist.

Nach dem Maschensatz ist bei abgeglichener Brücke

$$\left.\begin{array}{l} U_1 = U_3 \\ U_2 = U_4 \end{array}\right. \text{, also } \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_3}{U_4} \qquad (1)$$

Daraus ergibt sich als Bedingung für den Brückenabgleich:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \qquad (2)$$

In der Wheatstoneschen Meßbrücke wird diese Beziehung zur genauen Bestimmung unbekannter Widerstände benutzt. Der Widerstand $R_1 + R_2$ wird dabei z.B. durch einen kalibrierten Draht der Länge $l = 1$ m dargestellt, an welchem der Brückenabzweig D als Schiebekontakt ausgebildet ist (Bild 2). Ist nun der dritte Widerstand sehr genau bekannt (Normalwiderstand), so läßt sich ein unbekannter Widerstand R_x durch Abgleich der Brücke bestimmen.

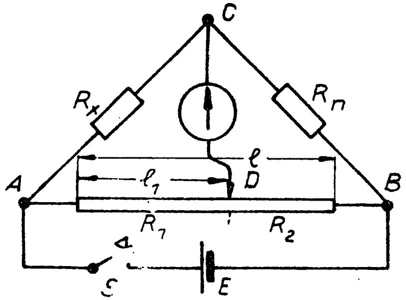


Bild 2
Schleifdraht-Meßbrücke

Ist der Schiebekontakt D so eingestellt, daß im Brückenzweig CD kein Strom fließt (Anzeige durch Nullinstrument), so ergibt sich wegen

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l - l_1}$$

für den unbekannten Widerstand die Beziehung

$$R_x = R_n \cdot \frac{l_1}{l - l_1} \qquad (3)$$

Aus Gründen der Meßgenauigkeit ist dabei das Widerstandsnormal in seiner Größe nahezu gleich dem unbekannten Widerstand R_x zu wählen, damit die Messung möglichst in der Mitte des Schleifdrahtes erfolgt.

Bei kompletten technischen Meßbrücken, insbesondere bei Tischinstrumenten, ist der größte Teil der Meßanordnung innerhalb eines geschlossenen Gehäuses untergebracht, so daß die Widerstandsmessung sehr einfach und schnell vonstatten geht.

Aufgaben:

1. Mit einer modellmäßigen Schleifdrahtmeßbrücke (nach Bild 2) sind die unbekannten Widerstände mehrerer Meßgeräte zu bestimmen.
   Dabei ist besonders bei der Messung von Amperemetern auf kurze (niederohmige) Leitungsführung und gute Kontaktgabe zu achten (warum?). Die Messungen sind mehrfach zu wiederholen und Mittelwerte zu bilden. Dabei ist der Punkt D abwechselnd von rechts und von links anzumessen.

2. Die gemessenen Werte sind mit einer Tischmeßbrücke zu überprüfen (Bild 3). Die am Drehpotentiometer der Tischmeßbrücke abzulesenden Zahlenwerte entsprechen bereits dem Quotienten $\dfrac{l_1}{l - l_1}$.

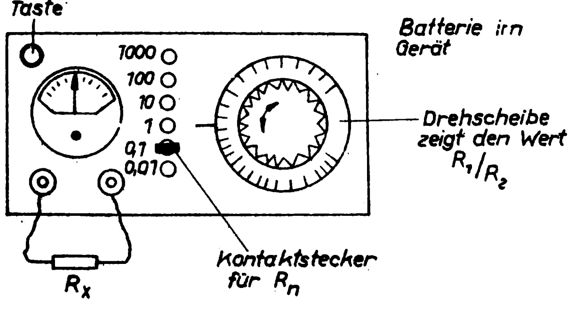


Bild 3
Meßanordnung mit Tischmeßbrücke

3. Mit einer technischen Meßbrücke (Bild 4) sind einige Drahtwiderstände genau auf die angegebenen Werte abzugleichen.

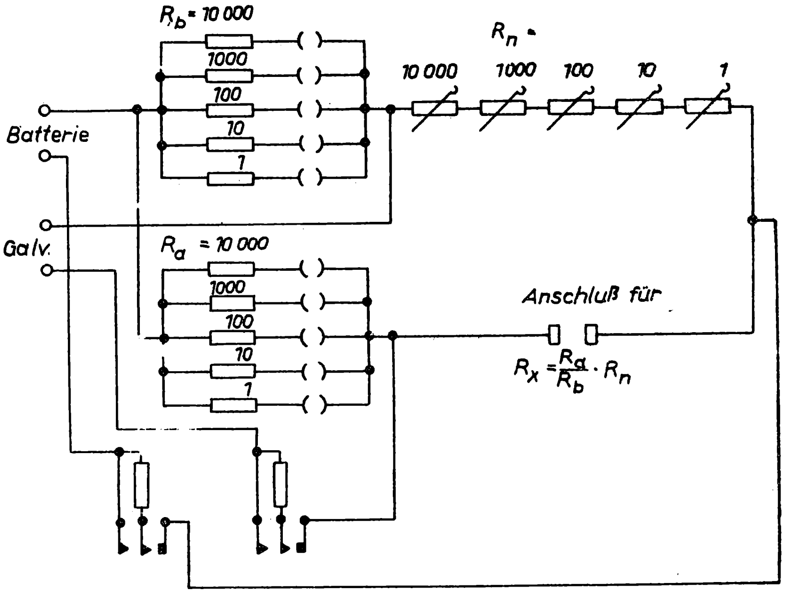


Bild 4
Schaltung der technischen Meßbrücke

<u>Auswertung:</u>

1. Beweisen Sie die Gleichungen (1), (2) und (3).

2. Weisen Sie durch Rechnung nach, daß die Meßgenauigkeit bei Mittelstellung des Schleifkontaktes größer ist als bei Randstellung.

3. Erklären Sie, welche Bedeutung die Größe der Spannungsquelle für die Messung besitzt. Wie groß wird man sie demnach wählen?

Ü b u n g Nr. 1.4: Der Schleifdrahtkompensator

Versuchsziel:

Vertraut werden mit dem Verfahren der Spannungskompensation anhand der Messung chemischer Urspannungen und der Eichung von Meßgeräten.

Grundlagen:

Werden zwei Spannungen E_1 und E_2 in einem Stromkreis gegeneinander geschaltet (Bild 1), so wird als Antriebsgröße auf den Strom ihre Differenz $E_2 - E_1$ wirksam. Sind beide Spannungen genau gleich groß, so fließt im Stromkreis kein Strom; die beiden Spannungen kompensieren sich gegenseitig in ihrer Wirkung.

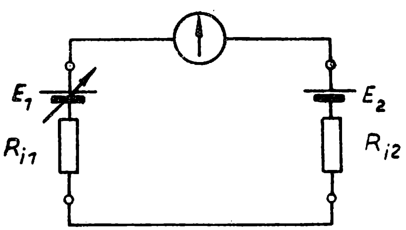


Bild 1
Spannungskompensation

Diese Kompensation der Spannungen läßt sich mit Hilfe eines empfindlichen Galvanometers (Nullinstrument) sehr genau herstellen, wenn die eine Spannung in geeigneter Weise veränderbar ist. Hierzu verwendet man oft ein Schleifdrahtpotentiometer (ähnlich wie bei der Wheatstoneschen Meßbrücke in Übung Nr. 1.3), welches dann zusammen mit einer Hilfsspannungsquelle E_1 in geeichtem Zustand als Kompensator bezeichnet wird (Bild 2). Ein derartiger Kompensator ist z.B. für Präzisionsmessungen unbekannter Urspannungen geeignet, ohne daß diesen dabei ein Strom entnommen wird.

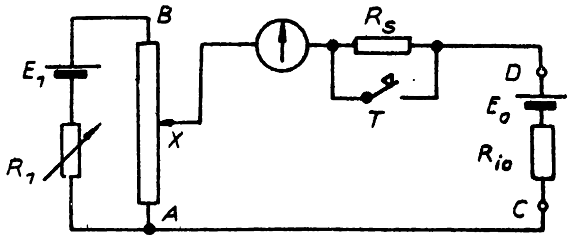


Bild 2

Schaltung zum Eichen des Schleifdrahtkompensators und zur Messung unbekannter Urspannungen.

<u>Aufgaben:</u>

1. Die Spannung über dem Spannungsteiler AB (Schleifdraht) ist mit Hilfe eines Normalelementes E_o auf genau 1,ooo V zu eichen (Bild 2).
   Dazu ist der Mittelabgriff auf den entsprechend der Urspannung E_o <u>genau berechneten Punkt</u> X (dicht bei der Mitte des Schleifdrahtes) fest einzustellen. Die Spannung U_{AB} ist mit Hilfe des Vorwiderstandes R_1 so einzustellen, daß das Nullinstrument keinen Ausschlag mehr zeigt (Kompensation). Dann ist $U_{AX} = E_o$!
   (Achtung! Für Grobeinstellung ist der <u>Schutzwiderstand R_s einzuschalten</u>, da dem Normalelement praktisch kein Strom entnommen werden darf!)

   Welche Spannung liegt jetzt über 1 mm Brückendraht?

2. Mit dem geeichten Kompensator sind eine Reihe chemischer Urspannungen zu messen, welche an Stelle des Normalelementes zwischen die Klemmen C und D geschaltet werden. (Jede mögliche Kombination der gründlich gereinigten Elektroden!)
   Dazu ist jeweils der Schiebekontakt X so zu verstellen, daß das Nullinstrument wieder stromlos wird. Dann ist die Spannung U_{AX} gleich der gesuchten Urspannung! Die

Einstellung ist sehr schnell vorzunehmen, um eine Polarisation der chemischen Spannungsquellen zu vermeiden. Die erste Messung ist jeweils nach Reinigung der Elektroden nochmals zu überprüfen.

3. Nach Bild 3a ist die Eichkurve eines Spannungsmessers aufzunehmen. Dazu ist die Spannung U_{CD} am Voltmeter mittels der Hilfsspannungsquelle E_2 und des Widerstandes R_2 auf eine Reihe von Werten einzustellen und jeweils mit der Spannung U_{AX} zu kompensieren. Die Ausschläge des Voltmeters (Skalenteile) sind in Abhängigkeit von der Kompensatorspannung graphisch aufzutragen.

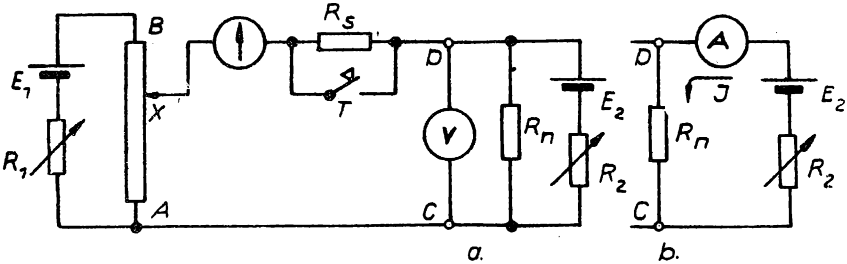


Bild 3

Schaltung zum Eichen eines Spannungsmessers und eines Strommessers.

4. Ähnlich ist die Eichkurve eines Amperemeters aufzunehmen (Bild 3b). Dazu ist die Stromstärke J (durch das Amperemeter und den Normalwiderstand R_n) mittels R_2 auf eine Reihe von Werten einzustellen. Die an R_n auftretende Spannung U_{CD} ist jeweils mit der Spannung U_{AX} zu kompensieren. Aus U_{CD} und R_n sind die zugehörigen Stromwerte zu berechnen. Die am Strommesser angezeigten Werte (Skalenteile) sind über den berechneten Stromwerten graphisch aufzutragen.

Auswertung:

1. Erklären Sie, warum das Kompensationsverfahren besonders zur Messung unbekannter (chemischer) Urspannungen geeignet ist!
2. Vergleichen Sie die gemessenen Urspannungen entsprechend der chemischen Spannungsreihe der Metalle miteinander!
3. Diskutieren Sie die Eichkurven der Meßinstrumente!

2. Kondensator

Übung Nr. 2.1: Kapazitätsmessung mit ballistischem Galvanometer

Versuchsziel:

Überprüfen der aus der Theorie bekannten Beziehung zwischen Ladung und Spannung bei Kondensatoren durch das Experiment. Bestimmung unbekannter Kapazitäten.

Grundlagen:

Aus der Theorie des Kondensators ergibt sich (bei Konstanz der äußeren Bedingungen) Proportionalität zwischen Ladung und Spannung:

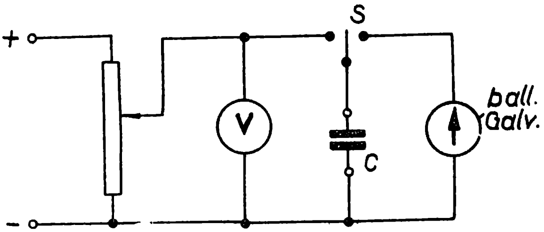
$$Q = C \cdot U \qquad (1)$$

Der Proportionalitätsfaktor C (gemessen in $\frac{As}{V} = F$ (Farad)) ist abhängig von Plattengröße und -abstand, sowie vom Dielektrikum, und heißt "Kapazität" des Kondensators. Für die meisten Dielektrika ist C unabhängig von der anliegenden Spannung.

Zur experimentellen Überprüfung dieser Tatsache ist eine gleichzeitige Messung der Kondensatorspannung U_C und der Ladung Q_C des Kondensators erforderlich. Zur Ladungsmessung wird hier ein sogenanntes "ballistisches Galvanometer" verwendet. Ein solches Instrument besitzt ein Drehspulsystem mit großer Drehmasse und relativ niedrigem Innenwiderstand. Entlädt sich ein Kondensator über dieses System, so ist seine gesamte Ladung Q_C bereits über das Galvanometer abgeflossen, bevor sich die Drehspule praktisch in Bewegung gesetzt hat. Der Drehimpuls, welchen das System erhält, und damit auch der maximale Zeigerausschlag α_{max} wird dadurch proportional der durchgeflossenen Ladungsmenge:

$$\alpha_{max} = k \cdot \int J\,dt = k \cdot Q_C \qquad [\text{Skt}] \qquad (2)$$

k ist hierbei eine Galvanometerkonstante.



Versuchsschaltung

Aufgaben:

1. Für ein bekanntes Kapazitätsnormal C_n ist der Ausschlag α des ballistischen Galvanometers bei Entladung in Abhängigkeit von der Kondensatorspannung U_C aufzunehmen (Eichkurve!). Aus den Messungen ist die Galvanometerkonstante k zu bestimmen (Maßeinheit z.B. $\frac{\mu As}{\text{Skalenteil}}$)!
2. Mit der gleichen Schaltung sind die Kapazitäten von drei unbekannten Kondensatoren zu bestimmen
   a) einzeln,
   b) parallel,
   c) in Reihe geschaltet.
   Die Messung ist jeweils mit zwei verschiedenen Spannungen vorzunehmen, welche so zu wählen sind, daß im zweiten bis dritten Drittel der Galvanometerskala gearbeitet wird.

Auswertung:

1. Vergleichen Sie die Versuchsergebnisse miteinander und rechnen Sie nach, ob die Ergebnisse der Reihen- und Parallelschaltung der Theorie entsprechen.

2. Weisen Sie nach, daß der Drehimpuls der Galvanometerspule proportional der durchgeflossenen Ladungsmenge ist!

Übung Nr. 2.2: Auf- und Entladevorgang des Kondensators

Versuchsziel:

Kennenlernen der Ausgleichsvorgänge beim Ein- und Abschalten einer Gleichspannung im Stromkreis mit Kondensator und Widerstand. Überprüfen der theoretischen Rechnung durch das Experiment.

Grundlagen:

1. Einschaltvorgang (Bild 1)

Bei sprunghaftem Einschalten einer Urspannung E mittels des Schalters S im Stromkreis mit Kondensator findet ein Ausgleichsvorgang statt, welcher erst beendet ist, wenn durch Aufladen des Kondensators die Spannung U_C gleich der Urspannung E geworden ist. Der geladene Kondensator wirkt dann praktisch als Spannungsquelle und kompensiert die Urspannung E.

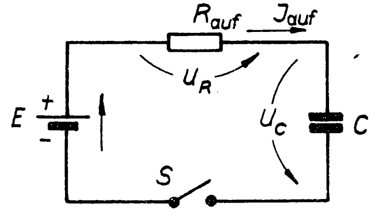


Bild 1

Nach dem Maschensatz ergibt sich

$$U_R + U_C = E \qquad (1)$$

als Ausgangsgleichung zur Berechnung des zeitlichen Strom- und Spannungsverlaufes am Kondensator.

Unter Anwendung der Grundgleichungen

$$U_R = J \cdot R \quad \text{und} \quad U_C = \frac{1}{C} \cdot \int J \, dt \qquad (2)$$

erhält man aus (1) schließlich die Differentialgleichung

$$\frac{dJ}{dt} + \frac{1}{R.C} J = 0 \qquad (3)$$

mit der Anfangsbedingung:

$$J_o = \frac{E}{R} \quad (\text{für } t = 0) \tag{4}$$

Als Lösung ergibt sich der Verlauf des Ladestromes

$$J_{auf} = J_o \cdot e^{-\frac{t}{R_{auf} \cdot C}} = \frac{E}{R_{auf}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{auf}}} . \tag{5}$$

Die <u>Zeitkonstante</u>

$$\tau_{auf} = R_{auf} \cdot C$$

ist maßgebend für die praktische Dauer des Aufladevorganges. Man rechnet leicht nach, daß nach der Zeit $t = 3\tau$ der Ladevorgang praktisch beendet ist.

Aus (5) und (3) ergibt sich der Verlauf der Kondensatorspannung während der Aufladung

$$U_{C\ auf} = E\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{auf}}}\right) . \tag{6}$$

Die <u>Halbwertzeit</u> t_H, nach welcher der Ladestrom auf die Hälfte seines Ausgangswertes abgesunken, bzw. die Kondensatorspannung bis zum halben Endwert angestiegen ist (Bild 3), beträgt

$$t_H \approx 0{,}7\tau$$

2. <u>Entladevorgang</u> (Bild 2)

Schaltet man den auf die Spannung $U_C = E$ aufgeladenen Kondensator über den Widerstand R_{ent} kurz, so ergibt sich in ähnlicher Weise wie oben ein Ausgleichsvorgang mit dem Verlauf

$$J_{ent} = - J_o \cdot e^{-\frac{t}{R_{ent} \cdot C}}$$

$$= - \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ent}}} \qquad (8)$$

$$U_{C\,ent} = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ent}}} \qquad (9)$$

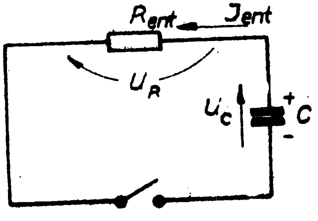


Bild 2

In Bild 3 schließlich ist der Verlauf der Spannung U_C und des Stromes J beim Lade- und Entladevorgang graphisch dargestellt.

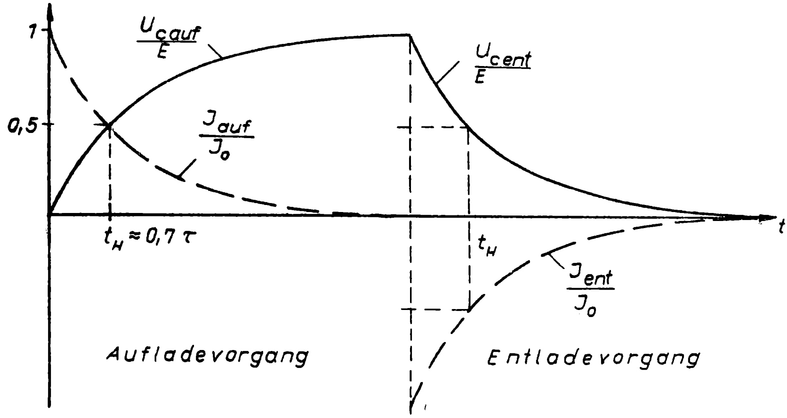


Bild 3
Auf- und Entladevorgang des Kondensators

Aufgaben:

1. Entsprechend Bild 4 ist der Verlauf von U_C und J beim Lade- und Entladevorgang für drei verschiedene Widerstände aufzunehmen und graphisch aufzutragen.
   Dazu sind die Werte von U_C und J in gleichen Zeitabständen (Stoppuhr!) von den Instrumenten abzulesen.
   Wird zur Strommessung kein Instrument mit Zeigermittelstellung verwendet, so ist es vor dem Beginn des Entladens umzupolen.

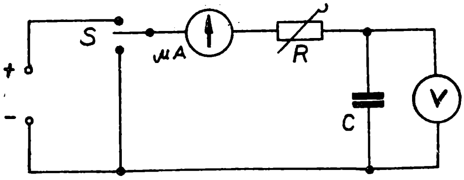


Bild 4
Versuchsschaltung

2. Aus den gemessenen Kurven ist über die jeweilige Halbwertzeit t_H die Zeitkonstante τ zu ermitteln und mit der errechneten zu vergleichen (Gl. (7)).

Auswertung:

1. Entwickeln Sie aus (1) die Differentialgleichung (3) und erklären Sie ihre Anfangsbedingung (4)!
2. Leiten Sie die Gleichungen (8) und (9) aus Bild 2 ab!
3. Erklären Sie die Wirkungsweise eines statischen Voltmeters. Warum wird ein solches im Versuch verwendet?
4. Zeichnen Sie für eine der drei errechneten Zeitkonstanten den theoretischen Verlauf der Ladespannung U_C auf und vergleichen Sie diesen mit der gemessenen Kurve!

Übung Nr. 2.3: Glimmlampen-Kippschaltung

Versuchsziel:

Kennenlernen einer wichtigen Anwendung der Schaltvorgänge am Kondensator in einer einfachen Oszillatorschaltung[1].

Grundlagen:

Für verschiedene elektronische Meßzwecke (z.B. im Elektronenstrahl-Oszillographen) benötigt man eine sich periodisch verändernde (oszillierende) Spannung, welche in bestimmten Zeitintervallen $T = t_2 - t_1$ linear bis zu einem Höchstwert ansteigt und dann nahezu zeitlos auf den Ausgangswert absinkt (Bild 1). Ihrer Form nach spricht man von einer Sägezahnspannung oder allgemein von einer Kippspannung.

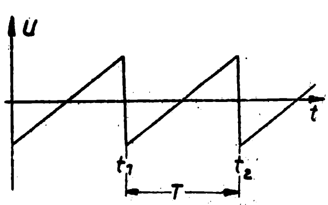


Bild 1
Sägezahnspannung

Eine einfache Oszillatorschaltung, welche näherungsweise einen solchen Spannungsverlauf liefert, ist in Bild 2 dargestellt. Ein Kondensator C ist über einen Widerstand R_{auf} an eine Gleichspannung E angeschlossen und lädt sich mit der Zeitkonstanten (vergl. Übung Nr. 2.1)

$$\tau_{auf} = R_{auf} \cdot C \qquad (1)$$

so weit auf, bis der Aufladevorgang durch Zünden der zu ihm parallelgeschalteten Glimmlampe G unterbrochen wird. Das geschieht, wenn die Kondensatorspannung U_C gleich der Zündspannung U_Z der Glimmlampe geworden ist (vergl. Übung Nr. 1.2, Kennlinie einer Glimmlampe). Da der innere Widerstand der Glimmlampe nach dem Zünden sehr klein wird, ist

---

1) oszillieren = schwingen, Oszillator = Schwinger

zu ihrem Schutze noch ein Vorwiderstand R_{ent} ($\ll R_{auf}$) eingeschaltet, über welchen sich der Kondensator nach der Zündung mit der Zeitkonstanten $\tau_{ent} \approx R_{ent} \cdot C$ entlädt. Die Entladung wird unterbrochen, sobald die Kondensatorspannung U_C bis auf den Wert der Löschspannung U_L der Glimmlampe abgesunken ist. Dann beginnt wieder der Aufladevorgang und das Spiel wiederholt sich periodisch (Bild 3).

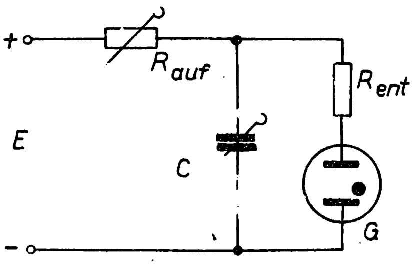


Bild 2
Einfache Kippschaltung

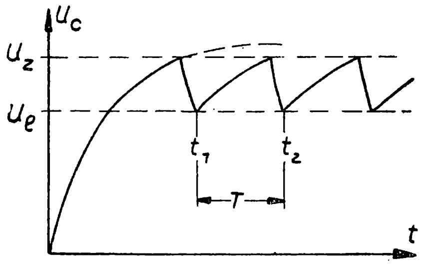


Bild 3
Spannungsverlauf am Kondensator bei nebenstehender Kippschaltung

Die erzeugte Kippfrequenz ergibt sich entsprechend dem Aufladevorgang des Kondensators (Übung Nr. 2.2, Gl. (6)) zu

$$f = \frac{1}{T} = \text{konst} \cdot \frac{1}{\tau_{auf}}, \qquad (2)$$

wenn man die Entladezeit wegen der kleinen Zeitkonstanten τ_{ent} vernachlässigt. Sie läßt sich also durch Wahl von R_{auf} und C willkürlich einstellen.

Mit derartigen Schaltungen lassen sich Kippfrequenzen bis zu einigen kHz erzeugen. Sie sind jedoch gewöhnlich in dieser einfachen Form nicht zu verwenden, da die Ladespannung nicht linear sondern exponentiell ansteigt. Außerdem gibt die Spanne von U_L bis U_Z einer Glimmlampe eine zu niedrige Kippamplitude.

Aufgaben:

1. Für die nach Bild 2 hergestellte Kippschaltung ist bei konstanter Kapazität (z.B. 4 μF) die (niedrig gewählte) Kippfrequenz f durch Abzählen der Entladungen pro Minute (Stoppuhr!) für eine Reihe von Widerständen R_{auf} aufzunehmen und graphisch aufzutragen.

2. Die Kippfrequenz f ist bei konstantem Widerstand R_{auf} (z.B. 1o MOhm) in gleicher Weise für eine Reihe von Kapazitäten aufzunehmen und graphisch aufzutragen.

Auswertung:

1. Vergleichen Sie die Meßergebnisse mit der Theorie (Gl. (2))!

2. Berechnen Sie in Gleichung (2) die Konstante aus der Exponentialfunktion für den Aufladevorgang und aus den beiden Spannungsgrenzen U_Z und U_L! Ist hier $\tau_{ent} \ll \tau_{auf}$?

3. Erklären Sie mit Hilfe der Kirchhoffschen Regeln, warum bei zu kleinem Ladewiderstand R_{auf} die Glimmlampe nicht mehr löscht und daher keine Kippschwingungen zustande kommen können. Wie kann man also nur zu höheren Frequenzen gelangen?

3. Elektromagnetismus

Übung Nr. 3.1: Untersuchung eines Kraftmagneten

Versuchsziel:

Abhängigkeit der Ankungs- und Haltekräfte von Stromstärke und Luftspalt sind zu ermitteln.

Grundlagen:

Aus der Definitionsgleichung für die magnetische Spannung V,

$$dW = V \cdot d\Phi \qquad (1)$$

errechnet sich der Energieinhalt einer Magnetflußstrecke (Bild 1) zu

$$W = \int V \; d\Phi \qquad (2)$$

Im homogenen Feld, wie es bei den vorliegenden Betrachtungen angenommen werden kann, ergibt sich durch Herausziehen der räumlichen Abmessungen

$$W = l \cdot S \cdot \int \mathcal{H} \; d\mathcal{B} \quad . \qquad (3)$$

Hierbei ist l die Länge und S der Querschnitt des betrachteten Volumens. Für einen Luftspalt entsprechend Bild 1 gilt

$$\mathcal{H} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \mathcal{B} \qquad (4)$$

mit μ_0 = konst.

Damit wird der Energieinhalt des Luftspaltes

$$W_{Luft} = l \cdot S \frac{\mathcal{B}^2}{2\,\mu_0} \qquad (5)$$

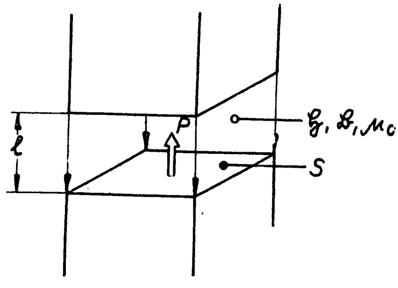


Bild 1

Infolge des Energieinhaltes wirkt auf die Randflächen des Luftspaltes eine (Anziehungs-)Kraft P. Schließt sich der Luftspalt unter dem Einfluß dieser Kraft, so liefert der Energiesatz (unter der Annahme <u>konstanter</u> Flußdichte $\mathfrak{B}$)

$$P \cdot l = l \cdot S \frac{\mathfrak{B}^2}{2 \mu_0} \tag{6}$$

Daraus berechnet sich die auf die Flächeneinheit wirkende Kraft zu

$$\frac{P}{S} = \frac{\mathfrak{B}^2}{2 \mu_0} \tag{7}$$

oder als zugeschnittene Größengleichung geschrieben

$$\frac{P}{S} / \frac{kp}{cm^2} = \left(\frac{\mathfrak{B}/G}{5000} \right)^2 \tag{8}$$

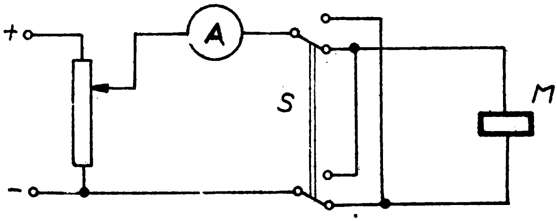


Bild 2
Versuchsschaltung

Aufgaben:

1. Für mehrere verschiedene Luftspalte ist die Haltekraft pro cm^2 Polfläche des Elektromagneten M in Abhängigkeit von der Amperewindungszahl zu bestimmen und graphisch aufzutragen. (Je Luftspalt eine Kurve. Alle aufgenommenen Kurven ins gleiche Diagramm!)
   Dazu ist mit der größten Belastung und dem größten Luftspalt zu beginnen. Die Stromstärke ist jedesmal von ihrem Maximalwert so weit herabzuregeln, bis der belastete Anker abfällt. Im Augenblick des Abfallens ist der Strom abzulesen.

2. In ähnlicher Weise ist die Anzugskraft pro cm^2 Polfläche des Elektromagneten in Abhängigkeit von der Amperewindungszahl zu bestimmen. Dabei ist jedesmal die vollständige Hysteresekurve zu durchfahren!

3. Nach Gleichung (8) ist der verwendete Kraftmaßstab in einen Flußdichtemaßstab umzurechnen. Die gemessenen Kurvenscharen sind in diesem neuen Maßstab über Jw aufzutragen und ergeben dann die Flußdichte im Luftspalt in Abhängigkeit von Jw.

4. Aus den Kurven der Aufgaben 1. und 2. sind die Werte $\frac{P}{S}$ für bestimmten (konstanten) Stromwert J abzulesen und in

Abhängigkeit vom Luftspalt l graphisch aufzutragen. Durch Extrapolation findet man die Kraft bei Luftspalt l = 0.

Auswertung:

1. Der Verlauf der Halte- und Anzugskräfte ist mit Hilfe der Theorie zu erklären!
2. Welcher Flußdichteverlauf ist theoretisch zu erwarten? Vergleichen Sie damit Aufgabe 3!
3. Erklären Sie die Abhängigkeit der Kraft vom Luftspalt theoretisch (Jw = konst!).

4. Wechselstrom

Übung Nr. 4.1: Wechselstromwiderstände

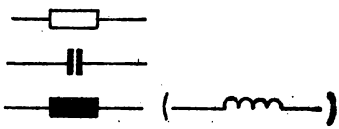
Versuchsziel:

Überprüfen der Frequenzabhängigkeit und geometrischen Addition von Wechselstromwiderständen.

Grundlagen:

In Stromkreisen mit zeitlich veränderlichen Spannungen und Strömen, insbesondere bei sinusförmigem Wechselstrom, gewinnen neben den reinen (ohmschen) Leiterwiderständen auch Schaltelemente an Bedeutung, welche über das elektrische bzw. magnetische Feld wirksam werden. Im allgemeinen genügt es, drei Grundschaltelemente zu betrachten:

1. den ohmschen Widerstand R
2. die Kapazität C
3. die Induktivität L



Für Spannungen und Ströme an diesen Schaltelementen gelten nach der Theorie folgende Beziehungen:

1. an R: $U = R \cdot J$ oder $J = \frac{1}{R} \cdot U$
2. an C: $U = \frac{1}{C} \cdot \int J\,dt$ oder $J = C \cdot \frac{dU}{dt}$ (1)
3. an L: $U = L \cdot \frac{dJ}{dt}$ oder $J = \frac{1}{L} \cdot \int U\,dt$

Bei sinusförmigem Wechselstrom

$$J_{\sim} = J_m \sin \omega t$$

ergeben sich in allen drei Fällen auch sinusförmige Spannungen, jedoch an Kapazität und Induktivität mit einer

Phasenverschiebung von 90° gegenüber dem Strom:

1. <u>an R:</u> $U_{\sim} = U_m \sin \omega t$ mit $U_m = R \cdot J_m$
2. <u>an C:</u> $U_{\sim} = U_m (- \cos \omega t)$ mit $U_m = \frac{1}{\omega C} \cdot J_m$ (2)
3. <u>an L:</u> $U_{\sim} = U_m (+ \cos \omega t)$ mit $U_m = \omega L \cdot J_m$

Als Wechselstromwiderstand <u>(Scheinwiderstand)</u>[1] Z definiert man das Verhältnis von Spannungsamplitude zur Stromamplitude (= dem Verhältnis der beiden Effektivwerte) und erhält

1. <u>an R:</u> $Z = R$ Wirkwiderstand[1][2]
2. <u>an C:</u> $Z = \frac{1}{\omega C}$ $(= X_C)$ kapazitiver Blindwiderstand[2](3)
3. <u>an L:</u> $Z = \omega L$ $(= X_L)$ induktiver Blindwiderstand[2]

Kapazitiver und induktiver Blindwiderstand[1] sind offenbar abhängig von der Frequenz (Kreisfrequenz) ω des verwendeten Wechselstromes (Bild 1).

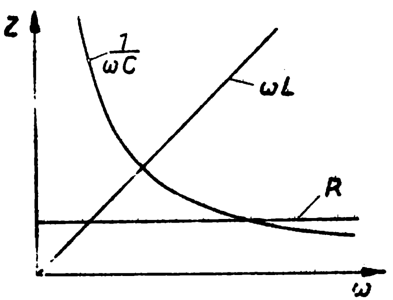


Bild 1
Frequenzabhängigkeit der Wechselstromwiderstände

Bei Reihenschaltung verschiedener Wechselstromwiderstände addieren sich die Spannungen und damit die Widerstände <u>geometrisch</u>, wie sich aus der Lösung der entsprechenden Differentialgleichung bzw. aus der Addition der Gln. (2) ergibt.

---

1) Gelegentlich verwendet man für die verschiedenen Wechselstromwiderstände die Bezeichnungen <u>Impedanz</u> (Scheinwiderstand), <u>Resistanz</u> (Wirkwiderstand) und <u>Reaktanz</u> (Blindwiderstand).

2) Bisher wurden für die Wechselstromwiderstände auch die Zeichen R_s (Scheinwiderstand), R_b, R_c, R_L (Blindwiderstand allgemein, kapazitiv, induktiv) und R_w (Wirkwiderstand) verwendet.

Man erhält

für R und L in Reihe: $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$

für R und C in Reihe: $Z = \sqrt{R^2 + (\frac{1}{\omega C})^2} = \sqrt{R^2 + X_C^2}$

für R, C und L in Reihe: $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$

$= \sqrt{R^2 + X^2}$

Entsprechendes gilt bei Parallelschaltung für die Ströme und die Leitwerte.

Diese Addition findet ihr geometrisches Analogon im Zeigerdiagramm für Spannungen und Widerstände bzw. Ströme und Leitwerte (Bild 2 und 3. Vergl. auch Übung Nr. 4.4 und 4.5).

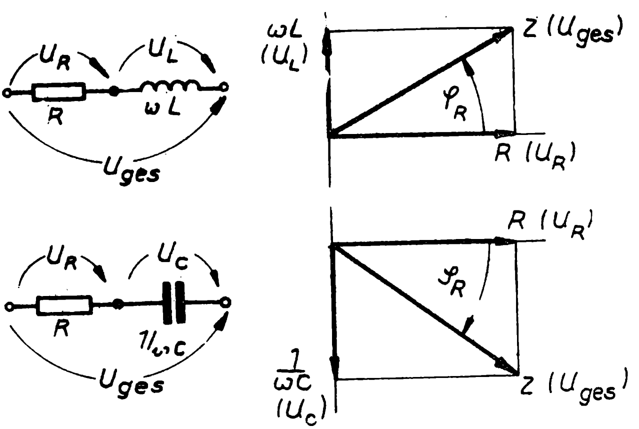


Bild 2

Zeigerbilder bei Reihenschaltung
von Wirk- und Blindwiderstand

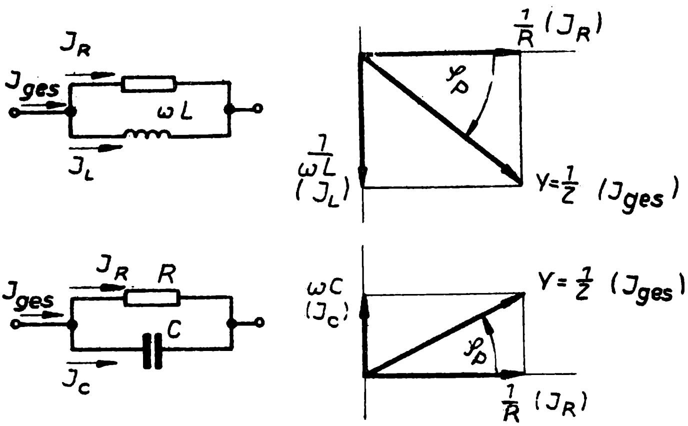


Bild 3

Zeigerbilder bei Parallelschaltung
von Wirk- und Blindleitwert

Aufgaben:

1. Durch Strom- und Spannungsmessung (Bild 4) ist der Scheinwiderstand Z in Abhängigkeit von der Frequenz f zu bestimmen und graphisch aufzutragen

   a) von R, L und C einzeln

   b) von R und L bzw. R und C in Reihe (R, L und R + L ins gleiche Diagramm und entspr. R, C und R + C).

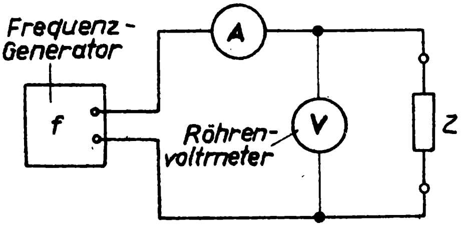


Bild 4

Versuchsschaltung

2. Entsprechend ist für eine Parallelschaltung von R und C Scheinleitwert und Scheinwiderstand in Abhängigkeit von der Frequenz aufzunehmen und graphisch aufzutragen.

<u>Auswertung:</u>

1. Die Meßergebnisse sind mit den theoretisch berechneten Kurven zu vergleichen. Abweichungen sind zu erklären!
2. Der Frequenzgang von R und C in Reihe ist auf doppelt logarithmischem Papier darzustellen und zu diskutieren!
3. Zu den Messungen 1b und 2 ist für zwei verschiedene Frequenzen je ein Widerstands- bzw. Leitwertdiagramm zu zeichnen. Die geometrische Addition der Wechselstromwiderstände ist dadurch zu bestätigen.

Übung Nr. 4.2: Leistungsmessung bei Wechselstrom

Versuchsziel:

Die Zusammenhänge von Wirk- und Blindgrößen im Wechselstromkreis sollen meßtechnisch erfaßt und ihre praktische Bedeutung erkannt werden.

Grundlagen:

Im Wechselstromkreis bestehen zwischen Strom, Spannung und Leistung gewöhnlich nicht so einfache Beziehungen wie im Gleichstromkreis. Die Ursache dafür ist eine Phasenverschiebung φ zwischen Spannung und Stromstärke, welche durch das Auftreten sogenannter Blindwiderstände (Induktivität, Kapazität) hervorgerufen wird. Man unterscheidet demzufolge zwischen

Wirkleistung $N_w = U \cdot J \cdot \cos\varphi = U \cdot J_w$ [W]

und

Blindleistung $N_b = U \cdot J \cdot \sin\varphi = U \cdot J_b$ [VA]

und nennt das Produkt aus den Effektivwerten von Spannung und Stromstärke die

Scheinleistung $N_s = U \cdot J = \sqrt{N_w^2 + N_b^2}$ [VA]

Entsprechende Beziehungen gelten für Ströme bzw. Spannungen.

Um alle diese Wechselstromgrößen meßtechnisch ermitteln zu können, ist es erforderlich, neben Strom und Spannung mindestens noch eine dritte Größe zu messen. Alle übrigen lassen sich dann aus diesen drei Meßwerten berechnen. Zweckmäßig mißt man außer Strom und Spannung noch die Wirkleistung N_w. Hierzu stehen Leistungsmesser ("Wattmeter") zur Verfügung, welche eine Strom- und eine Spannungsspule besitzen (Bild 1). Durch Multiplikation der Augenblickswerte von Strom und Spannung zeigt ein Wattmeter den zeitlichen Mittelwert der Momentanleistung an und berücksichtigt somit bereits den Phasenwinkel φ bzw. den <u>Leistungsfaktor cos φ</u> .

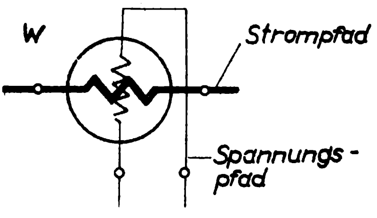


Bild 1
Schaltung eines Wattmeters

Instrumente, welche den Leistungsfaktor cos φ direkt anzeigen, werden nur selten verwendet, da sie teuer und ungenau sind.

<u>Aufgaben:</u>

1. An einem Wechselstrom-Kurzschlußläufermotor sind Strom J und Wirkleistung N_w bei konstanter Nennspannung aufzunehmen.[1] Aus den gemessenen Werten sind Leistungsfaktoren cos φ , Schein- und Blindleistung, sowie Wirk- und Blindstrom des Motors zu berechnen und alle Größen über dem Drehmoment graphisch aufzutragen. (Es genügen 5 Meßwerte zwischen Leerlauf und Vollast.)

---

1) Unter den "Nenn"werten eines elektrischen Gerätes versteht man diejenigen Werte von Strom, Spannung, Leistung usw., für welche das Gerät vom Hersteller vorgesehen ist. Diese Werte sind auf dem "Leistungsschild" des Gerätes eingetragen.

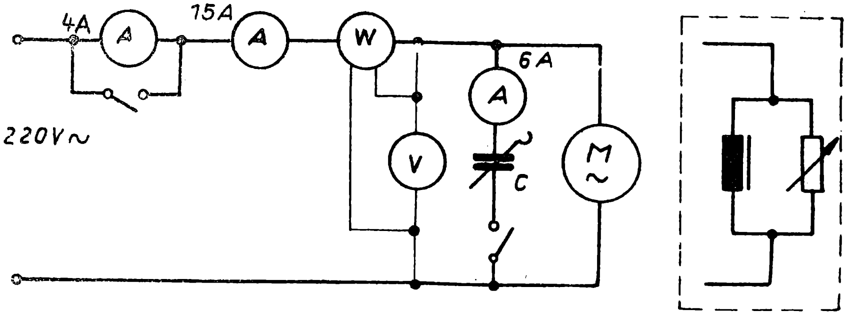


Bild 2
Versuchsschaltung

2. Die entsprechenden Werte sind nach Parallelschalten eines Phasenschieberkondensators aufzunehmen und in die gleichen Diagramme einzutragen (Alle Ströme in ein gemeinsames Stromdiagramm und alle Leistungen in ein gemeinsames Leistungsdiagramm).
   Vor dieser Messung sind die Kondensatoren der Kondensatorbatterie einzeln zuzuschalten und dabei die Instrumente zu beobachten. (Welche Veränderungen stellen Sie fest?) Die Messungen sind mit derjenigen Kapazität durchzuführen, bei welcher der Strom im Leerlauf ein Minimum annimmt.

Auswertung:

1. Seinem Verhalten nach läßt sich der Motor (ohne parallelgeschalteten Kondensator) näherungsweise als Parallelschaltung einer konstanten Induktivität und eines veränderbaren Ohmschen Widerstandes ansehen. (Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Motors. Vergl. Bild 2).
   Begründen Sie diese Behauptung anhand der gemessenen Werte!
   Berechnen Sie für einige Meßpunkte die Größe dieser Induktivität und des Widerstandes! Zeichnen Sie das

Zeigerdiagramm der Ströme für Leerlauf und Vollast maßstäblich!

2. Vergleichen Sie die verwendete Phasenschieberkapazität mit der unter 1. berechneten Induktivität des Motors! Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm der Ströme für Leerlauf (M_d = 0) und Vollast (M_d = Max.) mit Phasenschieberkondensator!

3. Erklären Sie die wirtschaftliche Bedeutung des Phasenschieberkondensators!

Übung Nr. 4.3: Induktivität einer Eisendrossel

Versuchsziel:

Nachweis der Abhängigkeit der Induktivität L einer Eisendrossel von Magnetisierungsgrad und Luftspalt.

Grundlagen:

Die Induktivität

$$L = \frac{w^2}{R_m} \tag{1}$$

einer Spule mit Eisenkern ist entsprechend der Definitionsgleichung (1) wesentlich bestimmt durch den magnetischen Widerstand R_m des Eisenkreises. Dieser ist nicht allein durch seine Abmessungen (Länge l und Querschnitt S), sondern vor allem durch die Permeabilität μ der betreffenden Eisensorte gegeben:

$$R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S} \quad (\mu = \mu_0 \cdot \mu_{rel}) \tag{2}$$

Die Permeabilität

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}} \tag{3}$$

der ferromagnetischen Stoffe ist entsprechend ihrer Magnetisierungskurve nicht konstant, sondern abhängig vom Grad der Magnetisierung (Bild 1). Daraus ergibt sich, daß sich auch die Induktivität L mit dem Magnetisierungsgrad verändern muß. Eine exakte Angabe der Induktivität einer Eisendrossel ist daher nur bei gleichzeitiger Angabe der Stromstärke angebracht.

Will man die Induktivität vom Magnetisierungsgrad des Eisens weitgehend unabhängig machen, so muß man die Magnetisierungskurve der Drossel mit Hilfe eines Luftspaltes linearisieren.

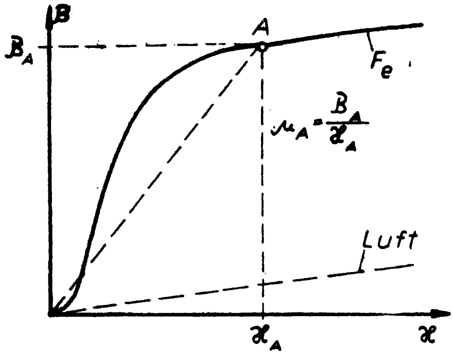


Bild 1

Bestimmung der Permeabilität μ aus der Magnetisierungskurve bei vorgegebener Flußdichte $\mathcal{B}_A$ oder Feldstärke $\mathcal{H}_A$ im Punkt A

Dann wird

$$R_m = \frac{1}{\mu_o S} \left(\frac{l_{Fe}}{\mu_{rel}} + l_{Luft} \right) \tag{4}$$

Der magnetische Widerstand ist bei hinreichend großem Luftspalt l_{Luft} nur noch in geringem Maße von der relativen Permeabilität μ_{rel} des Eisens abhängig. Weiterhin läßt sich die Induktivität L durch stetige Veränderung des Luftspaltes selbst stetig verändern.

Zur Messung der Induktivität ist der Blindwiderstand

$$X_L = \omega L \tag{5}$$

der Spule zu bestimmen. Läßt sich ihr Wirkwiderstand R gegenüber X_L vernachlässigen, so erhält man sofort

$$\frac{U}{J} = Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \approx X_L \tag{6}$$

also

$$L \approx \frac{U}{\omega J} \tag{7}$$

Läßt sich R nicht vernachlässigen, so berechnet sich die Induktivität genauer zu

$$L = \frac{\sqrt{U^2 J^2 - N_w^2}}{\omega J^2} \tag{8}$$

Bei der Messung ist außerdem der Eigenverbrauch der Meßgeräte zu berücksichtigen! Zumindest sind sie entsprechend dem Scheinwiderstand der Drossel so zu schalten, daß der auftretende Fehler klein gehalten wird (vergl. Übung Nr. 1.1, Schaltung a oder b).

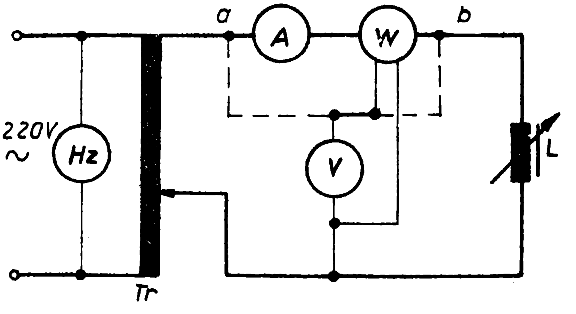


Bild 2
Versuchsschaltung

Aufgaben:

1. Die Induktivität L einer Spule mit Eisenkern (Trafoblech), sowie der die Spule durchfließende Strom J ist
   a) ohne Luftspalt
   b) mit Luftspalt (z.B. 1 mm)
   in Abhängigkeit von der anliegenden Spannung aufzunehmen und graphisch aufzutragen.
   Dazu ist entsprechend Bild 2 die Spannung U mit Hilfe des Einstelltransformators Tr zu variieren. Die Werte U, J, N_w und f sind als Tabelle aufzunehmen und daraus L nach Gl. (7) bzw. (8) zu berechnen.

2. Mit der gleichen Schaltung ist bei konstant gehaltener Spannung U die Induktivität L in Abhängigkeit vom Luftspalt l_{Luft} aufzunehmen und graphisch aufzutragen.
   Dazu wird der "Luft"spalt durch Einlegen von Platten aus nichtferromagnetischem Material verändert.

Auswertung:

1. Erklären Sie die Abhängigkeit der Induktivität der Eisendrossel vom Magnetisierungsgrad (Kurve 1a) mit Hilfe der theoretischen Grundlagen! Welcher Grenzwert wird bei hoher Magnetisierung erreicht? (Vergleich von Induktivitäts- und Stromkurve!)

2. Erklären Sie graphisch die Linearisierung mit Hilfe eines Luftspaltes (Kurve 1b) durch Addition der magnetischen Strom-Spannungskennlinien (Φ - Θ - Diagramm) von Eisenkreis und Luftspalt!

3. Erklären Sie den Verlauf der Induktivität in Abhängigkeit vom Luftspalt (Kurve 2) mit Hilfe der theoretischen Grundlagen! Welchem Grenzwert strebt L theoretisch und praktisch zu?

4. Leiten Sie Gl. (8) ab!

Übung Nr. 4.4: Reihenresonanz

Versuchsziel:

Die markanteste Erscheinung im Wechselstromkreis, die Resonanz, soll meßtechnisch erfaßt und dabei die Beziehung zwischen den verschiedenartigen Wechselstromwiderständen nachgeprüft werden.

Grundlagen:

Bei der Reihenschaltung von ohmschem, induktivem und kapazitivem Widerstand gilt infolge der zwischen den einzelnen Spannungen und dem Strom auftretenden Phasenverschiebungen die geometrische Addition für die Teilspannungen und damit auch für die Widerstände. Insbesondere ergibt sich für den gesamten Scheinwiderstand die Beziehung

$$\frac{U}{J} = Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad \text{(Bild 1)} \qquad (1)$$

Hierbei ist

$$X_L = \omega L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}. \qquad (1a)$$

X_L und X_C sind frequenzabhängig (vergl. auch Übung Nr.4.1 Bild 2). Durch geeignete Wahl der Frequenz f bzw. der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ läßt sich erreichen, daß $X_L = X_C$, also

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \qquad (2)$$

ist. Aus (2) ergibt sich diese "Resonanzfrequenz" zu

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L.C}} \qquad (3)$$

Für diese Frequenz nimmt der Scheinwiderstand seinen kleinsten Wert an:

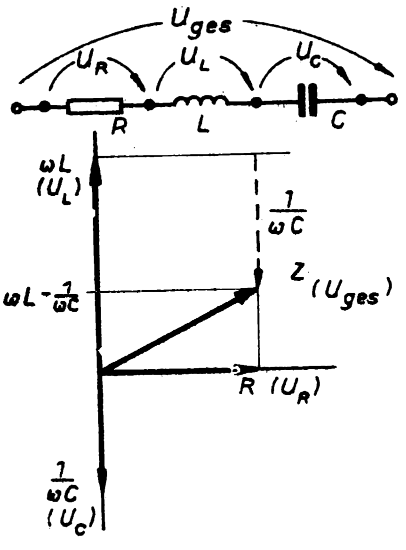


Bild 1
Widerstandsdiagramm
(bei Reihenschaltung)

$$Z = R \qquad (4)$$

für $\omega = \omega_r$

Induktiver und kapazitiver Widerstand heben sich gegenseitig auf.

Bei konstanter Gesamtspannung erreicht im Falle dieser Reihenresonanz der Strom ein Maximum. Dadurch treten an den einzelnen Blindschaltelementen Spannungsspitzen auf, welche ein Vielfaches der Gesamtspannung betragen können. Die Größe des Stromes und der Blindspannungen wird lediglich durch den ohmschen Widerstand R der Schaltung begrenzt. Sie berechnet sich zu

$$J_{res} = \frac{U_{ges}}{R} \qquad (5)$$

$$U_{L\ res} = U_{C\ res} = J_{res} \cdot \omega_r L = J_{res} \cdot \frac{1}{\omega_r C}$$

Ist die Frequenz des Stromkreises gegeben (z.B. 50 Hz), so kann Resonanz durch geeignete Veränderung von C bzw. L erreicht werden.

Das Verhältnis von Maximalspannung zur Gesamtspannung bezeichnet man als <u>Resonanzüberhöhung</u> oder <u>Resonanzschärfe</u>

$$\rho = \frac{U_{L\,max}}{U_{ges}} \approx \frac{U_{C\,max}}{U_{ges}}$$

$$\rho = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r CR} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (6)$$

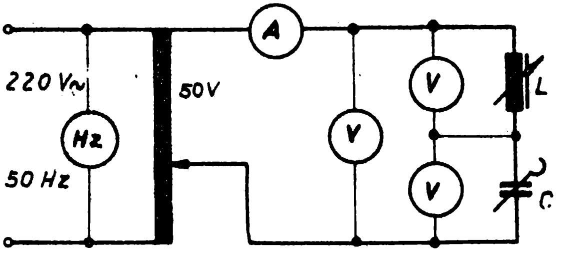


Bild 2
Versuchsschaltung

Aufgaben:

1. Bei konstanter Frequenz f, konstanter Gesamtspannung U und konstanter Induktivität L ist der Strom J und die Teilspannungen U_L und U_C in Abhängigkeit von der Kapazität C aufzunehmen und (in gemeinsamem Diagramm) graphisch aufzutragen.
   C ist dazu durch Parallelschalten einzelner Kondensatoren stufenweise zu verändern.

2. Bei konstanter Frequenz f, konstanter Gesamtspannung U und konstanter Kapazität C sind der Strom J und die Teilspannungen U_L und U_C in Abhängigkeit von der Induktivität

$$L \approx \frac{U_L}{\omega J} \qquad (7)$$

aufzunehmen und (in gemeinsamem Diagramm) graphisch aufzutragen.
Dazu ist L durch Verändern des Luftspaltes zu variieren und für jeden Meßpunkt aus Gl. (7) zu berechnen.

Auswertung:

1. Aus beiden Messungen ist mit Hilfe des Resonanzpunktes ($J = J_{max}$) der in der Schaltung enthaltene ohmsche Widerstand R und die Resonanzschärfe ρ zu berechnen.
2. Der Verlauf der gemessenen Kurven ist mit Hilfe der Theorie zu erklären. Dazu ist für mehrere Meßpunkte das Zeigerdiagramm der Spannungen maßstäblich zu zeichnen.
3. Es ist zu begründen, warum die Maxima von U_L und U_C nicht bei gleicher Kapazität bzw. Induktivität liegen. Die Begründung ist durch Rechnung zu ergänzen (Extremwertaufgabe!).
4. Welcher Fehler wird bei Verwendung von Gl. (7) in Kauf genommen?

Ü b u n g Nr. 4.5: Parallelresonanz

Versuchsziel:

Kennenlernen der Resonanzerscheinung am Parallelschwingkreis

Grundlagen:

Ähnlich wie bei der Reihenschaltung (Übung Nr. 4.4) tritt auch bei der Parallelschaltung von L, C und R im Wechselstromkreis ein Resonanzverhalten auf. Bekanntlich gelten die bei der Reihenschaltung auftretenden geometrischen Beziehungen zwischen den Spannungen bzw. den Widerständen bei der Parallelschaltung analog für die Ströme bzw. Leitwerte (vergl. Übung Nr. 4.1, Bild 3). Insbesondere ist der Scheinleitwert gegeben durch

$$\frac{J}{U} = Y = \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2} \qquad \text{(Bild 1)} \qquad (1)$$

Hierbei ist

$$G = \frac{1}{R}, \quad B_C = \omega C, \quad B_L = \frac{1}{\omega L} \qquad (1a)$$

B_C und B_L sind frequenzabhängig. Infolge der Phasenverschiebung der Ströme J_L und J_C um 180° gegeneinander heben sich diese und damit auch die Leitwerte B_L und B_C bei Wahl einer geeigneten Frequenz $\omega = \omega_r$ gegenseitig auf (Bild 2):

$$\omega_r C - \frac{1}{\omega_r L} = 0 \qquad (2)$$

Daraus ergibt sich in gleicher Weise, wie bei der Reihenschaltung die "Resonanzfrequenz" zu

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \qquad (3)$$

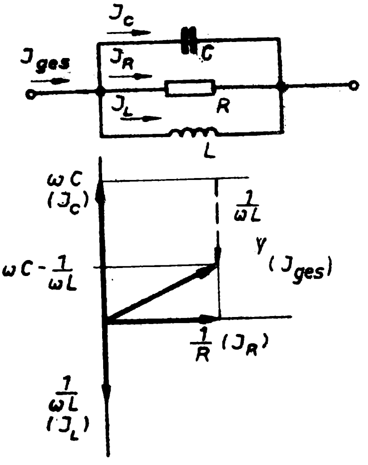


Bild 1
Parallelschaltung
mit Leitwertdiagramm

Für diese Resonanzfrequenz nimmt der Scheinleitwert seinen kleinsten Wert, der Scheinwiderstand also einen Maximalwert an:

$$Y_{min} = G = \frac{1}{R} \text{ (für } \omega = \omega_r) \qquad (4)$$

Bei konstantem Gesamtstrom erreicht im Falle dieser Parallelresonanz die Spannung ein Maximum. Dadurch treten in den einzelnen Zweigen Stromspitzen auf, welche an den Blindschaltelementen ein Vielfaches des Gesamtstromes betragen können. Die Größe der Spannung und der Blindströme wird lediglich durch den Wirkleitwert der Schaltung bestimmt. Es ergibt sich

$$U_{res} = J_{ges} \cdot R$$

$$J_{L\,res} = J_{C\,res} = U_{res} \cdot \frac{1}{\omega_r L} = U_{res} \cdot \omega_r C \qquad (5)$$

Als Resonanzüberhöhung oder Resonanzschärfe bezeichnet man das Verhältnis

$$\rho = \frac{J_{L\,max}}{J_{ges}} \approx \frac{J_{C\,max}}{J_{ges}}$$

$$\rho = \frac{R}{\omega_r L} = R \cdot \omega_r C = R \sqrt{\frac{C}{L}} \qquad (6)$$

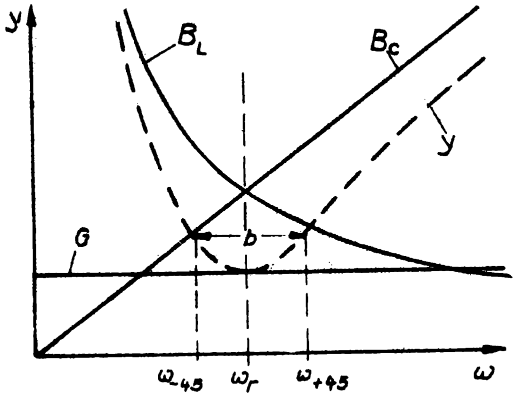


Bild 2
Frequenzabhängigkeit der Leitwerte bei Parallelschaltung

Als "45^o-Frequenz" bezeichnet man diejenige Frequenz, bei welcher zwischen Spannung und Gesamtstrom eine Phasenverschiebung von 45^o besteht. Das ist der Fall, wenn der gesamte Blindleitwert gleich dem Wirkleitwert ist (Bild 2), also bei

$$\omega_{45} C - \frac{1}{\omega_{45} L} = \frac{1}{R} \qquad (7)$$

An dieser Stelle ist

$$Y = G \cdot \sqrt{2}$$

und (für $\omega = \omega_{45}$)

$$U = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$$

Nach Gleichung (7) gibt es für ω_{45} zwei Werte $\omega_{\pm 45}$, welche unter- bzw. oberhalb der Resonanzfrequenz liegen (je nachdem, ob ωC oder $\frac{1}{\omega L}$ größer ist). Aus diesen beiden Werten definiert man die <u>Resonanzbreite</u>

$$b = \omega_{+45} - \omega_{-45} \tag{8}$$

Mit dieser Bezeichnung ergibt sich näherungsweise

$$\rho \approx \frac{\omega_r}{\omega_{+45} - \omega_{-45}} = \frac{\omega_r}{b} \tag{9}$$

das heißt, die Resonanzschärfe ρ ist umgekehrt proportional der Resonanzbreite b!

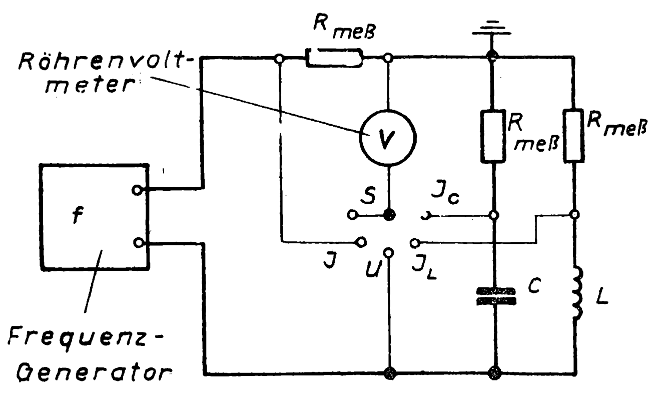


Bild 3
Versuchsschaltung

Aufgaben:

1. Bei konstanter Gesamtspannung U sind die Ströme J_{ges}, J_L und J_C in Abhängigkeit von der Frequenz f aufzunehmen und graphisch aufzutragen (zweckmäßig auf einfach logarithmischem Papier). Dazu ist die Frequenz etwa von $^1/_{10}\ f_r$ bis 10 f_r zu durchlaufen.
   Die einzelnen Ströme werden mittels Röhrenvoltmeter durch Spannungsmessung an bekannten Meßwiderständen $R_{meß}$ ermittelt.

2. Bei konstantem Gesamtstrom J_{ges} sind die Spannung U und die Teilströme J_L und J_C in Abhängigkeit von der Frequenz f aufzunehmen und graphisch aufzutragen. Dabei ist in gleicher Weise zu verfahren, wie unter 1..

Auswertung:

1. Erklären Sie die gemessenen Kurven aus der Theorie mittels Zeigerdiagramm!

2. Bestimmen Sie aus den Meßergebnissen L, C und f_r und vergleichen Sie diese mit den angegebenen Werten der Schaltelemente bzw. mit der errechneten Resonanzfrequenz.

3. Bestimmen Sie die Resonanzüberhöhung ρ und die Resonanzbreite b der gegebenen Schaltung. Berechnen Sie daraus den ohmschen (Parallel-)Widerstand! In welchem Zusammenhang steht dieser errechnete Widerstand mit den in der Schaltung wirklich vorhandenen Widerständen?
   Überprüfen Sie Gl. (9)!

B. Elektrische Geräte und Maschinen

5. Transformatoren und Transduktoren

Übung Nr. 5.1: Untersuchung eines Klingeltransformators

Versuchsziel:

Anhand der Wirkungsgrad- und Leistungsfaktorbestimmung an einem Kleintransformator soll die praktische Bedeutung der Elemente des Transformator-Ersatzschaltbildes untersucht werden.

Grundlagen:

Kleintransformatoren und Übertrager der Schwachstromtechnik besitzen relativ hohe Wirkverluste. Ihr Wirkungsgrad ist niedrig (≈ 50 %), er ist daher direkt durch Messung von aufgenommener und abgegebener Wirkleistung zu bestimmen:

$$\eta = \frac{N_{w2}}{N_{w1}} \qquad (1)$$

Klingeltransformatoren sind darüber hinaus mit verhältnismäßig hohen Streuinduktivitäten ausgestattet. Sie werden dadurch kurzschlußfest, da der Kurzschlußpunkt $U_2 = 0$ infolge der hohen Streuspannungsabfalle bereits bei relativ geringer Überlastung erreicht wird.

Im Ersatzschaltbild (Bild 1a) kommen diese Eigenschaften durch die relativ hohen Längswiderstände R_1, $R_2{}^*$ und Längsinduktivitäten L_1, $L_2{}^*$ zum Ausdruck. Diese Wider-

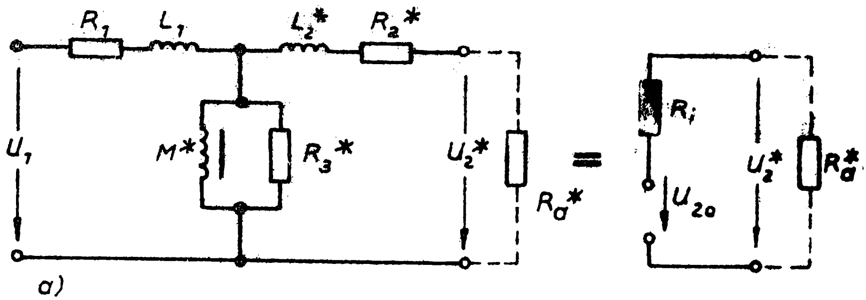


Bild 1
Transformator-Ersatzschaltbild
a) allgemein
b) Ersatzgrundstromkreis

stände sind - abgesehen vom Einfluß der Temperatur - als konstant, also als unabhängig von der Belastung zu betrachten. Der Querwiderstand jedoch, also die Koppelinduktivität M^* und der Fe-Verlustwiderstand R_3^*, sind infolge der unterschiedlichen Aussteuerung der Magnetisierungskurve des Eisens belastungsabhängig.

Die Messungen sind nach der Schaltung Bild 2 vorzunehmen. Die Sekundärseite des Klingeltransformators KTr wird durch einen Wirkwiderstand R_a belastet. Mithin ist

$$\cos \varphi_2 = 1 \quad \text{und} \quad N_{w2} = U_2 J_2 \qquad (2)$$

Die auftretenden Leistungen sind so klein, daß (insbesondere auf der Primärseite) der Eigenverbrauch der Meßgeräte berücksichtigt werden muß.

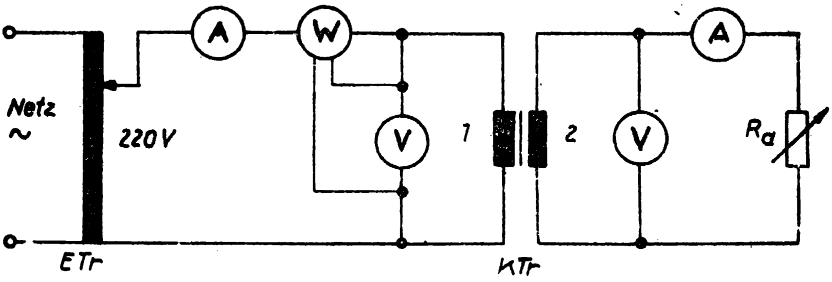


Bild 2
Versuchsschaltung zur Untersuchung des Klingeltransformators

Es ist

$$J_1 = J_1' - \frac{U_1}{R_{V1}} \; ; \qquad N_{w1} = N_{w1}' - \frac{U_1^2}{R_{V1}} \qquad (3)$$

$$\left(J_2 = J_2' + \frac{U_2}{R_{V2}} \right)$$

Hierbei sind J_1', N_{w1}' und J_2' die abgelesenen Werte, R_{V1} und R_{V2} sind die Widerstände der Spannungspfade (primärseitig und Volt- und Wattmeter).

Der primärseitige Leistungsfaktor läßt sich berechnen aus

$$\cos \varphi_1 = \frac{N_{w1}}{U_1 J_1} \qquad (4)$$

Aufgaben:

1. Mit Hilfe der angegebenen Schaltung ist die Sekundärspannung U_2, der Primärstrom J_1 und die Wirkleistung N_{w1} in Abhängigkeit vom sekundären Belastungsstrom J_2 zwischen Leerlauf ($J_2 = 0$) und Kurzschluß ($U_2 = 0$) aufzunehmen und graphisch aufzutragen.
   Dazu ist die Primärspannung U_1 mit Hilfe des Einstelltransformators ETr auf den Nennwert des Klingeltransformators (22o V) fest einzustellen und konstant zu halten. Der Belastungswiderstand R_a ist von ∞ (abgetrennter Widerstand) bis 0 zu verändern. Der Kurzschlußpunkt ($U_2 = 0$; $J_2 = J_k$) ist graphisch durch Extrapolation zu ermitteln.
2. Aus den aufgenommenen und nach Gl. (3) korrigierten Werten sind die abgegebene Leistung N_{w2}, der Wirkungsgrad η und der primäre Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ zu berechnen und über J_2 graphisch aufzutragen.

Auswertung:

1. Die Belastungsabhängigkeit von U_2, N_2, η und $\cos \varphi_1$ ist mit Hilfe des Ersatzschaltbildes (Bild 1a) zu erklären. Dazu ist gegebenenfalls auf den Ersatz-Grundstromkreis (Bild 1b) überzugehen.
2. Es ist anzugeben, in welcher Weise man vom Trafo-Ersatzschaltbild zum Ersatzgrundstromkreis gelangt (Bild 1). Wie berechnet sich der Innenwiderstand R_i und die Leerlaufspannung U_{20}?
3. Es ist zu erklären, warum beim Klingeltransformator die Gegeninduktivität M^* (und der Fe-Verlustwiderstand R_3) trotz konstantgehaltener Primärspannung nicht als konstant angesehen werden kann (Versuchsergebnisse!).

Ü b u n g Nr. 5.2: Leerlauf- und Kurzschlußversuch an einem mittleren Transformator

Versuchsziel:

Wirkungsgrad- und Verlustbestimmung an einem Einphasen-Transformator.

Grundlagen:

Bei mittleren und großen Transformatoren ist der Wirkungsgrad hoch und wird daher im indirekten Verfahren bestimmt. Man mißt die Verluste V und berechnet daraus den Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{N_{w1} - V}{N_{w1}} \quad \left(= \frac{N_{w2}}{N_{w2} + V}\right) \qquad (1)$$

Die Verluste setzen sich zusammen aus Eisenverlusten N_o (Hysterese- und Wirbelstromverluste) und Kupferverlusten N_k (Stromwärmeverluste in den Wicklungen). Vergl. hierzu Übung Nr. 5.1 Bild 1a, Widerstände $R_3{}^*$ bzw. R_1 und $R_2{}^*$.

Bei Leerlauf des Transformators treten fast ausschließlich die Eisenverluste auf, da der Leerlaufstrom J_o klein gegen den Nennstrom J_{1n} des Transformators, die Spannung U_1 (an $R_3{}^*$) jedoch gleich der Nennspannung U_{1n} ist. Das Ersatzschaltbild vereinfacht sich demzufolge entsprechend Bild 1. Zu ihm gehört das Leerlaufdiagramm Bild 2. Der Leistungsfaktor errechnet sich aus

$$\cos \varphi_o = \frac{N_o}{U_1 J_o} \qquad (2)$$

Der Kurzschlußversuch des Transformators ist dadurch gekennzeichnet, daß man die Primärspannung U_1 (= U_{k1}) bei kurzgeschlossener Sekundärseite nur so hoch wählt, daß primärseitig (und damit auch sekundärseitig) der gewünschte Be-

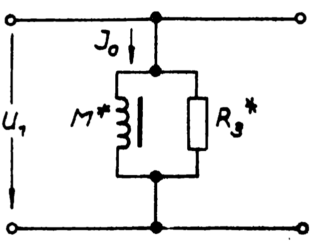


Bild 1
Vereinfachtes Trafo-Ersatzschaltbild bei Leerlauf

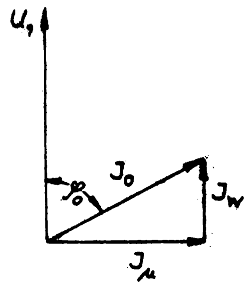


Bild 2
Leerlaufdiagramm des Transformators

lastungsstrom, z.B. der Nennstrom fließt. Diese "Kurzschluß"spannung U_{k1} ist klein gegen die Nennspannung des Transformators, daher treten beim Kurzschlußversuch praktisch keine Eisenverluste sondern lediglich Kupferverluste auf. Das Ersatzschaltbild vereinfacht sich demzufolge entsprechend Bild 3. Zu ihm gehört das Kurzschlußdiagramm Bild 4 (Kappsches Dreieck). Der Kurzschluß-Leistungsfaktor errechnet sich aus

$$\cos \varphi_k \approx \frac{N_{k1}}{U_{k1} J_1} \tag{3}$$

Aus Leerlaufverlusten N_o und Kurzschlußverlusten N_k ergeben sich die Gesamtverluste zu

$$V = N_o + N_k \tag{4}$$

Hierbei sind die Leerlaufverluste bei Nennspannung $U_1 = U_{1n}$ und die Kurzschlußverluste gewöhnlich bei Nennstrom $J_1 = J_{1n}$ zu ermitteln.

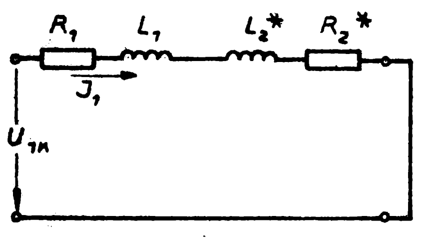


Bild 3

Vereinfachtes Trafo-Ersatzschaltbild für den Kurzschlußversuch

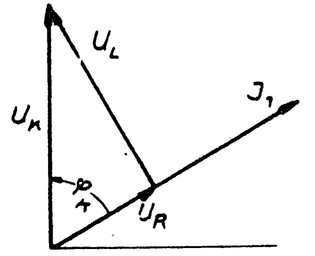


Bild 4

Kurzschlußdiagramm des Transformators (Kappsches Dreieck)

Aufgaben:

1. **Leerlaufversuch**

Mit Hilfe der Schaltung Bild 5 sind der Leerlaufstrom J_0 und die Leerlaufverlustleistung N_0 in Abhängigkeit von der Primärspannung U_1 aufzunehmen und graphisch aufzutragen.
Dazu ist die Spannung U_1 am Einstelltransformator ETr von 0 bis zur 1,3-fachen Nennspannung des zu untersuchenden Trafos Tr zu verändern.

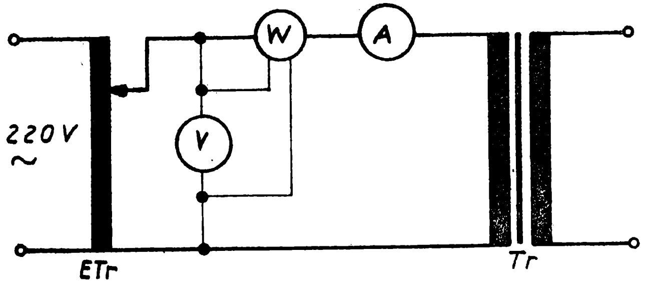


Bild 5

Versuchsschaltung zum Leerlaufversuch

2. Kurzschlußversuch

Nach Schaltung Bild 6 sind die Kurzschlußspannung U_k und die Kurzschlußverlustleistung N_k in Abhängigkeit vom Primärstrom J_1 aufzunehmen und graphisch aufzutragen.
Dazu ist der Strom J_1 mit Hilfe des Einstelltransformators ETr von 0 bis zum 1,3-fachen Nennstrom des zu untersuchenden Trafos Tr zu verändern.

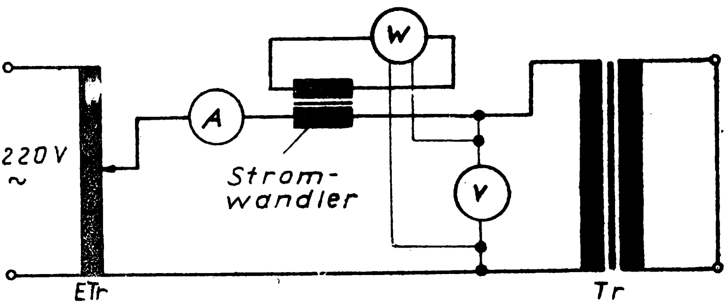


Bild 6
Versuchsschaltung zum Kurzschlußversuch

3. Aus den aufgenommenen Werten ist der Wirkungsgrad η zu berechnen und über J_1 graphisch aufzutragen.
Zu diesem Zweck sind zum Leerlaufverlust bei Nennspannung N_0 (aus Aufgabe 1) die zur jeweiligen Stromstärke J_1 gehörigen Kurzschlußverluste N_k (aus Aufgabe 2) zu addieren, um den jeweiligen Gesamtverlust V zu erhalten. Die aufgenommene Leistung N_{w1} ergibt sich zu

$$N_{w1} = U_{1n} J_1 \cdot \cos \varphi_1, \qquad (5.)$$

wobei für U_{1n} die primärseitige Nennspannung des Transformators und für J_1 der jeweilige Wert der Stromstärke einzusetzen ist. Der Leistungsfaktor soll für den einfachsten Fall der reinen Wirkleistung gewählt werden, also

$$\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2 = 1 \tag{6}$$

Auswertung:

1. Erklären Sie theoretisch (z.B. mit Hilfe des Ersatzschaltbildes) den Verlauf der aufgenommenen vier Kurven!
2. Weisen Sie nach, daß das Maximum des Wirkungsgrades theoretisch bei derjenigen Stromstärke liegt, bei welcher $N_k = N_o$ ist! Vergleichen Sie diese Tatsache mit der Messung!
3. Zeichnen Sie maßstäblich das Leerlauf- und Kurzschlußdiagramm des untersuchten Transformators für Nennspannung bzw. Nennstromstärke.
4. Erklären Sie den verschiedenen Anschluß der Spannungsmeßpfade (Spannungs- und Leistungsmesser) bei Leerlauf- bzw. Kurzschlußversuch!

Ü b u n g   Nr. 5.3:   Drehstromleistung

Versuchsziel:

Kennenlernen verschiedener Methoden der Leistungsmessung bei Drehstrom mit gleicher und ungleicher Phasenbelastung durch Messungen an einem Drehstrom-Transformator.

Grundlagen:

Ein Drehstromsystem besteht aus einer Kombination dreier voneinander unabhängiger Einphasensysteme, welche auf Grund der Beziehung

$$E_{1\sim} + E_{2\sim} + E_{3\sim} = 0 \qquad (1)$$

miteinander in Stern- oder Dreieckschaltung verkettet sind. Die Gesamtwirkleistung des Drehstromsystems ist daher gleich der Summe der drei Einzelleistungen:

$$N_{w\,ges} = N_{w1} + N_{w2} + N_{w3} \qquad (2)$$

mit $$N_{w1} = U_1 J_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad \text{und entspr.} \qquad (3)$$

Dabei ist U_1 die Phasenspannung und J_1 der Phasenstrom am Einzelverbraucher Z_1 und entspr. (Bild 1)

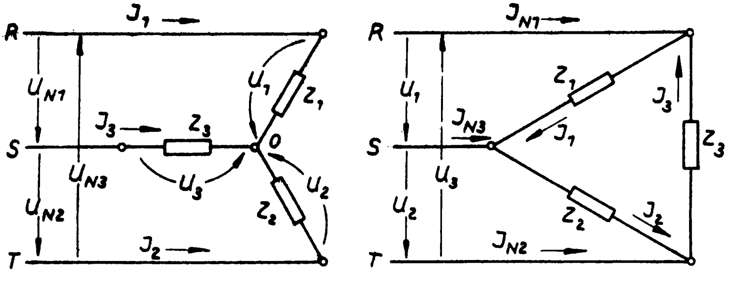


Bild 1

Phasenspannungen und Phasenströme
a) bei Sternschaltung,
b) bei Dreieckschaltung

Ist das Drehstromnetz symmetrisch belastet, also

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 \tag{4}$$

nach Betrag und Phase,

so ergibt sich für die Drehstromleistung

$$N_{w\ ges} = 3\ N_{w1} = 3\ U_1 J_1 \cos \varphi_1 . \tag{5}$$

Setzt man hier anstelle der Phasenwerte die Netzspannung U_N bzw. den Netzstrom J_N, so erhält man - gleich ob bei Stern- oder Dreieckschaltung -

$$N_{w\ ges} = \sqrt{3}\ U_N \cdot J_N \cdot \cos \varphi \tag{6}$$

(für gleiche Phasenbelastung)

Entsprechend ergibt sich für die Blindleistung

$$N_{b\ ges} = \sqrt{3}\ U_N \cdot J_N \cdot \sin \varphi \tag{7}$$

und für die Scheinleistung

$$N_{s\ ges} = \sqrt{3}\ U_N \cdot J_N \tag{8}$$

Für die Leistungsmessung bei symmetrischer Belastung genügt daher die Messung einer Phase, wie sie aus Übung Nr. 4.2 bekannt ist (Einwattmetermethode). Dabei muß der Stromspule des Wattmeters der Netzstrom, der Spannungsspule jedoch die Sternspannung zugeführt werden (Bild 2). Ist der Sternpunkt nicht zugänglich oder nicht vorhanden, so kann mit Hilfe von Widerständen ein künstlicher Sternpunkt geschaffen werden (Bild 3). Die gesamte Wirkleistung ergibt sich dann als das dreifache der angezeigten Leistung (nach Gl. (5)).

Die Methode kann auch bei ungleicher Phasenbelastung

$(Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3)$ angewendet werden, wenn das Wattmeter nacheinander in die drei Phasen geschaltet wird, bzw. wenn drei Wattmeter gleichzeitig verwendet werden (Dreiwattmetermethode). Die Gesamtleistung ergibt sich dann als Summe der drei Einzelleistungen (nach Gl. (2)).

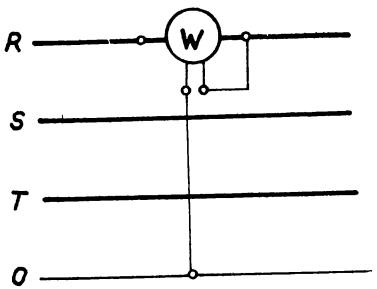
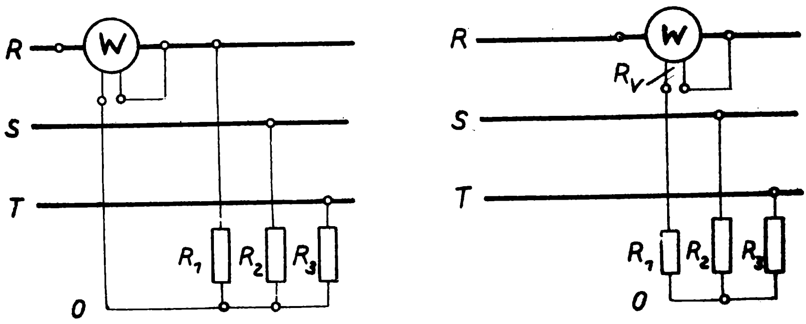


Bild 2
Einwattmeterschaltung mit Sternleiter

Bei ungleich belastetem Drehstromnetz ohne Sternleiter läßt sich auch zweck-



a) $R_1 = R_2 = R_3$ b) $R_1 + R_V = R_2 = R_3$

Bild 3
Einwattmeterschaltungen ohne Sternleiter

mäßig eine Zweiwattmeterschaltung (Aronschaltung) anwenden (Bild 4). Dabei wird jeweils die Spannung gegen den dritten Leiter gemessen. Sind α_1 und α_2 die Ausschläge der beiden Wattmeter, so ergibt sich die Gesamtleistung zu

$$N_{w\ ges} = \alpha_1 + \alpha_2 \tag{9}$$

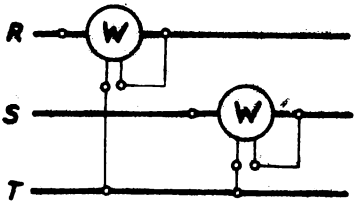


Bild 4
Zweiwattmeterschaltung
(nach Aron)

Hierbei ist die Summe der Ausschläge vorzeichenbehaftet zu bilden! Sie kann unter Umständen Null sein! Die einzelnen Wattmeterausschläge besitzen dabei keine physikalische Bedeutung.

Für die Blindleistung bei symmetrischer Belastung erhält man mit Hilfe der Aronschaltung

$$N_{b\ ges} = \sqrt{3}\,(\alpha_1 - \alpha_2) \tag{10}$$

Weitere Methoden der Blindleistungsmessung sollen hier nicht zur Sprache kommen.

Aufgaben:

1. Ein Drehstromtransformator ist sekundärseitig mit drei gleichen ohmschen Widerständen (symmetrisch) zu belasten.

   a) Bei Sternschaltung der Primärseite ist der Netzstrom J_N, die Netzspannung U_N und die aufgenommene Leistung $N_{w\ ges}$ nach der Einwattmeter- und Zweiwattmetermethode zu messen! (Spannungsangaben beachten!)
   Vor Herstellung der Schaltung ist eine Schaltskizze anzufertigen.

   b) Die entsprechenden Messungen sind bei Dreieckschaltung der Primärseite vorzunehmen.

   c) Aus den gemessenen Werten ist der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ und die Blindleistung $N_{b\ ges}$ zu berechnen.

2. Der Drehstromtransformator ist sekundärseitig unsymmetrisch zu belasten. Dazu ist eine Phase mit einem ohmschen Widerstand, die zweite kapazitiv und die dritte induktiv zu belasten.

Bei Dreieckschaltung der Primärseite sind die entsprechenden Messungen und Rechnungen wie unter 1. durchzuführen.

Auswertung:

1. Für den Fall symmetrischer Belastung sind die Gleichungen (9) und (1o) abzuleiten!
   Unter welcher Voraussetzung läßt sich die Zweiwattmeterschaltung auch bei Sternschaltung mit Sternleiter verwenden?
2. Die primärseitig bestimmten Phasenwinkel sind mit den Phasenwinkeln der (bekannten) Belastungswiderstände zu vergleichen!
   Welchen Einfluß besitzt der Transformator?
3. Für den Fall unsymmetrischer Belastung ist ein maßstäbliches Zeigerdiagramm der (primärseitigen) Spannungen und Ströme zu zeichnen!

Ü b u n g Nr. 5.4: Untersuchung einer Verstärkerdrossel (Transduktor)

Versuchsziel:

Kennenlernen des elektrischen Verhaltens einer gleichstromvormagnetisierten Eisendrossel nebst ihrer grundlegenden Schaltungen.

Grundlagen:

Der Wechselstromwiderstand einer Spule mit Eisenkern ergibt sich unter Vernachlässigung des ohmschen Anteiles zu

$$X_L = \omega L, \qquad (1)$$

ist also im wesentlichen durch die Induktivität

$$L = \frac{w^2}{R_m} = \frac{w^2 S}{l} \cdot \mu \qquad (2)$$

der Spule bestimmt. Hierbei ist die Windungszahl w, der Eisenquerschnitt S und die Länge l des Eisenkernes als konstant anzusehen. Daraus ergibt sich, daß der Wechselstromwiderstand X_L praktisch proportional der Permeabilität μ des Eisens ist:

$$X_L \sim \mu \qquad (3)$$

In Übung Nr. 4.3 wurde bereits ausgeführt und durch Versuch bestätigt, daß die Permeabilität μ in ihrer Größe abhängig vom Magnetisierungsgrad des Eisens ist (Bild 1). Demzufolge läßt sich der Wechselstromwiderstand X_L einer Eisendrossel durch Veränderung des Magnetisierungsgrades beeinflussen, er nimmt mit wachsender Magnetisierung ab.

Die Veränderung des Magnetisierungsgrades erfolgt praktisch durch Gleichstromvormagnetisierung über eine (oder mehrere)

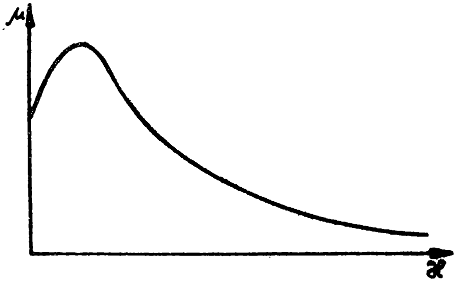


Bild 1

Abhängigkeit der Permeabilität vom Magnetisierungsgrad einer Eisendrossel

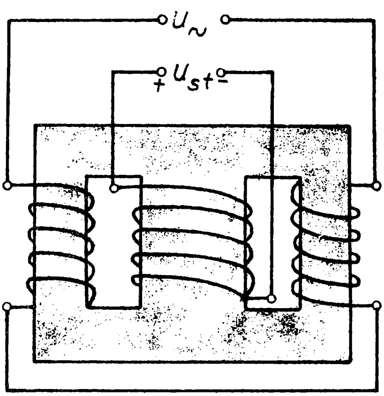


Bild 2

Anordnung von Steuer- und Hauptwicklung einer Verstärkerdrossel auf einem Mantelkern

zusätzlich auf den Eisenkern aufgebrachte Steuerwicklungen (Bild 2). Dabei sind die Steuerwicklungen zweckmäßig so anzuordnen, daß in ihnen keine Wechselspannung induziert werden kann. Bild 2 zeigt die Anordnung der Steuerwicklung auf dem Mittelschenkel eines Mantelkernes, während die Hauptwicklung auf die beiden Seitenschenkel so verteilt ist, daß sich der Wechselfluß im Mittelschenkel aufhebt. Bei der praktischen Anwendung ist neben der eigentlichen Steuerwicklung noch mindestens eine zweite (Steuer-) Wicklung vorhanden (Bild 3), mit welcher man den gewünschten Arbeitspunkt durch einen fest eingestellten Vorstrom festlegen kann (z.B. Sollwert bei Regelungsschaltungen). Bild 3 zeigt eine derartige grundlegende Schaltung, welche einen sogenannten <u>stromsteuernden Transduktor</u> darstellt. Bei dieser Schaltung ist <u>der Strom</u> $J_{a\sim}$ durch den Verbraucher R_a praktisch nur vom Steuerstrom J_{st} und nicht von der Größe des Verbrauchers abhängig.

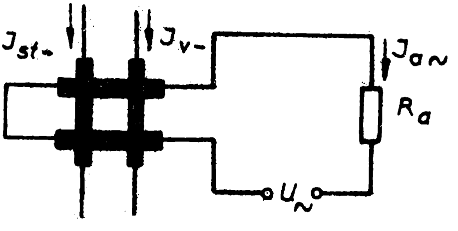


Bild 3
Fremderregte Schaltung des stromsteuernden Transduktors

Eine zweite wichtige Schaltung zeigt Bild 4. Hier liegt vor jeder Arbeitswicklung noch ein Gleichrichter, so daß durch beide Wicklungen nur gleichgerichtete Halbwellenströme fließen. Dadurch wird eine automatische Vormagnetisierung hervorgerufen, die Schaltung ist selbstsättigend. Wegen der Gegenläufigkeit der Halbwellenströme hat diese Transduktorschaltung trotzdem Wechselstromausgang. Bei dieser Schaltung ist die Spannung $U_{a\sim}$ am Verbraucher R_a praktisch nur vom Steuerstrom und nicht von der Größe des Verbrauchers abhängig.

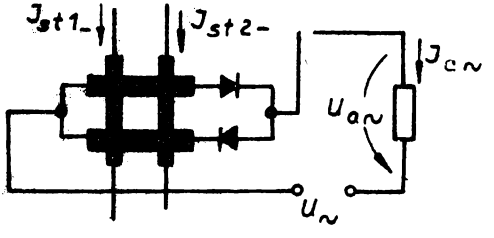


Bild 4
Selbstsättigende Schaltung des spannungsteuernden Transduktors

Aufgaben:

1. a) Bei einem stromsteuernden Transduktor ist nach Bild 5 der Arbeitsstrom $J_{a\sim}$ (und die Spannung $U_{a\sim}$ am Verbraucher) bei festem R_a und drei verschiedenen Vorströmen J_{v-} in Abhängigkeit vom Steuerstrom J_{st-} aufzunehmen und graphisch aufzutragen.
   Dazu ist der Steuerstrom von negativen zu positiven Werten zu verändern (Umpolen der Spannungsquelle und des Meßgerätes bei $J_{st-} = 0$ mittels des Schalters S).

   b) Entsprechend ist $J_{a\sim}$ und $U_{a\sim}$ bei gleichem Vorstrom J_{v-} und drei verschiedenen Arbeitswiderständen R_a in Abhängigkeit vom Steuerstrom J_{st-} aufzunehmen und graphisch aufzutragen.

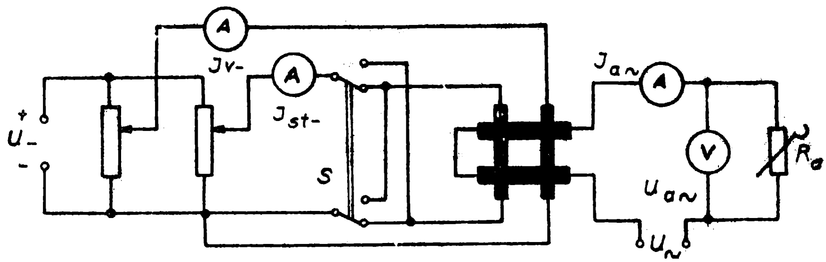


Bild 5
Versuchsschaltung zum stromsteuernden Transduktor

2. Bei einem spannungsteuernden Transduktor ist nach Bild 6 der Arbeitsstrom $J_{a\sim}$ und die Spannung $U_{a\sim}$ am Verbraucher bei drei verschiedenen Arbeitswiderständen R_a in Abhängigkeit vom Steuerstrom J_{st-} aufzunehmen und graphisch aufzutragen.

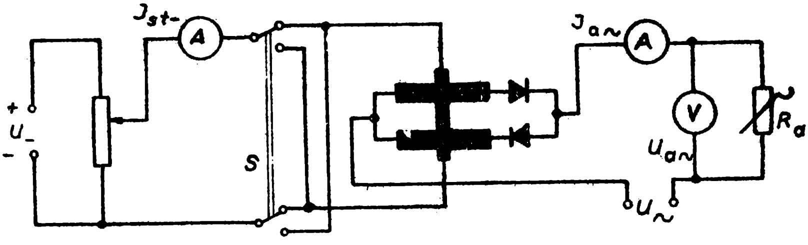


Bild 6
Versuchsschaltung zum spannungsteuernden Transduktor

Auswertung:

1. Die Abhängigkeit der Permeabilität μ vom Magnetisierungsgrad ist aus der Magnetisierungskurve zu erklären.
2. Der Verlauf sämtlicher aufgenommener Kennlinien ist zu diskutieren und nach der Theorie zu erklären.
3. Warum ist die Bezeichnung Magnet<u>verstärker</u> für den Transduktor berechtigt?

Gebühr DM 2,50 Ag 616/ 86 /62 Best.-Nr. 1006-01/62

III/9/278