

Schweizerische Armee

65.90/I d

Technische Grundlagen
für
Übermittlungsgerätemechaniker

Band I

Gültig ab 1. Oktober 1974

F. Lineare Bauelemente

Unter *linearen* Bauelementen verstehen wir jene, bei denen zwischen Strom und Spannung ein linearer Zusammenhang besteht. Bei den *nichtlinearen* Bauelementen, wie Röhren, Transistoren, Dioden usw., finden wir gekrümmte Kennlinien.

I. Widerstände

1. Einführung

Widerstände gehören zu den Bauelementen der Elektronik, welche in Geräten am häufigsten anzutreffen sind. Ihre Aufgaben sind äusserst vielseitig. Als Vorwiderstände setzen sie zu grosse Spannungen auf den gewünschten Wert herab, oder sie begrenzen Ströme auf bestimmte Grössen. Als Spannungsteiler unterteilen sie Spannungen in bestimmten Verhältnissen. Als Arbeitswiderstände in Röhren- oder Transistorschaltungen helfen sie die verstärkte Spannung zu gewinnen. In Messgeräten werden die Messbereiche mit Hilfe von Widerstandsschaltungen bestimmt. Die Lautstärke in Empfangsgeräten wird durch Potentiometer eingestellt. Die Aufzählung von Anwendungsgebieten für Widerstände liesse sich noch beliebig fortsetzen.

2. Was wissen Sie schon über Widerstände?

(Lösung Seite 444)

- Aus welchem Material sind die meisten kleinen Widerstände hergestellt?
- Welche Widerstände sind in der Regel höher belastbar, Draht- oder Schichtwiderstände?
- Was ist ein Potentiometer?
- Mit welcher Masseinheit werden Widerstände gemessen?

3. Die Widerstände

a. Schichtwiderstände

Beim Schichtwiderstand wird das Widerstandsmaterial in Form einer dünnen Schicht auf einen Körper aus Isoliermaterial aufgetragen. Als Widerstandsmaterialien werden Kohle oder Metalloxyde verwendet. In Bild 73 sehen wir Schichtwiderstände, deren Struktur durch Abkratzen der Lackschicht sichtbar gemacht ist.

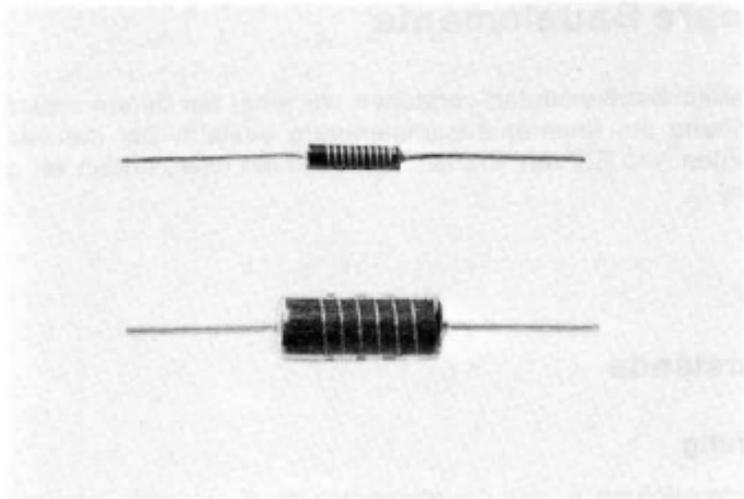


Bild 73

b. Massewiderstände

Der *Massewiderstand* besteht aus einem zylinderförmigen Körper aus gepresster Kohle. Bild 74 zeigt zwei Ausführungen von Massewiderständen, deren Aufbau ebenfalls durch Entfernen der Lackschicht sichtbar gemacht ist.

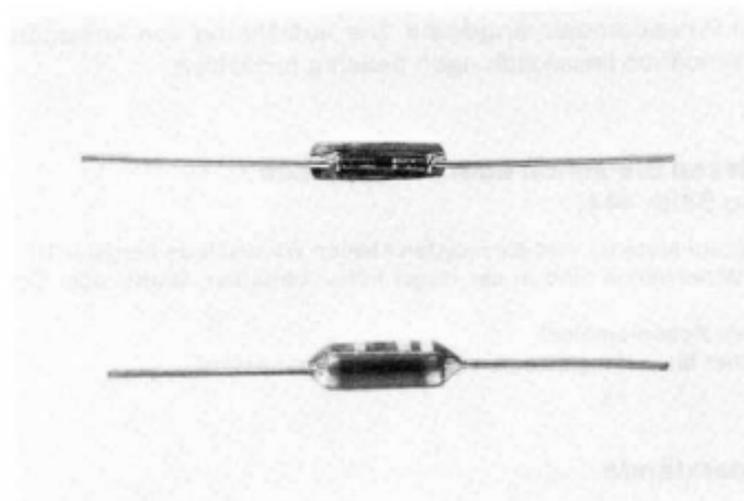


Bild 74

c. Drahtwiderstände

Drahtwiderstände werden für grössere Leistungen verwendet. Das Widerstandsmaterial besteht aus einem schlecht leitenden Draht, welcher auf ein Keramikrohr aufgewickelt wird. Oft werden Drahtwiderstände mit einer ver-

schiebbaren Abgriffschelle versehen. Diese Abgriffschellen ermöglichen die Unterteilung des Widerstandes in zwei Teilwiderstände, das Teilungsverhältnis lässt sich beliebig einstellen. In Bild 75 sehen wir folgende Drahtwiderstände. Drei normale Widerstände mit festem Widerstandswert verschiedener Leistung, links mit Schutzumpressung oder Schutzglasur, rechts mit entfernter Schutzschicht. Ganz rechts ist ein Widerstand mit Abgriffschelle. Drahtwiderstände lassen sich zufolge der Induktivität ihrer Wicklung nur für Gleichstrom oder niederfrequenten Wechselstrom verwenden.

DRAHTWIDERSTÄNDE

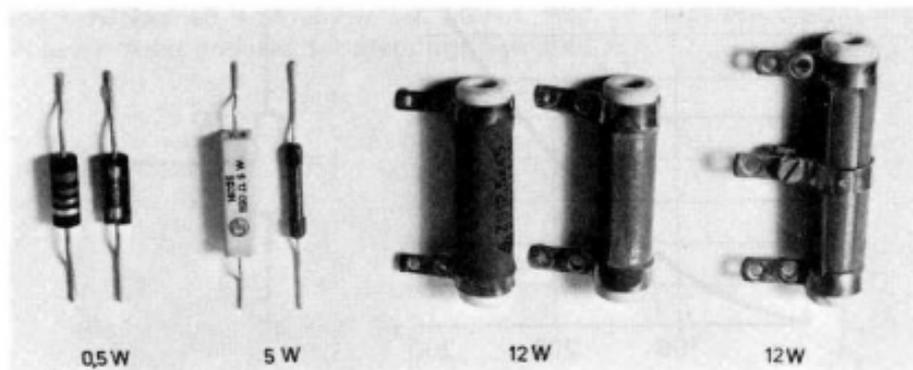


Bild 75

d. Potentiometer

Potentiometer sind Widerstände mit verstellbarem Abgriffschleifer. Sie finden meistens als veränderliche Spannungsteiler Verwendung. Man unterscheidet zwischen *linearen Potentiometern* und *logarithmischen Potentiometern*.

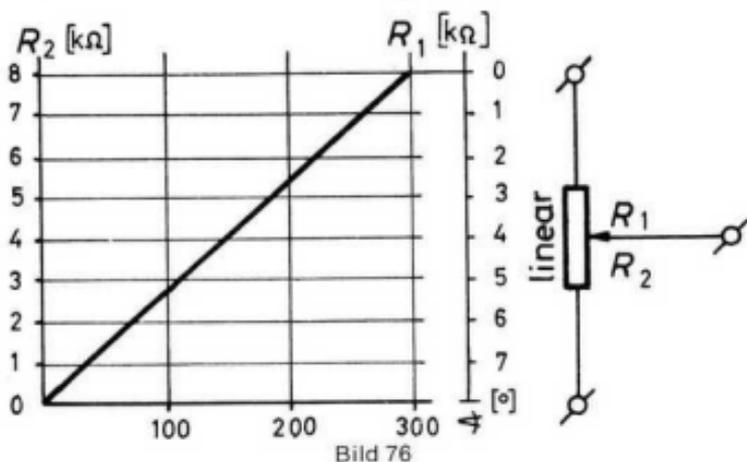
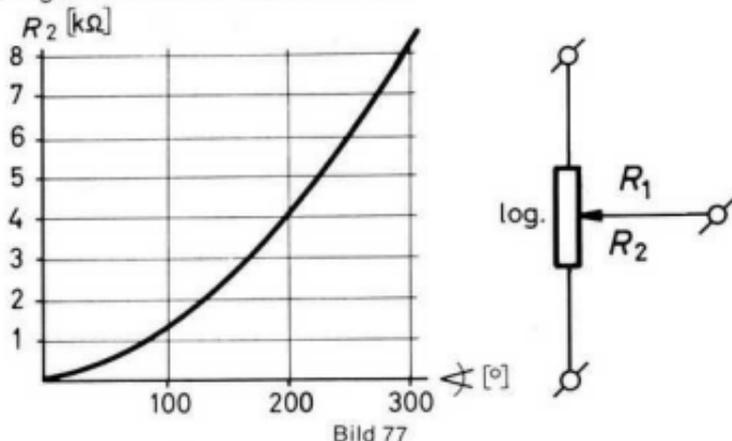


Bild 76

Beim linearen Potentiometer verläuft der Ohmwert eines Teilwiderstandes proportional zum Drehwinkel. Bild 76 zeigt den Verlauf der Potentiometerkurve eines linearen Potentiometers.

Lineare Potentiometer werden oft in Messschaltungen und Messgeräten als variable Spannungsteiler eingesetzt.

Beim logarithmischen Potentiometer verläuft der Ohmwert eines Teilwiderstandes nach einer logarithmischen Kennlinie. Bild 77 zeigt den Kurvenverlauf eines logarithmischen Potentiometers.



Logarithmische Potentiometer werden meistens als Lautstärkereglern und als Tonblenderegler in NF-Verstärkern verwendet. Lineare Regler sind für diesen Zweck ungeeignet, weil sich infolge der logarithmischen Empfindlichkeit des menschlichen Ohres der Regelbereich an einem Ende stark zusammendrängen würde.

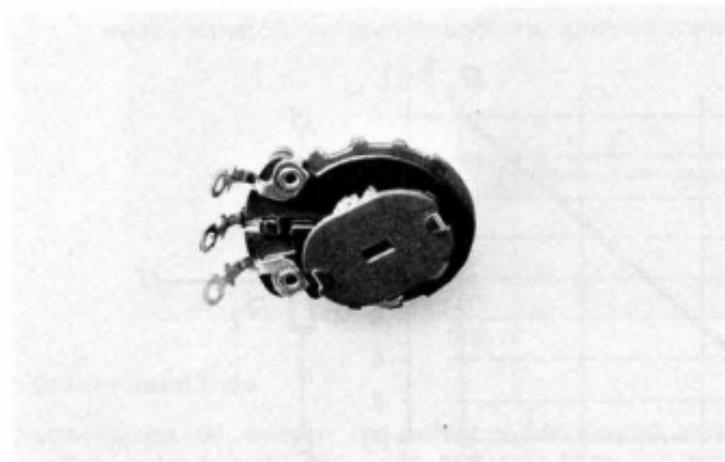
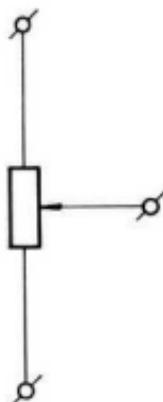


Bild 78



Potentiometer werden in verschiedenen Ausführungsformen auf den Markt gebracht. Am gebräuchlichsten ist das *Kohleschichtpotentiometer*. Es enthält eine kreisförmige Bahn aus Kohle, auf welcher der auf einer Achse montierte Schleifer als verstellbarer Abgriff aufliegt. Kohleschichtpotentiometer werden für Ohmwerte von einigen Ohm bis zu einigen Megohm und für Belastungen bis zu 0,5 Watt hergestellt. In Bild 78 sehen wir ein Kohleschichtpotentiometer und das dazugehörige Symbol.

Das *drahtgewickelte Potentiometer* weist an Stelle der Kohleschicht eine Drahtwicklung auf. Solche Potentiometer können für grosse Leistungen hergestellt werden. Für Messzwecke lassen sich drahtgewickelte Potentiometer mit sehr kleinen Toleranzwerten bauen. Bild 79 zeigt ein drahtgewickelt Potentiometer und das dazugehörige Symbol.

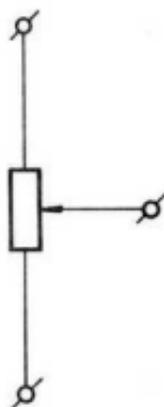
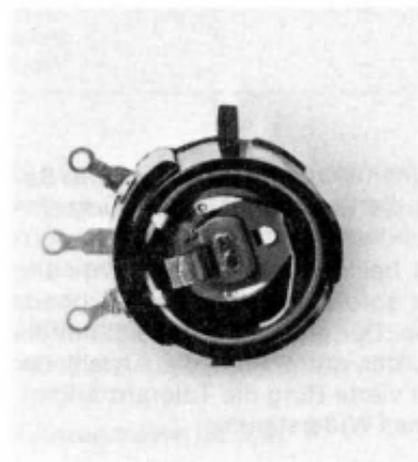


Bild 79

Einstell- oder Trimpotentiometer sind Potentiometer für Einstellzwecke. Sie sind in der Ausführung als Kohlepotentiometer und als Drahtpotentiometer anzutreffen. Sie finden in Schaltungen Anwendung, in welchen Widerstandswerte oder Spannungsteilerverhältnisse abgeglichen werden müssen. Der Unterschied zu einem gewöhnlichen Potentiometer liegt darin, dass die Einstellung meist im Innern eines Gerätes mit Hilfe eines Schraubenziehers anstelle eines allgemein zugänglichen Einstellknopfes vorgenommen werden muss. In Bild 80 sind zwei Trimpotentiometer mit dem dazugehörigen Symbol dargestellt, links in Normalausführung, rechts für Montage auf gedruckte Schaltung.

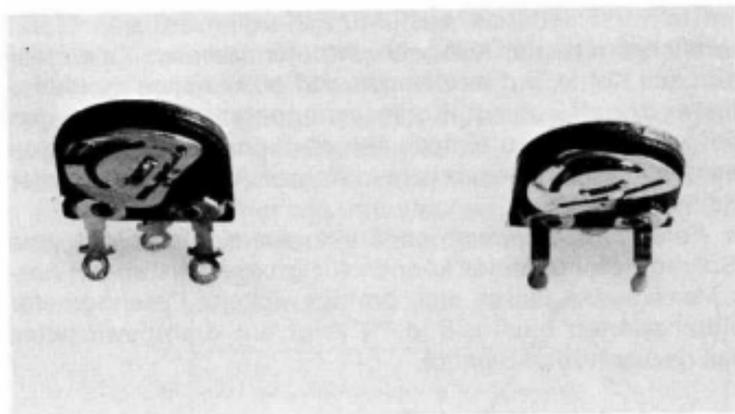


Bild 80

e. Kenndaten von Widerständen

Der Widerstand ist gekennzeichnet durch seinen *Widerstandswert*, seine *Belastbarkeit*, die *Toleranz* des Widerstandswertes und den *Temperaturkoeffizienten*.

Der Widerstandswert und die Toleranz sind bei den meisten Schicht- und Massewiderständen mit Hilfe des Farbcodes sofort ablesbar. Der Farbcodier arbeitet bei Widerständen mit farbigen Ringen. Der erste Ring bezeichnet die erste Zahl, der zweite Ring die zweite Zahl, der dritte Ring die Anzahl der Nullen hinter den beiden Zahlen, während der vierte Ring die Toleranz angibt. Bild 81 zeigt ein Beispiel für die Codierung eines Widerstandes.

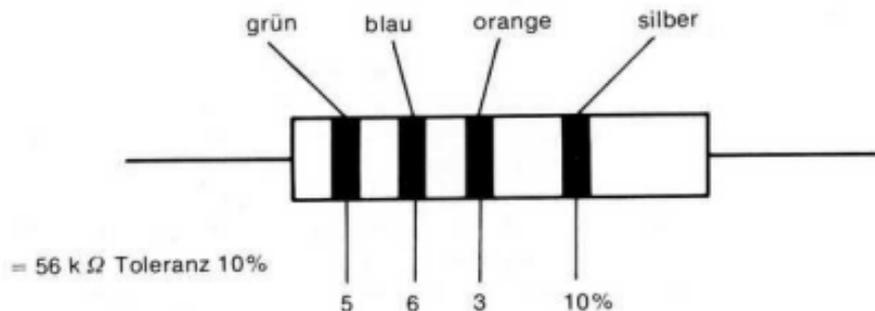


Bild 81

In Tabelle 9 sind alle Angaben über den Farbcode der Widerstände zusammen- gestellt.

Farbe	1. Ring 1. Zahl	2. Ring 2. Zahl	3. Ring Multiplikator		4. Ring Toleranz ± %
schwarz	0	0	x1	= 10 ⁰	–
braun	1	1	x10	= 10 ¹	1
rot	2	2	x100	= 10 ²	2
orange	3	3	x1000	= 10 ³	–
gelb	4	4	x10000	= 10 ⁴	–
grün	5	5	x100000	= 10 ⁵	–
blau	6	6	x1000000	= 10 ⁶	–
violett	7	7	x10000000	= 10 ⁷	–
grau	8	8	–	–	–
weiss	9	9	–	–	–
gold	–	–	x0,1	= 10 ⁻¹	5
silber	–	–	x0,01	= 10 ⁻²	10
fehlt	–	–	–	–	20

Tabelle 9

Die Widerstandswerte der handelsüblichen Widerstände richten sich nach der *Normreihe*. Die Werte innerhalb der Normreihe sind so gewählt, dass mit den Widerständen der entsprechenden Toleranzgruppe alle Zwischenwerte mög- lich sind.

Toleranzreihe für 10%:

10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82

Toleranzreihe für 5%:

10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 75, 82, 91

In Bild 82 erkennen wir die graphische Darstellung der beiden Toleranzreihen. Die senkrechten Striche geben den Platz des entsprechenden Widerstands- wertes an.

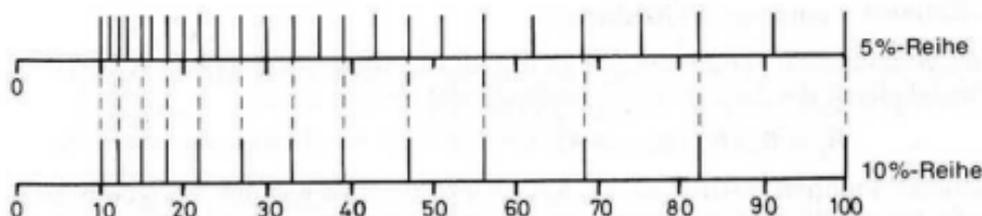


Bild 82

Die *Belastbarkeit* ist durch das Widerstandsmaterial und die geometrischen Abmessungen des Widerstandes bestimmt. Die gebräuchlichsten Belastungsgrenzen für Schicht- und Massewiderstände sind:

0,1 – 0,25 – 0,5 – 1 Watt

Mit drahtgewickelten Widerständen erreicht man jede beliebige Belastbarkeit. Normwerte für drahtgewickelte Widerstände sind:

0,5 – 1 – 2 – 3 – 4 – 6 – 12 – 25 – 50 Watt

Der Temperaturkoeffizient ist eine Verhältniszahl, die angibt um welchen Faktor sich der Wert eines Widerstandes pro °C Temperaturänderung ändert. Die Temperaturkoeffizienten der gebräuchlichsten Metalle sind positiv, Kohle weist einen negativen Beiwert auf. In Tabelle 10 sind die Temperaturkoeffizienten der wichtigsten Materialien zusammengestellt.

Material	Temperaturkoeffizient α_{20° *
Aluminium	0,0039
Eisen	0,0052 – 0,0062
Kohle	–0,0005
Konstantan	±0,0002
Kupfer	0,00393
Silber	0,0034
Gold	0,0038

Tabelle 10

* Zu beachten ist, dass α selbst temperaturabhängig ist.

Die Berechnung des Warmwiderstandes erfolgt nach der einfachen Beziehung:

$$R_w = R_{20^\circ} [1 + \alpha (\vartheta - 20^\circ)]$$

R_w Warmwiderstand

R_{20° Widerstand bei 20° C

α Temperaturkoeffizient

ϑ Temperatur des Widerstandes in ° C

f. Serieschaltung von Widerständen

Der Gesamtwiderstand einer Schaltung, aus in Serie geschalteten Widerständen ist gleich der Summe der Einzelwiderstände.

$$R_g = R_1 + R_2 + R_3 \dots + R_n$$

Serieschaltungen werden oft als *Spannungsteiler* verwendet. An jedem Teilwiderstand fällt eine Teilspannung ab. Durch entsprechende Wahl der Teilwiderstände, kann jedes beliebige Spannungsteilverhältnis erreicht werden.

Die Berechnung dieser Spannungsteiler basiert auf dem ohmschen Gesetz. Bild 83 zeigt einen einfachen Spannungsteiler mit der Bestimmungsgleichung für die Teilspannung.

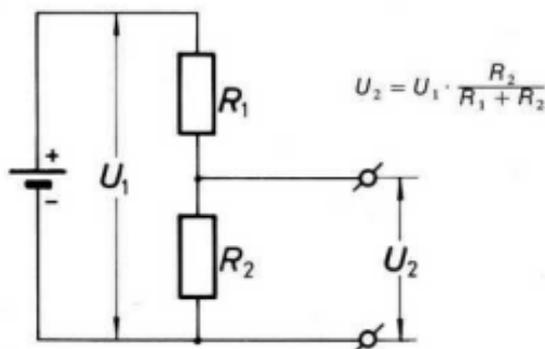


Bild 83

g. Parallelschaltung von Widerständen

Bei der Parallelschaltung liegt an allen Widerständen die gleiche Spannung. Die Summe aller Teilströme ergibt den Gesamtstrom der Schaltung. Bild 84 zeigt die Zusammenhänge.

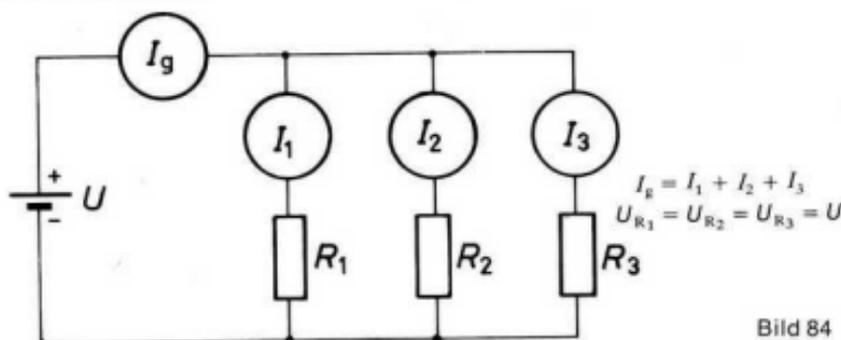


Bild 84

Wir haben als Reziprokwert des Widerstandes den Leitwert kennengelernt. Ströme und Leitwerte verhalten sich zueinander proportional, wir dürfen deshalb sagen:

Bei der Parallelschaltung von Widerständen ergibt die Summe der einzelnen Leitwerte den Gesamtleitwert.

$$G_g = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n$$

Zur Berechnung des Gesamtwiderstandes einer Parallelschaltung werden die Leitwerte addiert. Zum so erhaltenen Gesamtleitwert wird der Reziprokwert gesucht, dieser entspricht dem Gesamtwiderstand.

$$R_g = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

h. Widerstandswert und Leiter

Zur Vermeidung von unnötigen Wärmeverlusten muss der Widerstandswert einer Leitung möglichst klein gehalten werden. Die Leitungen müssen entsprechend ihrem Verwendungszweck dimensioniert werden. Der Widerstandswert eines Leiters hängt von drei Faktoren ab:

Leiterlänge
Leiterquerschnitt
Leitermaterial

Je länger die Leitung gemacht wird, desto grösser wird ihr Widerstandswert. Der Leitungswiderstand verhält sich zur Leiterlänge proportional. Der Einfluss des Leitungsquerschnittes auf den Leitungswiderstand lässt sich am mechanischen Modell der Wasserleitung studieren. Je grösser der Querschnitt einer Wasserleitung gewählt wird, desto geringer wird der Widerstand, den die betreffende Leitung dem durch sie fliessenden Wasser entgegensetzt. Die elektrische Leitung zeigt ein analoges Verhalten. Der Leitungswiderstand verhält sich umgekehrt proportional zum Leitungsquerschnitt. Die elektrischen Eigenschaften des Materials beeinflussen ebenfalls den Widerstandswert des Leiters. Der Einfluss des Widerstandsmaterials wird mit einer Materialkonstante angegeben. Man verwendet hierzu den *spezifischen Widerstand*.

Der spezifische Widerstand gibt an, wie gross der Widerstandswert eines Leiters aus dem betreffenden Material mit der Länge von einem Meter und dem Querschnitt von einem Quadratmillimeter ist.

Als Formelzeichen wird das ϱ (rho) verwendet.

Die Masseinheit lautet: $\frac{\text{V} \cdot \text{mm}^2}{\text{A} \cdot \text{m}}$ oder $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$

In der Tabelle 11 sind die Werte für den spezifischen Widerstand verschiedener Leitermaterialien zusammengestellt.

Spezifischer Widerstand einiger Metalle und Legierungen.

Metall/Legierung	$\varrho \left[\frac{\text{V} \cdot \text{mm}^2}{\text{A} \cdot \text{m}} \right]$
Silber	0,0163
Kupfer	0,0177
Gold	0,023
Aluminium	0,0286
Eisen	0,096
Konstantan	0,50

Tabelle 11

Oft arbeitet man mit dem Reziprokwert des spezifischen Widerstandes. Dieser Wert wird mit *Leitfähigkeit* bezeichnet. Die Leitfähigkeit sagt aus, wie gross

der Leitwert eines Leiters mit der Länge von 1 m und dem Querschnitt von 1 mm² ist.

Als Formelzeichen wird das γ (gamma) verwendet.

$$\text{Die Masseinheit lautet: } \frac{A \cdot m}{V \cdot \text{mm}^2} \text{ oder } \frac{S \cdot m}{\text{mm}^2}$$

Es ergeben sich folgende Beziehungen:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}; \quad [R] = \frac{\Omega \text{ mm}^2 \text{ m}}{\text{m} \cdot \text{mm}^2} = \Omega \quad l = \text{Leiterlänge, } A = \text{Leiterquerschnitt}$$

wenn mit dem spezifischen Widerstand gerechnet wird.

$$G = \frac{\gamma \cdot A}{l}; \quad [G] = \frac{\text{m} \cdot \text{mm}^2 \cdot S}{\text{m} \cdot \text{mm}^2} = S \quad \text{wenn mit der Leitfähigkeit gerechnet wird.}$$

4. Beispiele

a. Zwei Spulen werden in Serie geschaltet. Die eine Spule enthält 600 m Kupferdraht mit einem Durchmesser von 0,3 mm, die andere Spule besteht aus 200 m Kupferdraht mit einem Durchmesser von 0,8 mm. Welchen Widerstand weist die Schaltung bei einer Umgebungstemperatur von 50° auf?

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung der beiden Spulenwiderstände für 20° C

– Grundformel anschreiben:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen:

$$R_1 = \frac{0,0177 \cdot 600}{0,15^2 \cdot \pi} \frac{\Omega \text{ mm}^2 \text{ m}}{\text{m} \cdot \text{mm}^2}$$

$$R_1 = 150 \Omega$$

$$R_2 = \frac{0,0177 \cdot 200}{0,4^2 \cdot \pi}$$

$$R_2 = 7,04 \Omega$$

2. Schritt: Berechnung des Gesamtwiderstandes

– Grundformel anschreiben

$$R_g = R_1 + R_2$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_g = 150 \Omega + 7,04 \Omega$$

$$R_g = 157,04 \Omega$$

3. Schritt: Berechnung der Schaltung für eine Widerstandstemperatur von 50° C

– Grundformel anschreiben

$$R_w = R_{20^\circ} [1 + \alpha_{20^\circ} \cdot (\vartheta - 20^\circ)]$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $R_w = 157,04 [1 + 0,00393 \cdot (50 - 20)]$

$$R_w = 175,5 \Omega$$

b. Berechnen Sie die Schaltung nach Bild 85

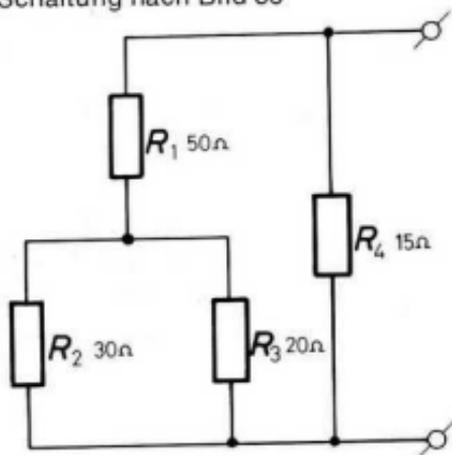


Bild 85

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung der Parallelschaltung $R_2 \parallel R_3$

– Grundformel anschreiben:

$$\frac{1}{R_{g''}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

– Grundformel nach R_g umstellen

$$R_{g''} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_{g''} = \frac{30 \cdot 20}{50}$$

$$R_{g''} = 12 \Omega$$

2. Schritt: Berechnung der Schaltung $R_1 + (R_2 \parallel R_3)$

– Grundformel anschreiben

$$R_{g'} = R_1 + (R_2 \parallel R_3)$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_{g'} = 50 + 12$$

$$R_{g'} = 62 \Omega$$

3. Schritt: Berechnung der Gesamtschaltung

– Grundformel anschreiben:

$$R_g = \frac{R_{g'} \cdot R_4}{R_{g'} + R_4}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_g = \frac{62 \cdot 15}{77}$$

$$R_g = 12,07 \Omega$$

5. Das Wesentliche

Wir kennen verschiedene Bauarten von Widerständen. In der Elektronik finden hauptsächlich Schichtwiderstände, Massewiderstände und Drahtwiderstände Verwendung.

Potentiometer sind Widerstände mit verstellbarem Abgriff. Sie werden als Kohleschichtpotentiometer und als drahtgewickelte Potentiometer hergestellt. Die Widerstandswerte sind normiert, gebräuchlich sind die 5%-Normreihe und die 10%-Normreihe. Der Widerstandswert und die Toleranz sind in Form von Farbringen nach einem Farbcode auf den Widerständen festgehalten.

Widerstände weisen einen Temperaturkoeffizienten auf, der angibt, wie sich der Widerstandswert unter dem Einfluss der Temperatur ändert.

Eine Serieschaltung von Widerständen weist einen Gesamtwiderstand auf, der der Summe der Teilwiderstände entspricht.

Bei der Parallelschaltung von Widerständen sind die Leitwerte der einzelnen Widerstände zu addieren, um den Gesamtleitwert der Schaltung zu ermitteln.

Die Widerstandswerte von Leitungen lassen sich errechnen, wenn der spezifische Widerstand oder die Leitfähigkeit des Leitermaterials, die Länge des Leiters und dessen Querschnitt bekannt sind. Der Widerstandswert ist proportional zum spezifischen Widerstand und zur Leiterlänge und umgekehrt proportional zum Leitungsquerschnitt.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 445)

- Nennen Sie drei Arten von Festwiderständen, die Sie kennen.
- Was ist ein Potentiometer?
- Welches ist der Unterschied zwischen einem logarithmischen und einem linearen Potentiometer?
- Geben Sie für beide Arten je ein Anwendungsbeispiel.
- Wo werden Trimpotentiometer gebraucht?
- Nennen Sie für alle Zahlen zwischen 0 und 9 die entsprechende Farbe im Farbcode.
- Wie werden die Toleranzen der Widerstände gekennzeichnet?
- Welche Arten von Normreihen kennen Sie?
- Wie errechnet sich eine Serieschaltung von Widerständen?
- Welche Gesetzmässigkeiten gelten für die Parallelschaltung von Widerständen?
- Von welchen Faktoren hängt der Widerstandswert eines Leiters ab?
- Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «spezifischer Widerstand»?
- Zwei Spulen L_1 und L_2 sind in Serie geschaltet, parallel zu dieser Schaltung liegt die Spule L_3 . Die Temperatur in diesen Spulen beträgt 60°C . Sie kennen folgende Spulendaten:
 - L_1 Drahtlänge 500 m, Drahtdurchmesser 0,7 mm, Material des Drahtes: Kupfer
 - L_2 Drahtlänge 210 m, Drahtdurchmesser 0,3 mm, Material des Drahtes: Aluminium
 - L_3 Drahtlänge 50 m, Drahtdurchmesser 0,6 mm, Material des Drahtes: Eisen ($\alpha_{20^\circ} = 0,0055$)Berechnen Sie den Gesamtwiderstand der Schaltung bei 60°C .

II. Kondensatoren

1. Einführung

Eines der wichtigsten Bauelemente der Elektronik, insbesondere der Wechselstromtechnik, ist der Kondensator. Es existieren praktisch keine Schaltungen und Geräte der Nachrichtentechnik, in welchen nicht Kondensatoren in den verschiedensten Ausführungsformen und Grössen verwendet werden. Der Kondensator ist zugleich einer der ältesten Bausteine der Physik, schon im letzten Jahrhundert wurden mit Kondensatoren physikalische Versuche angestellt. Die damaligen Kondensatoren bestanden aus Glasgefässen, welche innen und aussen mit einem leitenden Belag versehen waren. Wegen ihrem gefässartigen Aussehen und ihrer Herkunft wurden sie «Leidener-Flaschen» genannt. Die heutigen Kondensatoren haben mit diesen Leidener-Flaschen nur noch das Funktionsprinzip gemeinsam. Die Ausführungsformen wurden den Bedürfnissen der modernen Technik angepasst.

Kondensatoren finden in Gleichstromkreisen Verwendung als Siebglieder, als Zeitglieder und zur Funkenlöschung. In Niederfrequenzkreisen treffen wir Kondensatoren als Kopplungselemente und als Bestandteile von Filtern an. In Hochfrequenzkreisen werden sie oft als Bausteine von Schwingkreisen verwendet.

2. Was wissen Sie schon über Kondensatoren?

(Lösung Seite 447)

- Wie ist der grundsätzliche Aufbau eines Kondensators?
- Welche Masseinheit wird für Kondensatoren verwendet?
- Sperrt ein Kondensator den Gleichstrom?
- Welche Eigenschaften hat der Kondensator im Wechselstromkreis?
- Welche Arten von Kondensatoren kennen Sie?
- Was ist eine elektrische Feldstärke?

3. Kondensatoren

a. Definition

Der Kondensator ist ein Bauelement, das die Eigenschaft hat, elektrische Ladung zu speichern. In Gleichstromkreisen wirkt der Kondensator wie eine Sperre; er setzt dem Gleichstrom einen unendlich hohen Widerstand entgegen. In Wechselstromkreisen wirkt er wie ein Widerstand; er setzt dem Wechselstrom einen Widerstand entgegen, dessen Grösse vom Wert des Kondensators und der Frequenz abhängt.

b. Prinzip

Ein Kondensator besteht aus zwei Metallplatten, die sich isoliert gegenüberstehen. Als Isolator kann Luft oder ein anderes gutes Isoliermaterial verwendet werden. Das Isoliermaterial wird Dielektrikum genannt. In Bild 86 sehen wir den prinzipiellen Aufbau und das Symbol eines Kondensators.

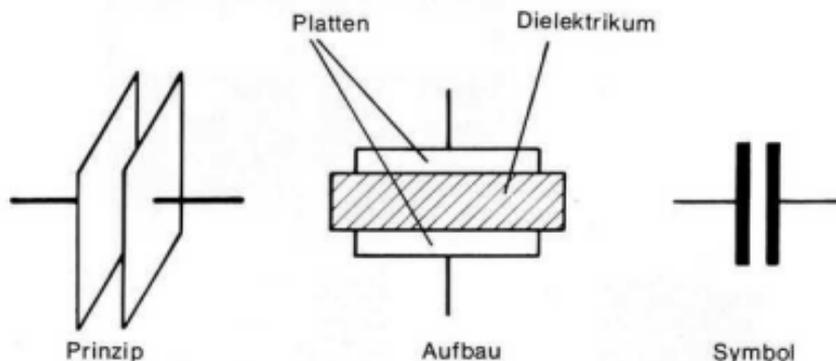


Bild 86

c. Die elektrische Ladung Q

Die elektrische Ladung Q ist mit der Elektrizitätsmenge identisch. Sie kann mit der Wassermenge verglichen werden, die in einem Behälter gespeichert ist.

Versuch:

Wir stellen uns eine Schaltung gemäss Bild 87a zusammen.

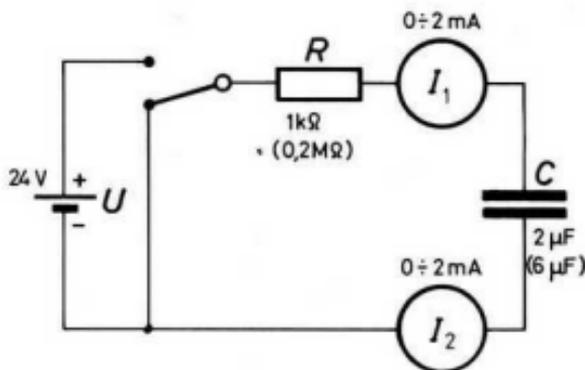


Bild 87a

In Bild 87b erkennen wir den Versuchsaufbau.

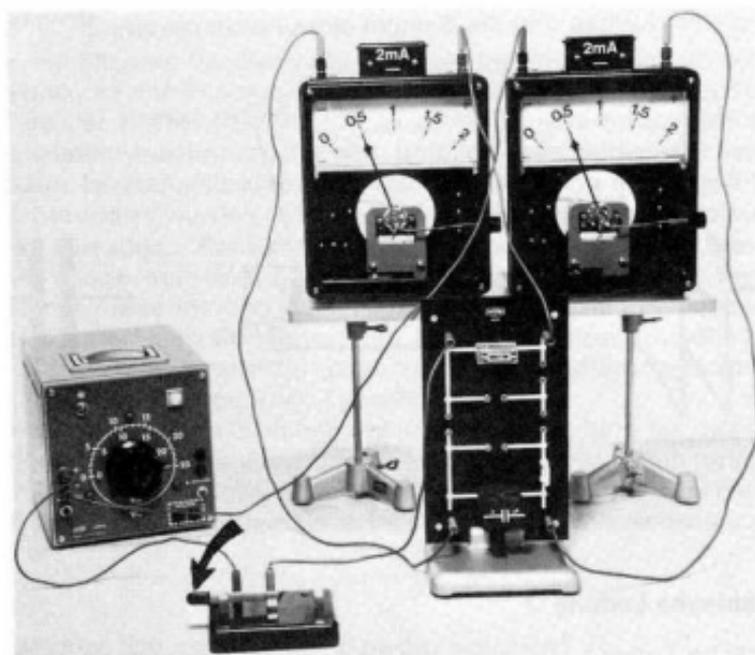


Bild 87b

Versuchsablauf:

Wir schalten den Schalter um auf die Spannungsquelle. Beide Strommesser zeigen einen gleich grossen Stromstoss an. Legen wir den Schalter wieder in die Ruhstellung zurück, zeigen die beiden Strommesser einen gleich grossen Stromstoss wie vorher an, aber entgegengesetzt gerichtet.

Wir wechseln den Widerstand $R = 1 \text{ k}\Omega$ gegen einen solchen von $200 \text{ k}\Omega$ aus. Der Stromstoss beim Einschalten wie auch beim Ausschalten ist jetzt kleiner, dauert dafür aber länger. Nach einer kurzen Zeit, etwa 2 s, ist im Kreis kein Strom mehr messbar.

Wir ersetzen den Kondensator durch einen mit grösserer Kapazität und wiederholen den Versuch. Die Stromstösse dauern nun länger, was sich – der Trägheit des Messsystems wegen – durch stärkere Zeigerausschläge äussert.

Aus dem Versuch ziehen wir folgende Lehre:

Der Kondensator stellt im Gleichstromkreis einen Unterbruch dar. Im Einschaltmoment fliesst ein Strom, der rasch abnimmt. Die Dauer des Strom-

stosses hängt vom Wert des Vorwiderstandes und von der Kapazität des Kondensators ab. Der Strom, der in den Kondensator hineinfliesst, ist gleich gross wie derjenige, der abfliesst. Der Versuch beweist, dass eine gewisse Elektrizitätsmenge in den Kondensator hineingeflossen ist. Diese Elektrizitätsmenge oder Ladung wird im Kondensator gespeichert. Ein mechanisches Modell hilft uns den Vorgang zu veranschaulichen. Bild 88 zeigt unser Modell.

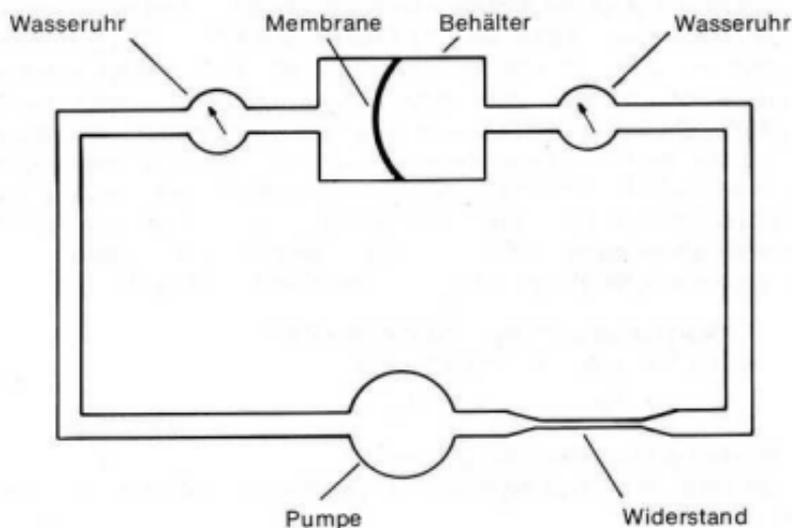


Bild 88

Ein Gefäss ist durch eine Gummimembrane in zwei Hälften geteilt. Jede Kammer ist an ein Wasserleitungssystem angeschlossen, dessen treibende Kraft eine Pumpe ist. Das ganze System ist mit Wasser gefüllt. Die Pumpe drückt das Wasser in eine Kammer, die Membrane dehnt sich aus und drückt die genau gleiche Wassermenge aus der anderen Kammer heraus. Die Wassermenge wird mit zwei Wasseruhren gemessen. Beide Uhren zeigen die gleiche Menge an. Wenn wir nun den Querschnitt der Wasserleitung auf einer gewissen Länge stark verkleinern, wird der Wasserfluss schwächer, dafür dauert er länger. Wenn wir ein grösseres Gefäss verwenden, wird der Wasserfluss von längerer Dauer.

Durch die Membrane ist kein Tropfen Wasser durchgetreten und trotzdem haben wir einen Stromfluss. Genau gleich verhält sich der Kondensator. Kein Strom wird von der einen Platte durch den Isolator zur anderen Platte fließen,

und trotzdem messen wir im äusseren Kreis einen kurzen Stromstoss. Würden wir die beiden Zuleitungen zum Wassergefäss unterbinden und dieses aus dem Kreis herausnehmen, so würden wir an den Leitungsenden einen gewissen Druck verspüren. Dieser rührt von der gespannten Membrane her. Analog dazu verhält sich der Kondensator. Wenn man ihn aus dem Stromkreis herausnimmt, ist er geladen, er weist eine Spannung auf. Bei unserem Versuch haben wir die Ladung ausgeglichen, indem wir den Kondensator vor der Wiederholung des Versuches kurzgeschlossen haben. Der Funke, der dabei entstand, zeigte den Ladungsausgleich an.

Die Wasseruhren haben die Wassermenge gemessen, während die Instrumente den Strom anzeigten. Wenn wir die *Elektrizitätsmenge* bestimmen wollen, dann haben wir den geflossenen Strom mit der Zeit, während welcher ein Stromfluss stattfand, zu multiplizieren. Wir erinnern uns, dass elektrischer Strom gleich geflossene Elektrizitätsmenge pro Zeiteinheit bedeutet. Ein elektrischer Strom hat die Grösse von einem Ampère, wenn in einem Leiter pro Sekunde $6,26 \cdot 10^{18}$ Elektronen fliessen. Unter elektrischer Ladung verstehen wir die Anzahl Elektronen oder Elementarladungen. Unter Elementarladung versteht man die Ladung eines einzelnen Elektrons. Die Einheit der Ladung ergibt sich demzufolge aus dem Produkt von Strom und Zeit:

Elektrische Ladung = Strom mal Zeit

Ladung = Ampère mal Sekunden

$$Q = I \cdot t \quad [\text{As oder Coulomb}]$$

Das Formelzeichen für die Ladung ist das Q

Die Masseinheit im Giorgi-System ist die *Ampèresekunde* (As) oder das *Coulomb*. $1 \text{ C} = 1 \text{ As}$.

d. Das elektrische Feld

Sobald an die Platten eines Kondensators eine Spannung angelegt wird, stehen sich positive und negative Ladungen gegenüber. Diese Ladungen üben Kräfte aufeinander aus. Der Bereich, in welchem diese Kräfte wirksam sind, wird *elektrisches Feld* genannt. Man denkt sich analog zum magnetischen Feld Kraftlinien als Träger des Feldes. In Bild 89 sind diese Kraftlinien dargestellt.

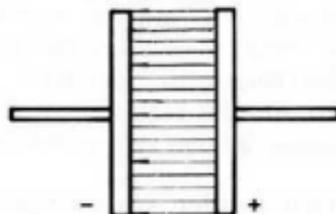


Bild 89

Die Kraftlinien treten bei der positiven Platte aus und bei der negativen Platte ein. Entlang dieser Feldlinien entsteht ein Spannungsgefälle. Die Grösse dieses Spannungsgefälles ist ein Mass für die elektrische Feldstärke. Die elektrische Feldstärke ist die Spannung je Längeneinheit.

Da die Feldstärke eine gerichtete Grösse ist, kann sie als Vektor dargestellt werden. Ihr Formelzeichen ist deshalb \vec{E} oder \vec{E} .

Zwecks Vereinfachung wird für die folgenden Betrachtungen ein homogenes Feld vorausgesetzt. Somit werden im weitern nur noch die Beträge der Vektoren berücksichtigt.

Die Masseinheit für die Feldstärke ist das V/m. Die Ursache des elektrischen Feldes dagegen ist die Ladung. Ohne Ladung kein Feld, je grösser die Ladung desto kräftiger das Feld.

Je kleiner die Plattenoberfläche bei gleichbleibender Ladung gemacht wird, desto dichter wird das Feld. Die *Dichte des elektrischen Feldes* wird als Ladung pro Flächeneinheit angegeben. Sie bezieht sich auf die Ladung pro Quadrat-zentimeter Plattenfläche.

Dichte des elektrischen Feldes = Ladung pro Flächeneinheit
[Dichte] = Ampèresekunden pro Quadratmeter

$$D = \frac{Q}{A} \quad \frac{\text{As}}{\text{m}^2}$$

Für den Begriff der Dichte verwendet man oft die Bezeichnung «dielektrische Verschiebung».

Vom Kondensator wissen wir bis jetzt, dass er in der Lage ist eine elektrische Ladung aufzunehmen. Der geschilderte Versuch hat uns gezeigt, dass die aufgenommene Ladung grösser wird, wenn die Kapazität grösser gemacht wird. Wir haben uns noch nicht mit dem Fassungsvermögen des Kondensators befasst, auch haben wir die Spannung, die am geladenen Kondensator entsteht, noch nicht näher betrachtet. Bevor wir uns diesen beiden Grössen zuwenden, wollen wir den Zusammenhang zwischen Dichte und Feldstärke untersuchen. Wir stellen uns einen aus zwei festen Platten bestehenden Kondensator vor. Weder die Grösse der Platten noch der Plattenabstand seien veränderlich. Der Kondensator weist demzufolge eine bestimmte unveränderliche Kapazität auf. Wir bringen nun eine bestimmte Ladung in den Kondensator, wobei sich eine bestimmte Dichte D einstellt. Das Feld wird nun eine bestimmte Feldstärke E aufweisen. Wir lassen eine zusätzliche Ladung in den Kondensator fliessen. Die Feldstärke sowie die Dichte nehmen zu.

Da wir uns das elektrische Feld aus Feldlinien bestehend vorstellen, und die Ladung die Ursache des Feldes ist, muss zwischen der Dichte und der Feldstärke ein Zusammenhang bestehen.

Dieser wird durch einen Proportionalitätsfaktor ausgedrückt.

$$D = \epsilon \cdot E$$

Der Faktor ϵ (epsilon) heisst *absolute Dielektrizitätskonstante* und setzt sich zusammen aus:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r; \epsilon_0 = 0,8855 \cdot 10^{-11} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

ϵ_r = relative Dielektrizitätskonstante.

ϵ_0 = Dielektrizitätskonstante des leeren Raumes.

Beim Studium der magnetischen Erscheinungen sind wir auf den Faktor μ_0 gestossen, dieser Faktor ist eine Naturkonstante und diente als Umrechnungsfaktor von einem Masssystem in das andere. Die gleiche Aufgabe fällt nun ϵ_0 zu.

Die Masseinheit für ϵ_0 ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$\epsilon_0 \cdot \epsilon_r = \frac{D}{E} \quad \text{wir machen die Einheitenprobe:}$$

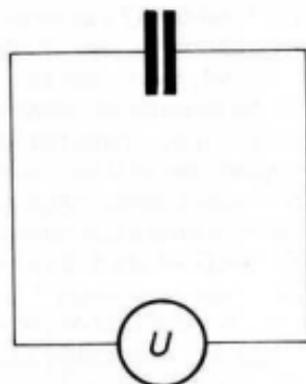
$$[\epsilon_0] = \frac{\text{As}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{V}} = \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

Die absolute Dielektrizitätskonstante wird später zur Berechnung der Kapazität verwendet.

e. Die Kapazität eines Kondensators

Die *Kapazität* eines Kondensators gibt an, wie gross die aufgenommene Ladung bei einer bestimmten Spannung ist.

Wir wollen die Zusammenhänge an Hand eines Versuches studieren. Bild 90 zeigt uns das Schaltungsprinzip des Versuches.



Elektrostatiches Voltmeter
oder Elektrometer

Bild 90

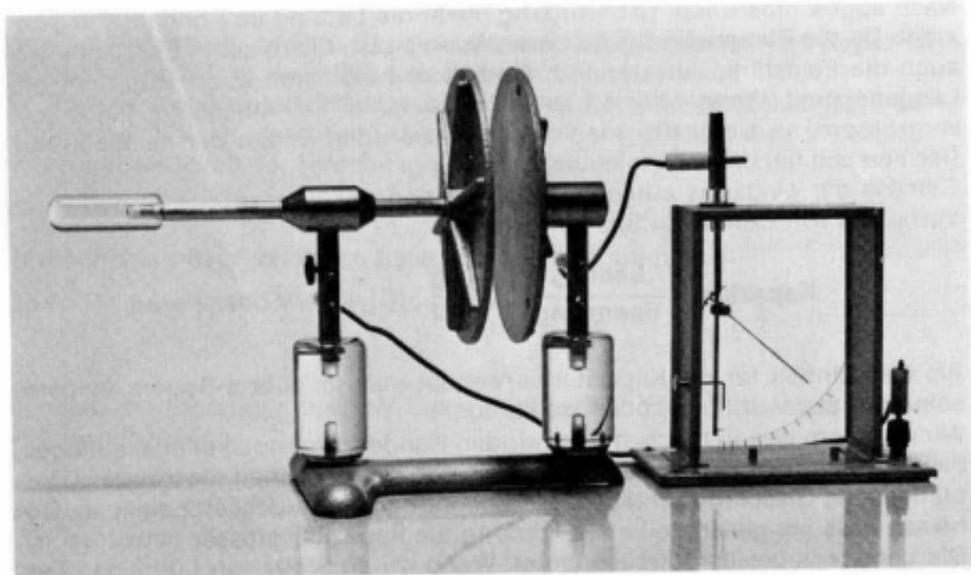


Bild 91

In Bild 91 erkennen wir die Versuchsanordnung. Ein Plattenkondensator wird mit einem geriebenen Hartgummistab aufgeladen. Durch die Reibung des Stabes mit einem Tuch sammelt sich auf dem Isolierstab eine elektrische Ladung an. Diese Ladung wird nun dem Kondensator zugeführt, indem man eine Platte mit dem Stab berührt. Infolge der Ladung entsteht zwischen den beiden Kondensatorplatten ein elektrisches Feld mit einer bestimmten Feldstärke. Die dadurch entstehende Spannung zwischen den Kondensatorplatten wird mit einem *Elektrometer* gemessen. Das Elektrometer hat einen praktisch unendlich hohen Innenwiderstand, es verbraucht keine Leistung. Es arbeitet auf dem Prinzip der Anziehung und Abstoßung im elektrischen Feld. Da es als Isolator wirkt, kann die Kondensatorladung nicht über das Instrument abfließen.

Der Kondensator wird mit dem Isolierstab so lange aufgeladen, bis sich ein mittlerer Ausschlag am Elektrometer einstellt. Jetzt wird der Plattenabstand langsam vergrößert, gleichzeitig beginnt der Ausschlag am Elektrometer zu steigen. Wird der Plattenabstand verkleinert, so sinkt die Elektrometerspannung ab. Der Versuch lässt sich mit der gleichen Ladung beliebig oft wiederholen.

Nach abgeschlossenem Ladevorgang bleibt die Ladung im Kondensator konstant. Da die Plattenoberfläche unveränderlich ist, bleibt somit die Dichte wie auch die Feldstärke unverändert. Feldstärke heisst nun aber Spannung pro Längeneinheit. Wenn wir die Länge der Feldlinien bei konstanter Feldstärke vergrössern, so steigt die Spannung zwischen den Enden der Feldlinien an. Der Versuch hat diese Überlegungen bestätigt.

Gemäss der eingangs aufgeführten Definition der Kapazität stellt diese das Verhältnis von Ladung zu Spannung dar.

$$\text{Kapazität} = \frac{\text{Ladung}}{\text{Spannung}}; C = \frac{Q}{U}; [C] = \text{As/V oder Farad}$$

Als Masseinheit für die Kapazität verwendet man im Giorgi-System Ampèresekunden pro Volt (As/V) oder das Farad (F)

Wir erweitern den Versuch, indem wir den Kondensator noch einmal aufladen, die Spannung am Elektrometer beachten und nun zwischen die Kondensatorplatten eine Glasplatte schieben. Die Spannung am Kondensator sinkt ab. Das heisst, dass bei gleichbleibender Ladung die Kapazität grösser geworden ist. Die Lehre aus diesem Versuch lautet: Wenn wir an Stelle von Luft einen besseren Isolator als Dielektrikum verwenden, so steigt die Kapazität des Kondensators an.

Wir wollen nun die Zusammenhänge zwischen den geometrischen Abmessungen des Kondensators und der Grösse seiner Kapazität aufspüren. Der eben gezeigte Versuch hat uns bereits zwei kapazitätsbestimmende Faktoren geliefert:

1. Bei zunehmendem Plattenabstand und gleichbleibender Ladung steigt die Spannung am Kondensator an. Ferner haben wir festgehalten, dass die Kapazität das Verhältnis von Ladung zu Spannung ist. Daraus folgt, dass die Kapazität mit zunehmendem Plattenabstand kleiner wird. *Die Kapazität verhält sich umgekehrt proportional zum Plattenabstand.*

2. Im gleichen Versuch haben wir gesehen, dass die Spannung bei gleichbleibender Ladung am Kondensator absinkt, wenn zwischen die Platten ein besserer Isolator als Luft gebracht wird. Daraus haben wir geschlossen, dass die Kapazität angestiegen ist. Der Faktor, um welchen die Kapazität bei Verwendung eines bestimmten Materials als Dielektrikum ansteigt, heisst *relative Dielektrizitätskonstante* ϵ_r . Er ist als Proportionalitätsfaktor dimensionslos.

Die Kapazität verhält sich proportional zur relativen Dielektrizitätskonstante.

3. Aus den vorstehend beschriebenen Experimenten und Überlegungen lässt sich leicht ableiten, dass bei zunehmender Plattenoberfläche und gleichbleibender Ladung die Dichte des elektrischen Feldes abnimmt. Da jedoch Dichte und Feldstärke mit der Dielektrizitätskonstante verknüpft sind und sich beide Grössen zueinander proportional verhalten, nimmt bei zunehmender Plattenoberfläche die Feldstärke ab. Abnehmende Feldstärke bei gleichbleibender Ladung ist aber gleichbedeutend mit Abnahme der Spannung am Kondensator.

sator, was wiederum besagt, dass die Kapazität zugenommen hat. *Kapazität und Plattenoberfläche verhalten sich zueinander proportional.*

Den Einfluss der Dielektrizitätskonstante wollen wir mit Hilfe der Algebra bestimmen. Wir wissen, dass die Dichte des elektrischen Feldes über die Dielektrizitätskonstante mit der Feldstärke verknüpft ist.

$$D = \varepsilon E$$

Für die Dichte setzen wir deren Bestimmungsgleichung:

$$D = \frac{Q}{A}$$

Zwischen der Feldstärke und der Spannung am Kondensator besteht folgender Zusammenhang:

$$E = \frac{U}{d}$$

Wir dürfen deshalb schreiben:

$$\frac{Q}{A} = \frac{\varepsilon \cdot U}{d}; \text{ und damit } Q = U \cdot \frac{\varepsilon \cdot A}{d}$$

Da $C = \frac{Q}{U}$ ergibt sich auch:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

Da sich ε aus ε_0 und ε_r zusammensetzt, lautet die vollständige Formel:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d}; [C] = \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \frac{\text{As}}{\text{V}} \text{ oder F}$$

Diese Einheit ist für die üblichen Kondensatoren viel zu gross.

In der Praxis kommen die folgenden Untereinheiten vor:

$$1 \mu\text{F} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ F (Mikrofarad)}$$

$$1 \text{ nF} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ F (Nanofarad)}$$

$$1 \text{ pF} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ F (Picofarad)}$$

f. Ausführungsformen

Der Plattenkondensator

Er besteht aus mehreren parallel geschalteten Platten-Paaren. Als Dielektrikum wird in der Regel Luft verwendet. Plattenkondensatoren werden oft in Senderleistungsstufen eingesetzt. Bild 92 zeigt die Ausführung eines Plattenkondensators.

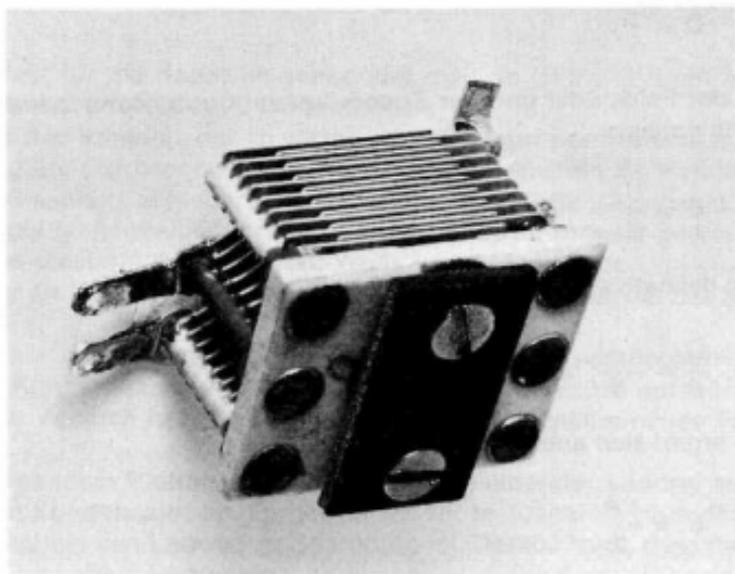


Bild 92

Der Drehkondensator

Er besteht aus zwei Paketen von Platten, wobei das eine Paket drehbar angeordnet ist. Durch Verdrehen des beweglichen Plattenpaketes lässt sich die Kapazität kontinuierlich verändern. Das bewegliche Paket heisst Rotor, die festen Platten bilden den Stator. Drehkondensatoren werden vor allem in Sende- und Empfangsgeräten verwendet; sie dienen dort der Abstimmung der Schwingkreise. Der Schnitt der Platten hat einen Einfluss auf die Teilung der Frequenzskalen der Geräte. Durch geeignete Wahl der Plattenformen ist es möglich, lineare Frequenzskalen zu erhalten. Drehkondensatoren werden als Einzelexemplare gebaut oder zu Systemen zusammengefügt; man spricht dann von Mehrfachdrehkondensatoren. Beim Mehrfachdrehkondensator sind alle Rotoren auf einer gemeinsamen Achse angeordnet. Die Anzahl der verwendeten Einzelkondensatoren pro System und deren Plattenschnitt hängt vom Verwendungszweck ab. In Bild 93 sehen wir einen Einzeldrehkonden-

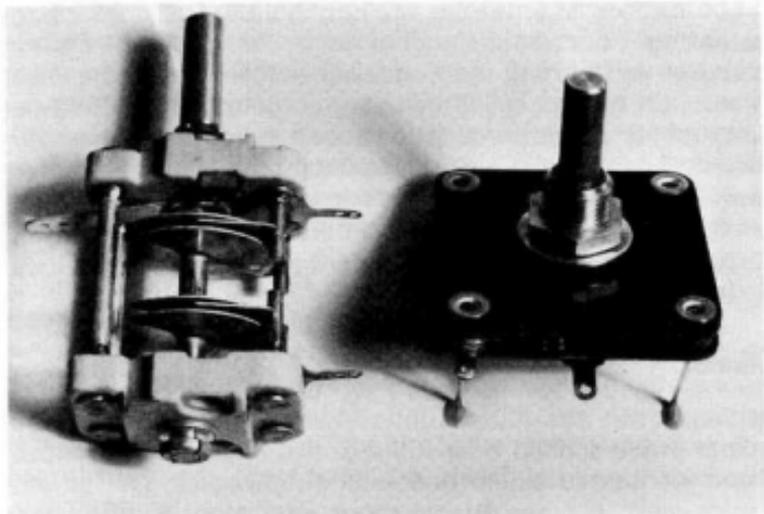


Bild 93

sator und einen Mehrfachdrehkondensator. Die Kapazität von Drehkondensatoren variiert je nach Verwendung zwischen einigen Picofarad und einigen hundert Picofarad.

Rechts der Abbildungen erkennen wir das Symbol für einen Drehkondensator.

Der Trimmerkondensator

Der Trimmerkondensator ist ein Einstellkondensator. Seine Kapazität ist kontinuierlich einstellbar. Der Trimmer dient zum Abgleich von Schaltungen und von Mehrfachdrehkondensatoren. Man unterscheidet verschiedene Ausführ-

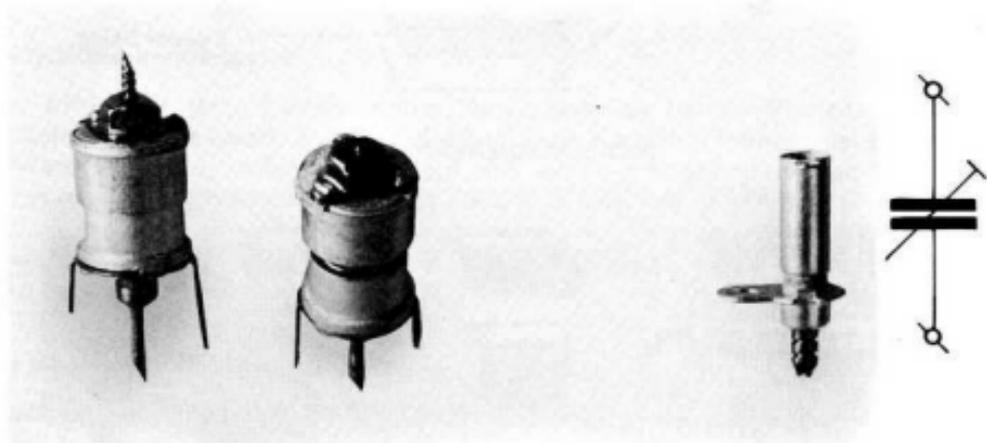


Bild 94

rungsformen. Der Lufttrimmer ist entweder wie ein Miniaturdrehkondensator aufgebaut, oder er hat die Form eines Tauchtrimmers, wie auf dem Foto in Bild 94 links. Eine andere Ausführung des keramischen Trimmers besteht aus zwei Keramikscheiben, auf welche ein Silberbelag aufgebrannt ist. Eine der beiden Scheiben ist drehbar angeordnet, so dass sich durch Verdrehen derselben die Kapazität verändern lässt. Eine weitere Bauart des Keramiktrimmers ist rechts auf dem Foto in Bild 94 sichtbar: Eine leitende Spindel wird mehr oder weniger in ein Keramikrohr mit äusserem Silberbelag eingetaucht. Trimmer werden für Kapazitäten bis etwa 100 pF gefertigt. Grössere Kapazitätswerte bilden die Ausnahme.

Der Wickelkondensator

Hier bestehen die Elektroden aus Aluminiumfolienstreifen. Als Dielektrikum wird eine imprägnierte Papierschicht oder Kunststoffolie verwendet. Elektroden und Dielektrikum werden zu einem Rollblock aufgewickelt. Der so entstandene Kondensator wird in einen Blechbecher oder einer Karton- oder Kunststoffhülse eingebaut und mit Kunstharz vergossen. Bild 95 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Wickelkondensators, während uns Bild 96 einige Ausführungen vorstellt. Wickelkondensatoren werden bis zu Kapazitätswerten von einigen μF hergestellt. Sie finden hauptsächlich in Niederfrequenzkreisen Anwendung.

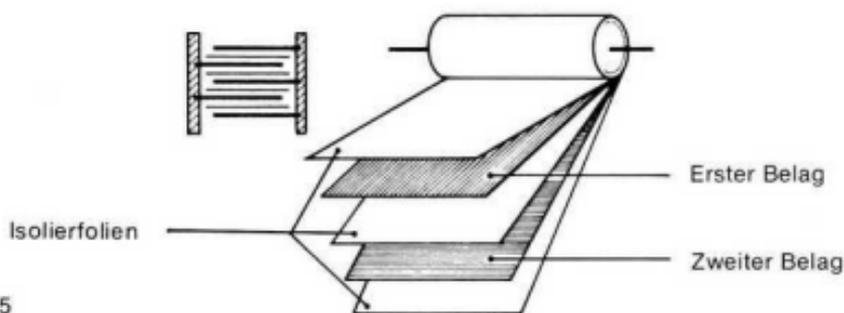


Bild 95

WICKELKONDENSATOREN

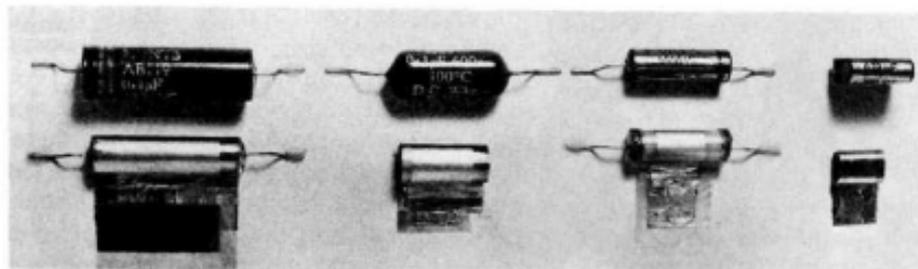


Bild 96

Der Keramikkondensator

Keramikkondensatoren existieren hauptsächlich in zwei Bauformen:

Plättchen- oder Scheibenkondensatoren: Ein dünnes Keramikplättchen weist beidseitig einen eingebrannten Silberbelag auf, auf welchen die Zuführungsdrähte gelötet sind. Ihre Kapazität ist bestimmt durch die Grösse der metallisierten Oberfläche, die Materialdicke und die relative Dielektrizitätskonstante des Materials. Ihre Kapazitätswerte liegen zwischen etwa 1 und 50 pF.

Rohr- oder Halmkondensatoren: Keramikröhrchen mit eingebranntem Silberbelag innen und aussen, mit daran angelöteten Zuführungsdrähten. Bezüglich ihrer Kapazität gilt das oben Gesagte. Sie werden gebaut für Kapazitäten von etwa 10 pF bis zu einigen tausend pF.

Die Keramikkondensatoren sind mit einem Schutzlack überzogen, dessen Farbe im allgemeinen den Temperaturkoeffizienten bezeichnet (je nach Fabrikat verschieden). Bild 97 stellt den prinzipiellen Aufbau eines Halmkondensators im Längsschnitt dar. Bild 98 zeigt einige Ausführungsformen von Keramikkondensatoren. Sie finden hauptsächlich in Hochfrequenzschaltungen Verwendung.

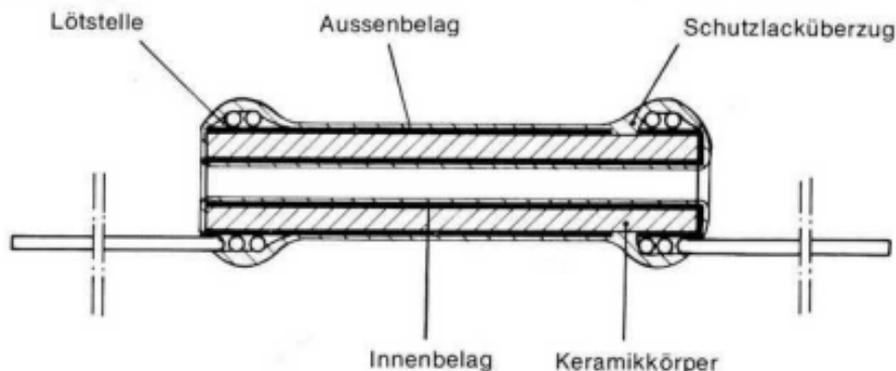


Bild 97

Der Glimmerkondensator

Hier wird Glimmer als Dielektrikum verwendet. Die beiden Plättchenoberflächen sind metallisiert. Zur Vergrösserung der Kapazität werden bei Bedarf mehrere Plättchen aufeinandergelegt mit dazwischengelegten Metallfolien zur Kontaktierung. Sie sind normalerweise in Kunststoff eingepresst und werden verwendet als Präzisionskondensatoren hoher Konstanz in Messinstrumenten und in Hochfrequenzkreisen. Sie existieren für Kapazitätswerte von etwa 30 pF bis zu einigen tausend pF.

Der Metallpapierkondensator MP

Dieser ist ein Spezialfall des Wickelkondensators. Der Baustein für den MP-Kondensator ist das Metallpapier. Metallpapier ist ein Papier mit aufgedampft-

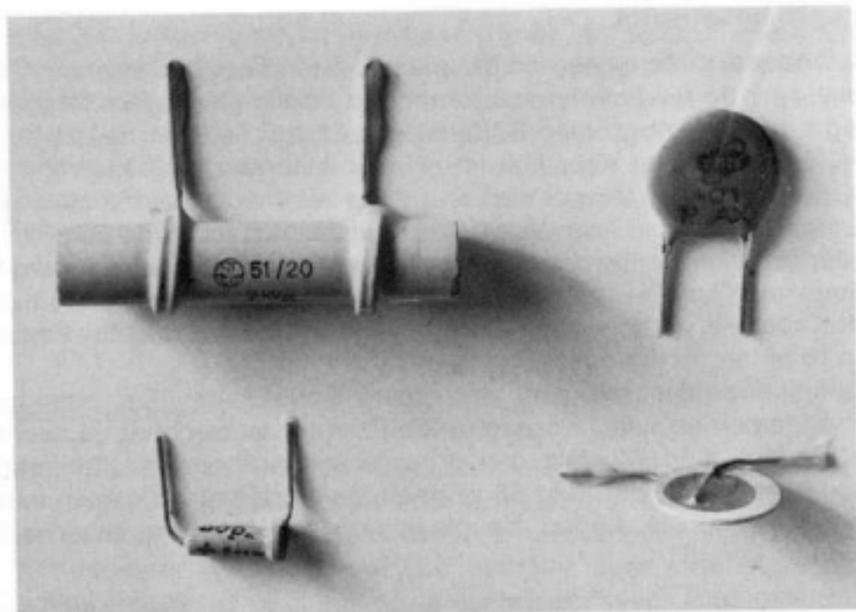


Bild 98

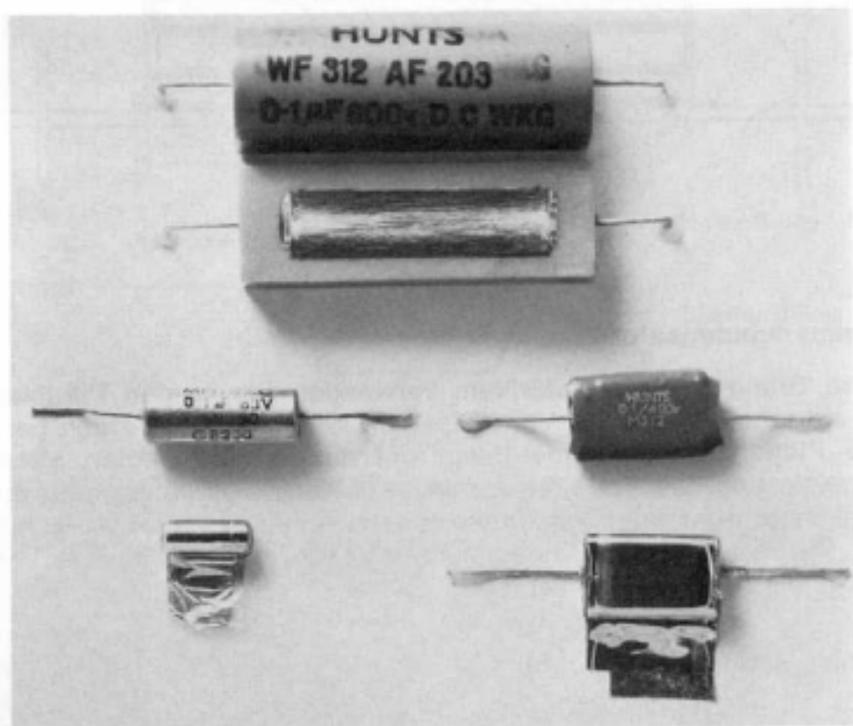


Bild 99

tem, äusserst dünnem Metallbelag. Metallpapierstreifen werden zu Kondensatoren aufgewickelt. Der Vorteil des Metallpapierkondensators liegt in seinen geringen Abmessungen im Verhältnis zu seiner Kapazität. Bei einem Spannungsdurchschlag brennt der Metallbelag weg, der Kondensator ist somit selbstheilend. MP-Kondensatoren werden häufig als Siebmittel in Gleichrichterschaltungen und in Niederfrequenzgeräten angewendet. Sie werden für Kapazitäten bis zu hundert und mehr μF gebaut. Bild 99 zeigt einige Ausführungsformen.

Der Elektrolytkondensator

Hier taucht eine Metallelektrode, deren Oberfläche durch Wellung oder andere Massnahmen vergrössert wurde, in einen Elektrolyten. Die eine Elektrode besteht aus dem Metall, die andere aus dem Elektrolyten. Sobald an den Elektroden eine Gleichspannung richtiger Polarität liegt, überzieht sich die Metalloberfläche mit einer dünnen Oxydschicht, welche als Isolator das Dielektrikum bildet. Da diese Schicht sehr dünn ist – in der Grössenordnung $1 \cdot 10^{-5}$ cm – ergibt sich eine grosse Kapazität in einem kleinen Raum. Bei den sogenannten Trockenelektrolyten besteht der Elektrolyt aus einer elektrolytgetränkten Paste. Die Elektrolytkondensatoren verlieren durch Alterung allgemein an Kapazität (Eintrocknen des Elektrolyten) und müssen deshalb in älteren Geräten gelegentlich ersetzt werden. Der Isolationswiderstand der Elektrolytkondensatoren ist nicht so gut wie bei anderen Kondensatorarten. Der Elektrolytkondensator benötigt für die Erhaltung der Oxydschicht einen geringen Strom. Der Strom beträgt etwa 0,01 mA pro μF . Durch seine speziellen Eigenschaften werden die Verwendungsmöglichkeiten des Elektrolytkondensators stark eingeschränkt. Er kann nur an einer Gleichspannung betrieben werden, der eine nicht zu grosse Wechselspannung überlagert sein darf. Bei allen Schaltungen mit Elektrolytkondensatoren ist die Polarität zu beachten. Wird ein Elektrolytkondensator falsch gepolt, so führt dies innerhalb kurzer Zeit zu dessen Zerstörung. Der Elektrolytkondensator wird deshalb vorwiegend in Gleichrichterschaltungen als Siebkondensator und in Niederfrequenzschaltungen als Glättungskondensator verwendet. Die Transistortechnik hat sein Anwendungsgebiet erheblich vergrössert, trifft man doch in den meisten Niederfrequenzschaltungen der Transistortechnik Elektrolytkondensatoren als Kopplungskondensatoren an. Elektrolytkondensatoren werden für Kapazitätswerte bis zu 1000 μF und mehr hergestellt. Grosse Kapazitätswerte sind vor allem bei den sogenannten Niedervoltelektrolyten anzutreffen, das sind Elektrolytkondensatoren für kleine Betriebsspannungen.

Bild 100 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Elektrolytkondensators, während Bild 101 einige Ausführungsformen von Trockenelektrolyten vorstellt.

Hier nicht behandelt sind die *bipolaren* Elektrolytkondensatoren, bei denen für eine gegebene Spannung pro Volumeneinheit nur eine halb so grosse Kapazität untergebracht werden kann, bei denen dafür aber nicht auf die Polarität geachtet werden muss.

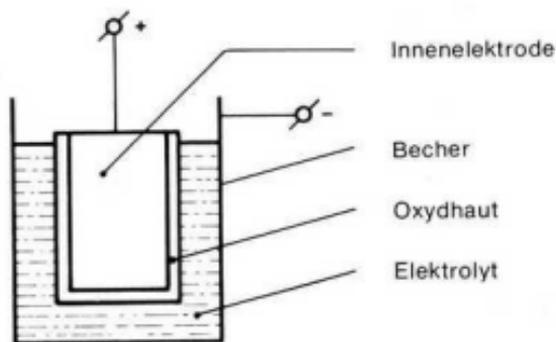


Bild 100

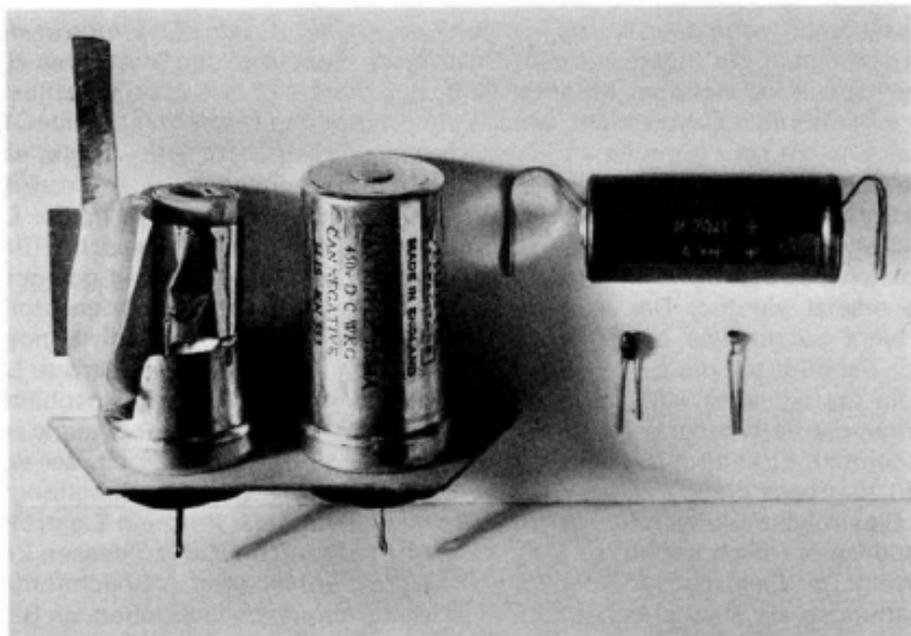


Bild 101

Unten rechts im Bild 101 sind 2 Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren dargestellt.

g. Kenndaten

Der Kondensator ist gekennzeichnet durch seinen *Kapazitätswert*, den *Verlustfaktor*, den *Temperaturkoeffizienten*, die *Betriebs-*, die *Prüfspannung* und die *Eigeninduktivität*.

Die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r

Die Kapazität eines Kondensators ist durch seine geometrischen Abmessungen und das Dielektrikum bestimmt. In Tabelle 12 ist die relative Dielektrizitätskonstante der wichtigsten Materialien zusammengestellt.

Material	Relative Dielektrizitätskonstante
Calit	6 6,5
Glas	2 16
Glimmer	4 8
Luft	1,000594
Pertinax	4,8
Plexiglas	3 4,5

Tabelle 12

Der Verlustfaktor $\text{tg } \delta$

Die Verluste in einem Kondensator haben drei Ursachen, die dielektrischen Verluste, die Isolationsverluste und die ohmschen Verluste. Dabei spielen die Verluste im Dielektrikum die Hauptrolle. Unter *dielektrischen Verlusten* verstehen wir diejenige elektrische Leistung, die im Dielektrikum eines Kondensators in Wärme umgesetzt wird, wenn dieser Kondensator an einer Wechselspannung liegt. Die Erwärmung des Dielektrikums hat ihre Ursache in den Bewegungen der Atome und Moleküle, die diese unter dem Einfluss des elektrischen Wechselfeldes ausführen. Die Grösse der Verlustleistung hängt bei gleichbleibender Spannung von den Eigenschaften des Dielektrikums ab. Die Verluste sind frequenzabhängig, je höher die Frequenz, desto grösser die Verluste. Diese Tatsache lässt sich leicht verstehen, wenn man sich vorstellt, dass die Moleküle und Atome des Dielektrikums ihre Bewegungen im Rhythmus der Frequenz der angelegten Wechselspannung ausführen. Die *Isolationsverluste* tragen ebenfalls einen Teil zum Verlustfaktor bei, ihr Anteil ist jedoch bei guten Kondensatoren äusserst gering. Abschliessend sollen noch die *ohmschen Verluste* in den Zuleitungsdrähten und auf den Platten erwähnt werden, obschon auch ihr Beitrag zum Verlustfaktor verschwindend klein ist. Alle diese Verluste denkt man sich in einem Parallel- oder Seriewiderstand vereinigt. Je grösser der Parallelverlustwiderstand wird, desto kleiner sind die Verluste. Beim Serieverlustwiderstand ist der Fall gerade umgekehrt, je grösser der Serieverlustwiderstand, desto grösser sind auch die Verluste. Ob man mit einem Serie- oder mit einem Parallelverlustwiderstand arbeitet, hängt von der Schaltung ab, in welcher der Kondensator betrieben wird. Wir werden später sehen, dass beide Darstellungsarten gleichwertig sind. Wir werden bei vielen Problemen der Wechselstromtechnik das Prinzip antreffen, nach welchem verschiedene Verlustwiderstände in einem Serie- oder Parallelverlustwiderstand zusammengefasst werden.

Bild 102 zeigt die beiden Ersatzschaltbilder für einen verlustbehafteten Kondensator.

Die Verluste im Kondensator werden messtechnisch erfasst. Für jeden Kondensator lässt sich der Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ ermitteln. Er ist ein Mass für die Ver-

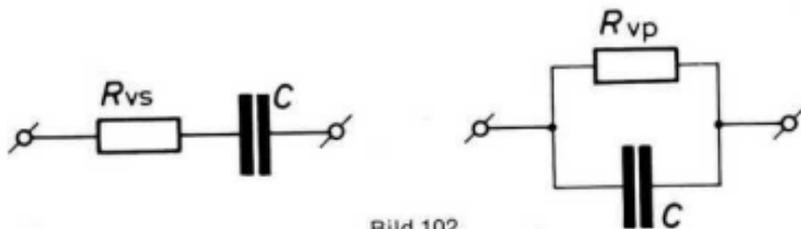


Bild 102

luste und hängt vom verwendeten Dielektrikum ab. Die Kondensatorverluste spielen primär in Wechselstromkreisen eine Rolle. Wir werden in einem späteren Abschnitt erfahren, wie sich der Verlustfaktor eines Kondensators errechnen lässt. In Tabelle 13 sind die Verlustfaktoren einiger Materialien zusammengestellt.

Material	$\text{tg } \delta$	Messfrequenz
Papier	$5,0 \cdot 10^{-3}$	3 kHz
Kunststoffolie	$0,5 \cdot 10^{-3}$	100 kHz
Glimmer	$0,3 \cdot 10^{-3}$	1 MHz
Keramik	$0,4 \cdot 10^{-3}$	1 MHz

Tabelle 13

Der Temperaturkoeffizient (TK_c oder α_c)

Die Kapazität von Kondensatoren ist temperaturabhängig. Diese Temperaturabhängigkeit wird im Temperaturkoeffizienten ausgedrückt, dieser sagt aus, um wieviel sich die Kapazität eines Kondensators bei einer Temperaturänderung von einem Grad Celsius verändert. Die Kapazitätsänderung kann positiv oder negativ verlaufen, je nachdem, was für ein Material als Dielektrikum verwendet wird. In Tabelle 14 ist der Temperaturkoeffizient für einige gebräuchliche Materialien festgehalten.

Der Temperaturkoeffizient von Kondensatoren wirkt sich vor allem in Schaltungen störend aus, in welchen ein Kondensator eine frequenzbestimmende Funktion hat. Durch geeignete Kombination von Kondensatoren mit negativem

Material	$\alpha_c = \frac{\Delta C}{C} / \Delta t \text{ um } 1^\circ \text{C}$	Temperaturkoeffizient α_c
Calit	+120	+160 · 10 ⁻⁶
Glimmer	+60	+100 · 10 ⁻⁶
Tempa S	+30	+50 · 10 ⁻⁶
Tempa N	-20	-40 · 10 ⁻⁶
Condensa N	-340	-380 · 10 ⁻⁶
Condensa C	-700	-740 · 10 ⁻⁶

Tabelle 14

und positivem Temperaturkoeffizienten lassen sich Kapazitäten zusammensetzen, die eine temperaturunabhängige Kapazität aufweisen.

Die Betriebsspannung

Die *Betriebsspannung* eines Kondensators entspricht demjenigen Spannungswert, der bei normalem Betrieb am Kondensator auftreten darf. *Betriebsspannungen sind in der Regel Gleichspannungswerte*. Es ist deshalb zu beachten, dass in Wechselstromkreisen die Betriebsspannung des Kondensators so hoch gewählt wird, dass der Spitzenwert der angelegten Wechselspannung die Betriebsspannung nicht überschreitet. Wird auch die Betriebswechselspannung angegeben, so ist sie als Effektivwert bei sinusförmiger Spannung zu verstehen.

Oft sind auf den Kondensatoren auch noch die Werte der *Prüfspannung* aufgedruckt. Bei der Prüfspannung handelt es sich um Gleichspannung oder Wechselspannung. Wird zur Prüfung Wechselspannung verwendet, so wird der Effektivwert angegeben.

Die Eigeninduktivität

Die *Eigeninduktivität* wird hervorgerufen durch die Induktivität der Zuleitungsdrähte und der Elektroden. Unter Induktivität versteht man die elektrischen Eigenschaften von Spulen. Jeder Kondensator hat in geringem Ausmass auch noch Spuleneigenschaften. Bei Wickelkondensatoren wirkt der Wickel als Spule, sofern nicht an jeder Stirnseite ein Belag herausgezogen und mit den Zuführungsdrähten zu einem Block verlötet ist. Es entsteht so ein Kondensator nach dem Prinzip des Tauchtrimmers (sogenannte induktionsarme Wickelkondensatoren). Damit wird dieser Anteil an Eigeninduktivität so gering, dass er erst im Ultrakurzwellenbereich eine wesentliche Rolle spielt.

h. Das Arbeitsverhalten von Kondensatoren

Der Kondensator im Gleichstromkreis

Das Gleichstromverhalten des Kondensators soll an Hand eines Versuches studiert werden. Wir bauen uns eine Schaltung gemäss Bild 103 auf.

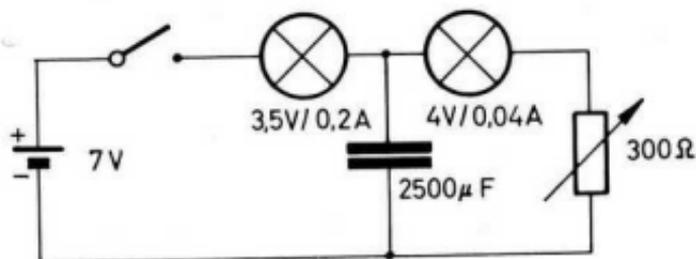


Bild 103

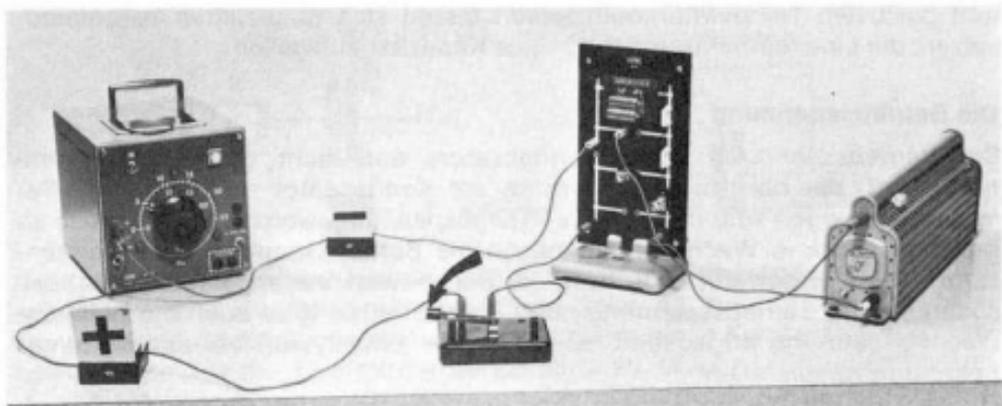


Bild 104

Bild 104 zeigt den Versuchsaufbau.

Der Kondensator wird über das Lämpchen 3,5V/0,2A aufgeladen. Der Ladestrom wird durch dieses Lämpchen angezeigt. Das Kontrollämpchen 4V/0,04A zeigt die Spannung am Kondensator an. Der Schiebewiderstand wird so eingestellt, dass dieses Kontrollämpchen bei voller Spannung normal aufleuchtet. Zur Spannungsanzeige wurde eine Lampe verwendet, die einen fünfmal kleineren Strom benötigt als die Lampe zur Anzeige des Ladestromes. Mit dieser Massnahme wird verhindert, dass der Strom durch das schwächere Lämpchen in der Ladestromlampe angezeigt wird.

Wird der Hebelschalter umgelegt, so zeigt das 3,5V/0,2A Lämpchen sofort einen Strom an, während das zweite Lämpchen merklich später aufleuchtet.

Das Experiment zeigt, dass beim Schliessen des Ladestromkreises sofort ein Ladestrom fliesst. Dieser Ladestrom erreicht im Einschaltmoment seinen Maximalwert und sinkt nachher auf Null ab. Die Spannung am Kondensator steigt in der gleichen Zeitspanne vom Nullwert zum Maximalwert an.

Ein Modell aus der Mechanik hilft uns den elektrischen Vorgang zu veranschaulichen. Wir stellen uns eine kleine, leere Gasflasche vor. Um diese kleine Gasflasche zu füllen, stehe uns ein Kompressor mit konstantem Druck zur Verfügung. Die kleine Gasflasche entspricht unserem Kondensator, der Kompressor stellt die Spannungsquelle dar.

Schliessen wir nun die leere Gasflasche an den Kompressor an, so fliesst im ersten Moment ein sehr grosser Gasstrom, dieser nimmt mit der Zeit ab, bis in der Gasflasche der gleiche Druck herrscht wie am Kompressor. Der Druck in der Gasflasche war im Anschaltmoment Null, er stieg so lange an, bis der

Druckausgleich hergestellt war. Wir erkennen im Gasdruck die Spannung am Kondensator und im Gasstrom den elektrischen Strom.

Wir fassen das Versuchsergebnis zusammen:

Beim Anlegen einer Gleichspannung an einen Kondensator sinkt der Ladestrom von einem Maximalwert auf Null ab, die Spannung am Kondensator steigt in dieser Zeit von Null auf ihren Maximalwert.

Der Ladestrom eilt der Spannung am Kondensator voraus.

Die Parallelschaltung von Kondensatoren

Der nächste Versuch zeigt uns das Verhalten von Kondensatoren bei Parallelschaltung. Bild 105 zeigt den Versuchsaufbau.

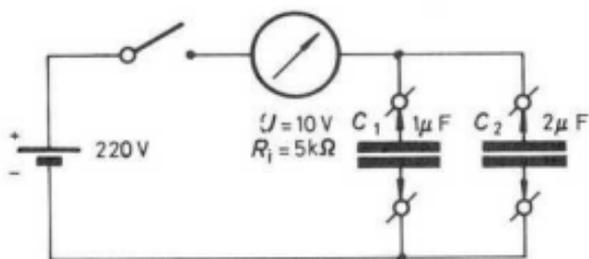


Bild 105

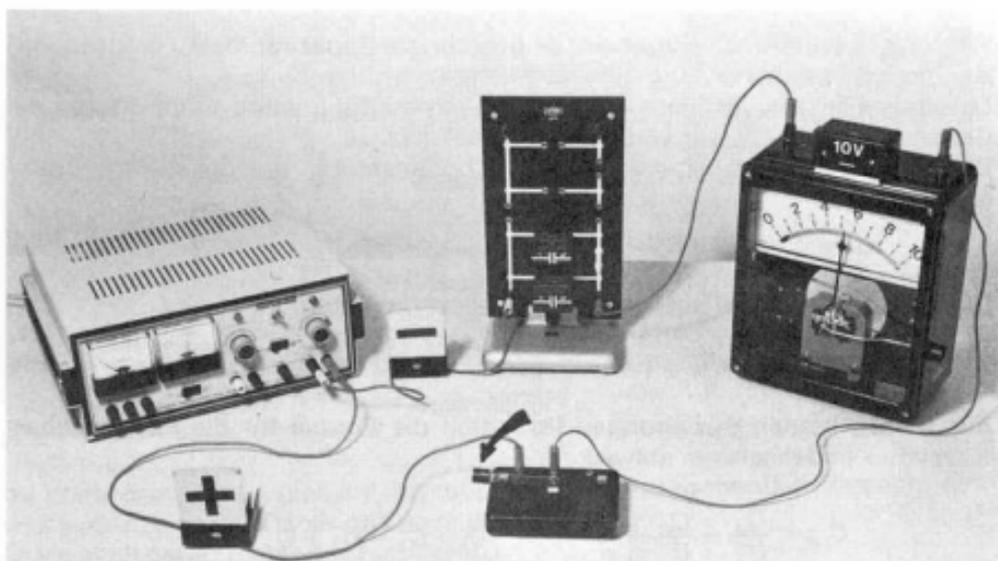


Bild 106

In Bild 106 erkennen wir die Versuchsanordnung.

Die Kondensatoren C_1 und C_2 können wahlweise einzeln oder parallelgeschaltet über das Voltmeter aufgeladen werden. Das Voltmeter hat einen Innenwiderstand von 5 k Ω . Der Innenwiderstand dient der Strombegrenzung, da der Ladestrom im Einschaltmoment lediglich durch den Innenwiderstand der Spannungsquelle limitiert würde. Der Ausschlag des Voltmeters ist demzufolge ein Hinweis für die Dauer des Stromflusses.

Der Versuch liefert folgende Messresultate:

Die Aufladung des Kondensators C_1 1 μ F ergibt einen bestimmten Ausschlag.

Die Aufladung des Kondensators C_2 2 μ F ergibt einen grösseren Ausschlag.

Die Aufladung der parallelgeschalteten Kondensatoren C_1 und C_2 ergibt den grössten Ausschlag.

Vor jeder Messung wurden die Kondensatoren entladen.

Die Messresultate bilden die Grundlage für die folgenden Überlegungen:

Der Ausschlag ist ein Mass für die Kapazität des Kondensators, da die Quellenspannung für alle Versuche dieselbe bleibt. Die Formel für die Beziehung zwischen Ladung, Spannung und Kapazität lautet:

$$Q = C \cdot U \text{ umgestellt nach } C \text{ ergibt } C = \frac{Q}{U},$$

an Stelle von Q tritt der Ausdruck $I \cdot t$. Das ergibt für C :

$$C = \frac{I \cdot t}{U}$$

Wir folgern aus diesem Ergebnis: Je grösser die Kapazität, desto grösser wird der Instrumentenausschlag bei gleichbleibender Spannung.

Daraus schliessen wir, dass bei der Parallelschaltung von Kondensatoren die Gesamtkapazität grösser wird als jede Teilkapazität.

Da sich bei der Parallelschaltung alle Kondensatoren auf die gleiche Spannung aufladen, dürfen wir schreiben:

$$U_1 = U_2 = U_3 = \dots U_n = U$$

Die Ladungen parallel geschalteter Kondensatoren addieren sich.

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots Q_n = Q_{\text{tot}}$$

Aus diesen beiden Beziehungen lässt sich die Formel für die Parallelschaltung von Kondensatoren entwickeln:

$$C_{\text{tot}} = \frac{Q_1}{U} + \frac{Q_2}{U} + \frac{Q_3}{U} + \dots \frac{Q_n}{U} = C_1 + C_2 + C_3 + C_n$$

$$C_{\text{tot}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots C_n$$

Wir fassen das Versuchsergebnis zusammen:

Die Gesamtkapazität parallel geschalteter Kondensatoren ist gleich der Summe der Einzelkapazitäten.

Serieschaltung von Kondensatoren

Der folgende Versuch zeigt das Verhalten von Kondensatoren in der Serieschaltung. In Bild 107 sehen wir die Schaltung des Versuchsaufbaues.

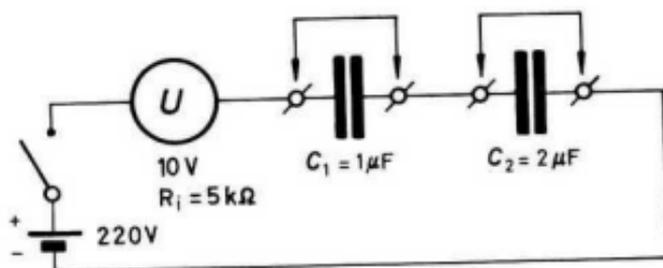


Bild 107

Bild 108 zeigt die Versuchsanordnung.

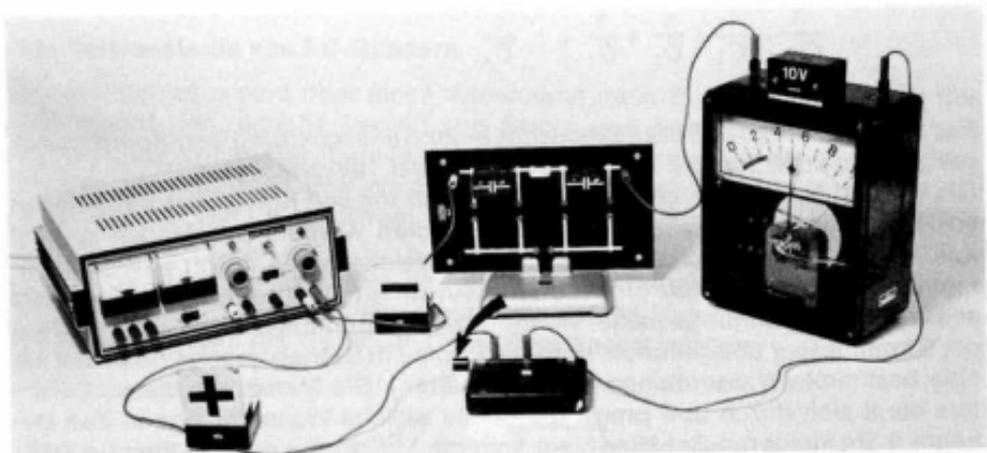


Bild 108

Das Voltmeter hat die gleiche Funktion wie im vorhergehenden Versuch, es dient zur Anzeige der Dauer des Stromflusses.

Der Versuch liefert folgende Messwerte:

Der Kondensator C₁ (1 μF) verursacht bei seiner Ladung einen bestimmten Instrumentenausschlag.

Der Kondensator C_2 ($2\mu\text{F}$) weist einen stärkeren Ausschlag auf. Die Kondensatoren werden in Serie geschaltet und erneut geladen, der gemessene Ausschlag ist nun am kleinsten.

Vor jeder Messung wurden die Kondensatoren entladen.

Die Messwerte und einige Überlegungen führen zur Entwicklung der Kapazitätsformel für die Serieschaltung von Kondensatoren. Wir gehen dabei von der Tatsache aus, dass bei in Serie geschalteten Kondensatoren jeder Kondensator die gleiche Ladung erhält, da ja jeder Kondensator während der gleichen Zeit mit dem gleichen Strom aufgeladen wurde. Die Summe der Kondensatorspannungen ergibt die Gesamtspannung. Diese beiden Erkenntnisse können mit Hilfe der Algebra klar formuliert werden:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots Q_n \text{ und } U_1 + U_2 + U_3 + \dots U_n = U_{\text{tot}}$$

Die beiden Beziehungen lassen sich umformen:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}, U_2 = \frac{Q}{C_2}, U_3 = \frac{Q}{C_3}, U_n = \frac{Q}{C_n}, U_{\text{tot}} = \frac{Q}{C_{\text{tot}}}$$

Durch Umstellen erhalten wir:

$$\frac{Q}{C_{\text{tot}}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} + \dots \frac{Q}{C_n}$$

Dividieren wir diese Gleichung durch Q , so erhalten wir:

$$\frac{1}{C_{\text{tot}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \frac{1}{C_n}$$

Wir fassen zusammen:

Der Reziprokwert der Gesamtkapazität einer Serieschaltung von Kondensatoren ist gleich der Summe der Reziprokwerte der Teilkapazitäten.

Die elektrischen Vorgänge in einer Serieschaltung von Kondensatoren können an Hand eines mechanischen Modelles studiert werden. Das Modell besteht aus zwei in Serie geschalteten Behältern, welche beide durch eine Gummimembrane in zwei gleich grosse Kammern unterteilt sind. Eine Pumpe steht an Stelle der Spannungsquelle, während zwei Durchflussmesser die Funktion der Strommesser übernehmen. Wird die Pumpe in Betrieb gesetzt, so presst sie eine bestimmte Wassermenge in den Behälter I. Die Membrane dieses Behälters biegt sich durch und presst die genau gleiche Wassermenge in den Behälter II. Im kleineren Behälter biegt sich die Membrane entsprechend stärker durch. Die herausgepresste Wassermenge fliesst über den Durchflussmesser I in die Pumpe zurück. Beide Durchflussmesser zeigen die gleiche Menge an. Übertragen auf die Schaltung mit Kondensatoren bedeutet dies, dass beide Kondensatoren unabhängig von ihrer Kapazität die gleiche Ladung aufgenommen haben. Die Membrane im kleineren Gefäss biegt sich stärker durch, sie ist kräftiger gespannt. Den gleichen Effekt stellen wir bei den Kondensatoren fest, wo der kleinere Kondensator immer die grössere Spannung aufweist als der grössere.

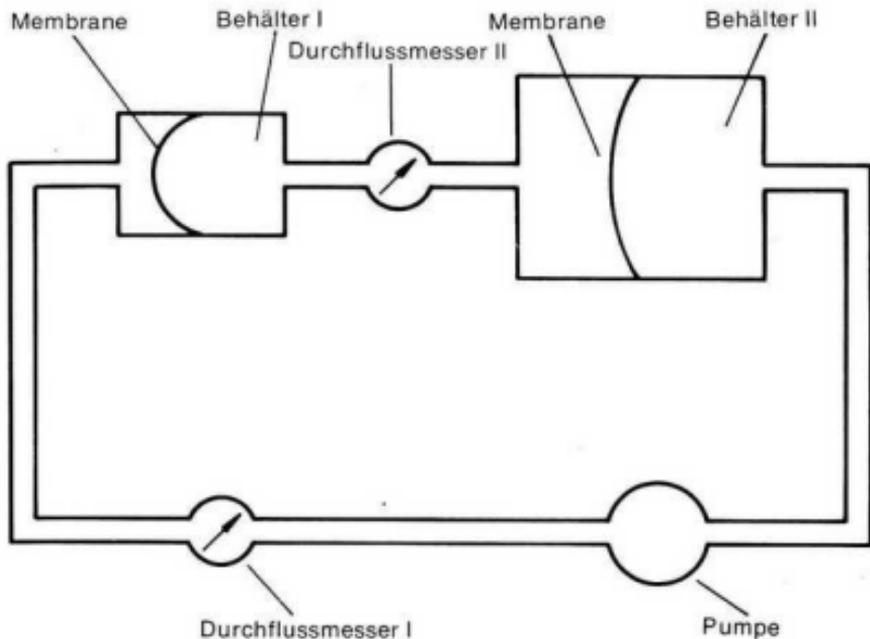


Bild 109

Die Zeitkonstante von RC-Gliedern

Ein Kondensator wird über einen Widerstand nach Bild 110 aufgeladen. Uns interessiert der zeitliche Verlauf von Strom und Spannung vom Einschaltmoment an. Wir wissen bereits, dass im Einschaltmoment der Strom seinen Maximalwert aufweist und die Spannung am Kondensator Null ist. Bild 111 zeigt uns den Verlauf von Strom und Spannung bei der Ladung eines Kondensators.

Die Kurvenform bleibt immer die gleiche, unabhängig von der Grösse des Widerstandes und des Kondensators, lediglich die Massstäbe auf den Achsen ändern sich, wenn die Werte von C und R verändert werden.

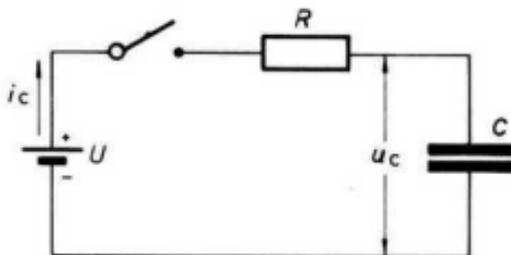


Bild 110

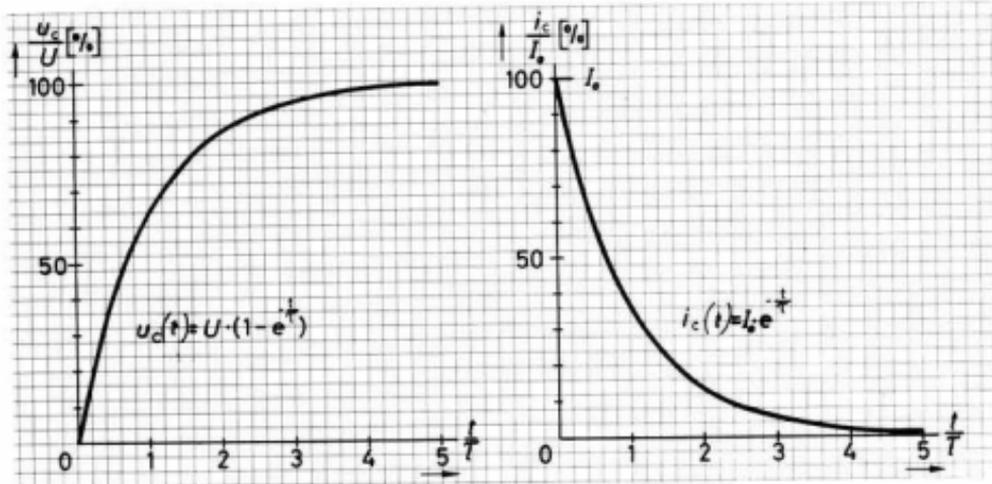


Bild 111

Die aufgezeichneten Kurven folgen einer Exponentialfunktion. Dieser Name stammt aus der Mathematik und bedeutet, dass die abgebildete Kurve zu einer Exponentialgleichung gehört. Von den recht komplizierten Berechnungen, die an einer solchen Kurve vorgenommen werden, interessieren uns nur wenige einfache Tatsachen:

Würde der Ladestrom seine ursprüngliche Stärke beibehalten, dann wäre der Kondensator voll aufgeladen, sobald die Tangente in Bild 112 den 100%-Wert erreicht hat. Der Ladestrom ist proportional der Spannungsdifferenz zwischen der Batteriespannung und der Spannung am Kondensator und wird durch den Widerstand R begrenzt. Mit zunehmender Ladung nimmt der Unterschied zwischen Batteriespannung und Kondensatorspannung ab, was zur Folge hat, dass der Ladestrom ebenfalls abnimmt. Dies sind die Gründe, weshalb Strom und Spannung nicht linear verlaufen.

Ein wichtiger Begriff in Schaltungen mit Kondensatoren ist die Zeitkonstante. Darunter ist jene Zeit zu verstehen, in welcher der Kondensator voll aufgeladen wäre, wenn der Anfangswert des Ladestroms konstant beibehalten würde.

Aus Bild 112 geht hervor, dass der Kondensator nach Ablauf einer Zeitkonstante auf 63% der Batteriespannung aufgeladen ist. Theoretisch erreicht die Spannung am Kondensator nie den Wert der Batteriespannung, für die Praxis dürfen wir jedoch vereinfachen und sagen, dass der Kondensator nach 5 Zeitkonstanten aufgeladen sei.

Die Zeitkonstante entspricht dem Produkt aus Ladewiderstand und Kapazität.

$$\tau = C \cdot R; [\tau] = s = \frac{As \cdot V}{V \cdot A}$$

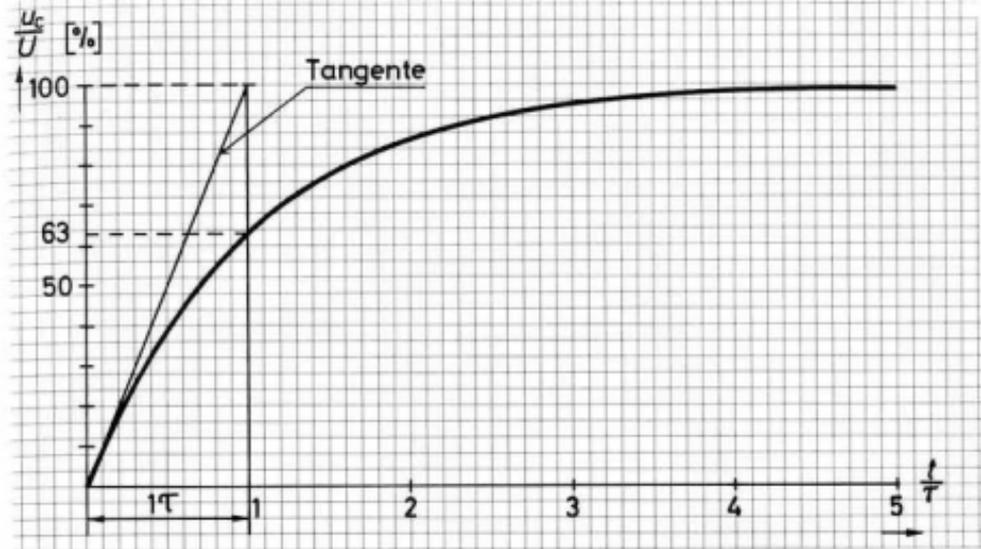


Bild 112

Der Kondensator im Wechselstromkreis

Der folgende Versuch zeigt uns das Verhalten des Kondensators im Wechselstromkreis. Bild 113 zeigt die Schaltung und Bild 114 die Versuchsanordnung.

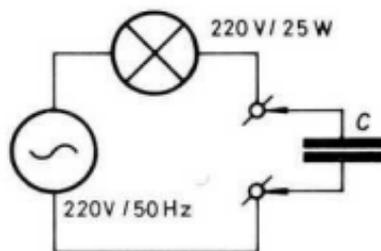


Bild 113

In den Wechselstromkreis werden nacheinander Kapazitäten von $2 \mu\text{F}$, $4 \mu\text{F}$, $6 \mu\text{F}$, $8 \mu\text{F}$ und $10 \mu\text{F}$ geschaltet. Mit zunehmender Kapazität leuchtet die Lampe immer heller auf.

Aus den gemachten Beobachtungen schliessen wir, dass der Kondensator für Wechselstrom einen Widerstand darstellt, und dass dieser Widerstand mit zunehmender Kapazität immer kleiner wird.

Wiederum dient uns ein mechanisches Modell zur Veranschaulichung der elektrischen Vorgänge. In Bild 115 sehen wir einen geschlossenen Wasserkreis. Wir erkennen in der Pumpe unsere Spannungsquelle, der Strom wird mit dem Durchflussmesser gemessen und der Kondensator wird wieder durch ein Gefäss dargestellt, das in der Mitte mit einer Gummimembrane unterteilt ist.

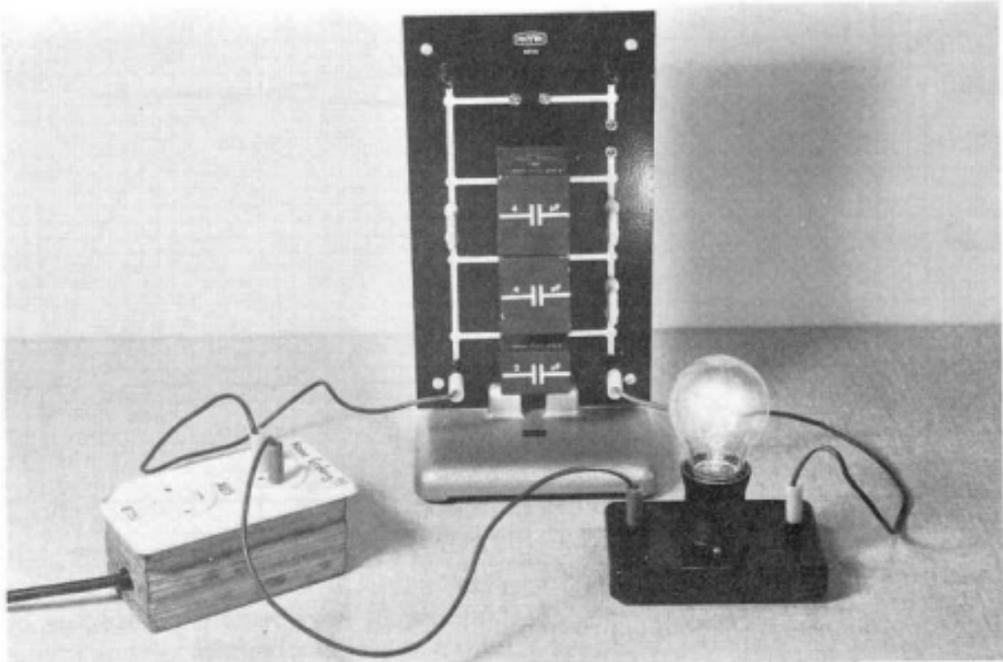


Bild 114

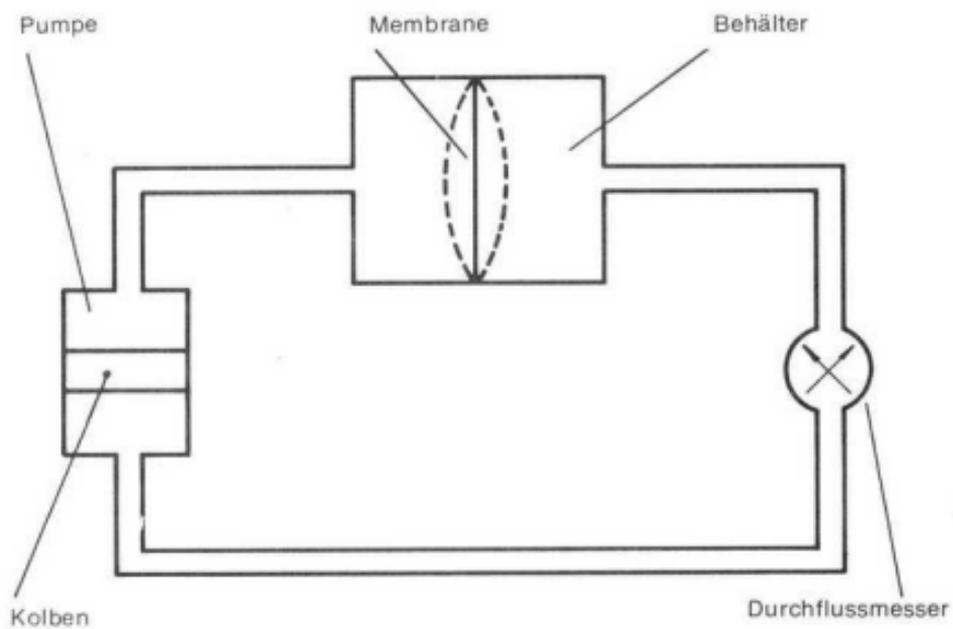


Bild 115

Da die Pumpe in diesem Fall eine Wechselspannungsquelle darstellen soll, drückt sie das Wasser nicht in einer Richtung, sie pumpt das Wasser einmal nach rechts und dann wieder nach links. Stellen wir uns vor, der Kolben werde pro Sekunde 50 mal hin und her bewegt, so entspricht dies einer Frequenz von 50 Hertz. Der Durchflussmesser wird einen «Wechselstrom» anzeigen. In einem früheren Kapitel haben wir festgehalten, dass elektrischer Strom gleichbedeutend ist mit der Anzahl Ladungsträger, die pro Zeiteinheit durch einen Leiter fliesst. Die Wassermenge pro Zeiteinheit entspricht demzufolge der Stromstärke. Es ist nun einleuchtend, dass umso mehr Wasser hin und her fliesst, je grösser der Behälter mit der Membrane ist und je höher die Frequenz der Spannungsquelle gemacht wird. Auf den elektrischen Stromkreis übertragen bedeutet das, dass der Strom mit zunehmender Frequenz und grösser werdender Kapazität ansteigt.

Wir fassen zusammen:

Kondensatoren stellen für Wechselstrom einen Widerstand dar.

Je grösser die Kapazität und je höher die Frequenz, desto kleiner wird dieser Widerstand.

Der Wechselstromwiderstand des Kondensators wird *kapazitiver Blindwiderstand* genannt.

Als Formelzeichen für den kapazitiven Blindwiderstand verwendet man X_c .

Die Masseinheit für kapazitive Blindwiderstände ist das Ohm.

An Stelle des allgemeinen Ausdruckes «Blindwiderstand» wird in der Praxis oft die Bezeichnung «*Reaktanz*» verwendet, für kapazitive Reaktanz speziell der Begriff «*Kapazitätanz*».

Der Blindwiderstand eines Kondensators errechnet sich nach folgender Formel:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

Die Einheitenprobe ergibt die Richtigkeit der Formel, wenn man für Farad As/V und für Hertz 1/s setzt:

$$[X_c] = \frac{1}{\frac{1}{s} \cdot \frac{As}{V}} = \frac{V}{A} = \Omega$$

Die vektorielle Darstellung von Strom und Spannung am Kondensator

Wir haben gesehen, dass zuerst ein Ladestrom fließen muss, bevor am Kondensator eine Spannung auftreten kann. Im Moment des Spannungsmaximums an den Platten ist der Ladestrom gleich Null. Dadurch zeigt sich, dass *der Strom im Kondensator der Spannung um 90° vorausgeht*. Diese *Phasenverschiebung* zwischen Strom und Spannung lässt sich anschaulich in einem Vektordiagramm darstellen. Man verwendet für Strom und Spannung je einen

Zeiger und denkt sich diese Zeiger im *Gegenuhrzeigersinn* pro Periode einmal umlaufend. Da der Strom gegenüber der Spannung voreilend ist, steht der Stromzeiger in Bild 116 senkrecht und der nacheilende Spannungszeiger waagrecht. Für den Phasenverschiebungswinkel wird der griechische Buchstabe phi (φ) verwendet.

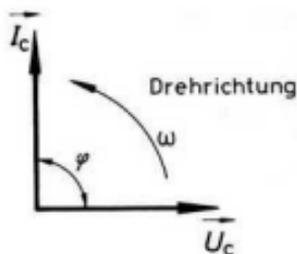


Bild 116

Die Darstellung von Strom und Spannung im Liniendiagramm

Bild 117 zeigt die Darstellung von Strom und Spannung im Liniendiagramm. Diese Kurvenzüge würden sichtbar, wenn man Strom und Spannung auf einem Katodenstrahloszilloskop betrachten würde. Diese Darstellungsart ist jedoch nicht sehr gebräuchlich, da die Vektordarstellung übersichtlicher ist. Mit Vektoren lässt sich einfacher rechnen, da die Gesetze der Trigonometrie dabei angewendet werden können, während sich die Kurvendarstellung für Berechnungen nur schlecht eignet.

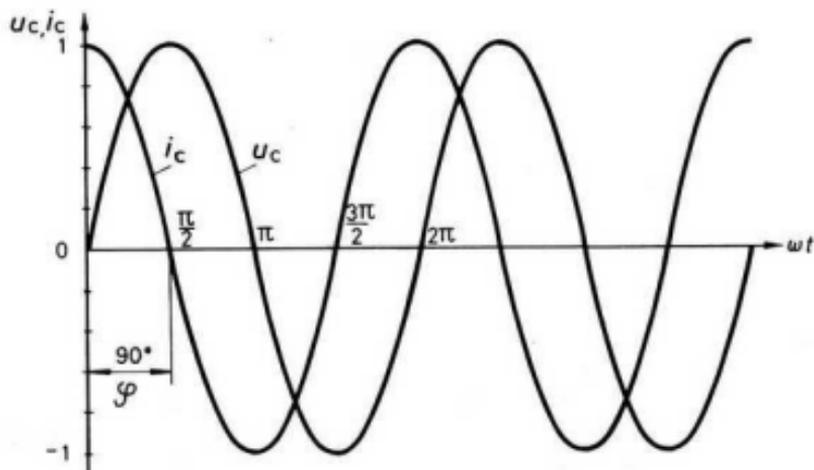


Bild 117

Blindwiderstand eines Kondensators in Abhängigkeit von der Frequenz

Der Blindwiderstand des Kondensators nimmt umgekehrt proportional mit der Frequenz ab. In Bild 118 ist der Verlauf des Blindwiderstandes in Abhängigkeit der Frequenz aufgezeichnet.

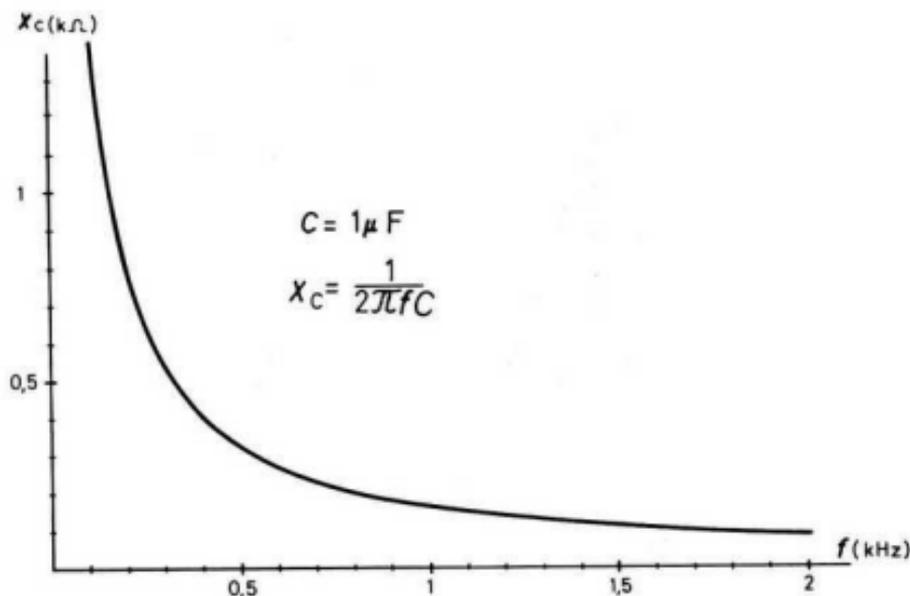


Bild 118

Die Blindleistung

Multipliziert man den Wechselstrom, der durch einen Kondensator fließt, mit der Spannung am Kondensator, so erhält man die *Blindleistung*. Der Name *Blindleistung* besagt, dass es sich hierbei nicht um eine wirkliche Leistung handeln kann. *Der Kondensator verbraucht* keine Leistung. Er speichert elektrische Energie und gibt diese wieder an das Netz ab. Dieser Vorgang spielt sich pro Periode des Wechselstromes zweimal ab. Bild 119 zeigt die Konstruktion der Blindleistungskurve. Strom und Spannung sind gegeneinander um 90° phasenverschoben. Durch Multiplikation der Momentanwerte von Strom und Spannung erhalten wir die Momentanwerte der Leistung. Die Leistungskurve weist die doppelte Frequenz der Strom- und Spannungskurve auf. Da diese zur Hälfte oberhalb und zur Hälfte unterhalb der Null-Linie verläuft, wird die aufgenommene Leistung über eine Periode Null.

Als Formelzeichen für die Blindleistung werden die Bezeichnungen Q und P_q verwendet. Um nicht die Blindleistung mit der elektrischen Ladung Q zu verwechseln, besitzen wir das Symbol P_q .

Die Einheit der Blindleistung ist das *Var* (Volt-Ampère reaktiv).

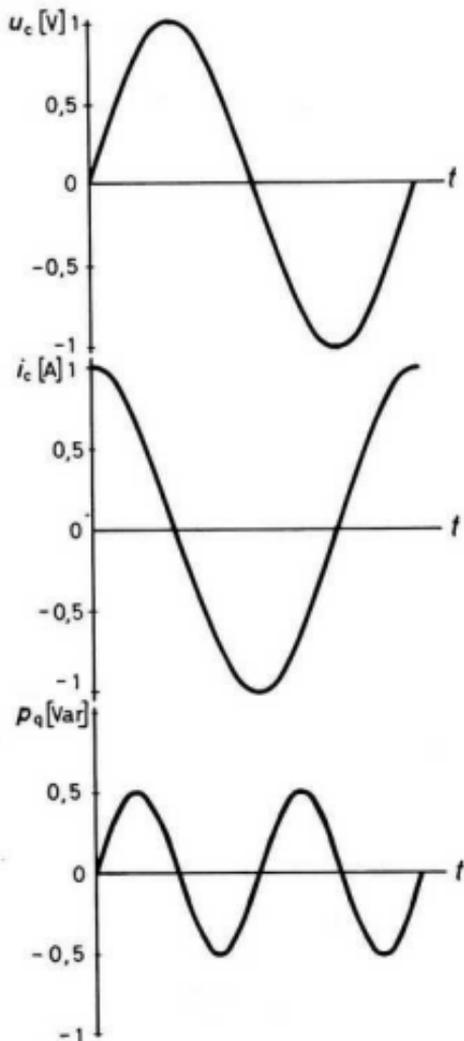


Bild 119

4. Beispiele

a. Berechnung der Kapazität eines einfachen Plattenkondensators

Ein einfacher Plattenkondensator mit Kreisplatten (Durchmesser 12 cm) und einem Plattenabstand von 3 mm mit Luft als Dielektrikum soll berechnet werden.

Vorgehen:

- Formel für C anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$$

$$C = \frac{0,8855 \cdot 1 \cdot 0,06^2 \cdot \pi}{0,003} \cdot 10^{-11}$$

$$[C] = \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \frac{\text{As}}{\text{V}} = \text{F}$$

$$C = 33,4 \text{ pF}$$

b. Berechnung der elektrischen Feldstärke

Der Kondensator nach Aufgabe a. hat eine Ladung von $3 \cdot 10^{-8} \text{ As}$ aufgenommen. Wie gross ist die elektrische Feldstärke?

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben
- Nach U umstellen
- U ausrechnen

- Formel für E anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = C \cdot U$$

$$U = \frac{Q}{C}$$

$$U = \frac{3 \cdot 10^{-8}}{33,4 \cdot 10^{-12}} \frac{\text{As} \cdot \text{V}}{\text{As}}$$

$$U = 900 \text{ V}$$

$$E = \frac{U}{d}$$

$$E = \frac{900}{3 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$E = 300\,000 \text{ V/m}$$

c. Berechnung der Ladung Q und der Kapazität C

In der Schaltung nach Bild 120 wird ein Kondensator mit einem konstanten Strom aufgeladen. Der veränderliche Widerstand R wird so geregelt, dass die Stromaufnahme konstant bleibt. Nach 5 s beträgt $U_c = 10 \text{ V}$.

Vorgehen:

- Bestimmungsgleichung für Q anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

- Bestimmungsgleichung für C anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = I \cdot t$$

$$Q = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \text{ A} \cdot \text{s}$$

$$Q = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ As}$$

$$C = \frac{Q}{U_c}$$

$$C = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{10}; [C] = \frac{\text{As}}{\text{V}} = \text{F}$$

$$C = 50 \mu\text{F}$$

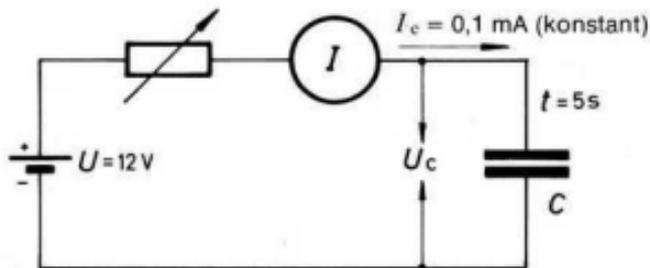


Bild 120

d. Berechnung einer gemischten Schaltung

Die Gesamtkapazität der Serie-Parallelschaltung nach Bild 121 ist bekannt. Der Wert des unbekanntenen Kondensators C_x ist zu bestimmen.

Vorgehen:

1. Schritt:

– Bestimmen des Wertes C_s der Serieschaltung von C_1 mit C_x

– Berechnungsformel aufstellen

$$C_s = C_{\text{tot}} - C_2$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C_s = 12 - 8 = 4 \mu\text{F}$$

2. Schritt:

– Bestimmungsgleichung für C_x aufstellen

$$C_s = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_x}} \quad \text{umstellen nach:}$$

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_x} \quad \text{umstellen nach:}$$

$$\frac{1}{C_x} = \frac{1}{C_s} - \frac{1}{C_1} \quad \text{umstellen nach:}$$

$$C_x = \frac{C_1 \cdot C_s}{C_1 - C_s}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C_x = \frac{5 \cdot 4}{5 - 4} \frac{\mu\text{F}^2}{\mu\text{F}}$$

$$C_x = 20 \mu\text{F}$$

Diese Aufgabe lässt sich in einem Schritt lösen. Versuchen Sie es!

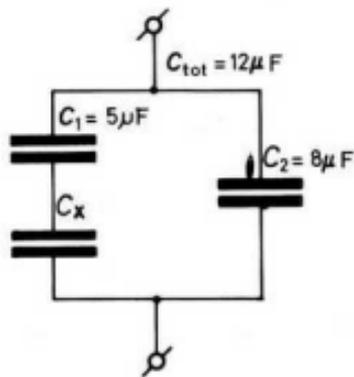


Bild 121

e. Berechnung einer Zeitkonstante

Die Zeitkonstante des RC -Gliedes nach Bild 122 ist zu berechnen.

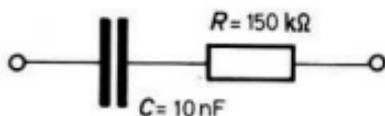


Bild 122

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\tau = C \cdot R$$

$$\tau = 10 \cdot 10^{-9} \cdot 0,15 \cdot 10^6$$

$$[\tau] = \frac{\text{As} \cdot \text{V}}{\text{V} \cdot \text{A}} = \text{s}$$

$$\tau = \mathbf{1,5 \text{ ms}}$$

f. Berechnung eines Kondensators im Wechselstromkreis

Die Kapazität des Kondensators in Bild 123 soll errechnet werden.

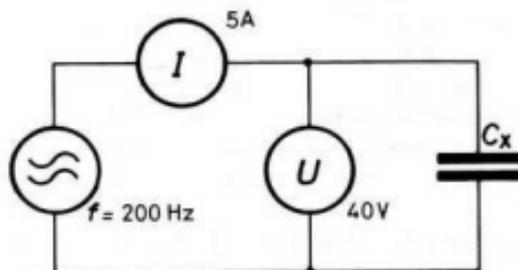


Bild 123

Vorgehen:

1. Schritt:

- Berechnung des Blindwiderstandes
- Bestimmungsgleichung anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_c = \frac{U}{I}$$

$$X_c = \frac{40 \text{ V}}{5 \text{ A}}$$

$$X_c = 8 \Omega$$

2. Schritt:

- Berechnung des Kapazitätswertes
- Grundformel anschreiben
- Umformen nach C
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_c = \frac{1}{\omega C}; [X_c] = \text{s} \cdot \frac{\text{V}}{\text{As}} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega X_c}; [C] = \frac{1}{\text{s}^{-1} \Omega} = \frac{\text{s A}}{\text{V}} = \text{F}$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 0,2 \cdot 10^3 \cdot 8}$$

$$C = 99,5 \mu\text{F}$$

5. Das Wesentliche

Der Kondensator besteht aus zwei Metallplatten, die sich isoliert gegenüberstehen. Das Isoliermaterial zwischen den Platten wird als Dielektrikum bezeichnet.

Der Kondensator kann elektrische Ladung speichern. Je grösser die Kapazität und die angelegte Spannung, desto grösser wird die gespeicherte Ladung. Als Masseinheit für die Ladung wird das Coulomb verwendet. Ein Coulomb entspricht einer Ampèresekunde. Ladung gleich Strom mal Zeit.

Die Kapazität eines Kondensators wird bestimmt durch die Plattenoberfläche, den Plattenabstand und das Dielektrikum. Je grösser die Plattenoberfläche gemacht wird und je kleiner man den Plattenabstand wählt, desto grösser wird die Kapazität. Der Kapazitätswert verhält sich proportional der Dielektrizitätskonstante. Die Kapazität wird in Farad gemessen. Ein Farad entspricht einer Ampèresekunde pro Volt.

Wir kennen Plattenkondensatoren für Hochfrequenzkreise, Drehkondensatoren für variable Hochfrequenzkreise, Trimmerkondensatoren für den Abgleich von Schaltungen, Wickelkondensatoren als Entkopplungskapazitäten und für die Verwendung in Niederfrequenzkreisen, Keramik-kondensatoren für Hochfrequenzkreise, selbstheilende Metallpapierkondensatoren in Niederfrequenz- und Siebkreisen und Elektrolytkondensatoren für Niederfrequenz-, Sieb- und Transistorkreise.

Die Verluste von Kondensatoren treten als ohmsche Serie- oder Parallelverlustwiderstände in Erscheinung, als Masseinheit für Kondensatorverluste kennen wir den Verlustfaktor Tangens δ ; dieser ist frequenzabhängig.

Werden Kondensatoren in frequenzbestimmenden Kreisen verwendet, so muss der Temperaturkoeffizient berücksichtigt werden. Durch geeignete Kombination von Kapazitäten mit positiven und negativen Temperaturkoeffizienten können Kapazitätswerte zusammengestellt werden, die praktisch keinen Temperaturgang mehr aufweisen.

Die Gesamtkapazität parallel geschalteter Kondensatoren ist gleich der Summe der Teilkapazitäten.

Der Reziprokwert der Gesamtkapazität einer Serieschaltung von Kondensatoren ist gleich der Summe der Reziprokwerte der Teilkapazitäten.

Wird ein Kondensator über einen Widerstand aufgeladen, so bezeichnet man die Zeit, die verstreicht, bis der Kondensator 63% seiner Ladespannung erreicht hat, als Zeitkonstante. Die Zeitkonstante entspricht dem Produkt aus Ladewiderstand und Kapazität.

Ein Kondensator trennt Gleichströme ab, im Wechselstromkreis dagegen verhält er sich wie ein Widerstand. Der Wert dieses Wechselstromwiderstandes ist der Frequenz und der Kapazität umgekehrt proportional. Im Kondensator eilt der Strom der Spannung um 90° vor.

Das Produkt aus Kondensatorspannung und Kondensatorstrom bezeichnet man als Blindleistung. Die Masseinheit dafür ist das Var.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 448)

- Definieren Sie die elektrische Ladung Q
- Welches sind die kapazitätsbestimmenden Faktoren eines Kondensators?
- Ein Kondensator von 75 pF mit Luft als Dielektrikum besteht aus zwei Platten mit einem Abstand von 0,1 mm. Wie gross ist die Plattenoberfläche?
- Was versteht man unter dem Begriff «Dielektrizitätskonstante des leeren Raumes»?
- An einem geladenen Kondensator herrscht eine Spannung von 120 V. Wie gross ist dessen Kapazität, wenn die gespeicherte Ladung $0,24 \cdot 10^{-3}$ As beträgt?
- Ein Plattenkondensator von 100 pF mit einer Plattenoberfläche von 100 cm² und Luft als Dielektrikum hat eine Ladung von $4 \cdot 10^{-9}$ As aufgenommen. Wie gross ist die Feldstärke zwischen den Platten?
- Definieren Sie den Begriff «Zeitkonstante» für ein RC-Glied.
- Die Zeitkonstante eines RC-Gliedes beträgt 50 ms, der Ladewiderstand misst 330 k Ω . Wie gross ist die Kapazität des Kondensators?
- Ein Kondensator von 5 μ F ist mit einem unbekanntem Kondensator in Serie geschaltet. Parallel zu dieser Serieschaltung liegen 10 μ F. Die Gesamtkapazität der Schaltung beträgt 12 μ F. Bestimmen Sie den Wert der unbekanntenen Kapazität.
- Ein Drehkondensator wurde auf 100 V aufgeladen. Nun wird der Rotor herausgedreht, bis der Kondensator noch die halbe Kapazität aufweist. Welche Spannung herrscht nun am Drehkondensator?
- Sie wollen die Kapazität eines unbekanntem Kondensators ermitteln. Zu diesem Zweck schalten Sie diesen über ein Wechselstrommilliampèremeter an eine Netzspannung von 220 V und 50 Hz an. Sie messen einen Strom von 0,207 A. Welchen Wert hat der Kondensator?
- Welchen Vorteil hat der Metallpapierkondensator gegenüber den gewöhnlichen Wickelkondensatoren?
- Auf was ist beim Betrieb eines Elektrolytkondensators zu achten?

III. Spulen

1. Einführung

Wir haben den Kondensator als wesentlichen Baustein der Elektronik kennengelernt. Die Spule steht dem Kondensator an Wichtigkeit nicht nach. Beide Bauteile ergänzen sich in vielen Schaltungen der Nachrichtentechnik. Die Spule ist das Gegenstück zum Kondensator, ihr Verhalten im Gleichstrom- und Wechselstromkreis ist dem Arbeitsverhalten des Kondensators reziprok. In den Geräten sind Spulen von verschiedener Bauart und von verschiedener Grösse anzutreffen.

In Gleichstromkreisen werden Spulen als Bestandteile von Siebgliedern verwendet. In Hochfrequenzkreisen trifft man sie oft als Bestandteil von Schwingkreisen und Bandfiltern an. In Transformatoren werden Spulen zur Transformation von Wechselspannungen herangezogen.

2. Was wissen Sie schon über Spulen?

(Lösung Seite 451)

- Aus was besteht eine Spule?
- Welche Masseinheit wird für die Induktivität verwendet?
- Wie wirkt die Spule im Gleichstromkreis?
- Wie verhält sich die Spule im Wechselstromkreis?
- Welche Arten von Spulen sind Ihnen bekannt?
- Welche Wirkung hat der Eisenkern in der Spule?
- Was ist ein magnetisches Feld?

3. Spulen

a. Definition

Die Spule besitzt die Eigenschaft, elektrische Energie in Form eines magnetischen Feldes zu speichern. In Gleichstromkreisen wirkt die Spule, abgesehen vom Moment des Ein- und Ausschaltens, nur als ohmscher Widerstand. Dieser ohmsche Widerstand entspricht dem Widerstand der Wicklung. Im Wechselstromkreis wirkt sie als Reaktanz, deren Wert von der Grösse der Induktivität und von der Frequenz abhängt.

b. Prinzip

Die Spule besteht aus einer gewissen Anzahl Windungen, die freitragend oder auf einem Spulenkörper angebracht sind. Wir unterscheiden zwischen Spulen mit Eisenkern und Spulen ohne Kern. Grösse, Windungszahl, Art des Kernes und Bauform der Spulen hängen vom Verwendungszweck ab und bestimmen deren Eigenschaften.

c. Die Selbstinduktion

Wir wissen, dass in einem Leiter, der sich in einem Magnetfeld bewegt, eine Spannung induziert wird. An Stelle des Leiters kann auch das Magnetfeld bewegt werden, der Effekt ist derselbe. Der Versuch nach Bild 124 demonstriert den Effekt der Induktion.

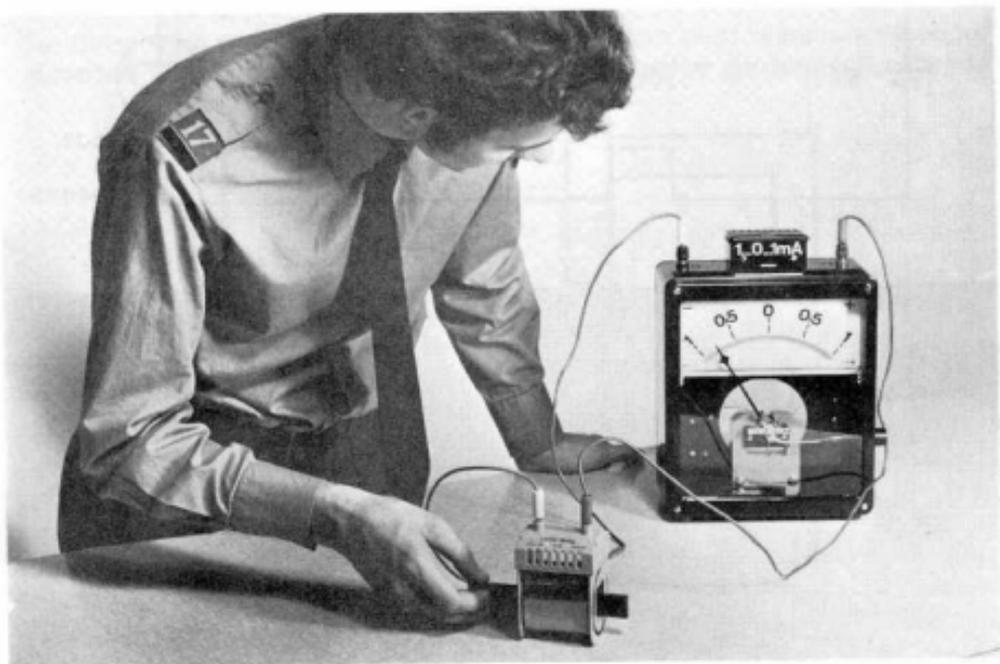


Bild 124

Eine Spule mit 1200 Windungen wird mit einem Milliampèremeter verbunden. Der Zeiger des Instrumentes hat seine Ruhelage in der Skalenmitte. Ein Stabmagnet wird langsam in die Spule geschoben und mit gleicher Geschwindigkeit wieder herausgezogen. Das Instrument schlägt während des Hineinschiebens nach einer Richtung aus, während es beim Herausziehen nach der anderen Seite ausschlägt.

Der Versuch wird wiederholt, die Bewegung mit dem Magneten jedoch rascher ausgeführt. Die Ausschläge am Instrument sind grösser geworden.

Die Spule wird gegen eine solche mit 600 Windungen ausgetauscht. Der Versuch wird mit beiden Geschwindigkeiten wiederholt. Die Ausschläge sind kleiner als mit der Spule zu 1200 Windungen.

Der Versuch hat uns bestätigt, was wir schon wissen. *Die induzierte Spannung wird um so grösser, je grösser die Geschwindigkeit der Änderung des Magnetfeldes ist. Die Spannung nimmt mit zunehmender Windungszahl zu.*

Es ist gleichgültig, ob die Magnetfeldänderung durch Bewegen eines Permanentmagneten oder mit Hilfe eines Elektromagneten erzeugt wird. Der Versuch nach Bild 125 und 126 zeigt die Erzeugung einer Selbstinduktionsspannung mit Hilfe eines Elektromagneten.

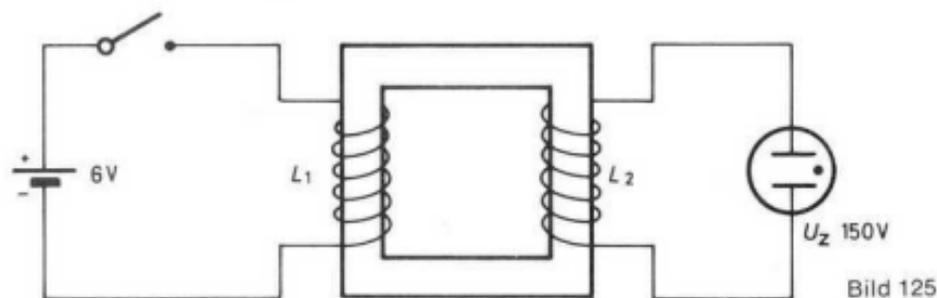


Bild 125

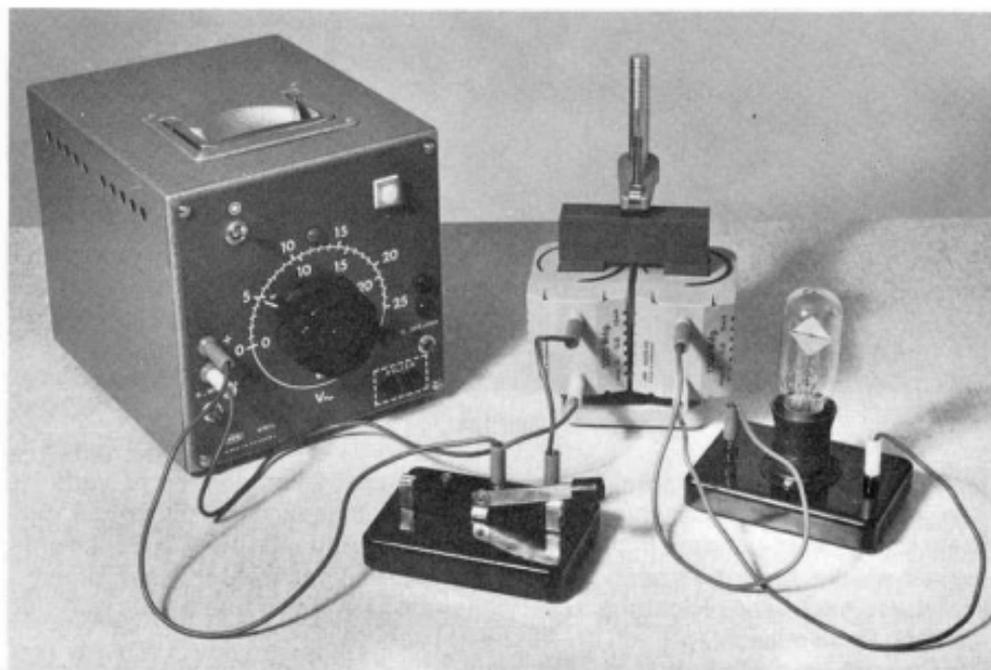


Bild 126

Auf einem Eisenkern sind zwei Spulen mit je 1200 Windungen angebracht. Die Spule L_1 wird über einen Schalter an eine Gleichspannungsquelle von einigen Volt gelegt. An die Spule L_2 ist eine Glühlampe mit einer Zündspannung von etwa 150 V angeschlossen. Im Eisenkern ist ein Magnetfeld wirksam. Ursache dieses Magnetfeldes ist der Spulenstrom durch L_1 . Der Schalter

wird geöffnet, die Glimmlampe zeigt durch kurzzeitiges Aufleuchten eine induzierte Spannung an. Die Erklärung dieses Effektes ist einfach. Wird der Stromkreis der Spule L_1 unterbrochen, so bricht das Magnetfeld plötzlich auf den Wert Null zusammen. Es findet eine rasche Feldänderung statt. Diese Feldänderung induziert in der Spule L_2 eine Spannung.

Im Versuch nach Bild 127 wird die Schaltung vereinfacht. Es wird nur eine Spule mit 1200 Windungen an die Gleichspannungsquelle angeschlossen. Die Glimmlampe liegt jetzt parallel zu dieser Spule.

Der Stromkreis wird unterbrochen, die Glimmlampe zeigt wiederum einen induzierten Spannungsschoss an. Das beim Ausschalten zusammenbrechende

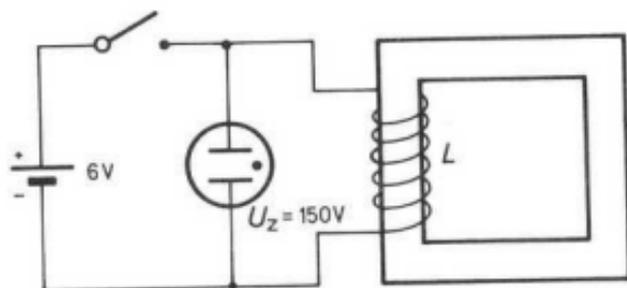


Bild 127

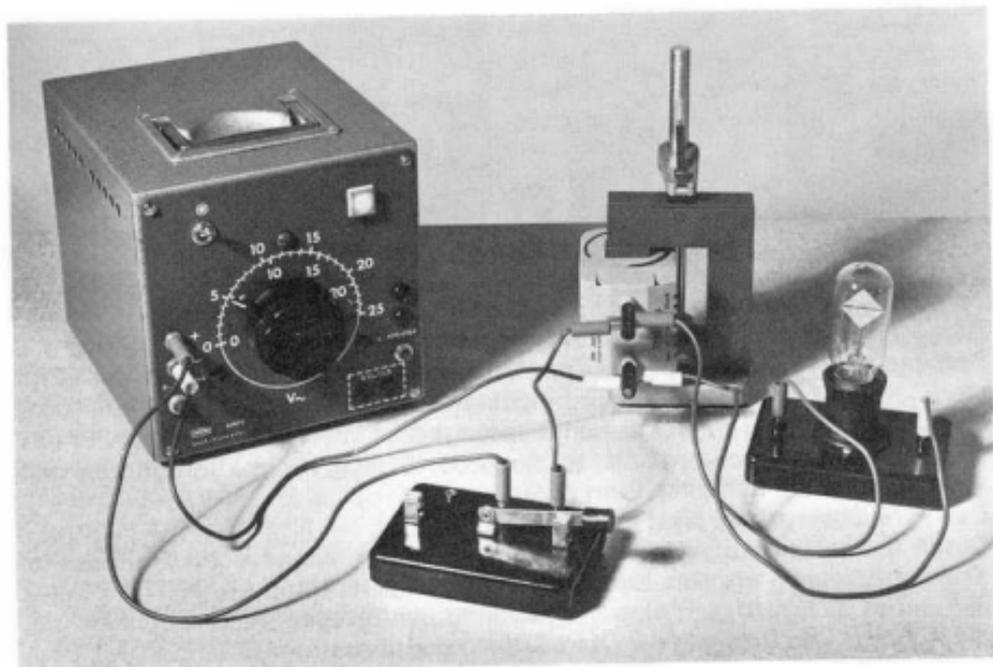


Bild 128

Magnetfeld induziert auch in der Erregerspule eine Spannung. Die Spannung heisst *Selbstinduktionsspannung*. Der gezeigte Vorgang wird *Selbstinduktion* genannt.

Die Richtung des Selbstinduktionsstromes, welcher dank der Selbstinduktionsspannung fliesst, ist für das Arbeitsverhalten von Spulen wichtig. In Bild 129 ist die Schaltung des Versuches nach Bild 130 aufgezeichnet. Dieser Versuch zeigt die Richtung des Selbstinduktionsstromes.

Bild 129

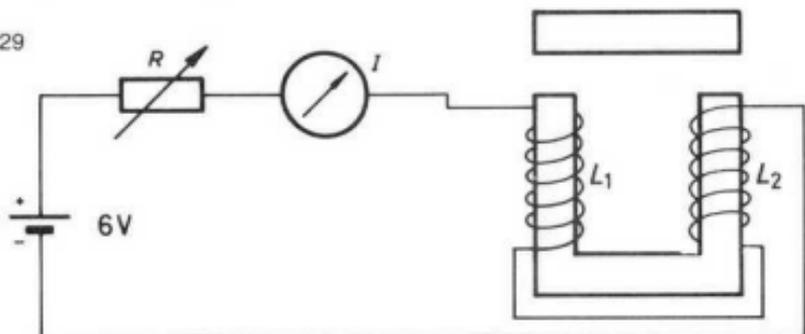
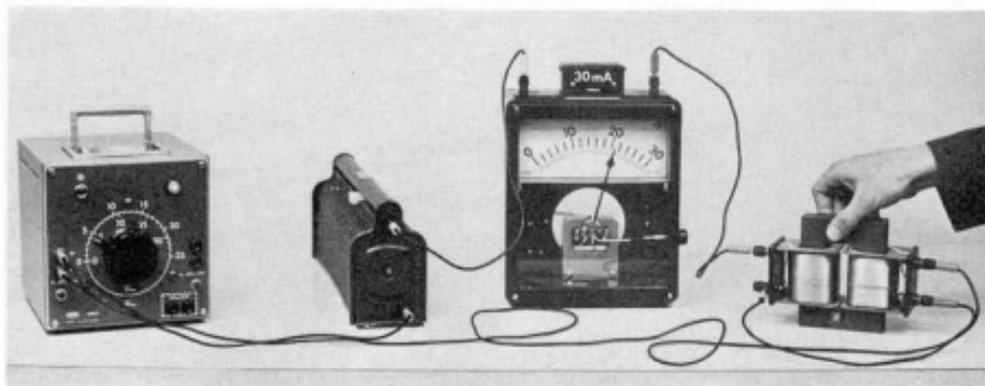


Bild 130



Das Joch über der Spule wird entfernt. Mit dem Schiebewiderstand wird der Spulenstrom so eingestellt, dass am Milliampèremeter der Zeiger in der Mitte steht. Jetzt wird das Joch rasch aufgesetzt. Der Erregerstrom geht ruckartig zurück, um nachher wieder seinen ursprünglichen Wert zu erreichen. Wird das Joch mit einem Ruck entfernt, so steigt der Erregerstrom kurzzeitig an und sinkt nachher auf den alten Wert zurück.

Das Versuchsergebnis lässt folgende Schlüsse zu:

Durch das rasche Aufsetzen des Joches steigt der magnetische Kraftfluss im Kreis sprungartig an. Der Erregerstrom sinkt gleichzeitig ab. In Wirklichkeit handelt es sich nicht um eine Schwächung des Erregerstromes, sondern um die Addition von Erregerstrom und Selbstinduktionsstrom. *Das bedeutet, dass der Selbstinduktionsstrom gegen den Erregerstrom fliesst, wenn der Magnetfluss vergrössert wird.*

Durch das plötzliche Wegnehmen des Joches wird der magnetische Fluss ebenso rasch abgeschwächt. Die Zunahme des Erregerstromes beweist, dass der Selbstinduktionsstrom bei Abschwächung des Magnetflusses in Richtung des Erregerstromes fliesst.

Das Verhalten des Selbstinduktionsstromes in einer Spule lässt sich an einem mechanischen Modell veranschaulichen. Auf einem horizontalen, schnurgeraden Eisenbahngleise rollt ein Güterwagen mit konstanter Geschwindigkeit. Wenn wir die Reibung der Räder und den Luftwiderstand vernachlässigen, rollt der Wagen in alle Ewigkeit mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Soll seine Geschwindigkeit erhöht werden, muss er durch eine äussere Kraft in Fahrtrichtung beschleunigt werden. Er setzt dieser Kraft einen kräftigen Widerstand, die Trägheit des Wagens, entgegen. Soll der rollende Wagen abgebremst werden, muss auf ihn eine bremsende Kraft entgegen der Fahrtrichtung einwirken, welche wieder die Trägheit des Wagens überwinden muss. Die Trägheit des Güterwagens lässt sich mit dem Verhalten der Spule vergleichen. Wird der magnetische Kraftfluss vergrössert, dies entspricht der Beschleunigung des Wagens, so muss eine zusätzliche Kraft aufgewendet werden. Der Selbstinduktionsstrom widersetzt sich einer Feldvergrösserung, er muss zuerst überwunden werden. Dieser Effekt entspricht der Trägheit des Wagens, die ebenfalls überwunden werden muss, bis er mit einer grösseren Geschwindigkeit rollt. Wird der Feldfluss verkleinert, so hat der Selbstinduktionsstrom das Bestreben den Fluss aufrechtzuerhalten, genau so möchte die Trägheit des Wagens die Bewegung beibehalten.

Das Versuchsergebnis lässt sich zusammenfassen:

Der Selbstinduktionsstrom wirkt seiner Entstehungsursache entgegen, er ist bestrebt, den bestehenden Zustand beizubehalten.

d. Der Selbstinduktionskoeffizient

Die in einer Spule induzierte Spannung hängt von drei Faktoren ab. Es sind dies die Grösse der Stromänderung, die Geschwindigkeit, mit welcher diese Stromänderung erfolgt und der Selbstinduktionskoeffizient der Spule. Dieser Selbstinduktionskoeffizient, oft auch Induktivität genannt, ist mit der Kapazität des Kondensators vergleichbar. Die Induktivität einer Spule beschreibt deren elektrisches Verhalten. Der Zusammenhang zwischen den drei Faktoren und der induzierten Spannung lässt sich in einer einfachen Gleichung darstellen.

$$-U_i = \frac{\Delta I}{\Delta t} \cdot L$$

U_i = induzierte Spannung. Das Vorzeichen zeigt an, dass die Spannung gegen die Erregerspannung gerichtet ist.

ΔI = Stromänderung

Δt = Zeitänderung

L = Induktivität der Spule

Die Gleichung sagt aus, dass die induzierte Spannung um so grösser wird, je grösser die Stromänderung ist, je kürzer die Zeit ist, in welcher diese Stromänderung erfolgt, und je grösser die Induktivität der Spule gemacht wird. Aus nachstehender Gleichung ist die Masseinheit für die Induktivität im Giorgi-System gegeben.

$$-U_i = \frac{\Delta I}{\Delta t} L \quad [U_i] = V = \frac{A}{s} \cdot \frac{Vs}{A}$$

Anstelle von $\frac{Vs}{A}$ wird im Giorgi-System das Henry verwendet. 1 Henry = 1 Vs/A.

Eine Spule hat dann eine Induktivität von einem Henry oder einer Voltsekunde pro Ampère, wenn bei einer gleichmässigen Stromänderung um ein Ampère während einer Sekunde, eine Spannung von einem Volt induziert wird.

Diese Grösse ist in der Praxis durchaus üblich. Spulen in Siebketten und Niederfrequenzkreisen weisen oft Induktivitäten von mehreren Henry auf.

Folgende Untereinheiten sind gebräuchlich:

$$1 \text{ mH} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ H (Millihenry)}$$

$$1 \mu\text{H} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ H (Mikrohenry)}$$

Induktivitäten in der Grösse von Millihenry werden in der Hochfrequenztechnik oft als Drosselspulen oder als Schwingkreiselemente für tiefere Frequenzen verwendet. Spulen mit Induktivitäten in der Grössenordnung von Mikrohenry sind in der Hochfrequenztechnik als Schwingkreiselemente für höhere Frequenzen bis in den VHF-Bereich anzutreffen.

e. Die induktivitätsbestimmenden Faktoren

Die Induktivität einer Spule hängt von folgenden Faktoren ab:

- Windungszahl N
- Spulenlänge l (m)
- Wicklungsfläche A (m²)
- Art des Eisenkernes (relative Permeabilität μ_r)

Für lange einlagige Zylinderspulen gilt folgende Dimensionierungsformel:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot N^2}{l} \quad \frac{Vs}{A}$$

r = Spulenradius

$$\mu_0 = \text{Permeabilität des leeren Raumes} = \frac{4 \cdot \pi}{10 \cdot 10^6} \quad \frac{Vs}{A \cdot m}$$

Für kürzere Spulen sind Korrekturfaktoren zu berücksichtigen, Spulen mit Eisenkern werden nach folgender Formel dimensioniert:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot A}{l} \quad \frac{Vs}{A} \quad (l = \text{Eisenweglänge})$$

$$\text{Einheitenprobe: } [L] = \frac{Vs}{A \cdot m} \cdot \frac{m^2}{m} = \frac{Vs}{A}$$

f. Ausführungsformen

Zylinderspule

Die Zylinderspule kann freitragend, oder auf einen Spulenkörper gewickelt werden. Die in Bild 131 gezeigte Art von Zylinderspule wird oft als Schwingkreiselement in Senderleistungsstufen verwendet, auch in Senderantennenabstimmgeräten ist diese Bauart anzutreffen. Bild 132 zeigt die beiden gebräuchlichsten Schaltsymbole.

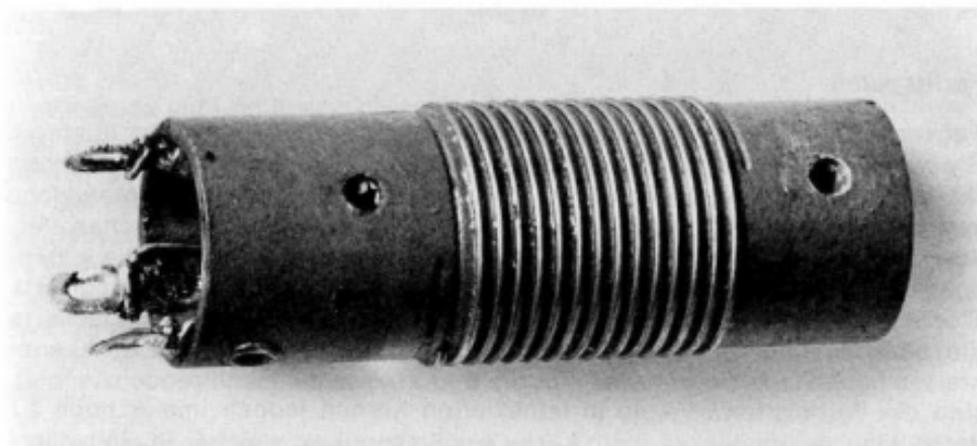


Bild 131

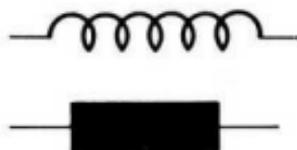
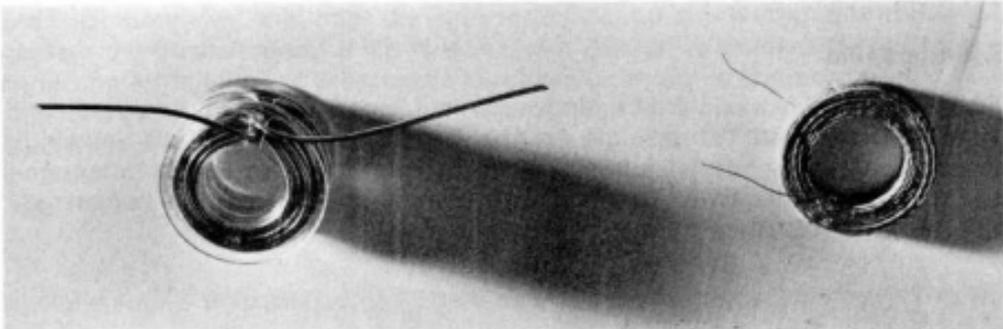


Bild 132

Luftspulen

Luftspulen sind Induktivitäten ohne Eisenkern. Die genannte Zylinderspule ist auch eine Luftspule. Luftspulen gibt es in verschiedenen Grössen und Ausführungen. Sie finden meistens in der Hochfrequenztechnik als Drosselspulen oder Schwingkreiselemente Verwendung. Bild 133 zeigt einige gebräuchliche Arten von Luftspulen.



mit Spulenkörper

freitragend

Bild 133

Ferritspulen

Ferrite sind Magnetwerkstoffe, deren elektrischer Widerstand sehr hoch ist. Sie weisen daher fast keine Wirbelströme auf. Wirbelströme sind Ströme, die in jedem Eisenkern entstehen, der sich in einer Spule befindet, welche von einem Wechselstrom durchflossen wird. Wirbelströme verursachen Verluste, da zu ihrer Erzeugung Energie aufgewendet werden muss. Die schädlichen Wirbelströme können herabgesetzt werden, indem man lamellierte Eisenkerne verwendet. Es sind dies Kerne, welche in viele unter sich isolierte Einzelbleche unterteilt sind. Die meisten Induktivitäten in Niederfrequenzkreisen haben lamellierte Kerne. Für die Bedürfnisse der Hochfrequenztechnik sind die Wirbelstromverluste in lamellierten Kernen jedoch immer noch zu gross. Man verwendete deshalb Kerne aus Eisenpulver, welches in ein Isoliermaterial eingebettet war. Diese Pulverkerne wurden von den Ferriten abgelöst. Dank der Permeabilität dieser Kerne steigt die Induktivität der Spule an. Das hat zur Folge, dass für eine bestimmte Induktivität weniger Windungen benötigt werden. Wir werden später sehen, dass der Wicklungswiderstand als Spulenverlust in Erscheinung tritt; je weniger Windungen eine Spule aufweist, desto geringer wird auch der Wicklungswiderstand.

Ferritspulen werden als Induktivitäten mit Stabkern oder als Spulen mit Topfkern u. s. w. hergestellt. Eine Ferritspule besteht aus einem Spulenkörper mit der Wicklung und einem in der Regel drehbaren Ferritstabkern. Der Kern weist

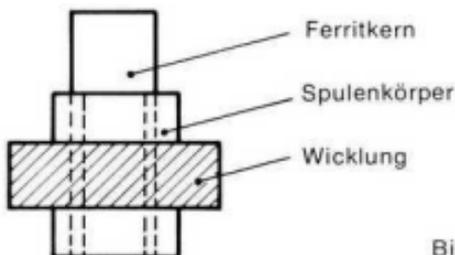
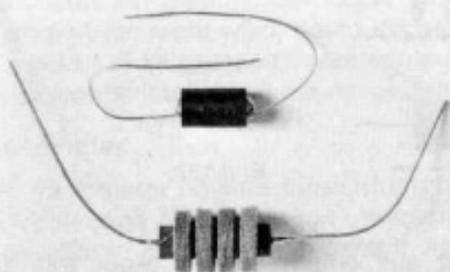


Bild 134



Induktivität fest

Induktivität variabel

Bild 135

ein Gewinde auf und lässt sich mehr oder weniger in die Spule hineinschrauben. Damit lässt sich die Induktivität der Spule in gewissen Grenzen verändern. Bild 134 und 135 zeigen das Prinzip und einige Ausführungsformen.

Bei der Ferritspule mit Topfkern umschliesst der Kern die Spule. Dank dem geschlossenen magnetischen Kreis ist die Wirkung des Kernes viel grösser als beim Stabkern. Topfkern mit verstellbarem Luftspalt lassen sich abgleichen, da man die Induktivität durch Verändern des Luftspaltes variieren kann. Bild 136 zeigt einige Topfkern, Bild 137 die dazugehörigen Symbole.

Ferritkerne werden für Niederfrequenz- und für Hochfrequenzschaltungen gebaut.

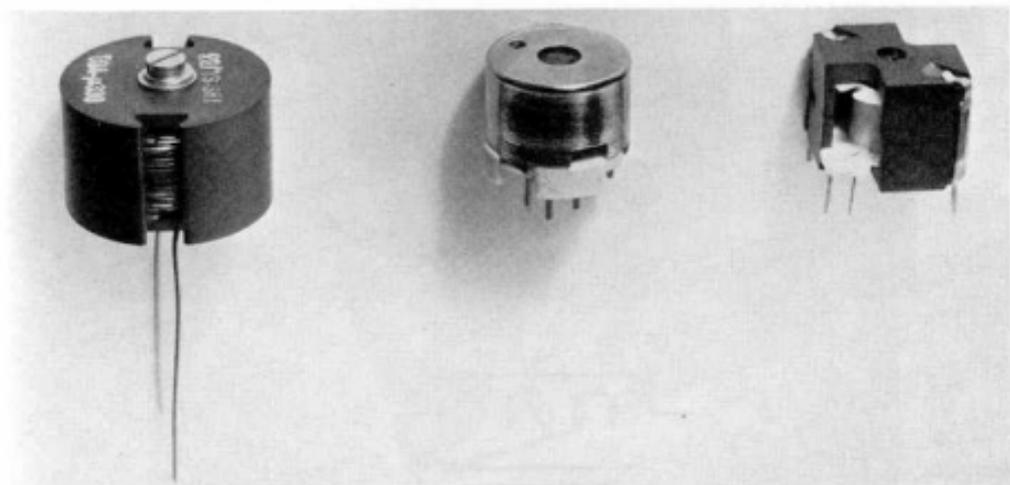


Bild 136

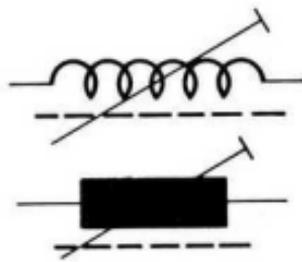


Bild 137

Drosselspule mit Eisenkern

Die Drosselspule mit Eisenkern besteht aus einem Spulenkörper mit der Wicklung und einem Eisenkern aus lamelliertem Material. Sie wird vorwiegend in Niederfrequenzschaltungen und in Siebgliedern verwendet. Oft wird der Eisenkern mit einem festen Luftspalt versehen, um zu starke Vormagnetisierung des Eisenkernes zu vermeiden. Wir wissen, dass die relative Permeabilität eines Eisenkernes keine konstante Grösse ist. Ihr Wert hängt weitgehend von der Magnetisierung ab. Je grösser die magnetische Feldstärke gemacht wird, desto geringer wird die relative Permeabilität. Dieser Effekt hätte zur Folge, dass die Induktivität der Spule vom Erregerstrom abhängig wäre. Der Luftspalt stellt einen grossen magnetischen Widerstand dar, er bestimmt daher weitgehend den magnetischen Fluss. Dadurch wird die Flussänderung klein gehalten. Durch diese Massnahme wird erreicht, dass die In-

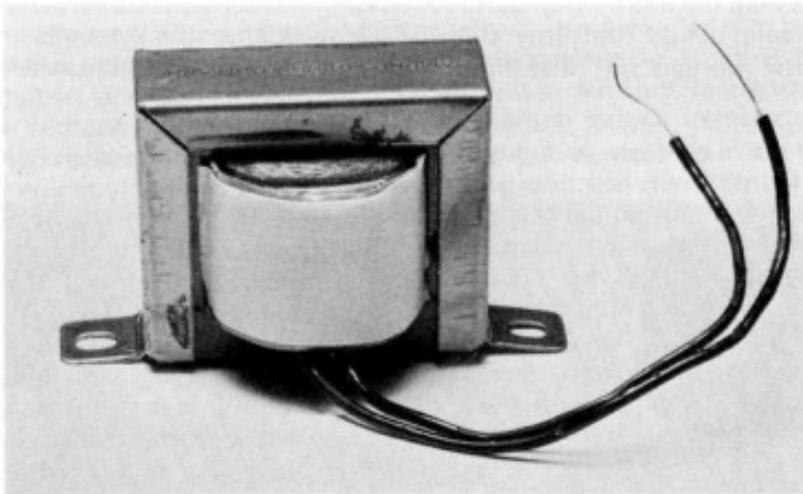


Bild 138

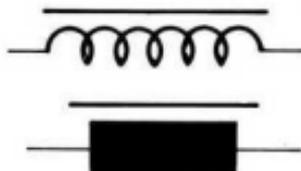


Bild 139

duktivität bei Stromänderungen nur unwesentlich schwankt. Je grösser der Luftspalt gemacht wird, desto kleiner wird der Magnetfluss und die Induktivität. Bild 138 zeigt eine Drosselspule mit Eisenkern. In Bild 139 sind die beiden gebräuchlichsten Symbole dargestellt.

Variometer

Ein Variometer ist eine Einrichtung mit veränderlicher Induktivität. Es werden verschiedene Ausführungen unterschieden. Die einfachste Bauart besteht aus einer *Spule mit kontinuierlichem Abgriff*. Die Spule ist meistens auf einem drehbaren Zylinder angeordnet und besteht aus blankem Draht. Als Abgriff dient ein Schleifer. Dieser wird von der sich drehenden Wicklung geführt und bewegt sich längs der Spule. Dadurch ist es möglich, zwischen Null und der maximalen Windungszahl des Variometers jede beliebige Anzahl Windungen abzugreifen und somit die Induktivität zwischen Null und dem Maximalwert kontinuierlich zu verändern. Diese Art von Variometer wird meistens in Senderstufen als Schwingkreiselement und in Antennenanpassungsgeräten als einstellbare Induktivität verwendet. Bild 140 zeigt ein Variometer mit kontinuierlichem Abgriff, Bild 141 die gebräuchlichsten Symbole für Variometer mit veränderlicher Induktivität.

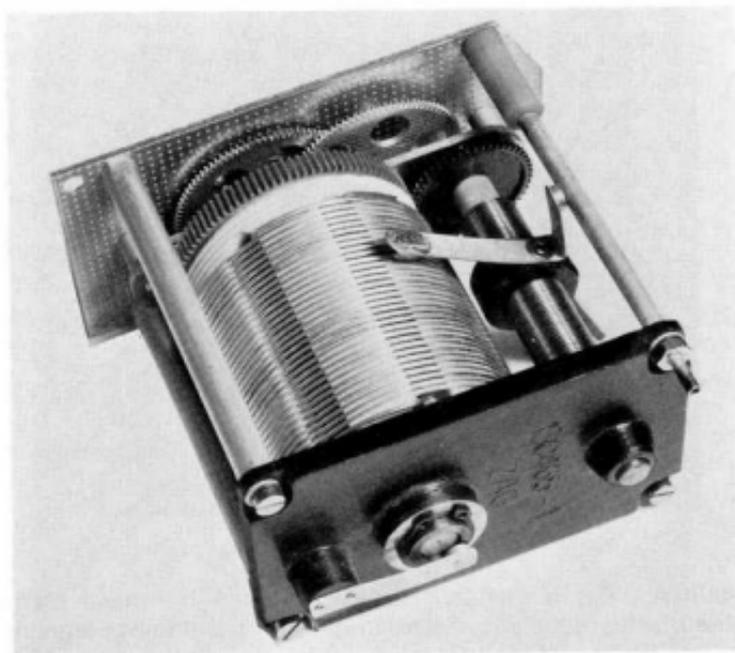


Bild 140

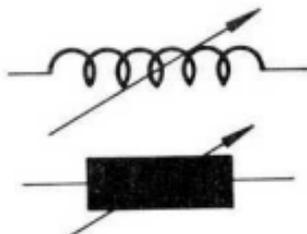


Bild 141

Das *Massenkernvariometer* beruht auf einem anderen Prinzip. In eine Zylinderspule wird ein Ferritkern eingetaucht und damit die Induktivität in einem gewissen Bereich verändert. Diese Art von Variometer wird oft in Sendern und Empfängern als veränderliches Schwingkreiselement eingesetzt. Bild 142 zeigt zwei Massenkernvariometer in der Schaltung eines Kleinfunkgerätes, Bild 143 zwei gebräuchliche Symbole für Massekernvariometer.

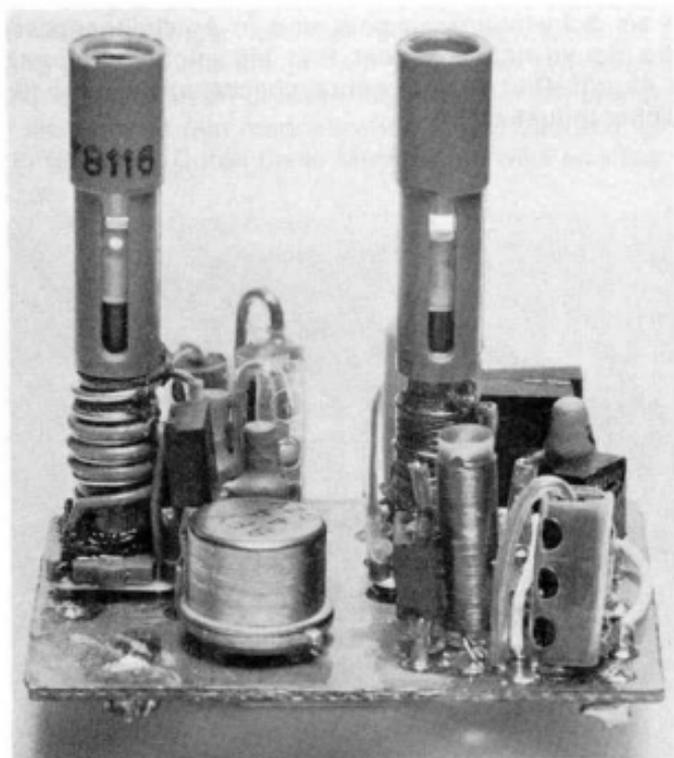


Bild 142

Das *Drehspulenvariometer* besteht aus zwei Spulen. In einer festen Zylinderspule ist eine drehbare kleinere Spule angeordnet. Beide Spulen sind in Serie geschaltet. Die beiden Magnetfelder beeinflussen sich gegenseitig, je nach Stellung der drehbaren Spule wird das Gesamtfeld erhöht oder verkleinert.

Damit ändert sich auch die Induktivität der Einrichtung. Mit dem Drehspulvariometer lässt sich ein relativ grosser Induktivitätsbereich überstreichen. Seine Verwendungsmöglichkeiten sind vielfältig. Es wird überall dort eingesetzt, wo ein möglichst grosser Frequenzbereich kontinuierlich verändert werden soll. Bild 144 zeigt den Aufbau eines Drehspulvariometers. Das Symbol eines Drehspulvariometers ist gleich dem eines Variometers mit Abgriff (Bild 141).

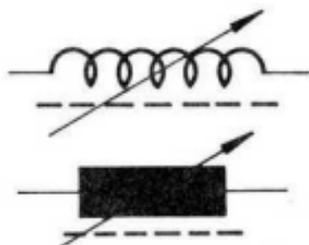


Bild 143

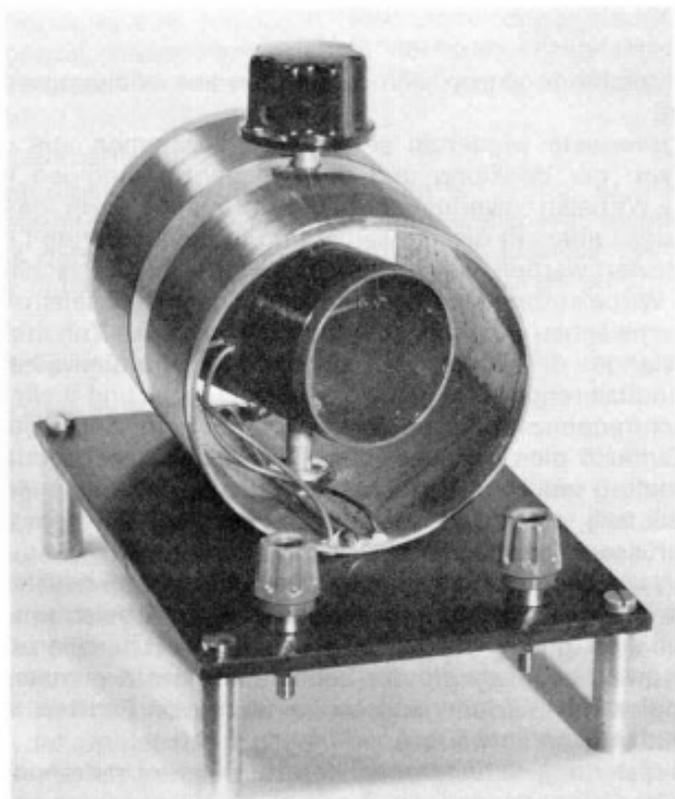


Bild 144

g. Kenndaten

Die Spule ist gekennzeichnet durch ihren *Induktivitätswert*, die *Spulengüte*, die *Eigenkapazität* und den *Temperaturkoeffizienten*.

Die Spulengüte Q_L

Eine reine Induktivität ohne Verlustwiderstände lässt sich nicht herstellen. Die Verlustwiderstände wirken sich aus wie beim Kondensator als ohmsche Widerstände in Serie oder parallel zur Induktivität. Bild 145 zeigt die beiden Ersatzschaltbilder.

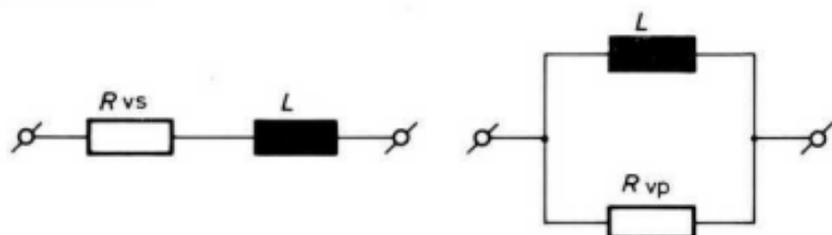


Bild 145

Die Verlustwiderstände setzen sich zusammen aus Wicklungsverlusten und Kernverlusten.

Die *Wicklungsverluste* wiederum setzen sich zusammen aus dem *Gleichstromwiderstand* der Wicklung und den frequenzabhängigen *Wirbelstromverlusten*. Die Wirbelstromverluste haben ihre Ursache darin, dass durch das Wechselfeld des Leiters in diesem selbst und in benachbarten Leitern Wechselströme induziert werden, welche sich im Leiter selbst kurzschliessen. Diese sogenannten Wirbelströme sind dem induzierenden Wechselstrom entgegengesetzt und schwächen ihn, was sich auswirkt wie eine Zunahme des ohmschen Widerstandes des Leiters. Mit zunehmender Frequenz heben sich im Leiterinnern induzierender und induzierter Strom mehr und mehr auf, so dass der Nutz-Hochfrequenzstrom praktisch nur noch in der Leiteroberfläche fliesst. Der Einfluss dieses Haut- oder *Skinneffektes* kann reduziert werden durch Verwendung von Hochfrequenzlitze (feinste, unter sich isolierte parallele Drähte) anstelle festen Drahtes, weil eine Litze bei gleichem Gesamtquerschnitt eine grössere Oberfläche aufweist.

Die *Kernverluste* setzen sich zusammen aus *Wirbelstromverlusten* wie in der Wicklung sowie *Ummagnetisierungsverlusten*. Die Wirbelstromverluste werden klein gehalten durch Unterteilung des Kerns (Lamellierung, Hochfrequenzweisen) sowie Herabsetzung der Leitfähigkeit des Kernmaterials (Lamellenmaterial legiert mit Silizium, oder Verwendung von Ferriten, welche praktisch keine Leitfähigkeit aufweisen).

Die Ummagnetisierungsverluste entstehen durch die Umdrehungsarbeit der molekularen Elementarmagnete im Kernmaterial. Sie werden klein gehalten durch Verwendung von magnetisch «weichem» Material.

Zusätzliche Wirbelstromverluste können noch entstehen in allfälligen Abschirmbechern, wenn die Spulen stärkere Streufelder aufweisen (Spulen mit Stabkern).

Die Spulenverluste lassen sich messtechnisch erfassen. Die Spulengüte Q_L ist, wie später gezeigt wird, das Verhältnis von Reaktanz zu Serie-Verlustwiderstand, oder Parallelwiderstand zu Reaktanz:

$$Q_L = \frac{X_L}{R_{vs}} = \frac{R_{vp}}{X_L}$$

X_L = Spulen-Reaktanz
 R_{vs} = Serie-Verlustwiderstand
 R_{vp} = Parallel-Verlustwiderstand

Diese Spulengüte ist in Wechselstromkreisen von Bedeutung. Die Güte der üblichen Spulen für Hochfrequenzkreise schwankt zwischen kleinen Werten in der Grösse von etwa 40 für sehr hohe Frequenzen und Werte um 500 für Frequenzen im Langwellenbereich.

Die Eigenkapazität

Die Eigenkapazität oder Wicklungskapazität der Spule wirkt sich aus, als ob eine Kapazität parallel zur Spule geschaltet wäre. Jede Windung bildet mit der Nachbarwindung eine Kapazität. Die Summe dieser Kapazitäten ergibt die Eigenkapazität. Diese macht sich in Hochfrequenzkreisen störend bemerkbar. Durch spezielle Anordnung der Wicklung kann sie jedoch klein gehalten werden.

Der Temperaturkoeffizient

Der Temperaturkoeffizient von Induktivitäten ist gering. Er bewegt sich je nach Kernmaterial zwischen $2 \dots 16 \cdot 10^{-6}$. In frequenzbestimmenden Schwingkreisen muss darauf geachtet werden, dass der Einfluss des Temperaturkoeffizienten durch Wahl eines entsprechenden Kondensators kompensiert wird.

h. Das Arbeitsverhalten von Spulen

Die Spule im Gleichstromkreis

Der folgende Versuch zeigt das Verhalten der Spule im Gleichstromkreis. In der Schaltung nach Bild 146 wird die Induktivität über ein Glühlämpchen und einen Schalter an eine Gleichspannungsquelle gelegt. Das Glühlämpchen zeigt den Spulenstrom an. Die Gleichspannung wird so einreguliert, dass das Lämpchen im Spulenkreis hell leuchtet. Mit dem Schiebewiderstand wird die Helligkeit des zweiten Lämpchens so einreguliert, dass es gleich stark leuchtet wie dasjenige im Spulenkreis.

Der Schalter wird geöffnet und wieder geschlossen. Das Lämpchen im Spulenkreis leuchtet etwas später auf als dasjenige im Widerstandskreis. Das bedeutet, dass der Spulenstrom gegenüber der Spannung nacheilt. Diese Erscheinung lässt sich mit Hilfe des Selbstinduktionsstromes leicht erklären. Im Einschaltmoment hat der Strom das Bestreben, unendlich rasch vom Wert Null auf den Maximalwert anzusteigen. Das hätte eine unendlich rasche Feld-

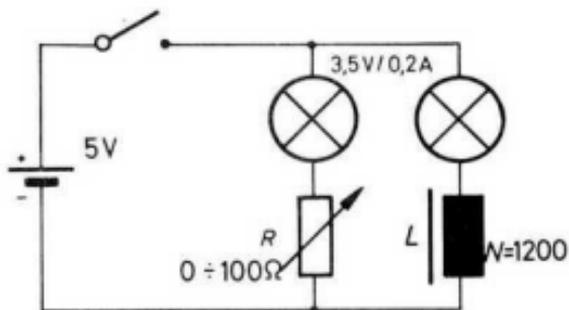


Bild 146

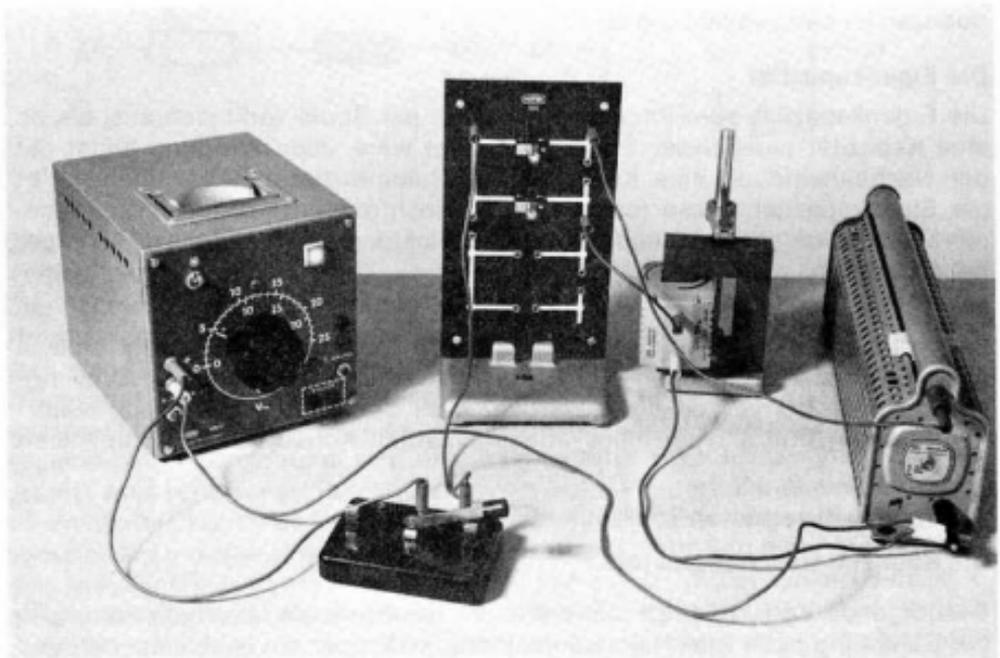


Bild 147

änderung zur Folge, das Feld würde ebenfalls vom Wert Null sofort seinen Höchstwert erreichen. Die induzierte Gegeninduktionsspannung würde unendlich gross. Der vorgängige Versuch hat uns gezeigt, dass der Gegeninduktionsstrom schwächend auf den Erregerstrom wirkt, wenn das Magnetfeld vergrössert wird. Der Erregerstrom kann daher nur langsam ansteigen, da er den Gegeninduktionsstrom überwinden muss. Der Stromanstieg wird um so länger dauern, je grösser der Selbstinduktionskoeffizient der Spule ist. In Bild 147 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

Die Serieschaltung von Spulen

In Reihe geschaltete Spulen lassen sich zu einer Gesamtinduktivität zusammenfassen. Dabei ist zu unterscheiden, ob die Spulen magnetisch miteinander gekoppelt sind oder nicht. Gekoppelte Spulen sollen vorerst ausser acht gelassen werden, sie werden später im Zusammenhang mit den Bandfiltern besprochen. Nicht gekoppelte Spulen können sich gegenseitig nicht beeinflussen, sie sind entweder abgeschirmt oder liegen weit auseinander. In Serie geschaltete Spulen verhalten sich genau wie in Serie geschaltete Widerstände. Die Gesamtinduktivität ist gleich der Summe der Teilinduktivitäten.

$$L_{\text{tot}} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots L_n$$

Das Resultat der Serieschaltung ist leicht verständlich, wenn man berücksichtigt, dass sich bei der Reihenschaltung die Selbstinduktionsspannungen der Einzelinduktivitäten addieren, und dass die Selbstinduktionsspannung der Induktivität proportional ist.

Die Parallelschaltung von Spulen

Nicht gekoppelte Spulen verhalten sich parallel geschaltet wie parallele Widerstände. Der Reziprokwert der Gesamtinduktivität ist gleich der Summe der Reziprokwerte der Teilinduktivitäten.

$$\frac{1}{L_{\text{tot}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots \frac{1}{L_n}$$

Die Zeitkonstante von RL-Gliedern

Der Strom durch die reine Induktivität steigt ab dem Einschaltmoment nach einer Exponentialfunktion an und nähert sich seinem Maximalwert. Er zeigt das gleiche Verhalten wie die Spannung am Kondensator. Im Abschaltmoment bricht er nicht zusammen, er klingt nach einer e-Funktion ab. Bild 148 zeigt die Verhältnisse.

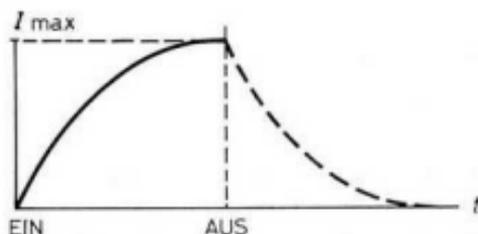
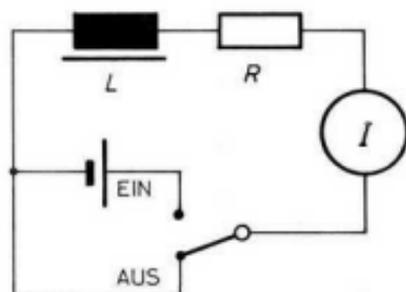


Bild 148

Bild 149 zeigt den Verlauf des Stromes durch die Induktivität. Sie folgt den gleichen mathematischen Gesetzen wie die Kurve der Spannung am Kondensator. Wie beim RC-Glied lässt sich auch für das RL-Glied eine Zeitkonstante

definieren. Würde der Strom mit der Geschwindigkeit anwachsen, die er im Einschaltmoment aufwies, so würde er nach Ablauf von einer Zeitkonstante seinen Maximalwert erreicht haben. Dieser gedachte Verlauf des Stromes wird durch die Tangente in Bild 149 dargestellt.

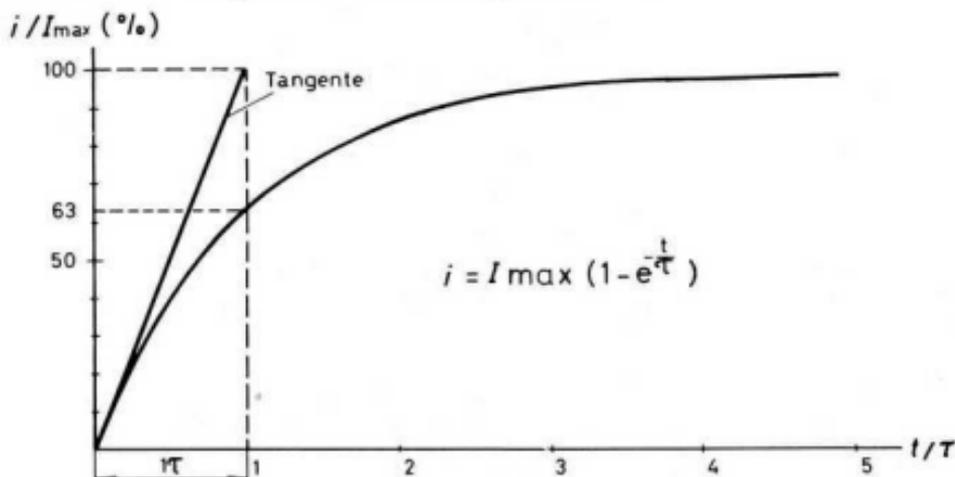


Bild 149

Infolge des exponentiellen Anstieges beträgt der Strom nach einer Zeitkonstante nur 63% seines Maximalwertes. Theoretisch wird es ihm nie gelingen, den Maximalwert, der durch die Summe aller ohmschen Widerstände des Kreises gegeben ist, zu erreichen. Wie beim Kondensator lassen sich die Vorgänge vereinfachen; für die Praxis darf angenommen werden, dass der Strom nach 5 Zeitkonstanten auf den Maximalwert angestiegen sei.

Die Zeitkonstante für ein RL-Glied entspricht dem Quotienten von Induktivität und Widerstand.

$$\tau = \frac{L}{R} \quad [\tau] = \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \frac{\text{A}}{\text{V}} = \text{s}$$

Die Spule im Wechselstromkreis

Der Versuch nach Bild 150 und 151 demonstriert das Verhalten der Spule im Wechselstromkreis. Eine Spule von 1200 Windungen mit geschlossenem Eisenkern wird über ein Ampèremeter an die Netzspannung 220 V/50 Hz angeschlossen. Das Instrument zeigt einen bestimmten Strom an. Das Joch des Kernes wird langsam zurückgeschoben, der Spulenstrom steigt an.

Durch das Verschieben des Joches wurde der magnetische Widerstand des Kernes vergrößert. Das hat zur Folge, dass der magnetische Fluss kleiner geworden ist. Kleinerer Magnetfluss bedeutet kleinere Induktivität. Das Experiment beweist somit, dass der Wechselstromwiderstand der Spule mit kleiner werdender Induktivität abnimmt.

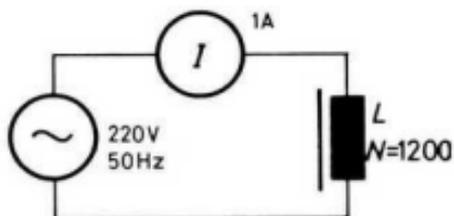


Bild 150

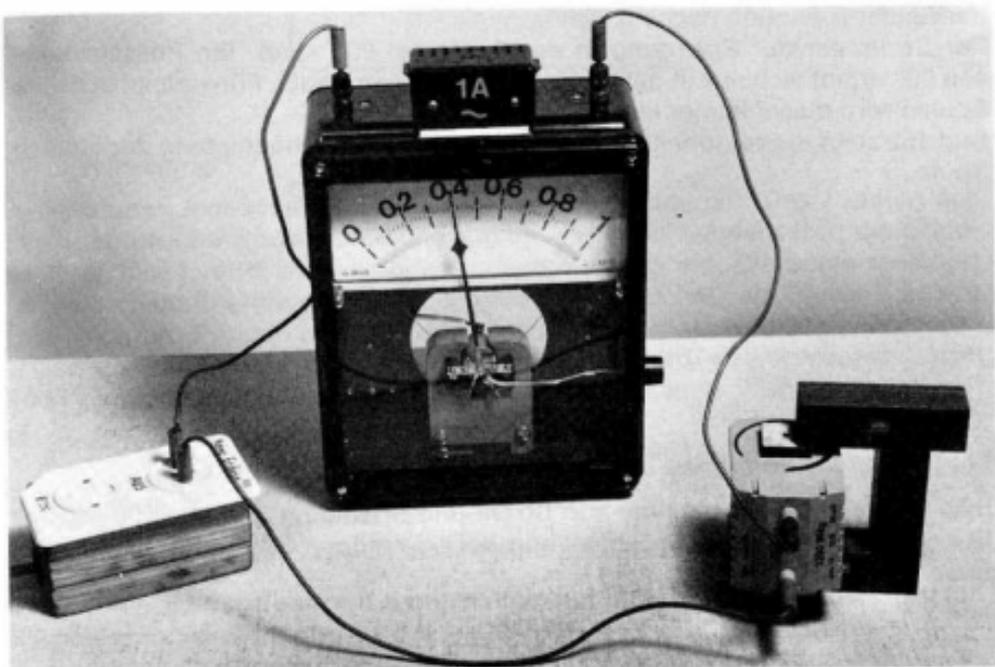


Bild 151

Eine Wechselspannung wirkt sich an der Induktivität ähnlich aus, wie wenn man eine Gleichspannung periodisch umpolen würde. Der Auf- und Abbau des Magnetfeldes wiederholt sich mit der Frequenz der Wechselspannung. Die dabei entstehende Gegeninduktionsspannung ist dauernd wirksam und verhindert ein Ansteigen des Stromes auf den Wert, der sich bei Gleichspannung einstellen würde. Je höher die Frequenz, desto rascher erfolgt die Feldänderung, desto kleiner wird der Strom durch die Spule.

Der Widerstand, den die Spule einem Wechselstrom entgegensetzt, wird *induktiver Blindwiderstand* genannt.

Als Formelzeichen für den induktiven Blindwiderstand wird X_L verwendet.

Die Masseinheit für den induktiven Blindwiderstand ist das Ohm. Analog den Begriffen bei den Kapazitäten spricht man hier von induktiven Reaktanzen oder Induktanzen.

Der induktive Blindwiderstand wird um so grösser, je grösser die Induktivität der Spule und die Frequenz des Wechselstromes gemacht werden.

$$X_L = \omega L \quad [X_L] = \frac{1}{s} \cdot \frac{Vs}{A} = \frac{V}{A} = \Omega$$

Die vektorielle Darstellung von Strom und Spannung in der Spule

Der Erregerstrom durch die Spule muss den Gegeninduktionsstrom überwinden. Der Versuch mit den Glühlämpchen hat gezeigt, dass der Spulenstrom der Spulenspannung nacheilt.

Der Strom eilt der Spannung in der Spule um 90° nach. Ein Phasenwinkel von 90° ergibt sich nur in der verlustfreien, idealen Spule. Für verlustbehaftete Spulen wird dieser immer kleiner als 90° .

Bild 152 zeigt die vektorielle Darstellung der Phasenverhältnisse in der idealen Spule.

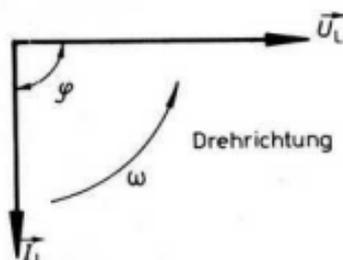


Bild 152

Die Darstellung von Strom und Spannung im Liniendiagramm

Bild 153 zeigt die Darstellung von Strom und Spannung im Liniendiagramm. Vor- und Nachteile dieser Darstellung haben wir im Kapitel über Kondensatoren besprochen.

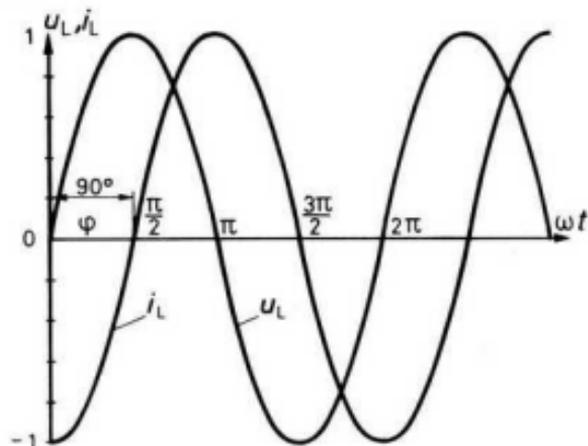


Bild 153

Der Blindwiderstand einer Spule in Abhängigkeit von der Frequenz

Der induktive Blindwiderstand einer Spule nimmt proportional mit der Frequenz zu. Bild 154 hält die Verhältnisse grafisch fest.

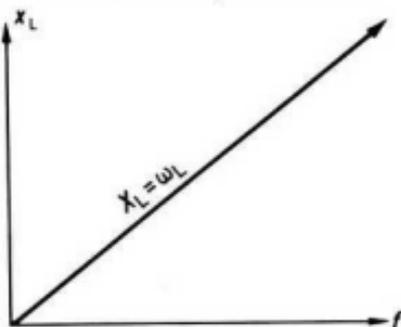


Bild 154

Die Blindleistung

In der reinen Induktivität wird keine Leistung verbraucht. Das Produkt aus Spulenstrom und Spulenspannung ergibt, wie beim Kondensator, die Blindleistung. Ihre Einheit ist, wie beim Kondensator, das Var. Die Spule speichert im Magnetfeld Energie und gibt diese wieder an das Netz ab. Dieser Vorgang spielt sich pro Periode des Wechselstromes zweimal ab. Bild 119 lieferte den zeichnerischen Beweis, dass die Wirkleistung Null wird, wenn zwischen Strom und Spannung eine Phasenverschiebung von 90° besteht.

4. Beispiele

a. Berechnung der Induktivität einer Spule mit Eisenkern

Die Induktivität der Spule mit den nachfolgenden Daten soll ermittelt werden.

- Spulendaten: Windungszahl $N = 1200$
 Wicklungsfläche $A = 5 \text{ cm}^2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
Eisenweglänge: $l = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$
 Relative Permeabilität $\mu_r = 80$
 (für eine bestimmte Stromstärke)

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

$$L = \frac{4\pi \cdot 80 \cdot 1,44 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1 \text{ m}^2}$$

$$[L] = \frac{\text{Vs}}{\text{A m}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = \text{H}$$

$$L = 0,723 \text{ H}$$

b. Berechnung der induzierten Spannung

Bild 155 zeigt eine Schaltung, die es ermöglicht, den Spulenstrom linear ansteigen zu lassen. Der Widerstand R wird nach einer Exponentialkurve während des Ladevorgangs so verkleinert, dass sich in der Spule ein konstanter Strom ergibt. In unserem Beispiel steige der Strom innerhalb von 2 Sekunden linear von Null auf 6 Ampère an. Die Spuleninduktivität beträgt 3 H. Wie gross ist die induzierte Gegeninduktionsspannung?

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$U = 3 \cdot \frac{6}{2} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{s}}$$

$$U = 9 \text{ V}$$

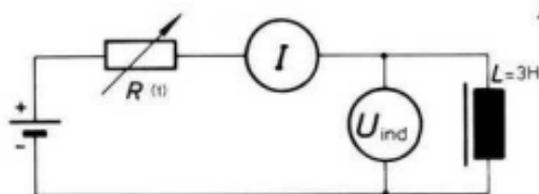
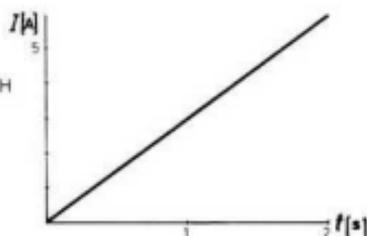


Bild 155



c. Berechnung der Zeitkonstante

Die Zeitkonstante für das RL -Glied in Bild 156 wird gesucht.



Bild 156

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$\tau = \frac{12}{0,7 \cdot 10^3} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

$$\tau = 17,15 \text{ ms}$$

d. Bestimmen der Induktivität durch eine Strom- und Spannungsmessung

Eine unbekannte Induktivität wird an einen Hochfrequenzgenerator angeschlossen. Strom und Spannung werden gemessen. Mit Hilfe der Messresultate soll der Wert der Induktivität bestimmt werden. Bild 157 zeigt die Schaltung und die Messwerte.

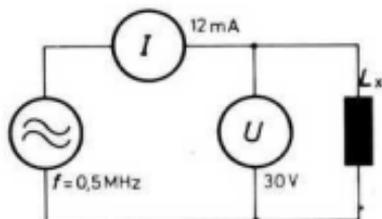


Bild 157

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen des Blindwiderstandes

– Grundformel anschreiben

$$X_L = \frac{U}{I}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_L = \frac{30}{12 \cdot 10^{-3}}$$

$$X_L = 2,5 \text{ k}\Omega$$

2. Schritt: Berechnung der Induktivität

– Grundformel anschreiben

$$X_L = \omega L$$

– nach L umstellen

$$L = \frac{X_L}{\omega}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$L = \frac{2,5 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 0,5 \cdot 10^6} \quad \frac{\text{V}}{\text{A} \cdot \text{s}}$$

$$L = 0,796 \text{ mH}$$

5. Das Wesentliche

Es wird unterschieden zwischen Spulen mit Eisenkern und Spulen ohne Eisenkern. Der Kern erhöht die Induktivität der Spule. Die Wicklung der Spule kann auf einem Spulenkörper sitzen oder freitragend sein.

Die Selbstinduktion der Spule wird bestimmt durch deren geometrische Abmessungen, die Windungszahl und die relative Permeabilität des Kernes. Die Induktivität steigt mit dem Quadrat der Windungszahl an. Die relative Permeabilität des Kernes ist kein konstanter Wert, sie hängt vom Spulenstrom ab. Zur Herabsetzung des Einflusses des Spulenstromes werden oft Kerne mit Luftspalt verwendet.

Die Induktivität wird in Voltsekunden pro Ampère oder Henry gemessen. Eine Spule weist dann eine Induktivität von einer Voltsekunde pro Ampère oder einem Henry auf, wenn eine gleichmässige Stromänderung von einem Ampère sich während einer Sekunde vollzieht und dabei eine Spannung von einem Volt induziert wird.

In Hochfrequenzkreisen werden Ferritspulen oder Luftspulen verwendet. Ferrit ist ein Kernmaterial mit guten Hochfrequenzeigenschaften, es weist nur sehr geringe Wirbelstromverluste auf. In Senderendstufen und Messgeräten sind oft Variometer anzutreffen. Variometer sind Spulen, deren Induktivität sich kontinuierlich verändern lässt. Spulen mit lamellierten Eisenkernen fin-

den sich in Schaltungen der Niederfrequenztechnik und in Siebketten von Gleichrichtern.

Die Spulenverluste treten als Serie- oder Parallelverlustwiderstände in Erscheinung, diese beeinflussen die Güte der Spule. Als Masseinheit für die Spulengüte dient der Gütefaktor Q . Die Güte ist frequenzabhängig.

Die Serie- und Parallelschaltung von Spulen, welche nicht miteinander gekoppelt sind, berechnen sich nach den gleichen Regeln wie analoge Schaltungen mit Widerständen.

Die Zeitkonstante eines RL -Gliedes errechnet sich aus dem Quotienten von Induktivität und Seriewiderstand. Wird ein Serieglied, bestehend aus Induktivität und Widerstand, an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen, so steigt der Spulenstrom innerhalb einer Zeitkonstante auf 63% seines Maximalwertes an.

Im Wechselstromkreis verhält sich eine Spule wie ein Widerstand. Der Wert dieses Wechselstromwiderstandes ist der Frequenz und der Induktivität proportional. In der Spule eilt der Strom der Spannung um 90° nach.

Das Produkt aus Spulenstrom und Spulenspannung wird als Blindleistung bezeichnet. Die Masseinheit dafür ist das Var.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 452)

a) Von einer langen zylinderförmigen Luftspule sind folgende Daten bekannt:

Induktivität L 600 mH

Spulenlänge l 12 cm

Spulendurchmesser d 4 cm

Bestimmen Sie die notwendige Windungszahl.

b) In einer Spule sinkt der Strom innerhalb von 0,7 s linear von 6 A auf 1 A ab. Während der Dauer dieser Stromänderung wird in der Spule eine Spannung von 50 V induziert. Bestimmen Sie die Induktivität der Spule.

c) Ein RL -Glied weist eine Zeitkonstante von 8 ms auf. Der Widerstand misst 200 Ohm. Wie gross ist die Induktivität der Spule?

d) Eine Spule wird über ein Ampèremeter an einen Niederfrequenzgenerator angeschlossen. Dieser erzeugt eine Wechselspannung von 500 Hz. Die Spannung an der Spule beträgt 80 V, das Instrument zeigt einen Spulenstrom von 10 mA an. Bestimmen Sie den Wert der Induktivität.

e) Bestimmen Sie in der Schaltung nach Bild 158 die Ströme I_2, I_3 sowie L_2 .

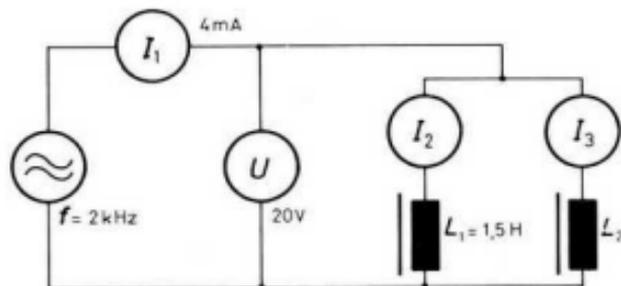


Bild 158

IV. Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen

1. Einführung

Induktivitäten und Kapazitäten lassen sich nicht verlustfrei herstellen, sie weisen immer einen Verlustwiderstand auf. Kondensatoren und Spulen bestehen deshalb immer aus Blind- und Wirkwiderständen. Die Serieschaltung von Blind- und Wirkwiderständen ist in der Elektrotechnik und der Elektronik häufig anzutreffen. So wirken Motoren, Transformatoren und Antennen als Serieschaltungen von RCL -Gliedern. Die Spulengüte Q_L und der Verlustfaktor $\tan \delta$ lassen sich aus der Serieschaltung von Reaktanzen mit Widerständen ableiten. Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ hat für die Starkstromtechnik eine grosse Bedeutung, er lässt sich mit Hilfe einer Serieschaltung von RL -Gliedern bestimmen. Serieschwingkreise stellen einen Sonderfall der gemischten Serieschaltung dar. Diese Aufzählung liesse sich beliebig erweitern. Wir ersehen daraus, wie wichtig das Verständnis der Serieschaltung ist. Die Regeln der Trigonometrie, insbesondere der Winkelfunktionen, spielen für die Erklärung der Vorgänge in gemischten Schaltungen eine grosse Rolle. Die Darstellung von Wechselstromgrössen gemischter Schaltungen im Vektordiagramm ist die Regel. Die zu besprechenden Probleme werden Ihnen Gelegenheit geben, Ihr bis dahin erworbenes Wissen anzuwenden.

2. Was wissen Sie schon über die Serieschaltung von Blind- und Wirkwiderständen? (Lösung Seite 455)

- Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «kapazitiver Blindwiderstand»?
- Was ist ein «induktiver Blindwiderstand»?
- Wie verhalten sich Strom und Spannung im Kondensator?
- Wie verhalten sich Strom und Spannung in der Spule?
- Der Gesamtwiderstand einer Serieschaltung eines ohmschen Widerstandes von 5 Ohm mit einem kapazitiven Blindwiderstand von 8 Ohm soll ermittelt werden. Dürfen die beiden Werte addiert werden?
- Was verstehen Sie unter einer Impedanz?
- Was sagt Ihnen der Ausdruck «Blindleistung»?
- Wo spielt der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ eine Rolle?

3. Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen

a. Serieschaltung von induktivem Blindwiderstand und ohmschem Widerstand

Das Verhalten von Serieschaltungen wird am folgenden Experiment erklärt. Eine Spule von 600 Windungen mit Eisenkern und aufgesetztem Joch wird nach Bild 159 über ein Ampèremeter an das Lichtnetz angeschlossen. Der

Blindwiderstand der Spule wird aus dem Strom- und Spannungswert errechnet.

Für die nächste Messung wird ein bekannter Widerstand zur Spule in Serie geschaltet. Der Wechselstromwiderstand der Schaltung wird erneut aus den Strom- und Spannungswerten ermittelt.

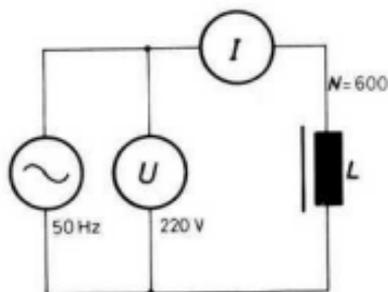


Bild 159

Der Wechselstromwiderstand der Schaltung nach Bild 160 und 161 ist kleiner als die Addition des ohmschen Widerstandes mit dem Blindwiderstand der Spule.

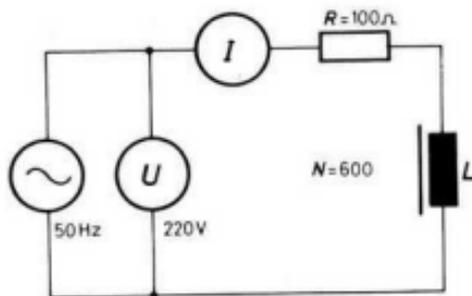


Bild 160

Das Versuchsergebnis wird sofort klar, wenn man die Phasenlage der Spannungen über dem Widerstand und der Spule betrachtet. Die Spannung über der Induktivität eilt gegenüber der Spannung am Widerstand um 90° vor. Die Werte der beiden Teilspannungen dürfen nicht einfach addiert werden. Die Gesamtspannung über der Serieschaltung entspricht der geometrischen Addition der Teilspannungen. Graphisch werden die Verhältnisse im *Vektordiagramm* (Zeigerdiagramm) dargestellt.

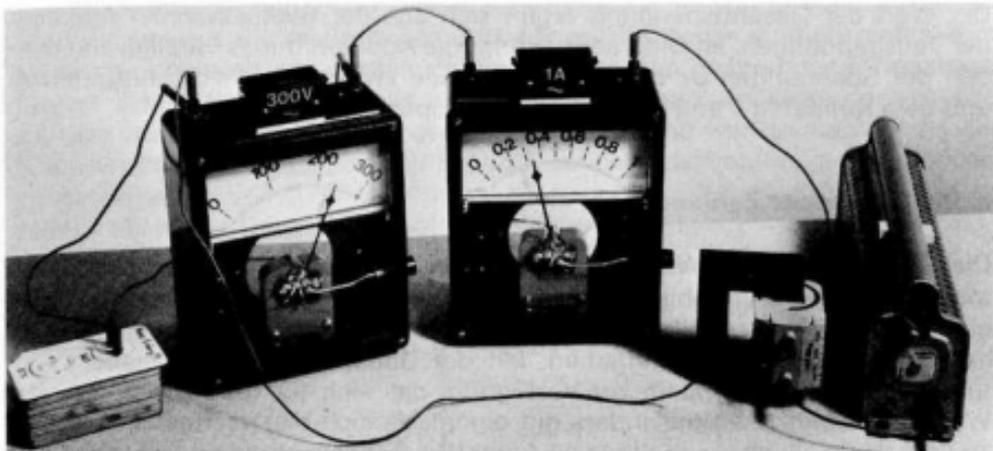


Bild 161

b. Das rechtwinklige kartesische Koordinatensystem

Wechselstromgrößen werden oft im kartesischen Koordinatensystem dargestellt. Das rechtwinklige kartesische Koordinatensystem besteht aus der horizontalen x - oder Abszissenachse und der vertikalen y - oder Ordinatenachse. Die Achsen stehen senkrecht aufeinander. Der Schnittpunkt der Achsen heisst Nullpunkt oder Ursprung. Reelle Werte werden auf der positiven x -Achse aufgetragen, Reaktanzen je nach Phasenlage auf der negativen oder positiven y -Achse. In Bild 162 ist die Spannung am Wirkwiderstand nach rechts auf der x -Achse aufgetragen. Die Länge des Pfeiles entspricht dem Wert der Spannung. Im gleichen Masstab wurde die Spannung über der Induktivität nach oben eingezeichnet. Winkel werden im Gegenuhrzeigersinn gemessen, deshalb hat die um 90° voreilende Spannung über der Induktivität ihren Platz auf der positiven y -Achse.

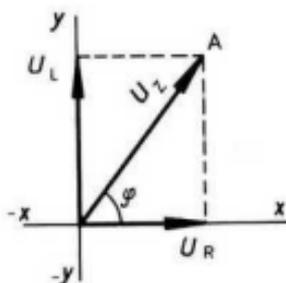


Bild 162

Der Wert der Gesamtspannung ergibt sich aus der geometrischen Addition der Teilspannungen. Im Diagramm erfolgt die Addition durch Parallelverschieben der Spannungen U_L und U_R . Die Gerade zwischen dem Schnittpunkt A und dem Nullpunkt 0 entspricht der Gesamtspannung U_x .

c. Die Gaussche Zahlenebene

Die Darstellung von Wechselstromgrössen im kartesischen Koordinatensystem ist für die graphische Lösung von Wechselstromproblemen gut geeignet. Die Elektrotechnik fordert jedoch eine grafische *und* rechnerische Behandlung der gestellten Aufgaben. Mit der Gausschen Zahlenebene steht uns ein Koordinatensystem zur Verfügung, das sich für die Darstellung von Wechselstromgrössen besonders gut eignet, da sich die zeichnerisch dargestellten Werte algebraisch direkt als komplexe Zahl anschreiben lassen.

Die Kenntnis der Rechenregeln für komplexe Zahlen ist für das Verständnis der Elektrotechnik nicht unbedingt erforderlich. In den meisten Fachaufsätzen werden jedoch Wechselgrössen komplex dargestellt, so dass die Grundkenntnisse dieser Rechnungsart das Verständnis erleichtern. Der folgende Text soll die einfachen Grundbegriffe vermitteln, ohne dass dabei auf die Rechenregeln eingegangen wird. Der Schüler soll über die Darstellung in der Gausschen Zahlenebene so viel wissen, dass er in der Lage ist, ein Zeigerdiagramm zu lesen.

In der Algebra unterscheidet man zwischen *reellen Zahlen* und *imaginären Zahlen*.

Reelle Zahlen sind Zahlen, deren Quadrate positiv sind.

Beispiele für reelle Zahlen:

5 weil $5^2 = 25$, -7 weil $-7^2 = 49$, $0,2$ weil $0,2^2 = 0,04$, $-0,3$ weil $-0,3^2 = 0,09$.

Imaginäre Zahlen sind Zahlen, deren Quadrate negativ sind.

Beispiele für imaginäre Zahlen:

$\sqrt{-9}$ weil $(\sqrt{-9})^2 = -9$, $\sqrt{-0,16}$ weil $(\sqrt{-0,16})^2 = -0,16$

Aus einer negativen Zahl lässt sich nur dann die zweite Wurzel ziehen, wenn man eine Hilfsgrösse einführt. Diese Hilfsgrösse heisst *imaginäre Einheit* und hat den Wert $\sqrt{-1}$. Als Symbol für die imaginäre Einheit wird der Buchstabe j verwendet.

$$\sqrt{-1} = j; j^2 = -1$$

Beispiel:

Der Wurzelausdruck $\sqrt{-25}$ soll berechnet werden. Mit den Regeln der Wurzelrechnung ist diese Aufgabe nicht lösbar. Wir können jedoch den Wurzelausdruck mit j erweitern, unter der Bedingung, dass das Resultat ebenfalls mit j erweitert wird.

$$\sqrt{-25} = \sqrt{(-1) \cdot 25} = \sqrt{-1} \cdot \sqrt{25} = \sqrt{-1} \cdot 5 = 5j$$

Die Gaussche Zahlenebene verwendet rechtwinklige Koordinaten. An Stelle der x -Achse tritt die reelle Achse. Auf der reellen Achse werden rechts vom Nullpunkt die positiven reellen Zahlen aufgetragen, während die negativen reellen Zahlen ihren Platz links vom Nullpunkt haben. An Stelle der y -Achse tritt die imaginäre Achse. Auf der imaginären Achse werden nach oben die positiven imaginären Zahlen und nach unten die negativen imaginären Zahlen aufzeichnet.

In Bild 163 ist die Gaussche Zahlenebene dargestellt.

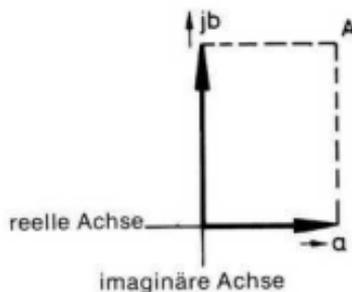


Bild 163

Jeder Punkt in jedem der vier Quadranten kann durch die Angabe einer reellen und einer imaginären Komponente dargestellt werden. Der Punkt A in Bild 163 ist bestimmt durch die Komponenten $a + jb$. Die Addition oder Subtraktion einer reellen und einer imaginären Zahl ergibt eine *komplexe Zahl*.

Für die Darstellung von Wechselstromgrössen in der Gausschen Zahlenebene gelten folgende Regeln:

- Wirkwiderstände, Wirkanteile von Spannungen und Wirkanteile von Strömen werden immer auf der reellen Achse aufgetragen.
- Blindwiderstände, Blindanteile von Spannungen und Blindanteile von Strömen werden immer auf der imaginären Achse aufgetragen.
- Induktive Blindwiderstände werden auf der positiven imaginären Achse, kapazitive Blindwiderstände auf der negativen imaginären Achse dargestellt.

Für die algebraische Darstellung von Wechselstromgrössen in der Gausschen Zahlenebene gelten folgende Regeln:

- Komplexe Wechselstromwerte werden in der Komponentenform dargestellt (Bild 163a)

$$\underline{Z} = R + j\omega L$$

Der Strich unter dem Z bedeutet, dass Z eine komplexe Grösse ist. Durch diese Schreibweise ist die Impedanz in der Gausschen Zahlenebene festgelegt. Die Serieschaltung von einem kapazitiven mit einem reellen Widerstand ergibt folgende Darstellung:

$$\underline{Z} = R + \frac{1}{j\omega C}$$

Der Faktor j gibt die Richtung des Blindwiderstandes an. Diese Form ist eine *Darstellungsart*. Wenn der Wert (Betrag) der Impedanz errechnet werden soll, so müssen der reelle Wert und der imaginäre Wert geometrisch addiert werden. Das Resultat ergibt die Länge des Pfeiles Z , diese entspricht dem Wert der Impedanz.

- Der Faktor j kommt immer vor das Symbol der Kreisfrequenz zu stehen.

$$jX_L = j\omega L$$

$$jX_C = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C}$$

- Der Faktor j beeinflusst den Betrag des Wertes, mit dem er multipliziert wird, nicht.
- Die Multiplikation eines Faktors mit j bedeutet das Vordrehen um 90° .
- Die Multiplikation eines Faktors mit $-j$ bedeutet ein Zurückdrehen um 90° .
- Die zweifache Multiplikation mit j ergibt den Faktor -1 (da $\sqrt{-1} \cdot \sqrt{-1} = -1$).

$\frac{1}{j} = -j$ Beweis: Der Ausdruck kann mit j erweitert werden

$$\frac{1}{j} = \frac{j}{j \cdot j} = \frac{j}{\sqrt{-1} \cdot \sqrt{-1}} = \frac{j}{-1} = -\sqrt{-1} = -j$$

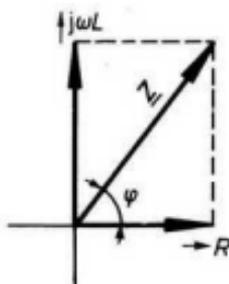


Bild 163a

Beispiele:

Darstellung eines kapazitiven Blindwiderstandes Bild 163b

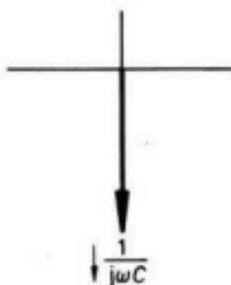


Bild 163b

Der kapazitive Blindwiderstand wird nach den Regeln auf der negativen imaginären Achse aufgetragen. Die algebraische Schreibweise trägt dem Rechnung. Da nach der Regel der Faktor j vor das Symbol der Kreisfrequenz zu stehen kommt, ergibt sich eine Multiplikation des Blindwiderstandes mit dem Faktor $-j$, weil j unter dem Bruchstrich stand. Eine Multiplikation mit $-j$ bedeutet eine Zurückdrehung um 90° .

Darstellung eines induktiven Blindwiderstandes Bild 163c

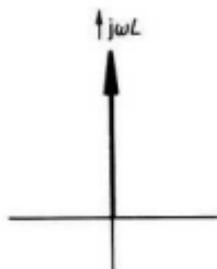


Bild 163c

Der induktive Blindwiderstand wird nach den Regeln auf der positiven imaginären Achse aufgetragen. Algebraisch kommt diese Vorwärtsdrehung um 90° durch den Faktor j vor dem Symbol der Kreisfrequenz zum Ausdruck.

Darstellung der Serieschaltung eines Wirkwiderstandes mit einem induktiven Blindwiderstand (Bild 163d).

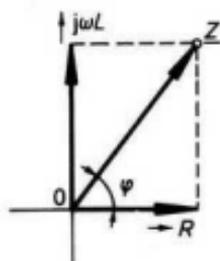


Bild 163d

Wirk- und Blindwiderstand werden nach den Regeln eingezeichnet und durch Parallelverschiebung erfolgt die Konstruktion der Impedanz. Die Darstellung in der Komponentenform lautet:

$$\underline{Z} = R + j\omega L$$

Als Betrag oder Absolutwert der komplexen Impedanz \underline{Z} bezeichnet man die Länge des Pfeiles \underline{Z} , d. h. den Abstand des Punktes \underline{Z} vom Nullpunkt:

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

Die beiden senkrechten Striche, die das Symbol für die Impedanz einrahmen, machen darauf aufmerksam, dass es sich um den Betrag, das heisst den Absolutwert der Impedanz handelt. Das Symbol ohne diese Striche wird für die Komponentendarstellung verwendet.

Zusammenfassung:

Die Gaußsche Zahlenebene dient zur graphischen Darstellung von Wechselstromgrössen. Blindwerte werden auf der imaginären Achse aufgetragen, Wirkwerte auf der reellen Achse.

Die Komponentenform ist eine algebraische *Darstellungsform* der Werte in der Gaußschen Zahlenebene.

Zur Berechnung der *Beträge* wird nach den Regeln der Trigonometrie vorgegangen.

Die Rechenregeln für komplexe Zahlen werden hier nicht erläutert. Wir nehmen zur Kenntnis, dass die Darstellung der komplexen Zahlen in der Komponentenform oder in anderen Formen für die mathematische Behandlung gebraucht werden. Für den Praktiker ist die Komponentenform insofern interessant, als er daraus die Richtung der Blindanteile für die graphische Darstellung erkennen kann.

d. Wechselstromgrössen in der Gaußschen Zahlenebene

Die Serieschaltung in Bild 164 soll graphisch in der Gaußschen Zahlenebene dargestellt werden. Wirkwiderstand und induktiver Blindwiderstand werden nach den gezeigten Regeln eingezeichnet. Die Impedanz \underline{Z} wird durch Parallelverschieben von X_L zeichnerisch ermittelt. Der Winkel zwischen dem Wirkwiderstand R und der Impedanz \underline{Z} heisst *Phasenwinkel* φ .

Das Produkt aus Strom und Gesamtspannung heisst *Scheinleistung*. Es ist dies die Leistung, die von der Impedanz scheinbar verbraucht wird.

Die gebräuchlichsten Symbole für die Scheinleistung sind S und P_s .

Die Masseinheit ist VA (Voltampère)

$$P_s = U \cdot I \text{ (Effektivwerte)}$$

Die *Wirkleistung* ist die Leistung, die in der Impedanz wirklich in eine andere Energieform umgesetzt wird. Sie entspricht der Leistung, die von den Wirkwiderständen aufgenommen wird.

Das Symbol für die Wirkleistung ist P

Die Masseinheit ist W (Watt)

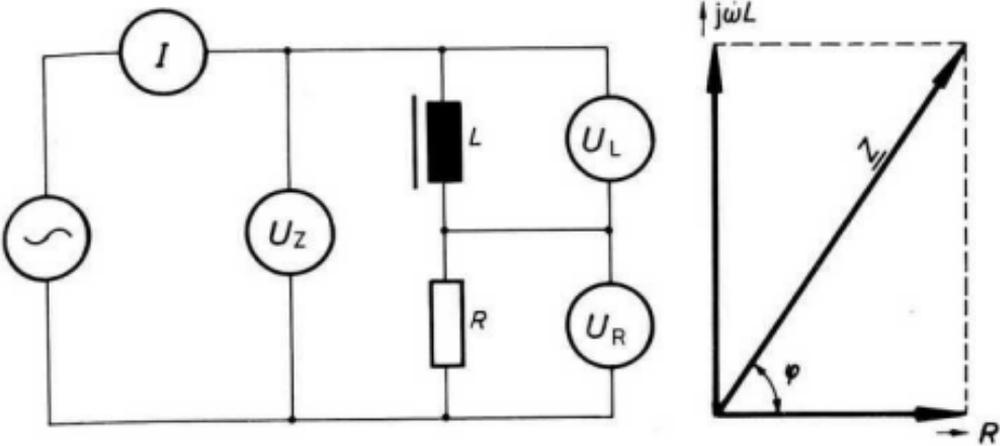


Bild 164

Die Wirkleistung lässt sich mit Hilfe des Zeigerdiagrammes leicht errechnen. Sie entspricht dem Produkt von Strom und Spannung am Wirkwiderstand.

$$P = I \cdot U_R \text{ (Effektivwerte)}$$

Widerstände und Spannungen verhalten sich in der Serieschaltung proportional zueinander. Das Verhältnis der Spannung am Wirkwiderstand U_R zur Gesamtspannung U_Z entspricht damit dem Verhältnis des Wirkwiderstandes R zur Impedanz $|Z|$. Dieser Quotient ist gleich dem Kosinus des Phasenwinkels φ . Damit erhalten wir die Wirkleistung:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ (Effektivwerte)}$$

Der *Leistungsfaktor* $\cos \varphi$ dient der Errechnung der Wirkleistung, die in Impedanzen verbraucht wird.

Für die Serieschaltung errechnet er sich nach:

$$\cos \varphi = \frac{R}{|Z|}$$

Die *Blindleistung* ist die Leistung, die scheinbar in Reaktanzen verbraucht wird. Sie ist eine rein formale Grösse ohne wirkliche physikalische Bedeutung. Man kann sie aber für Rechenzwecke oft gut verwenden.

Die gebräuchlichsten Symbole für die Blindleistung sind Q und P_q (vergleiche mit Seite 165).

Die Masseinheit ist das *Var* (Voltampère reaktiv)

Auch die Blindleistung lässt sich aus dem Zeigerdiagramm errechnen. Das Verhältnis der Spannung U_L zur Gesamtspannung U_Z entspricht dem Verhältnis des induktiven Blindwiderstandes X_L zur Impedanz $|Z|$. Dieser Quotient ist gleich dem Sinus des Phasenwinkels φ . Daraus ergibt sich die Blindleistung:

$$P_q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Der Blindleistungsfaktor $\sin \varphi$ dient zur Berechnung der Blindleistung, die von Impedanzen aufgenommen wird.

Für die Serieschaltung errechnet er sich nach:

$$\sin \varphi = \frac{X_L}{Z}$$

Die Spulengüte Q_L ist ein Mass für die Güte einer Spule. Alle Spulenverluste werden in einem Serieverlustwiderstand zusammengefasst. Das Verhältnis von Blindwiderstand zu Wirkwiderstand ergibt die Spulengüte.

$$Q_L = \frac{X_L}{R}$$

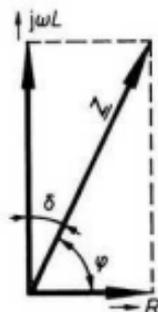


Bild 165

Bild 165 zeigt das Zeigerdiagramm für eine Spule mit Verlusten.

$$Q_L = \frac{\omega L}{R_v} = \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} \quad [Q_L] = \frac{V_s \cdot A}{s \cdot A \cdot V} = \text{dimensionslos}$$

Der *Verlustwinkel* δ ist der Komplementärwinkel zum Phasenwinkel φ . Für die reine Induktivität wird er zu Null, da der Phasenwinkel 90° wird; der Tangens wird damit ebenfalls Null, was bedeutet, dass die Spulengüte unendlich würde. Diese Schlussfolgerung ist richtig, da die reine Induktivität keinen Verlustwiderstand aufweist.

e. Serieschaltung von kapazitivem Blindwiderstand und ohmschem Widerstand

Der folgende Versuch zeigt das Verhalten eines RC-Gliedes. Vorerst wird der Blindwiderstand eines Kondensators nach Bild 166 messtechnisch ermittelt. Zu diesem Blindwiderstand wird nach Bild 167 und 168 ein Wirkwiderstand in Serie geschaltet. Die Impedanz wird aus den Strom- und Spannungswerten errechnet. Das Resultat zeigt für die Impedanz einen kleineren Wert, als die Addition von Wirk- und Blindwiderstand ergeben würden. Die Verhältnisse liegen gleich wie beim RL-Glied. Infolge der Phasenverschiebung um 90°

zwischen Strom und Spannung im Blindwiderstand müssen die Widerstandswerte geometrisch addiert werden. Da die Spannung am Kondensator gegenüber der Spannung am Widerstand nacheilt, wird der kapazitive Blindwiderstand auf dem neg. Teil der imaginären Achse aufgetragen. Bild 169 zeigt die graphische Darstellung im Zeigerdiagramm in der Gaussischen Zahlenebene.

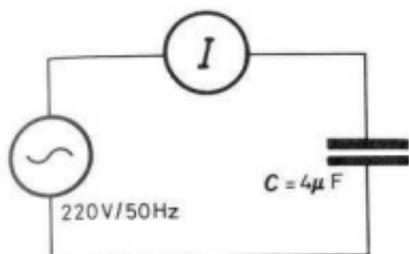


Bild 166

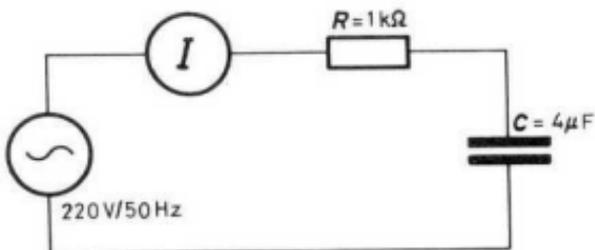


Bild 167

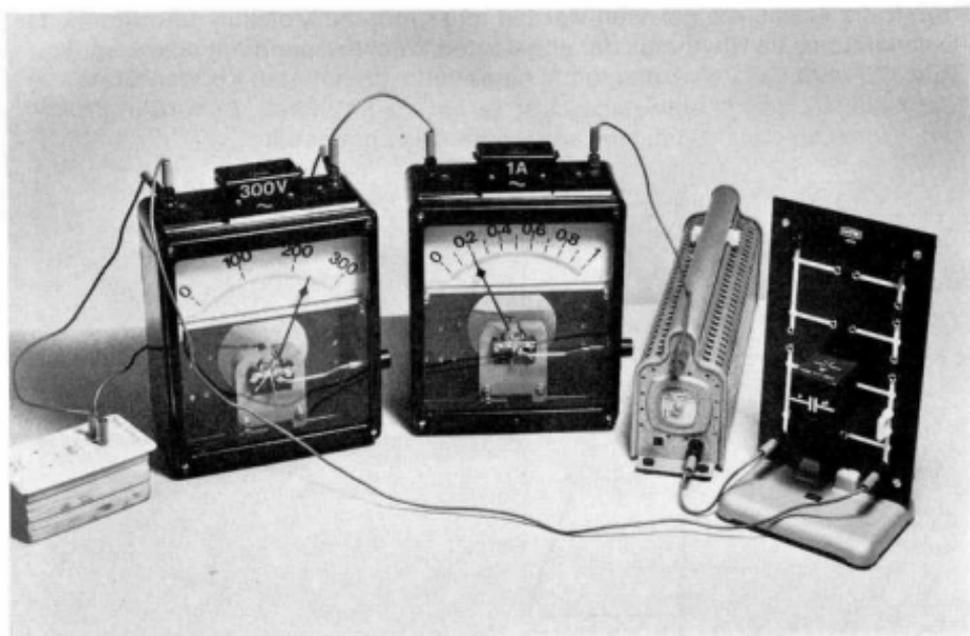


Bild 168

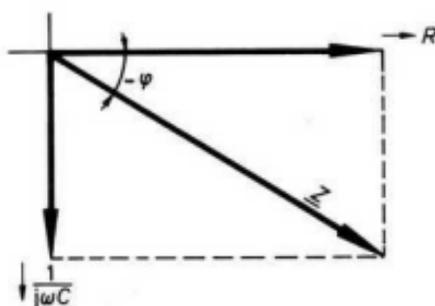
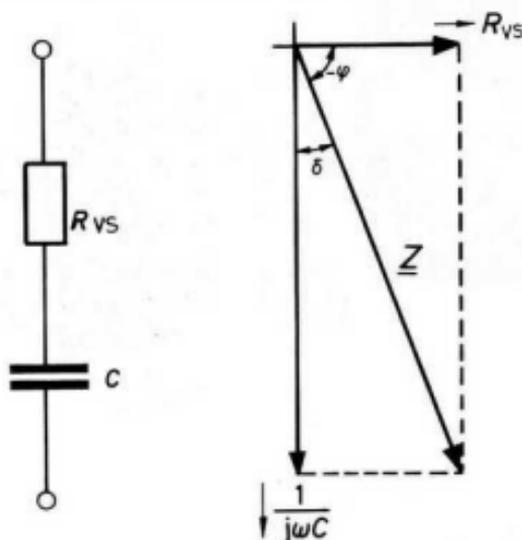


Bild 169

Die Regeln für das RL -Serieglied zur Berechnung der Wirk-, Blind- und Scheinleistung gelten auch für das RC -Serieglied.

Die Verluste im Kondensator werden durch den *Verlustfaktor* $\operatorname{tg} \delta$ ausgedrückt. Alle Kondensatorverluste werden in einem *Serieverlustwiderstand* zusammengefasst. Je kleiner der *Serieverlustwiderstand* ist, desto geringer sind die Verluste. Der Tangens des Verlustwinkels δ entspricht dem Verlustfaktor. Analog zur Spule weist eine reine Kapazität keine Verluste auf, der Tangens des Verlustwinkels wird Null. Der Verlustfaktor ist keine konstante Grösse, er ist frequenzabhängig. Der *Serieverlustwiderstand* ist demnach ebenfalls frequenzabhängig, denn der grösste Anteil der ohmschen Verluste ist auf Verluste im Dielektrikum zurückzuführen. Diese dielektrischen Verluste entstehen durch die Arbeit, die geleistet werden muss, um die Moleküle und Atome des Dielektrikums im Rhythmus der angelegten Wechselspannung auszurichten. Bild 170 zeigt das Zeigerdiagramm eines verlustbehafteten Kondensators. Der Verlustfaktor ist eine reine Zahl, er hat keine Einheit. Er wird in Prozenten, Promillen oder negativen Zehnerpotenzen angegeben.



$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R_{vs}}{X_c} = \frac{R_{vs}}{\frac{1}{\omega C}}$$

$$\operatorname{tg} \delta = R_{vs} \cdot \omega C \quad \left[\frac{V}{A} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{As}{V} = 1 \right]$$

Bild 170

f. Serieschaltung von induktivem und kapazitivem Blindwiderstand mit ohmschem Widerstand

Die Wirk- und Blindwiderstände des Versuches nach Bild 171 und 172 wurden durch eine Strom-Spannungsmessung bestimmt. Strom und Spannung an der Schaltung ergeben einen Wert für die Impedanz, der bedeutend unter

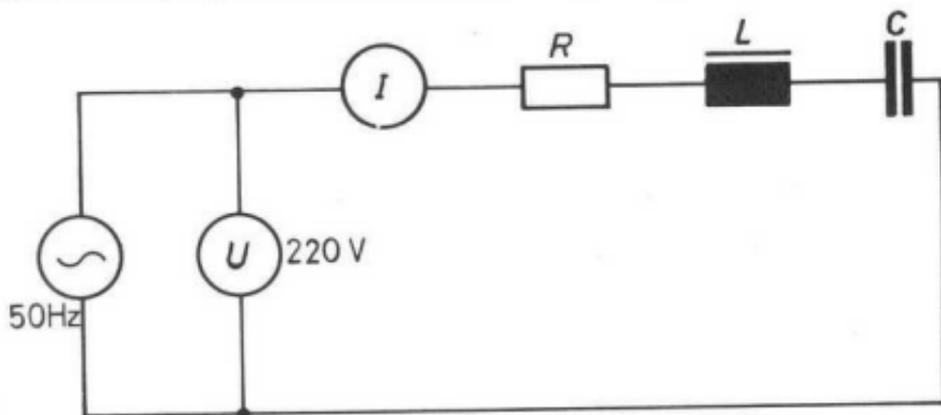


Bild 171

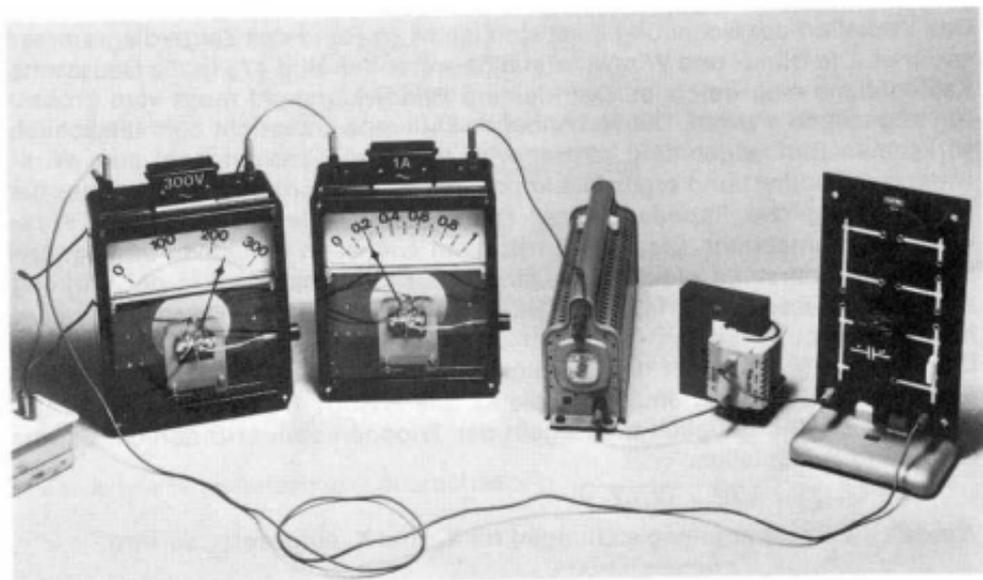
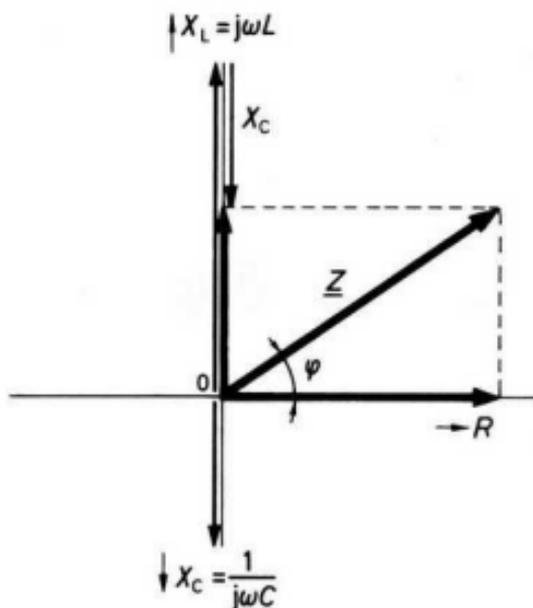


Bild 172



$$\underline{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

$$\underline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Bild 173

dem Wert der Summe der Einzelwiderstände liegt. Das Joch über der Spule wird verschoben und damit der Wert der Induktivität verändert, gleichzeitig ändert sich der Strom durch die Impedanz. Für eine bestimmte Stellung des Joches erreicht der Strom seinen Maximalwert.

Das Verhalten der Schaltung lässt sich leicht an Hand des Zeigerdiagrammes erklären. Die Blind- und Wirkwiderstände werden in Bild 173 in die Gaussche Zahlenebene eingezeichnet. Der kleinere Blindwiderstand muss vom grösseren abgezogen werden. Die verbleibende Differenz entspricht dem tatsächlich wirksamen Blindwiderstand, dieser wird vektoriell (geometrisch) zum Wirkwiderstand addiert und ergibt die Impedanz. Es ist leicht einzusehen, dass die kleinste mögliche Impedanz einer gemischten Serieschaltung dem Wirkwiderstand entspricht. Dieser Fall tritt dann ein, wenn induktiver und kapazitiver Blindwiderstand gleich gross sind und sich demzufolge in der Wirkung aufheben. Dieser Sonderfall wird später als Resonanzfall des Schwingkreises besprochen.

Die Zeigerdiagramme der drei möglichen Fälle für eine Serieschaltung lassen sich in eine Gleichung umsetzen, die es uns erlaubt, die Impedanzen zu berechnen. Es sind lediglich die Regeln der Trigonometrie erforderlich, um die Gleichung aufzustellen.

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Werden die Bestimmungsgleichungen für X_L und X_C eingesetzt, so wird:

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Diese Gleichung gilt für alle Serieschaltungen von R , L und C , wobei ein eventuell fehlendes Element in der Formel einfach weggelassen wird. Es spielt auch keine Rolle, welcher der beiden Blindwiderstände grösser ist. Ergibt sich in der Klammer ein negativer Wert, so fällt das Minusvorzeichen durch das Quadrieren des Ausdruckes wieder weg.

4. Beispiele

Allgemeines Vorgehen:

- Wir stellen zuerst die Gleichungen in Komponentenform auf.
- Da wir aber für die nachfolgenden Rechnungen einen Phasenwinkel φ zwischen Strom und Spannung von $+90^\circ$ bzw. -90° für induktive bzw. kapazitive Widerstände annehmen, ersetzen wir die komplexen Zeiger sofort durch ihre Beträge (Effektivwerte) und lassen die Richtung unberücksichtigt.

a) Zur Schaltung nach Bild 174 sollen folgende Grössen bestimmt werden:

- Strom I durch die Impedanz
- Scheinleistung P_s
- Phasenverschiebung ($\text{tg } \varphi$)
- Blindleistung P_q
- Impedanz Z
- Zeigerdiagramm für die Widerstände
- Wirkleistung P
- Zeigerdiagramm für die Spannungen

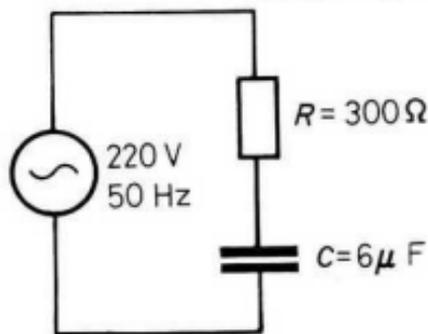


Bild 174

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen des kapazitiven Blindwiderstandes X_C

- Komponentenform
- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}$$

$$[X_C] = \text{s} \cdot \frac{\text{V}}{\text{As}} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega$$

$$X_C = 530 \Omega$$

2. Schritt: Zeichnen des Vektordiagrammes für die Widerstände

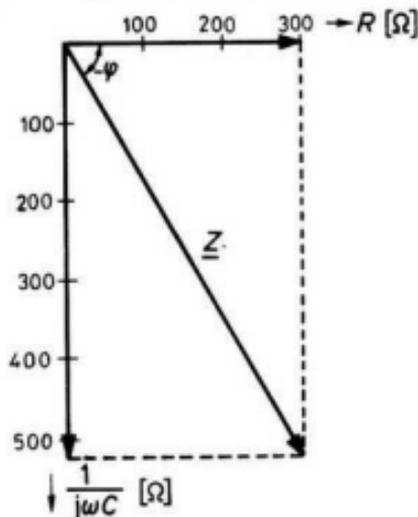


Bild 175

3. Schritt: Berechnen der Impedanz Z

– Komponentenform:

$$\underline{Z} = R + \frac{1}{j\omega C} = R - j\frac{1}{\omega C}$$

– Grundformel anschreiben:

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + \left(-\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$|\underline{Z}| = \sqrt{300^2 + 530^2}$$

$$Z = |\underline{Z}| = 609 \Omega$$

4. Schritt: Berechnen des Stromes I

– Grundformel anschreiben (Effektivwerte)

$$I = \frac{U}{Z}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I = \frac{220}{609} \frac{\text{V}}{\Omega}$$

$$I = 0,362 \text{ A}$$

5. Schritt: Berechnen des $\text{tg}\varphi$

– Grundformel anschreiben

$$\text{tg}\varphi = \frac{-\frac{1}{\omega C}}{R} = -\frac{1}{\omega CR}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\text{tg}\varphi = -\frac{530 \Omega}{300 \Omega}$$

$$\text{tg}\varphi = -1,77$$

- Phasenwinkel $\varphi = -60^\circ 30'$, d. h. die Spannung an der Impedanz Z eilt dem Strom um $60^\circ 30'$ nach.
- Für die Phasenverschiebung ist also das Verhältnis vom kapazitiven bzw. induktiven Widerstand zum Wirkwiderstand massgebend.

6. Schritt: Berechnen der Spannungen U_C und U_R

- Grundformel anschreiben $U_C = I \cdot X_C; U_R = I \cdot R$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $U_C = 0,362 \cdot 530$
 $U_C = 192 \text{ V}$
- $U_R = 0,362 \cdot 300$
 $U_R = 108,5 \text{ V}$

7. Schritt: Zeichnen des Zeigerdiagrammes für die Spannungen

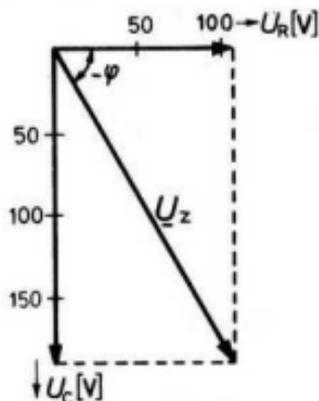


Bild 176

8. Schritt: Berechnen der Leistungen

- Grundformel für $\sin \varphi$ und $\cos \varphi$ anschreiben $\sin \varphi = \frac{X_C}{Z}; \cos \varphi = \frac{R}{Z}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $\sin \varphi = \frac{530}{609}; \cos \varphi = \frac{300}{609}$
 $\sin \varphi = 0,870; \cos \varphi = 0,493$
- Grundformeln für die Leistungen anschreiben $P_S = U \cdot I$
 $P_q = P_S \cdot \sin \varphi$
 $P = P_S \cdot \cos \varphi$
 $P_S = 220 \cdot 0,362$
 $P_S = 79,5 \text{ VA}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $P_q = 79,5 \cdot 0,870$
 $P_q = 69,5 \text{ Var}$
 $P = 79,5 \cdot 0,493$
 $P = 39,2 \text{ W}$

9. Schritt: Kontrolle, P und P_q können auch mit I und U_R sowie U_C bestimmt werden, da Wirkleistung gleichbedeutend ist mit Strom mal Spannung am ohmschen Widerstand und Blindleistung mit Strom mal Spannung am Kondensator. Wenn die Resultate dieser Rechnung gleiche Werte ergeben, dann stimmen die restlichen Berechnungen ebenfalls.

- Formel für die Leistungen anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P = U_R \cdot I$$

$$P_q = U_C \cdot I$$

$$P = 108,5 \cdot 0,362$$

$$P = 39,2 \text{ W}$$

$$P_q = 192 \cdot 0,362$$

$$P_q = 69,5 \text{ Var}$$

10. Schritt: Resultate zusammenstellen

$$I = 0,362 \text{ A}$$

$$P = 39,2 \text{ W}$$

$$\text{tg } \varphi = -1,77$$

$$P_s = 79,5 \text{ VA}$$

$$Z = 608 \Omega$$

$$P_q = 69,5 \text{ Var}$$

b) Zur Schaltung nach Bild 177 sollen folgende Werte bestimmt werden:

- Impedanz Z
- Strom I durch die Impedanz
- Wirkleistung P
- Blindleistung P_q
- Scheinleistung P_s
- Zeigerdiagramm für die Widerstände
- Zeigerdiagramm für die Spannungen

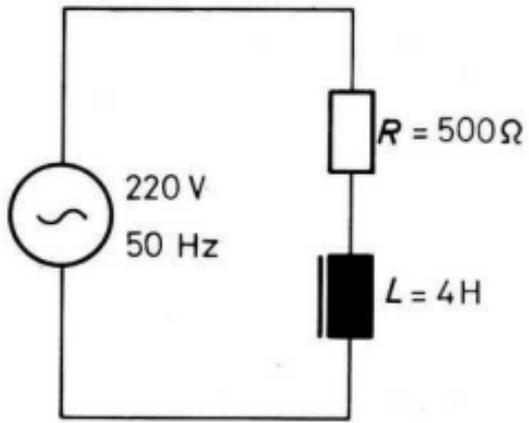


Bild 177

Diese Aufgabe weist den gleichen Lösungsgang auf wie Aufgabe a. Es wird gezeigt wie sich die Aufgabe in weniger Schritten lösen lässt, indem man einzelne Berechnungsvorgänge zusammenfasst.

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung von Impedanz und Strom in einem Rechnungsgang.

– *Komponentenform:* $I = \frac{U}{R + j\omega L}$

– Formel für I anschreiben $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $I = \frac{220}{\sqrt{500^2 + (2\pi \cdot 50 \cdot 4)^2}} \frac{\text{V}}{\Omega}$

$$I = \frac{220}{1352} \frac{\text{V}}{\Omega}$$
$$I = \mathbf{0,1625 \text{ A}}$$
$$Z \equiv |Z| = \mathbf{1352 \Omega}$$

2. Schritt: Berechnung von $\sin \varphi$ und Blindwiderstand in einem Rechnungsgang

– Formel für $\sin \varphi$ anschreiben $\sin \varphi = \frac{\omega L}{Z}$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $\sin \varphi = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 4}{1352} = \frac{1256}{1352}$

$$\sin \varphi = 0,93$$
$$X_L = 1256 \Omega$$

3. Schritt: Berechnen des Leistungsfaktors $\cos \varphi$

– Grundformel für $\cos \varphi$ anschreiben $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $\cos \varphi = \frac{500}{1352}$

$$\cos \varphi = 0,37$$

4. Schritt: Berechnen der Leistungen

– Grundformel für die Leistungen anschreiben $P_s = U \cdot I$

$$P = P_s \cdot \cos \varphi$$
$$P_q = P_s \cdot \sin \varphi$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $P_s = 220 \cdot 0,1625$

$$P_s = \mathbf{35,7 \text{ VA}}$$
$$P = 35,7 \cdot 0,37$$
$$P = \mathbf{13,20 \text{ W}}$$
$$P_q = 35,7 \cdot 0,93$$
$$P_q = \mathbf{33,2 \text{ Var}}$$

5. Schritt: Berechnen der Spannungen U_L und U_R verbunden mit gleichzeitiger Kontrolle der übrigen Berechnungen.

– Grundformel für Spannungen und Leistungen anschreiben

$$U_L = I \cdot X_L \qquad P_q = U_L \cdot I = I^2 \cdot X_L$$

$$U_R = I \cdot R \qquad P = U_R \cdot I = I^2 \cdot R$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_L = 0,1625 \cdot 1256 \qquad P_q = 0,1625 \cdot 204$$

$$U_L = \mathbf{204 \text{ V}} \qquad P_q = 33,2 \text{ Var}$$

$$\text{oder } P_q = 0,1625^2 \cdot 1256 = 33,2 \text{ Var}$$

$$U_R = 0,1625 \cdot 500 \qquad P = 0,1625 \cdot 81,25$$

$$U_R = \mathbf{81,25 \text{ V}} \qquad P = 13,20 \text{ W}$$

$$\text{oder } P = 0,1625^2 \cdot 500 = 13,20 \text{ W}$$

6. Schritt: Zusammenstellen der Resultate

$$Z = \mathbf{1352 \Omega}$$

$$I = \mathbf{0,1625 \text{ A}}$$

$$P_s = \mathbf{35,7 \text{ VA}}$$

$$P = \mathbf{13,20 \text{ W}}$$

$$P_q = \mathbf{33,2 \text{ Var}}$$

7. Schritt: Aufzeichnen der Diagramme

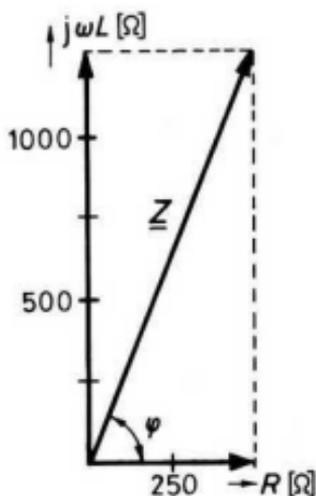


Bild 178

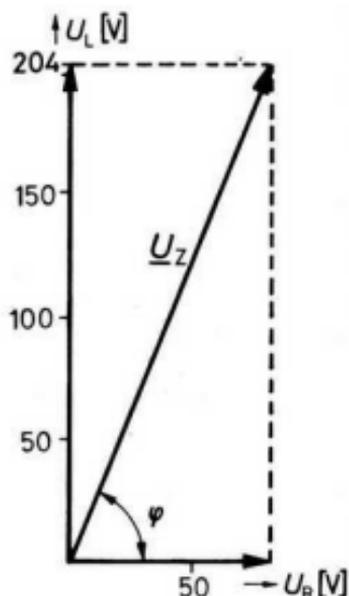


Bild 179

c) Der Serieverlustwiderstand des Kondensators nach Bild 180 ist zu bestimmen.

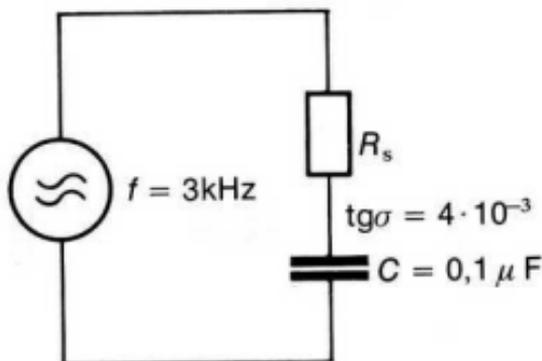


Bild 180

Vorgehen:

- Grundformel für $\text{tg } \delta$ anschreiben (siehe Seite 208)
- Formel nach R_s umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\text{tg } \delta = R_s \cdot \omega \cdot C$$

$$R_s = \frac{\text{tg } \delta}{\omega C}$$

$$R_s = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_s = \mathbf{2,12 \Omega}$$

d) Die Spulengüte der verlustbehafteten Spule nach Bild 181 soll bestimmt werden.

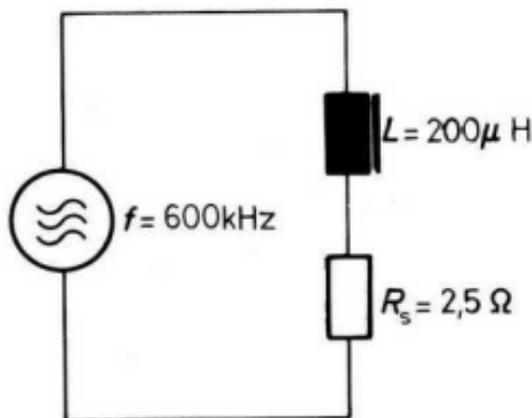


Bild 181

Vorgehen:

- Grundformel für Spulengüte anschreiben (siehe Seite 206)
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q_L = \frac{\omega L}{R_s}$$

$$Q_L = \frac{2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{2,5}$$

$$Q_L = \mathbf{302}$$

e) Für die Schaltung nach Bild 182 sollen folgende Werte ermittelt werden:

- Impedanz Z und Phasenwinkel φ
- Wirkleistung P
- Scheinleistung P_s
- Blindleistung P_q
- Vektordiagramm für die Widerstände

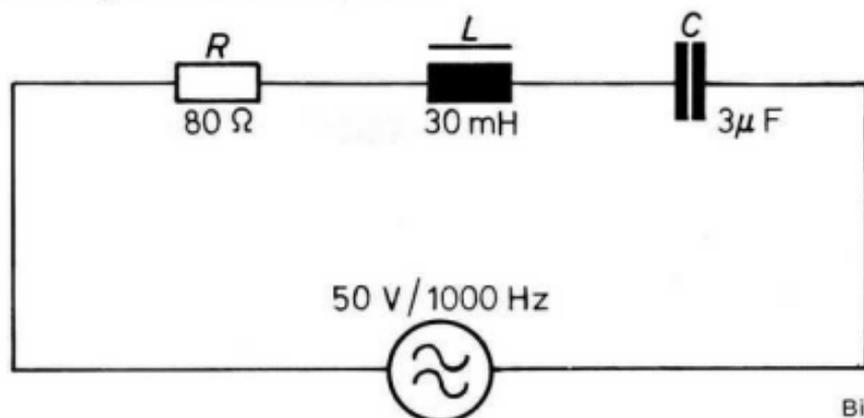


Bild 182

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung von Z

- Komponentenform

$$|\underline{Z}| = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

- Berechnungsformel anschreiben

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$|\underline{Z}| = \sqrt{80^2 + (2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-6}})^2}$$

$$Z = |\underline{Z}| = 157,3 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \varphi = \arctg \frac{X}{R} = 59,4^\circ$$

2. Schritt: Ermitteln von $\cos \varphi$ und $\sin \varphi$

- Berechnungsformel für $\cos \varphi$ anschreiben

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\cos \varphi = \frac{80}{157,3}$$

$$\cos \varphi = 0,508$$

- Berechnungsformel
für $\sin \varphi$ anschreiben

$$\sin \varphi = \frac{(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{Z}$$

- Zahlenwerte gekürzt einsetzen und
ausrechnen

$$\sin \varphi = \frac{(2\pi \cdot 30 - \frac{1}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^{-3}})}{157,3}$$

$$\sin \varphi = 0,86$$

3. Schritt: Berechnen der Leistungen

- Berechnungsformel
für die Leistungen anschreiben

$$P_s = \frac{U^2}{Z}$$

$$P = P_s \cdot \cos \varphi$$

$$P_q = P_s \cdot \sin \varphi$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P_s = \frac{50^2}{157,3}$$

$$P_s = \mathbf{15,88 \text{ VA}}$$

$$P = 15,88 \cdot 0,508$$

$$P = \mathbf{8,07 \text{ W}}$$

$$P_q = 15,88 \cdot 0,86$$

$$P_q = \mathbf{13,65 \text{ Var}}$$

4. Schritt: Berechnung der Widerstände und Kontrolle der übrigen Berechnungen

- Komponentenform

$$|X_L| = j\omega L; |X_C| = \frac{1}{j\omega C}$$

- Grundformel

$$X_L \equiv |X_L| = \omega L \quad X_C \equiv |X_C| = \frac{1}{\omega C}$$

für die Blindwiderstände anschreiben

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_L = 2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-3}$$

$$|X_L| = \frac{1}{s} \cdot \frac{Vs}{A} = \frac{V}{A} = \Omega$$

$$X_L = 188,5 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-6}}$$

$$|X_C| = s \cdot \frac{V}{As} = \frac{V}{A} = \Omega$$

$$X_C = 53,1 \Omega$$

- Kontrolle der Leistungen

- Grundformel

$$P = I^2 \cdot R \quad I = \frac{U}{Z}$$

$$P_q = I^2 \cdot (X_L - X_C)$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I = \frac{50}{157,3}$$

$$I = \mathbf{0,318 \text{ A}}$$

$$\begin{aligned}
 P &= 0,318^2 \cdot 80 \\
 P &= 8,07 \text{ W} \\
 P_q &= 0,318^2 \cdot 135,4 \\
 P_q &= 13,65 \text{ Var}
 \end{aligned}$$

5. Schritt: Resultate zusammenstellen und Zeigerdiagramm aufzeichnen

$$\begin{aligned}
 Z &= 157,3 \text{ Ohm} \\
 \varphi &= 59,4^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \cos \varphi &= 0,508 \\
 \sin \varphi &= 0,86
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &= 8,07 \text{ W} \\
 P_S &= 15,88 \text{ VA} \\
 P_q &= 13,65 \text{ Var}
 \end{aligned}$$

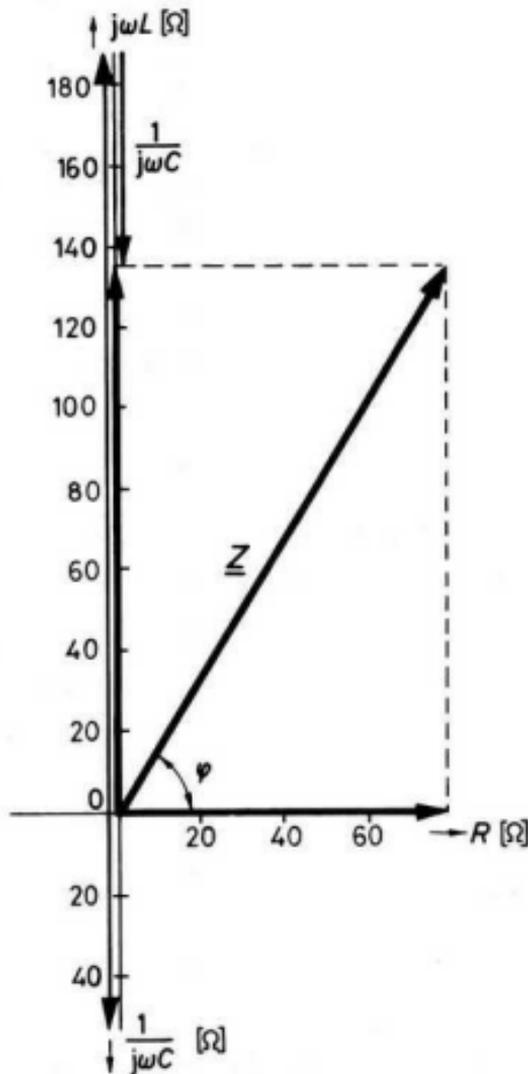


Bild 183

f) In der Schaltung nach Bild 184 soll die Spannung über dem Widerstand errechnet werden. Die Rechnung soll mit Hilfe des Zeigerdiagrammes überprüft werden.

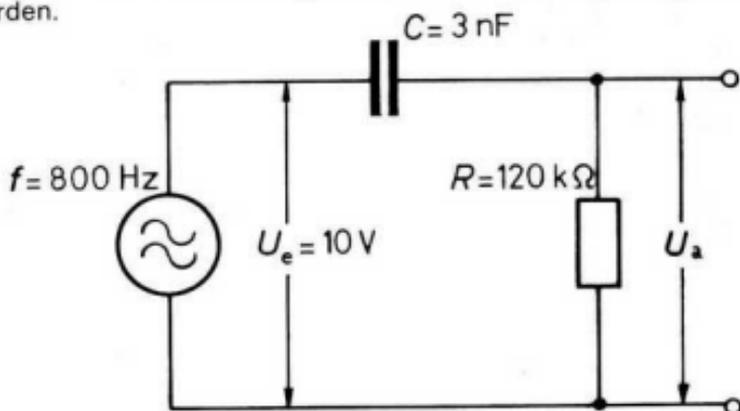


Bild 184

Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen von X_C und Z

Komponentenform

– Grundformel für X_C anschreiben

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}$$

$$X_C = |X_C| = \frac{1}{\omega C}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 0,8 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-9}}$$

$$|X_C| = \frac{\text{sV}}{\text{As}} = \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$X_C = 66,3 \text{ k}\Omega$$

– Grundformel für Z anschreiben

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\begin{aligned} |Z| &= \sqrt{R^2 + X_C^2} \\ |Z| &= \sqrt{(66,3 \cdot 10^3)^2 + (120 \cdot 10^3)^2} \\ Z &\equiv |Z| = 137,1 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

2. Schritt: Bestimmen der Spannung an R

– Grundformel für U_a anschreiben

$$U_a = \frac{U_Z R}{Z}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_a = \frac{10 \cdot 120 \cdot 10^3}{137,1 \cdot 10^3} \frac{\text{V}\Omega}{\Omega}$$

$$U_a = 8,75 \text{ V}$$

3. Schritt: Kontrolle der Rechnung mit Hilfe des Zeigerdiagrammes

– Zeigerdiagramm für die Widerstände aufzeichnen (1 cm = 20 kΩ)

– Z -Achse verlängern auf 10 cm, damit entspricht 1 cm auf dieser Achse 1 V

– Verlängerte Z -Achse auf R -Achse und X_C -Achse projizieren. U_a auf R -Achse abmessen.

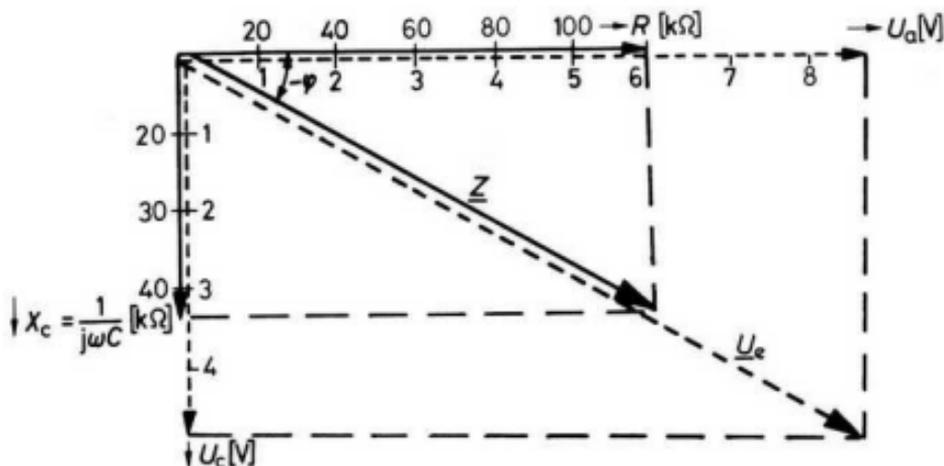


Bild 185

5. Das Wesentliche

Wechselstromgrößen werden in der Gaußschen Zahlenebene dargestellt. Auf der horizontalen reellen Achse werden Wirkwiderstände, Wirkleitwerte sowie Spannungen und Ströme über Wirkwiderständen aufgetragen. Auf der imaginären Achse werden Blindwiderstände, Blindleitwerte sowie Spannungen und Ströme zu Blindwiderständen dargestellt. Die Drehrichtung für die Darstellung von Phasenverschiebungen läuft gegen den Uhrzeigersinn.

Die Teilspannungen über den einzelnen Elementen einer Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen werden geometrisch addiert.

Wirk- und Blindwiderstände von Serieschaltungen werden rechnerisch gleich behandelt wie die Teilspannungen der Schaltung.

Der Wechselstromwiderstand einer Schaltung mit Wirk- und Blindwiderständen heisst Impedanz.

Im Wechselstromkreis unterscheiden wir drei Arten von Leistungen: Die Wirkleistung entspricht der Leistung, die in den Wirkwiderständen in eine andere Energieform umgesetzt wird. Die Blindleistung ist das Produkt von Strom und Spannung über dem wirksamen Blindanteil der Schaltung. Unter Scheinleistung versteht man die von der Impedanz scheinbar aufgenommene Leistung. Diese entspricht dem Produkt von Strom und Spannung an der Impedanz.

Der Kosinus des Phasenverschiebungswinkels φ erlaubt eine einfache Berechnung der Wirkleistung. Multipliziert man die Scheinleistung mit dem Leistungsfaktor $\cos \varphi$, so erhält man die Wirkleistung.

Der Sinus des Phasenverschiebungswinkels φ heisst Blindleistungsfaktor. Wird die Scheinleistung damit multipliziert, so ergibt sich die Blindleistung der Schaltung.

Die Spulengüte Q_L ist ein Mass für die Güte einer Spule. Die gesamten Spulenverluste werden in einem Serieverlustwiderstand zusammengefasst. Das Verhältnis von Blindwiderstand zu Verlustwiderstand ergibt die Spulengüte. Der Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ ist ein Mass für die Verluste in einem Kondensator. Alle Kondensatorverluste werden in einem Serieverlustwiderstand zusammengefasst. Der Tangens des Verlustwinkels δ bringt diese Verluste zum Ausdruck. Der Verlustwinkel δ ist der Komplementärwinkel zum Phasenverschiebungswinkel φ .

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 457)

- Welche Bedeutung hat der Leistungsfaktor $\cos \varphi$?
- Zu was dient der Sinus des Phasenwinkels φ ?
- Erklären Sie die Ausdrücke «Scheinleistung», «Blindleistung» und «Wirkleistung» und nennen Sie die Einheiten, in welchen sie gemessen werden.
- Was sagt die Spulengüte Q_L aus?
- Mit welcher Masseinheit werden Kondensatorverluste gemessen?
- Die Güte einer Spule wird bei 10 MHz gemessen. Bei einer Induktivität von $2 \mu\text{H}$ ergibt sich ein Gütewert von 80. Wie gross ist der Serieverlustwiderstand?
- Ein mit genügend hoher Gleichspannung vorgespannter Elektrolytkondensator von $32 \mu\text{F}$ weist bei 50 Hz einen Serieverlustwiderstand von 5 Ohm auf. Wie gross ist der $\operatorname{tg} \delta$ des Kondensators?
- Bestimmen Sie für die Schaltung nach Bild 186 die Impedanz, den Leistungsfaktor, den Blindleistungsfaktor, Blind-, Wirk- und Scheinleistung, den Phasenwinkel und das Zeigerdiagramm.

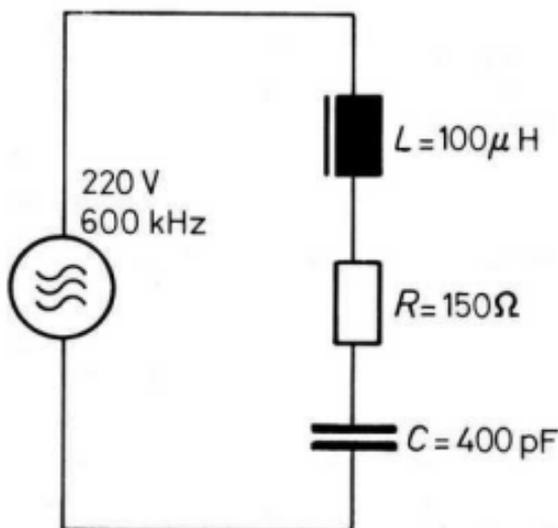


Bild 186

V. Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen

1. Einführung

Parallelschaltungen von Wirk- und Blindwiderständen sind in der Praxis ebenso oft anzutreffen wie Serieschaltungen. Für die Berechnung der Parallelschaltung von Reaktanzen und reellen Widerständen gelten die gleichen Regeln wie für die Parallelschaltung von Widerständen; die Leitwerte werden addiert und ergeben den Gesamtleitwert. Diese Addition wird jedoch unter Berücksichtigung der Phasenlage der Ströme durch die einzelnen Reaktanzen und Widerstände vorgenommen. Dies führt zur vektoriellen Addition der Leitwerte.

2. Was wissen Sie schon über die Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen?

(Lösung Seite 461)

- Welche Bedeutung hat der $\cos \varphi$ in der Parallelschaltung von Reaktanzen mit reellen Widerständen, verglichen mit deren Serieschaltung?
- Welches ist der grundsätzliche Unterschied zwischen der rechnerischen Behandlung der Serieschaltung und der Parallelschaltung von Reaktanzen mit reellen Widerständen?
- Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Leitwert»?
- Welche Begriffe müssen bei der Parallelschaltung eines Kondensators mit einem Widerstand bekannt sein, damit die aufgenommene Blindleistung ermittelt werden kann?
- Ist es möglich, den Gütefaktor Q_L einer Spule zu bestimmen, wenn diese durch einen Parallelwiderstand bedämpft wird?
- Wie verhalten sich in der Gaußschen Zahlenebene die Richtungen der Leitwerte und der zugehörigen Widerstände?

3. Die Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen

a) Parallelschaltung von induktivem Blindwiderstand mit ohmschem Widerstand

Das Arbeitsverhalten der Parallelschaltung wird am folgenden Versuch gezeigt. Die Versuchsschaltung ist in Bild 187 dargestellt, während Bild 188 den Aufbau zeigt.

Zuerst wird die Spule allein an das Netz angeschlossen und der Strom gemessen. Daraufhin wird die gleiche Messung mit dem Widerstand allein wiederholt. Für die nächste Messung werden Spule und Widerstand parallel geschaltet. *Der gemessene Strom ist kleiner als die algebraische Summe der Ströme durch Spule und Widerstand.*

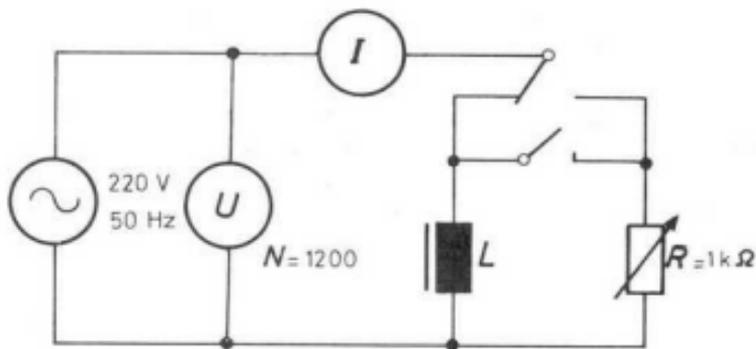


Bild 187

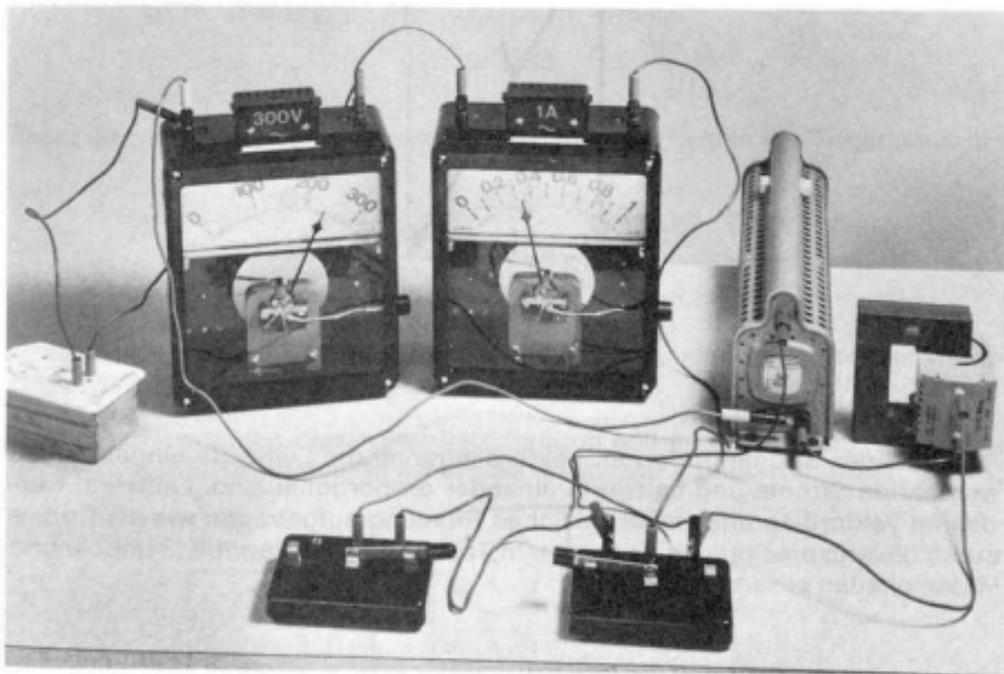


Bild 188

Das bedeutet, dass der Gesamtwiderstand der Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderstand grösser ist, als der Gesamtwiderstand einer entsprechenden Parallelschaltung von zwei Wirkwiderständen. Die Ursache dieser Erscheinung liegt in der Phasenverschiebung zwischen dem Spulenstrom und dem Strom im Wirkwiderstand. Für die Parallelschal-

tung liegt an beiden Elementen die gleiche Spannung. Die Ströme durch diese sind in bezug auf Betrag und Phase verschieden. Der Gesamtstrom lässt sich graphisch im Vektordiagramm ermitteln; rechnerisch wird er durch geometrische Addition der beiden Ströme bestimmt. Der Strom durch den reellen Widerstand wird auf der positiven reellen Achse aufgezeichnet, der Strom durch die Induktivität auf der negativen imaginären Achse, da der Spulenstrom dem Strom durch den Wirkwiderstand um 90° nachhinkt. In Bild 189 wird das zeichnerische Verfahren zur Bestimmung des Gesamtstromes gezeigt.

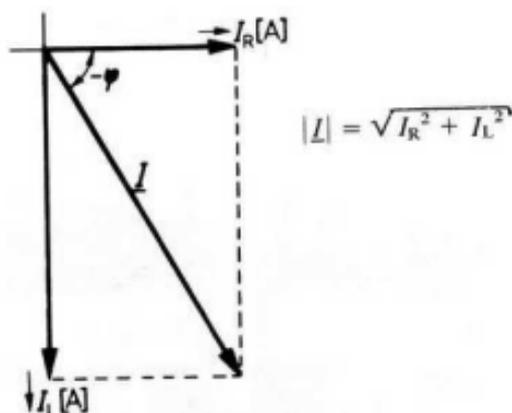


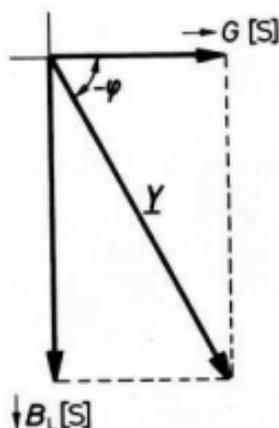
Bild 189

An Stelle der Ströme dürfen im Vektordiagramm die Leitwerte eingezeichnet werden, da Ströme und Leitwerte einander proportional sind. Leitwerte werden im Vektordiagramm in der gleichen Richtung aufgetragen wie die Ströme durch die entsprechenden Leitwerte. In Tabelle 15 sind Begriffe, Symbole und Masseinheiten zusammengestellt.

Begriff:	Symbol:	Masseinheit:
Wirkleitwert	G	Siemens (S)
Blindleitwert	B_L oder B_C	Siemens (S)
Scheinleitwert oder Admittanz	Y	Siemens (S)

Tabelle 15

Bild 190 zeigt das Vektordiagramm einer Parallelschaltung von Induktivität und Widerstand.



$$|Y| = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}$$

Bild 190

Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ errechnet sich nach den Regeln der Trigonometrie:

$$\cos \varphi = \frac{G}{|Y|} \quad \text{oder:} \quad \cos \varphi = \frac{|Z|}{R} \quad \left(G = \frac{1}{R}; \quad |Y| = \frac{1}{|Z|} \right)$$

b) Parallelschaltung von kapazitivem Blindwiderstand und ohmschem Widerstand

Das Arbeitsverhalten dieser Parallelschaltung soll an einem Versuch gezeigt werden. In Bild 191 erkennen wir die Schaltung der Versuchsanordnung.

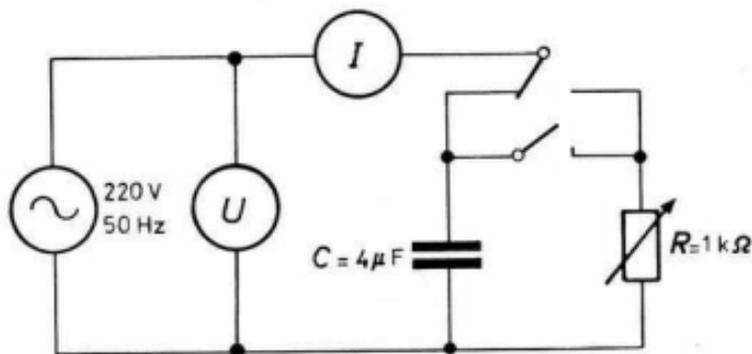


Bild 191

Bild 192 zeigt den Versuchsaufbau.

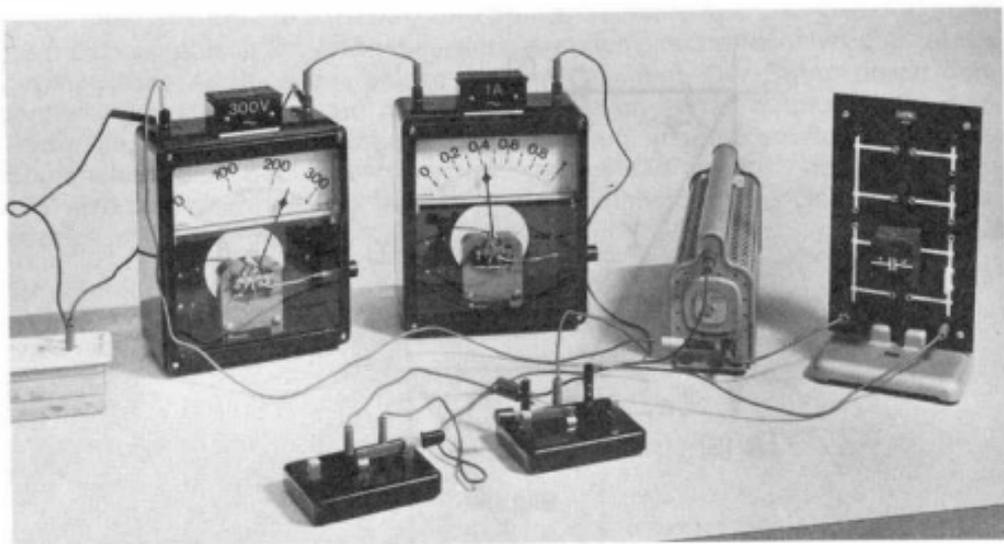


Bild 192

Das Vorgehen ist das gleiche wie beim vorhergehenden Versuch. Die Ströme durch C und R werden einzeln gemessen. Der Gesamtstrom ist wiederum kleiner als die Summe der beiden Einzelströme. Die Schaltung verhält sich analog zur Schaltung mit Spule und Widerstand. Die graphische und rechnerische Behandlung des Problems erfolgt nach denselben Regeln, es ist lediglich zu beachten, dass der Strom durch den Kondensator gegenüber dem Strom durch den Widerstand um 90° voreilt. Bild 193 zeigt das Vektordiagramm der Ströme.

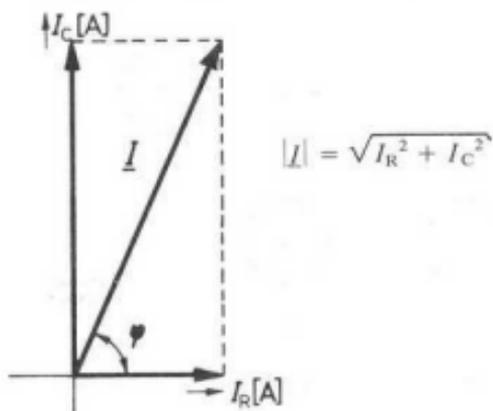


Bild 193

In Bild 194 sind die Leitwerte im Vektordiagramm festgehalten.

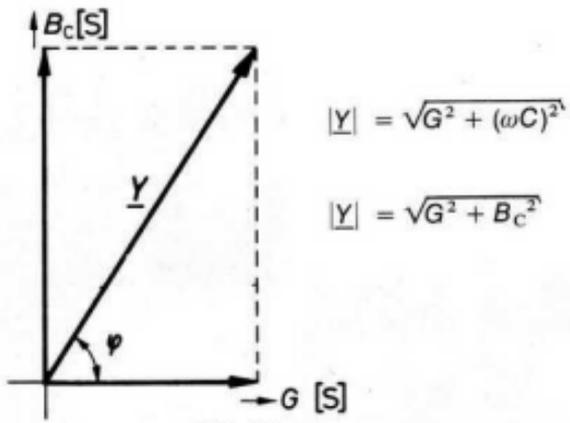


Bild 194

Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ lässt sich aus dem Vektorbild bestimmen.

$$\cos \varphi = \frac{G}{|Y|}$$

c) Parallelschaltung von induktivem und kapazitivem Blindwiderstand mit einem ohmschen Widerstand

Der Versuch nach Bild 195 zeigt uns das Verhalten einer Parallelschaltung von Kondensator, Spule und ohmschem Widerstand.

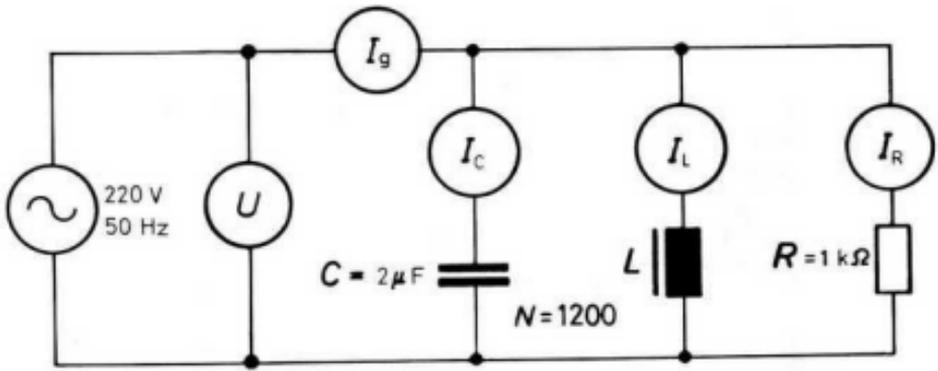


Bild 195

In Bild 196 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

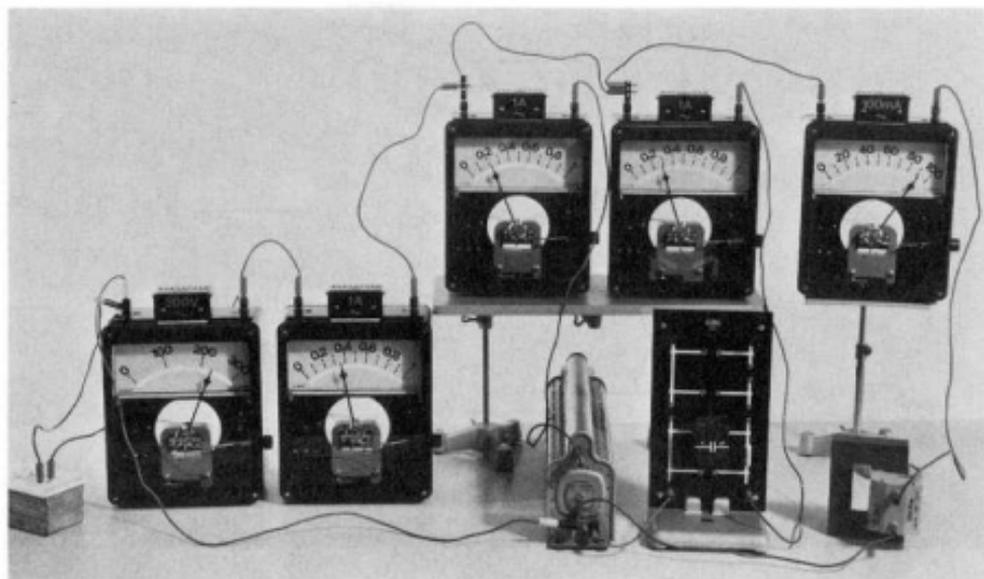
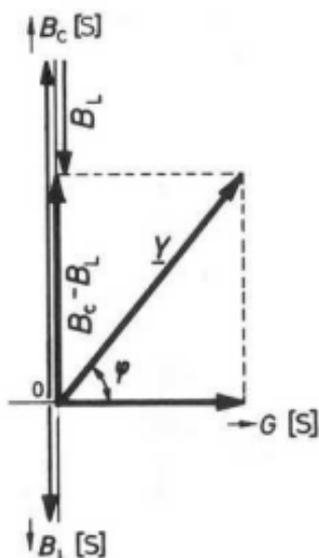


Bild 196

Der Versuch beweist, dass der Gesamtstrom wesentlich kleiner ist, als die Summe der Teilströme. Das Versuchsergebnis wird verständlich, wenn man bedenkt, dass die beiden Blindströme I_L und I_C gegeneinander um 180° phasenverschoben sind. Vektoriell betrachtet heisst das, dass sich diese ent-



$$|Y| = \sqrt{G^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

$$|Y| = \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B}{G}$$

Bild 197

gegenwirken; nur die Differenz der beiden Ströme bleibt wirksam. Dieser wirksame Blindstrom wird zum Wirkstrom geometrisch addiert und ergibt den Gesamtstrom. Je nachdem, welcher der Blindströme überwiegt, wirkt die Schaltung als RC - oder RL -Glied. Ein Sonderfall tritt ein, wenn beide Blindströme gleich gross sind, die Schaltung wirkt dann als ohmscher Widerstand. Bild 197 zeigt, wie der Gesamtleitwert der besprochenen Schaltung vektoriell ermittelt wird. Da der kapazitive Blindleitwert bei dieser Frequenz überwiegt, wirkt die Schaltung als RC -Glied.

4. Beispiele

a) Berechnung einer Parallelschaltung bestehend aus Induktivität und ohmschem Widerstand

Die Schaltung nach Bild 198 ist zu berechnen. Die Rechnung soll mit Hilfe des Vektordiagrammes überprüft werden.

Gesucht:

$Z, I_g, I_L, I_R, P, P_s, P_q,$

$\cos \varphi, \sin \varphi, \angle \varphi$

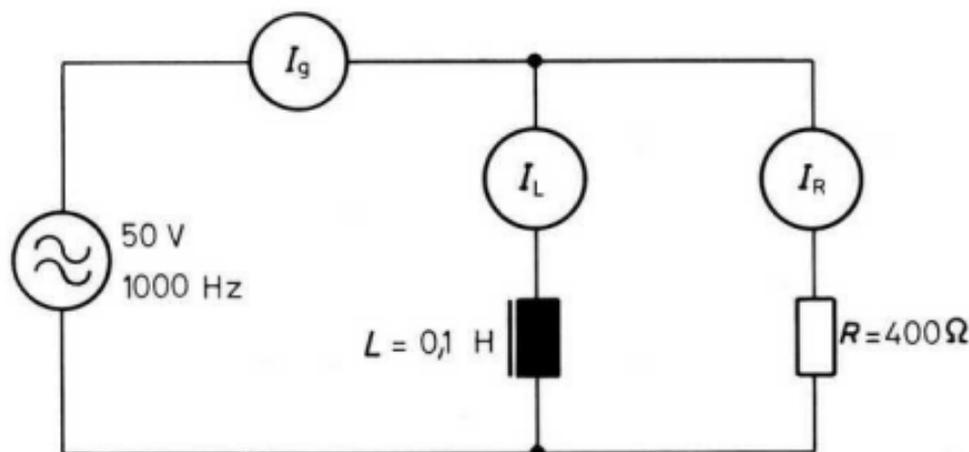


Bild 198

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Leitwerte

– Komponentenform

– Formeln anschreiben

$$G = \frac{1}{R}$$

$$B_L = \frac{1}{j\omega L} = \frac{1}{jX_L} = -j \frac{1}{X_L}$$

$$B_L \equiv |B_L| = \frac{1}{X_L}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $G = \frac{1}{400}$
 $= 2,5 \text{ mS}$

$$B_L = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 0,1} \frac{\text{s A}}{\text{V s}}$$

$$B_L = 1,592 \text{ mS}$$

2. Schritt: Berechnen des Scheinleitwertes

- Grundformel anschreiben

$$|Y| = \sqrt{G^2 + B_L^2}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $Y \equiv |Y| = \sqrt{(2,5 \cdot 10^{-3})^2 + (1,592 \cdot 10^{-3})^2}$

$$Y = 2,96 \text{ mS}$$

3. Schritt: Berechnen von Z

- Grundformel anschreiben:

$$Z = \frac{1}{Y}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $Z = \frac{1}{2,96 \cdot 10^{-3}}$

$$Z = 338 \Omega$$

4. Schritt: Berechnen der Ströme

- Grundformel anschreiben

$$I_g = \frac{U}{Z}$$

$$I_L = U \cdot B_L$$

$$I_R = U \cdot G$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $I_g = \frac{50}{338}$

$$I_g = 0,148 \text{ A}$$

$$I_L = U \cdot B_L = 50 \cdot 1,592 \cdot 10^{-3}$$

$$I_L = 79,6 \text{ mA}$$

$$I_R = U \cdot G = 50 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}$$

$$I_R = 125 \text{ mA}$$

5. Schritt: Berechnung von $\sin \varphi$, $\cos \varphi$ und $\angle \varphi$

- Grundformel anschreiben

$$\cos \varphi = \frac{Z}{R}; \quad \sin \varphi = \frac{Z}{X_L} = Z \cdot B_L$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\cos \varphi = \frac{338}{400}; \quad \sin \varphi = 338 \cdot 1,592 \cdot 10^{-3}$$

$$\cos \varphi = 0,845; \quad \sin \varphi = 0,538$$

$$\sin \varphi = 0,538$$

– Der Winkel φ wird aus der Tabelle abgelesen:

$$\varphi = 32,5^\circ$$

6. Schritt: Berechnen der Leistungen

- Grundformeln anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P_S = U \cdot I$$

$$P_S = 50 \cdot 0,148$$

$$P_S = 7,4 \text{ VA}$$

$$P = P_S \cdot \cos \varphi$$

$$P = 7,4 \cdot 0,845$$

$$P = 6,25 \text{ W}$$

$$P_q = P_S \cdot \sin \varphi$$

$$P_q = 7,4 \cdot 0,538$$

$$P_q = 3,98 \text{ Var}$$

Kontrollen:

$$P = U \cdot I_R$$

$$P = 50 \cdot 0,125$$

$$P = 6,25 \text{ W}$$

$$P_q = U \cdot I_L$$

$$P_q = 50 \cdot 0,0796$$

$$P_q = 3,98 \text{ Var}$$

7. Schritt: Überprüfung der Resultate mit dem Vektordiagramm

In Bild 199 sind der Blind- und der Wirkleitwert aufgetragen. Der Gesamtleitwert wird graphisch ermittelt und mit dem errechneten Wert verglichen. Der Phasenwinkel φ wird mit dem Transporteur gemessen und dem errechneten Wert gegenübergestellt.

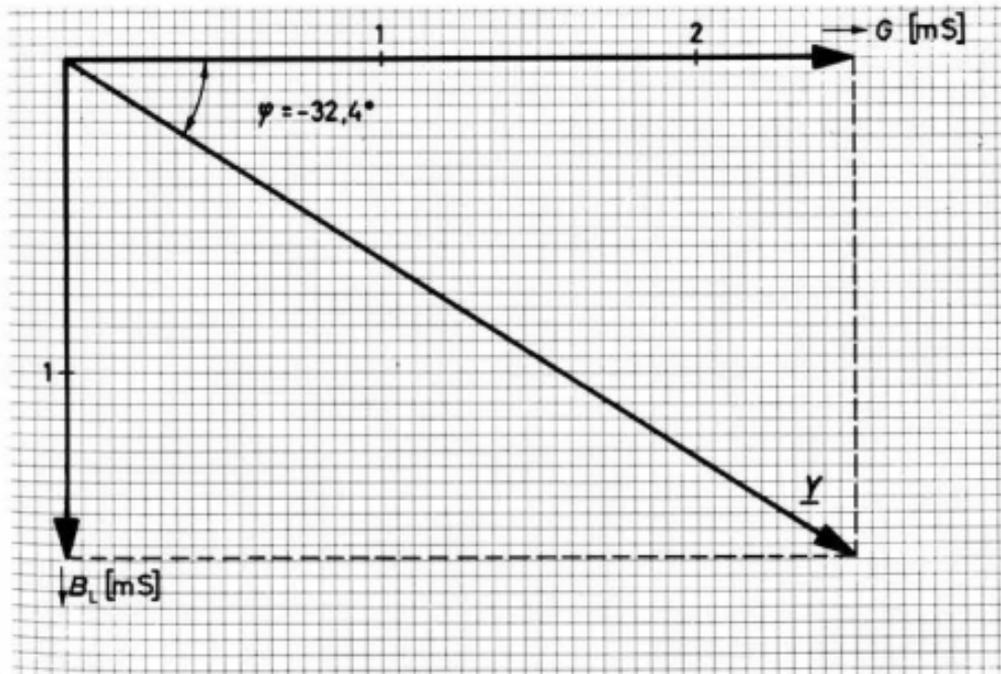


Bild 199

b) Berechnung einer Parallelschaltung bestehend aus einer Kapazität und einem ohmschen Widerstand

Die Schaltung nach Bild 200 ist zu berechnen. Die Rechnung ist mit Hilfe des Vektordiagrammes zu überprüfen.

Gesucht:

$Z, I_g, I_C, I_R, \cos \varphi, \sin \varphi, \angle \varphi$

P, P_s, P_q

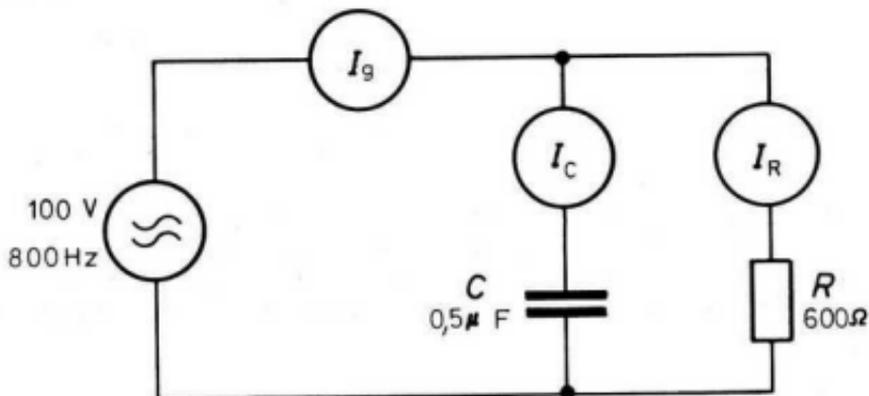


Bild 200

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Leitwerte

– Grundformel anschreiben

$$G = \frac{1}{R}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$G = \frac{1}{600}$$

$$G = 1,667 \text{ mS}$$

– Komponentenform

$$B_C = j\omega C$$

$$B_C \equiv |B_C| = \omega C; \quad [B_C] = \frac{\text{As}}{\text{s} \cdot \text{V}} = \text{S}$$

$$B_C = 2\pi \cdot 0,8 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}$$

$$B_C = 2,513 \text{ mS}$$

2. Schritt: Berechnen des Scheinleitwertes

– Grundformel anschreiben

$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Y \equiv |Y| = \sqrt{1,667^2 \cdot 10^{-6} + 2,513^2 \cdot 10^{-6}}$$

$$Y = 3,015 \text{ mS}$$

3. Schritt: Berechnen der Impedanz Z

– Grundformel anschreiben

$$Z = \frac{1}{Y}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Z = \frac{1}{3,015 \cdot 10^{-3}}$$

$$Z = 332 \, \Omega$$

4. Schritt: Berechnen der Ströme

– Grundformel anschreiben

$$I_B = \frac{U}{Z}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_B = \frac{100}{332}$$

$$I_B = 0,3015 \, \text{A}$$

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

$$I_R = \frac{100}{600}$$

$$I_R = 0,1667 \, \text{A}$$

$$I_C = U \cdot B_C$$

$$I_C = 100 \cdot 2,513 \cdot 10^{-3} \quad \frac{\text{V As}}{\text{sV}}$$

$$I_C = 0,2513 \, \text{A}$$

5. Schritt: Berechnung von $\cos \varphi$, $\sin \varphi$ und $\sphericalangle \varphi$

– Grundformeln anschreiben

$$\cos \varphi = \frac{Z}{R}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\cos \varphi = \frac{332}{600}$$

$$\cos \varphi = 0,553$$

$$\sin \varphi = Z \cdot B_C$$

$$\sin \varphi = 332 \cdot 2,513 \cdot 10^{-3}$$

$$\sin \varphi = 0,834$$

– Der Winkel φ wird aus der Tabelle abgelesen.

$$\varphi = 56,44^\circ$$

6. Schritt: Berechnen der Leistungen

– Grundformeln anschreiben

$$P_S = U \cdot I_g$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P_S = 100 \cdot 0,3015$$

$$P_S = \mathbf{30,15 \text{ VA}}$$

$$P = P_S \cdot \cos \varphi$$

$$P = 30,15 \cdot 0,55$$

$$P = \mathbf{16,67 \text{ W}}$$

$$P_q = P_S \cdot \sin \varphi$$

$$P_q = 30,15 \cdot 0,834$$

$$P_q = \mathbf{25,13 \text{ Var}}$$

Kontrollen:

$$P = U \cdot I_R$$

$$P = 100 \cdot 0,1667$$

$$P = 16,67 \text{ W}$$

$$P_q = U \cdot I_C$$

$$P_q = 100 \cdot 0,2513$$

$$P_q = 25,13 \text{ Var}$$

7. Schritt: Überprüfung der Resultate mit dem Vektordiagramm

In Bild 201 sind der Blind- und der Wirkleitwert aufgetragen. Der Gesamtleitwert wird graphisch ermittelt und mit dem errechneten Wert verglichen. Der

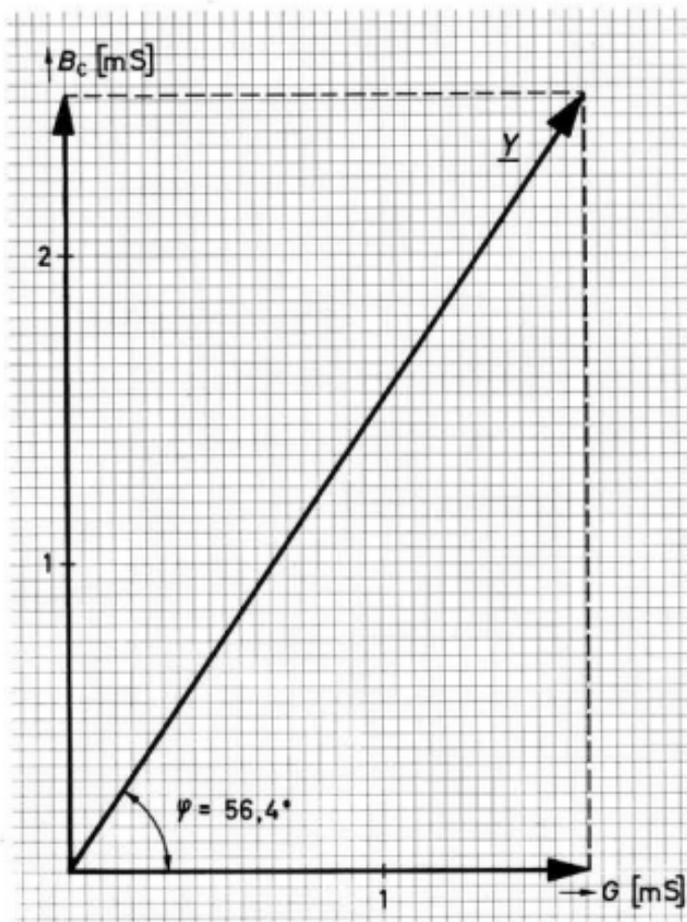


Bild 201

Phasenwinkel φ wird mit dem Winkelmesser gemessen und dem errechneten Wert gegenübergestellt.

c) Berechnung einer Parallelschaltung von Kapazität, Induktivität und ohmschem Widerstand

Die Schaltung nach Bild 202 ist zu berechnen. Die Rechnung soll an Hand des Vektordiagrammes überprüft werden.

Gesucht: $Z, I_g, I_L, I_C, I_R, \cos \varphi,$
 $\sin \varphi, \angle \varphi, P_S, P, P_q$

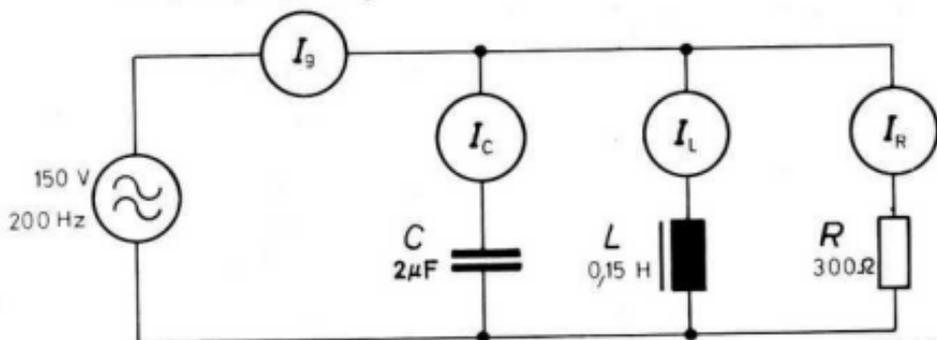


Bild 202

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung der Leitwerte

– Grundformel anschreiben:

$$G = \frac{1}{R}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$G = \frac{1}{300}$$

$$= 3,33 \text{ mS}$$

– Komponentenform

$$B_C = j\omega \cdot C; B_L = -j \frac{1}{\omega L}$$

$$B_C = |B_C| = \omega C$$

$$B_C = 2\pi \cdot 0,2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{\text{As}}{\text{s} \cdot \text{V}}$$

$$B_C = 2,513 \text{ mS}$$

$$B_L = |B_L| = \frac{1}{\omega L}$$

$$B_L = \frac{1}{2\pi \cdot 0,2 \cdot 10^3 \cdot 0,15}$$

$$\frac{\text{s} \cdot \text{A}}{\text{Vs}}$$

$$B_L = 5,31 \text{ mS}$$

2. Schritt: Berechnung des Scheinleitwertes

– Grundformel anschreiben:

$$|Y| = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Y = |Y| = \sqrt{3,33^2 \cdot 10^{-6} + 2,8^2 \cdot 10^{-6}}$$

$$Y = 4,35 \text{ mS}$$

3. Schritt: Berechnung der Impedanz

– Grundformel anschreiben:

$$Z = \frac{1}{Y}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Z = \frac{1}{4,35 \cdot 10^{-3}}$$
$$Z = 230 \, \Omega$$

4. Schritt: Berechnung der Ströme

– Grundformeln anschreiben:

$$I_B = \frac{U}{Z}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_B = \frac{150}{230}$$
$$I_B = 0,652 \, \text{A}$$

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

$$I_R = \frac{150}{300}$$
$$I_R = 0,5 \, \text{A}$$

$$I_L = U \cdot B_L$$

$$I_L = 150 \cdot 5,31 \cdot 10^{-3}$$

$$I_L = 0,796 \, \text{A}$$

$$V \cdot \frac{\text{sA}}{\text{Vs}}$$

$$I_C = U \cdot B_C$$

$$I_C = 150 \cdot 2,51 \cdot 10^{-3}$$

$$I_C = 0,376 \, \text{A}$$

$$V \cdot \frac{\text{As}}{\text{Vs}}$$

5. Schritt: Berechnung von $\sin \varphi$, $\cos \varphi$ und $\sphericalangle \varphi$

– Grundformeln anschreiben:

$$\cos \varphi = \frac{Z}{R}$$

$$\cos \varphi = \frac{230}{300}$$

$$\cos \varphi = 0,767$$

$$\sin \varphi = \frac{B_L - B_C}{Y} = B \cdot Z$$

$$\sin \varphi = 2,8 \cdot 10^{-3} \cdot 230$$

$$\sin \varphi = 0,643$$

– Der Phasenwinkel φ wird aus der Tabelle abgelesen

$$\varphi = -40^\circ$$

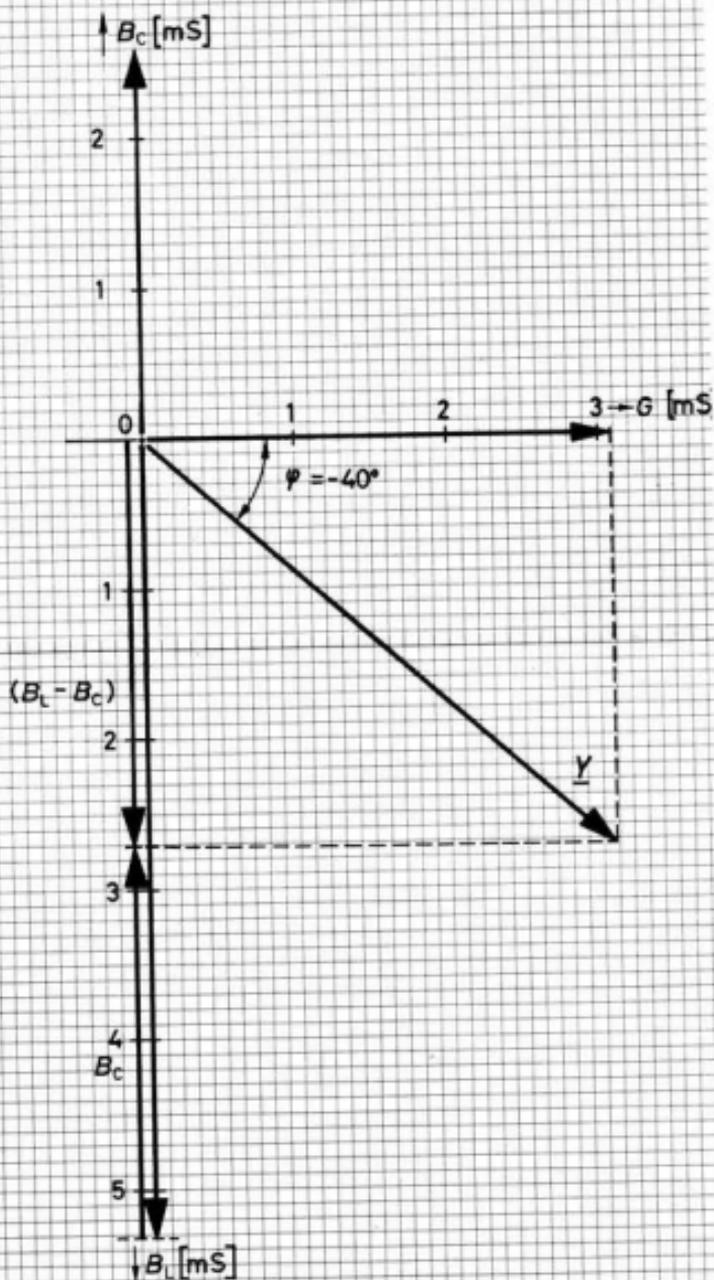


Bild 203

6. Schritt: Berechnen der Leistungen

– Grundformeln anschreiben:

$$P_S = U \cdot I_g$$

$$P_S = 150 \cdot 0,652$$

$$P_S = \mathbf{97,8 \text{ VA}}$$

Kontrollen:

$$P = |U \cdot I_R$$

$$P = 150 \cdot 0,5$$

$$P = 75 \text{ W}$$

– Grundformeln anschreiben:

$$P = P_S \cdot \cos \varphi$$

$$P = 97,8 \cdot 0,767$$

$$P = \mathbf{75 \text{ W}}$$

$$P_q = U \cdot (I_L - I_C)$$

$$P_q = 150 \cdot 0,42$$

$$P_q = 63 \text{ Var}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P_q = P_S \cdot \sin \varphi$$

$$P_q = 97,8 \cdot 0,643$$

$$P_q = \mathbf{62,8 \text{ Var}}$$

– Die kleinen Differenzen zwischen dem Resultat und dem Kontrollresultat entstehen durch die Ungenauigkeit des Rechenschiebers. Diese Ungenauigkeiten dürfen toleriert werden, da die Rechnung trotzdem noch genauer ist als in Wirklichkeit. In der Elektronik werden in der Regel Bauteile mit einer Toleranz von 5% verwendet. Elemente mit einer Genauigkeit von 1% werden in Messgeräten eingesetzt. Die Ablesgenauigkeit von guten Instrumenten liegt bei 1 bis 2%.

7. Schritt: Überprüfung der Resultate mit dem Vektordiagramm

Die Blindleitwerte und der Wirkleitwert werden im Vektordiagramm nach Bild 203 aufgetragen. Aus der Differenz der Blindleitwerte und dem Wirkleitwert erfolgt die graphische Ermittlung des Gesamtleitwertes. Sein Wert wird mit demjenigen der Rechnung verglichen. Der Wert des Phasenwinkels φ wird mit dem Winkelmesser gemessen und mit dem Wert der Rechnung verglichen.

5. Das Wesentliche

Bei der Parallelschaltung bestimmen die Ströme, die durch die einzelnen Zweige fließen, das Verhalten der Schaltung. Die Spannung ist in bezug auf Betrag und Phase für alle Elemente gleich.

Im Vektordiagramm wird die Parallelschaltung durch die Leitwerte dargestellt.

Die Richtung der Vektoren für die Leitwerte im Vektordiagramm ist durch die Richtung des Stromes im betreffenden Leitwert bestimmt.

Für die Berechnung einer Parallelschaltung ist es von Vorteil, wenn zuerst die Leitwerte berechnet und in einem Vektordiagramm aufgezeichnet werden. Die Ermittlung des Gesamtleitwertes und des Phasenwinkels erfolgt dann im Diagramm nach den Regeln der Trigonometrie. Die zeichnerische Lösung des Problems erlaubt eine sofortige und einfache Überprüfung der Rechnung.

Für die graphische Lösung jeder gemischten Parallelschaltung sind die folgenden einfachen Regeln zu beachten:

- Ohmsche Leitwerte werden auf der positiven reellen Achse aufgetragen.
- Kapazitive Leitwerte sind der positiven imaginären Achse zugeordnet.

- Induktive Leitwerte stehen auf der negativen imaginären Achse.
- In Schaltungen mit induktiven und kapazitiven Leitwerten wird die Differenz zwischen den Leitwerten gebildet. Die Richtung des Differenzleitwertes bestimmt, ob sich die Schaltung induktiv oder kapazitiv verhält.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 463)

- Wie wird die Richtung eines Blindleitwertvektors im Vektordiagramm einer Parallelschaltung bestimmt?
- Besteht ein Unterschied zwischen dem Leistungsfaktor $\cos \varphi$ einer Serieschaltung und demjenigen einer Parallelschaltung?
- Definieren Sie den Ausdruck «Induktiver Blindleitwert».
- Definieren Sie den Ausdruck «Kapazitiver Blindleitwert».
- Eine Induktivität von 6 H wird mit einem Widerstand von 900 Ohm parallel geschaltet. Berechnen Sie die Impedanz Z und den Leistungsfaktor $\cos \varphi$ für eine Frequenz von 50 Hz.
Überprüfen Sie die rechnerische Lösung mit dem Vektordiagramm.
- Zur Schaltung der Aufgabe e wird ein Kondensator parallel geschaltet. Wie gross muss seine Kapazität gewählt werden, damit der induktive Blindanteil kompensiert wird, und sich die Schaltung wie ein ohmscher Widerstand verhält?
Überprüfen Sie die Rechnung mit dem Vektordiagramm.
- Berechnen Sie die Schaltung nach Bild 204 und überprüfen Sie die Rechnung mit Hilfe des Vektordiagrammes.

Gesucht:

$Z, P_s, P, P_q, \cos \varphi, \sin \varphi, \angle \varphi$

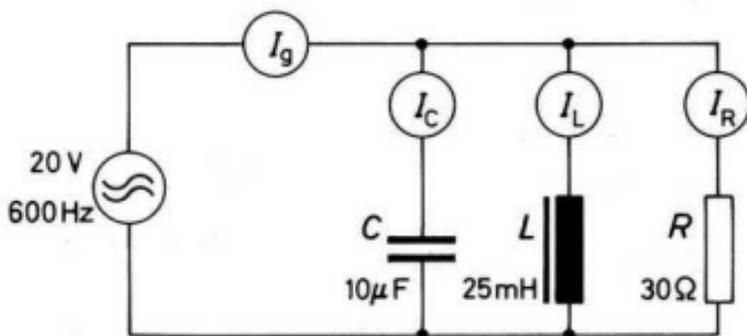


Bild 204

VI. Der Transformator

1. Einführung

Der Transformator ist aus der Elektrotechnik nicht mehr wegzudenken. Die Starkstromtechnik bedient sich der Grosstransformatoren für Elektrizitätswerke, in elektrischen Apparaten werden die benötigten Speisespannungen aus Netztransformatoren gewonnen, während in Niederfrequenzgeräten Transformatoren als Tonfrequenzübertrager eingesetzt sind. Der Transformator ist ein Bauelement, ohne das die meisten Schaltungen und Geräte undenkbar wären. Wir werden dem Transformator vorwiegend in Speisegeräten und Niederfrequenzschaltungen begegnen. Er dient der Übertragung elektrischer Wechselstrom- oder Impulsleistung.

2. Was wissen Sie schon über den Transformator?

(Lösung Seite 469)

- Aus welchen Teilen besteht ein Transformator für Niederfrequenzspannungen?
- Welches ist die Aufgabe von Netztransformatoren?
- Welche Grösse bestimmt das Übersetzungsverhältnis zwischen Primärspannung und Sekundärspannung?
- Warum ist der Eisenkern des Transformators lamelliert?
- Welches ist die Aufgabe des Eisenkernes?
- Gibt es Transformatoren ohne Eisenkern?

3. Der Transformator

a) Der Kopplungsfaktor k

Der Kopplungsfaktor k ist ein Mass für die Kopplung von Spulen. Bild 205 zeigt gekoppelte Spulen im Schnitt.

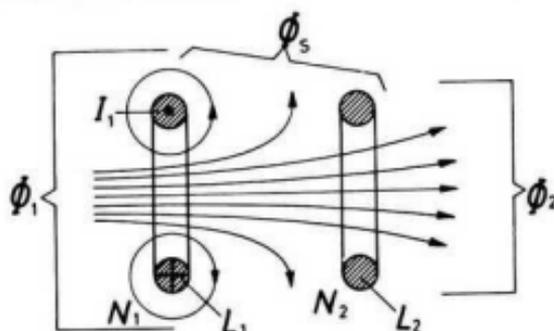


Bild 205

Wird die Primärspule L_1 von einem Wechselstrom durchflossen, so baut sich ein magnetisches Wechselfeld auf. Der gesamte Fluss dieses Feldes wird mit Φ_1 bezeichnet. Ein Teil des Primärflusses Φ_1 schneidet die Windungen der Sekundärspule L_2 . Dieser Flussanteil wird Φ_2 genannt. Ein Teil des Primärflusses beeinflusst die Sekundärwicklungen nicht, er geht für die Sekundärspule verloren. Dieser *Streufloss* trägt die Bezeichnung Φ_s .

Der Kopplungsfaktor der Spule L_1 mit der Spule L_2 gibt an, wie eng die Spulen miteinander gekoppelt sind. Er wird ausgedrückt durch das Verhältnis des Flusses, der die Sekundärwicklungen schneidet, zum gesamten Primärfluss.

$$k = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}$$

Als Symbol für den Kopplungsfaktor dient der Buchstabe k .

Der Kopplungsfaktor hat keine Dimension, er ist ein reiner Zahlenwert, der im günstigsten Fall, das heisst bei maximaler Kopplung der Spulen, Eins wird.

Wird durch die Spule L_2 ein Wechselstrom geschickt, so beeinflusst ein Teil des Flusses Φ_2 die Spule L_1 . Der Kopplungsfaktor der Spule L_2 mit der Spule L_1 ergibt sich dann aus dem Verhältnis vom Fluss Φ_1 zum Fluss Φ_2 .

b) Der Streufaktor σ

Der Streufaktor σ ist ein Mass für die Streuung, die zwischen zwei gekoppelten Spulen auftritt.

Der Streufaktor der Spule L_1 zur Spule L_2 wird durch das Verhältnis des Streufusses zum gesamten Primärfluss ausgedrückt.

$$\sigma = \frac{\Phi_s}{\Phi_1}$$

Als Symbol dient der griechische Buchstabe σ (sigma)

Der Streufaktor hat keine Dimension, er ist ein reiner Zahlenwert, der im günstigsten Fall, das heisst bei maximaler Kopplung der Spulen, Null wird.

Der Streufaktor der Spule L_2 zur Spule L_1 wird durch das Verhältnis des Streufusses zum Fluss in L_2 ausgedrückt.

c) Die Gegeninduktivität M

Die Gegeninduktivität M ist ein Mass für die Beeinflussung zweier gekoppelter Spulen über den gemeinsamen Anteil des magnetischen Feldes.

Die Gegeninduktivität ergibt sich aus dem Produkt aus Windungszahl und dem magnetischen Leitwert des gemeinsamen Feldanteiles.

$$M = \frac{\Phi_2}{i_1} \cdot N_2 ; [M] = \frac{Vs}{A} = H \quad (\mu r = \text{konstant})$$

Als Symbol wird der Buchstabe M verwendet.

Die Masseinheit ist das Henry oder die Voltsekunde pro Ampère.

Bild 206 zeigt den Zusammenhang zwischen Gegeninduktivität und induzierter Spannung.

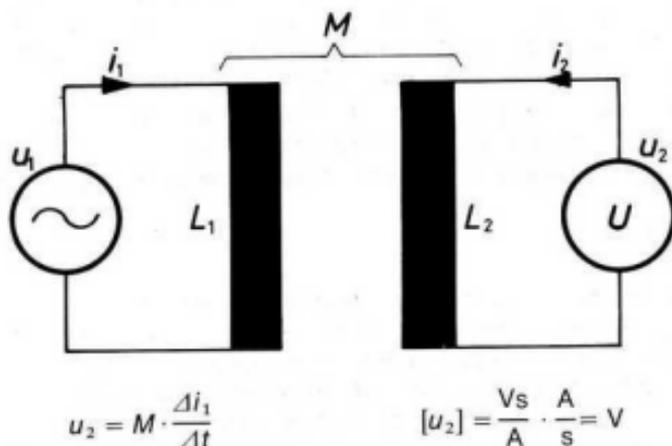


Bild 206

Eine Feldänderung, hervorgerufen durch eine Stromänderung in der Spule L_1 , erzeugt in der Spule L_2 eine Gegeninduktionsspannung. Die Grösse dieser induzierten Spannung ist von der Feldänderung und der Gegeninduktivität abhängig.

Wir erinnern uns, dass die Selbstinduktionsspannung in einer einzelnen Spule durch die Stromänderung pro Zeiteinheit und die Induktivität der Spule bestimmt wird.

$$u = \frac{\Delta i}{\Delta t} \cdot L; [u] = \frac{A}{s} \cdot \frac{Vs}{A} = V$$

Die Gleichung in Bild 206 lässt erkennen, dass bei grösser werdender Gegeninduktivität die induzierte Spannung an Spule L_2 ansteigt. Wenn der Kopplungsfaktor so eng gemacht wird, dass L_2 vom gesamten Fluss der Spule L_1 durchflossen wird ($k = 1$) und die Windungszahlen der Spulen gleich sind, so erreicht die Gegeninduktivität den Wert der Primärinduktivität. Für diesen Fall entspricht die in L_2 induzierte Spannung der Spannung an L_1 .

d) Zusammenhang zwischen Kopplungsfaktor, Gegeninduktivität und Streufaktor

Der Kopplungsfaktor zwischen der Spule L_1 und der Spule L_2 bildet mit dem Kopplungsfaktor der Spule L_2 zur Spule L_1 den Gesamtkopplungsfaktor. Dieser ergibt sich aus dem geometrischen Mittel der beiden Kopplungsfaktoren.

$$k = \sqrt{k_{12} \cdot k_{21}}$$

- k = Gesamtkopplungsfaktor
- k_{12} = Kopplungsfaktor zwischen der Spule L_1 und der Spule L_2
- k_{21} = Kopplungsfaktor zwischen der Spule L_2 und der Spule L_1

Der Zusammenhang zwischen Streu- und Kopplungsfaktor lautet:

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

- σ = Streufaktor
- k = Gesamtkopplungsfaktor

Die Gegeninduktivität zwischen den Spulen L_1 und L_2 entspricht dem Produkt aus Gesamtkopplungsfaktor mal geometrisches Mittel aus den beiden Induktivitäten.

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

- M = Gegeninduktivität
- k = Gesamtkopplungsfaktor
- L_1 = Induktivität der Spule L_1
- L_2 = Induktivität der Spule L_2

Die Begriffe Kopplungsfaktor, Gegeninduktivität und Streuung werden uns noch oft begegnen. Es geht nicht darum, dass die Formeln, die diese Begriffe umschreiben, auswendig gelernt werden. Wesentlich ist vielmehr, dass die Begriffe in ihrer Bedeutung verstanden werden.

Der Kopplungsfaktor wird bei Transformatoren möglichst hoch gemacht, um die Streuung möglichst klein zu halten. Streuung bedeutet für den Transformator Herabsetzung des Wirkungsgrades.

e) Definition des Transformators

Der Transformator besteht aus induktiv gekoppelten Spulen. Er wird zum Transformieren von Wechselspannungen und Wechselströmen, zur Impedanzanpassung und zur Erzeugung von Impulsen verwendet.

f) Symbole für Transformatoren

In Bild 207 sind die gebräuchlichsten Transformatorsymbole zusammengestellt.



Bild 207a Transformator mit Eisenkern



Bild 207b Transformator mit Ferritkern



Bild 207c Lufttransformator

g) Funktionsprinzip

Der Versuch nach der in Bild 208 gezeigten Schaltung zeigt das Funktionsprinzip des Transformators. Bild 209 hält den Versuchsaufbau fest.

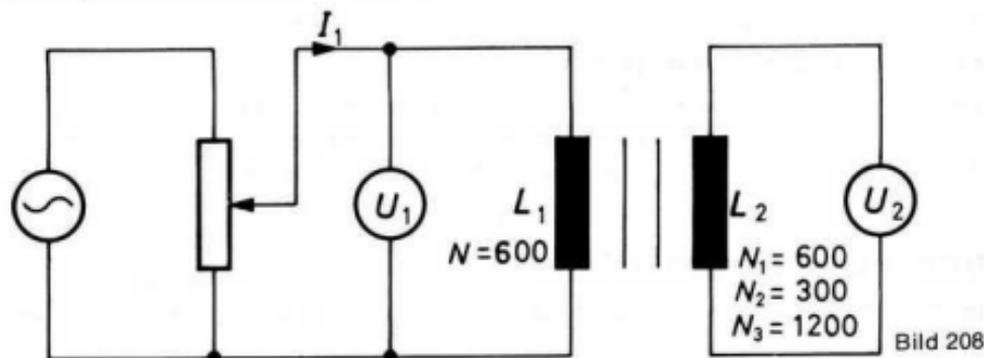


Bild 208

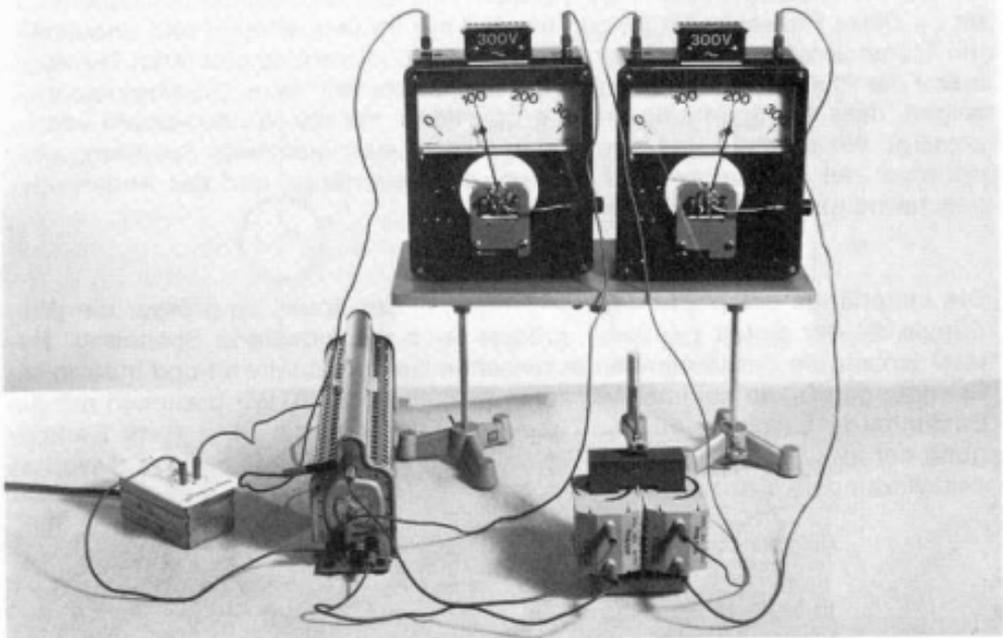


Bild 209

Die Spannung an der Spule L_1 wird zu Beginn des Versuches mit dem Schiebewiderstand R auf Null gestellt. Die Spulen L_1 und L_2 haben beide 600 Windungen. Der geschlossene Eisenkern sorgt für eine enge magnetische Kopplung. Der Kopplungsfaktor ist gross, sein Wert liegt nahe bei Eins. Der Wert der Gegeninduktivität erreicht deshalb beinahe den Wert der Induktivität der Spule L_1 , da beide Spulen die gleiche Windungszahl aufweisen.

Die Spannung an L_1 wird schrittweise erhöht und dabei gleichzeitig die Spannung an L_2 beobachtet. Beide Spannungen sind gleich gross.

Für die folgende Messreihe wird die Spule L_2 ausgetauscht. Die neue Spule L_2 hat 300 Windungen. Die Spannung an L_2 beträgt jetzt für jede Messung die Hälfte der Spannung an L_1 .

Für eine dritte Messreihe wird als L_2 eine Spule mit 1200 Windungen verwendet. Die Spannung an L_2 ist nunmehr für alle Messungen doppelt so gross wie die Spannung an L_1 .

Die Erklärung der Resultate der Messreihen führt uns zum Begriff der Selbstinduktion zurück. Der Strom I_1 erzeugt in der Spule L_1 ein magnetisches Wechselfeld. Dieses Feld verursacht eine Selbstinduktionsspannung, welche gegen die Gegeninduktionsspannung gerichtet ist. Das gleiche Feld induziert in der Spule L_2 eine Spannung. Bei gleichem Wicklungssinn der Spulen ist die Spannung an L_2 gegenüber der Netzspannung um 180° phasenverschoben,

da sie die gleiche Phasenlage aufweist wie die Selbstinduktionsspannung an L_1 . Diese Phasenbedingungen werden nur im verlustfreien und unbelasteten Transformator erfüllt. Unter Belastung wird im verlustbehafteten Transformator die Phasenverschiebung immer kleiner als 180° sein. Die Messresultate zeigen, dass die Spannung an L_2 proportional mit der Windungszahl von L_2 ansteigt. Wir erinnern uns, dass die in einem Leiter induzierte Spannung proportional der magnetischen Induktion, der Leiterlänge und der Änderungsgeschwindigkeit des Magnetfeldes ist.

$$U = B \cdot l \cdot v; [U] = \frac{Vs}{m^2} \cdot m \cdot \frac{m}{s} = V$$

Die Leiterlänge entspricht der Windungszahl der Spule. Je grösser die Windungszahl der Spule L_2 , desto grösser wird die induzierte Spannung. Betrachten wir die Zusammenhänge zwischen Gegeninduktivität und induzierter Spannung in L_2 , so kommen wir zum gleichen Resultat. Wir brauchen nur die Bestimmungsgleichung für die Gegeninduktivität in die Formel zur Berechnung der induzierten Spannung einzusetzen, um festzustellen, dass diese von der Windungszahl abhängt.

$$\text{Gegeninduktivität } M = \frac{\Delta\Phi_2}{\Delta i_1} \cdot N_2$$

$$\text{Induzierte Spannung } u \text{ in } N_2 \quad u = M \frac{\Delta i_1}{\Delta t}$$

$$\begin{aligned} \text{daraus folgt: } u_2 &= \frac{\Delta\Phi_2}{\Delta i_1} \cdot N_2 \frac{\Delta i_1}{\Delta t} \\ &= \frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t} \cdot N_2; [u_2] = \frac{Vs}{s} = V \end{aligned}$$

Diese Gleichung zeigt deutlich, dass die Grösse der in L_2 induzierten Spannung proportional der Windungszahl und der Gegeninduktivität ist.

Die Spule L_1 wird *Primärspule* genannt, die Spule L_2 *Sekundärspule*. Man spricht deshalb von *Primärspannung* für U_1 und von *Sekundärspannung* für U_2 .

Das Verhältnis von N_1 zu N_2 heisst *Übersetzungsverhältnis*.

$$\bar{u} = \frac{N_1}{N_2}$$

Wir fassen zusammen:

- Im unbelasteten, verlustfreien Transformator herrscht zwischen Primärspannung und Sekundärspannung eine Phasenverschiebung von 180° .
- Die Spannungen an den Wicklungen verhalten sich proportional zu den Windungszahlen.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \bar{u}$$

Der folgende Versuch erbringt den Beweis, dass auch zwischen Primärstrom und Sekundärstrom eine Phasenverschiebung von 180° herrscht. Bild 210 zeigt die Schaltung des Experimentes. Bild 211 stellt den Versuchsaufbau vor.

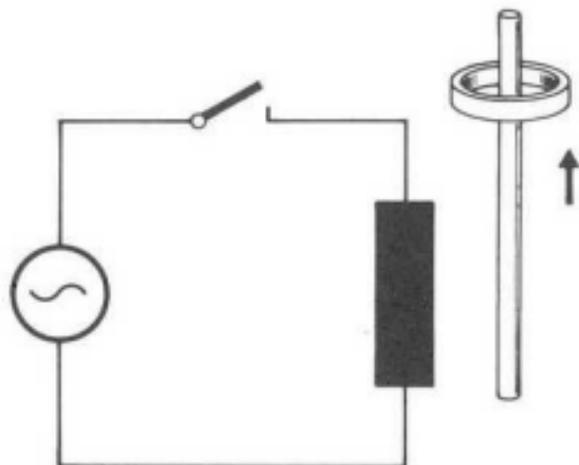


Bild 210

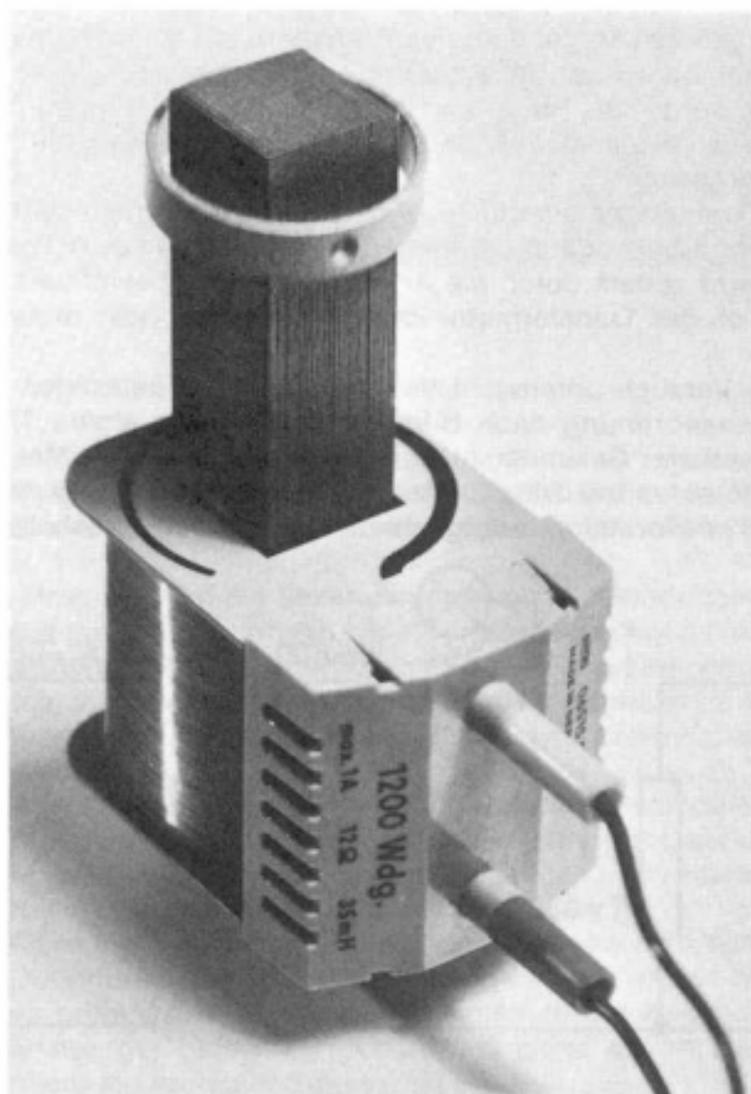


Bild 211

Sobald der Stromkreis der Primärspule geschlossen wird, springt der Aluminiumring nach oben und verbleibt in schwebendem Zustand. Will man den Ring nach unten drücken, so muss dazu eine gewisse Kraft aufgewendet werden. Wird er losgelassen, so springt er in die Schwebelage zurück. Das Verhalten des Ringes lässt sich wie folgt erklären:

Der Ring wirkt als kurzgeschlossene Sekundärwicklung mit extrem kleinem ohmschem Widerstand. Der induktive Blindwiderstand ist bedeutend grösser als der reelle Widerstand. Der Ring wirkt wie ein beinahe idealer induktiver Verbraucher. Der Ringstrom eilt der Ringspannung um fast 90° nach. Das vom Primärstrom erzeugte magnetische Wechselfeld induziert im Ring eine Spannung, die zur Primärspannung um 180° phasenverschoben ist. Da die Phasenverschiebung zwischen Primärstrom und Primärspannung ebenfalls fast 90° beträgt, besteht zwischen Primärstrom und Sekundärstrom eine Phasenverschiebung von angenähert 180° . Der Sekundärstrom erzeugt im Ring ein Magnetfeld, das dem Magnetfeld des Primärstromes entgegengesetzt ist. Die beiden Magnetfelder üben aufeinander eine abstossende Wirkung aus. Als Folge davon wird der Ring von der Primärspule weggedrängt. In der Schwebelage ist die abstossende Kraft des Magnetfeldes mit der Schwerkraft im Gleichgewicht.

Infolge der Transformatorverluste wird die Phasenverschiebung zwischen Primärstrom und Sekundärstrom immer kleiner als 180° sein. Die Phasenlage der Ströme wird zudem durch die Art der Belastung beeinflusst. Es ist nicht gleichgültig, ob der Transformator kapazitiv, induktiv oder rein reell belastet wird.

Der folgende Versuch untersucht das Verhalten des belasteten Transformators. Die Messanordnung nach Bild 212 besteht aus einem Transformator mit auswechselbarer Sekundärspule. Für die verschiedenen Messungen werden Sekundärspulen mit 300, 600 und 1200 Windungen verwendet. Die Belastung des Transformators erfolgt durch zwei parallel geschaltete Glühlampen.

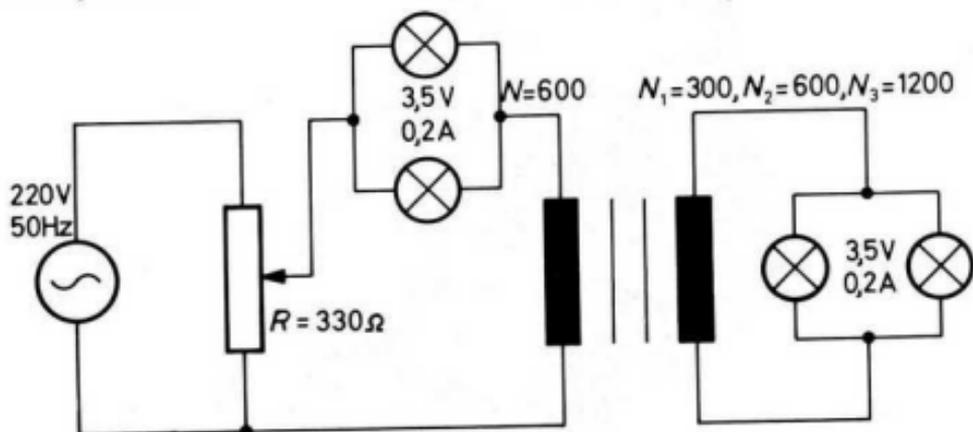


Bild 212

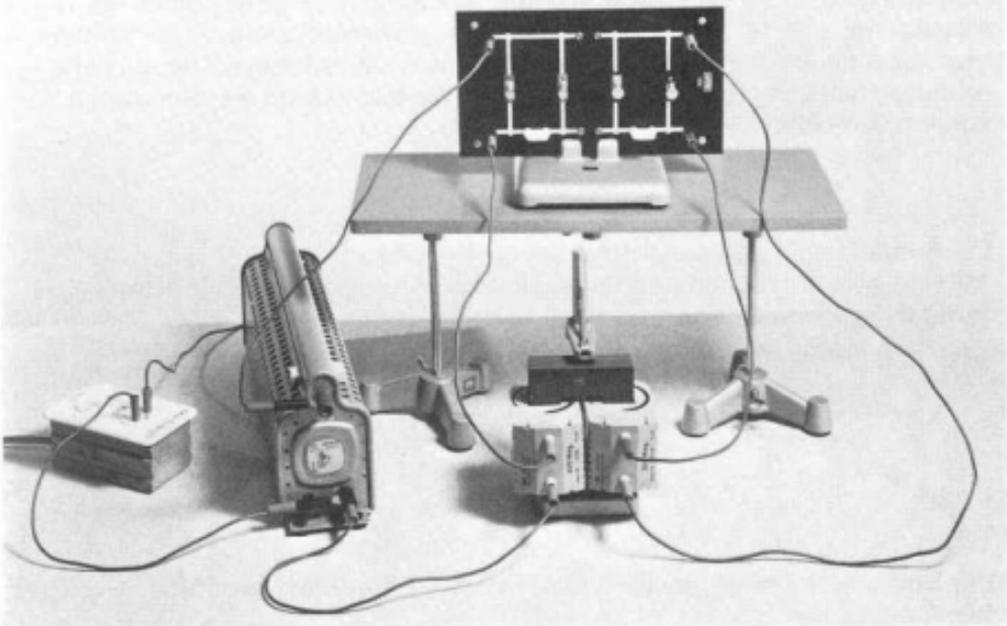


Bild 213

pen 3,5V/0,2A. Der Primärstrom wird durch zwei parallel geschaltete Glühlampen mit denselben elektrischen Daten angezeigt. Bild 213 zeigt den Versuchsaufbau.

Für die erste Messung wird die Sekundärspule mit 300 Windungen verwendet. Die Primärspule mit 600 Windungen bleibt für alle Messungen dieselbe.

Die Primärspannung wird soweit erhöht, bis die beiden Lämpchen im Sekundärkreis normal hell brennen. Die Lämpchen im Primärkreis brennen mit halber Helligkeit; wird eines davon ausgedreht, so brennt das andere mit normaler Intensität.

Für die folgende Messung wird die Windungszahl der Sekundärspule auf 600 erhöht. Die Primärspannung wird wiederum so weit erhöht, bis die Indikatorlampen im Sekundärkreis normal brennen. Diejenigen im Primärkreis brennen mit gleicher Helligkeit wie diejenigen im Sekundärkreis.

Die nächste Messung wird mit einer Sekundärspule von 1200 Windungen vorgenommen. Die Primärspannung wird so lange vergrößert, bis die Lämpchen im Primärkreis normal hell brennen. Die Lämpchen des Sekundärkreises erzeugen dabei nur die halbe Helligkeit. Wird eines davon ausgedreht, so brennt das andere mit normaler Stärke.

Die Messreihe beweist, dass beim Transformator das Produkt aus Strom und Spannung für die Primärseite und die Sekundärseite gleich gross ist. Diese Aussage ist nur für den verlustfreien Transformator genau. Der Wirkungsgrad der meisten grösseren Transformatoren ist jedoch so hoch, dass für grundsätzliche Überlegungen die Verluste vernachlässigt werden dürfen. Wir können schreiben:

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

Die Primärleistung entspricht der Sekundärleistung.

Mit Hilfe einer einfachen Umformung lassen sich die Ströme in eine Beziehung zum Übersetzungsverhältnis bringen.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}, U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \text{ daraus: } \frac{U_1 \cdot I_1}{I_2} = U_2 \text{ daraus:}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \text{ daraus: } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\bar{u}}$$

Die Ströme im Transformator verhalten sich umgekehrt proportional zu den Windungszahlen

Der Einfluss des Eisenkernes wird im folgenden Versuch gezeigt. In der Versuchsanordnung nach Bild 214 und 215 wird die Sekundärspannung gemessen.

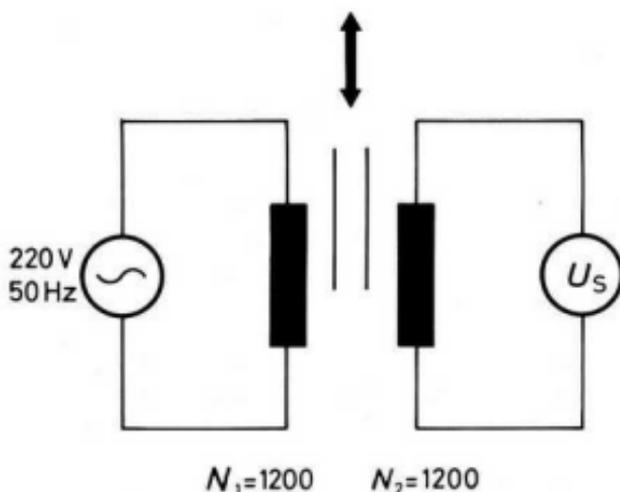


Bild 214

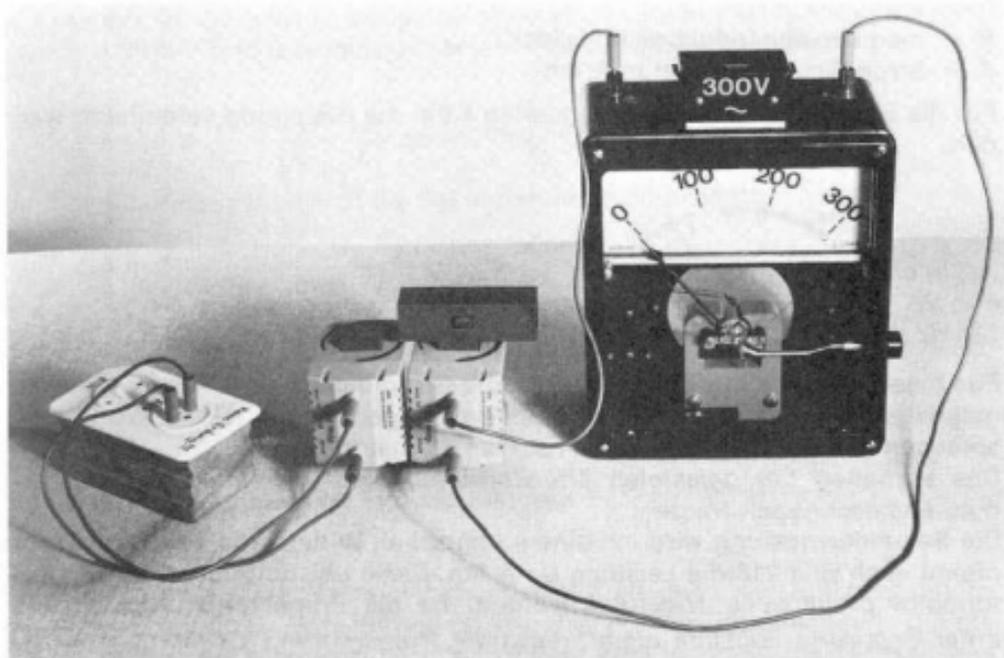


Bild 215

Für die erste Messung wird das Joch entfernt, der Kern ist nicht geschlossen. Nun wird das Joch aufgelegt und die Sekundärspannung mit derjenigen der ersten Messung verglichen. Die zweite Messung ergibt einen bedeutend höheren Wert für die Sekundärspannung als die erste. Zieht man das Joch langsam weg, so kann ein Absinken der Spannung beobachtet werden.

Der Versuch zeigt, dass die Beschaffenheit des Eisenkernes für den Transformator von grosser Bedeutung ist. Je besser der Kern geschlossen wird, desto höher wird die magnetische Induktion und damit auch die induzierte Spannung. Der Kern bewirkt einen besseren Wirkungsgrad, kleinere Verluste und kleinere Abmessungen des Transformators. Die Grösse des Kernes hängt primär von der zu übertragenden Leistung, von der magnetischen Induktion und von der Frequenz ab. Die genaue Berechnungsformel für den Querschnitt des Kernes lautet:

$$A_{Fe} = \sqrt{\frac{P k_{Cu/Fe}}{f \cdot B \cdot J}}; [A_{Fe}] = \sqrt{\frac{VA \cdot s \cdot cm^2 \cdot cm^2}{Vs \cdot A}} = cm^2$$

A_{Fe} = Eisenquerschnitt in cm^2

P = zu übertragende Leistung in VA

$k_{Cu/Fe}$ = Verhältnis von Kupfer- zu Eisengewicht (1 bis 1,5)

f = Frequenz in Hz

B = magnetische Induktion in Vs/cm²

J = Stromdichte im Leiter in A/cm²

Für die üblichen Dimensionierungsarten kann die Gleichung vereinfacht werden.

$$A_{Fe} \approx 5 \cdot \sqrt{\frac{P}{f}}$$

A_{Fe} in cm²

P in VA

f in Hz

Für diese vereinfachte Formel wurde die Stromdichte zu 3 A/mm² und die magnetische Induktion zu $12 \cdot 10^{-5}$ Vs/cm² angenommen. Diese Werte entsprechen den Durchschnittsdaten für Transformatoren.

Das Verhalten des *belasteten Transformators* kann *vereinfacht* folgendermassen beschrieben werden:

Die Sekundärwicklung wird mit einem ohmschen Widerstand belastet. Dieser nimmt nach Bild 216 die Leistung $U_2 \cdot I_2$ auf. Diese Leistung muss dem Transformator primärseitig zugeführt werden. Da die Primärspannung U_1 auch unter Belastung konstant bleibt, muss der Primärstrom I_1 entsprechend zunehmen. Diese Stromzunahme wird durch das Magnetfeld des Sekundärstromes verursacht. Dieser erzeugt in den Sekundärwicklungen den Fluss Φ_2 . Da die beiden Ströme in Gegenphase sind, ist auch der Primärfluss Φ_1 gegen den Sekundärfluss Φ_2 gerichtet. Die Differenz zwischen diesen beiden Flüssen muss dem Fluss im unbelasteten Zustand entsprechen. Die Primärwicklung wird gegenüber dem Betrieb im Leerlauf genau soviel Strom mehr aufnehmen, als zur Kompensierung des, den Primärfluss schwächenden, Sekundärflusses notwendig ist. Der sekundäre Belastungswiderstand wird in seiner Auswirkung auf die Primärseite transformiert.

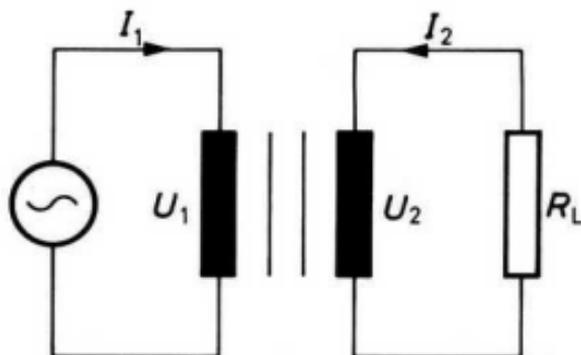


Bild 216

Die Regeln für diese Widerstandstransformation sind einfach und lassen sich aus dem Strom- und Spannungsübersetzungsverhältnis ableiten:

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}, \text{ daraus folgt: } U_2 = \frac{U_1}{\ddot{u}} \text{ und } I_2 = \ddot{u} \cdot I_1$$

daraus lässt sich die Sekundärimpedanz errechnen:

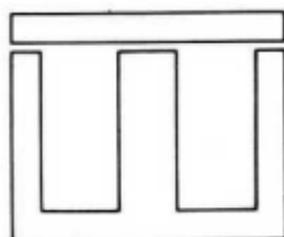
$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_1}{\ddot{u} \cdot \ddot{u} \cdot I_1} = \frac{U_1}{\ddot{u}^2 \cdot I_1} = \frac{Z_1}{\ddot{u}^2} \text{ daraus } \frac{Z_1}{Z_2} = \ddot{u}^2$$

Impedanzen werden mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses transformiert.

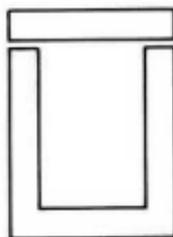
h) Ausführungsformen von Transformatoren

Netztransformatoren

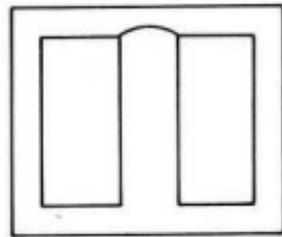
In Geräten dienen *Netztransformatoren* der Erzeugung der Speisespannungen. Die Grösse des Transformators ist durch die Leistung bestimmt, die die Sekundärseite aufzubringen hat. Der mittlere Wirkungsgrad für Netztransformatoren liegt zwischen 80 und 90%. Als Eisenkerne werden meistens die genormten E/I-, M-, oder U/I-Schnitte verwendet. Bild 217 zeigt die Blechformen für die erwähnten Schnitte.



E/I-Schnitt



U/I-Schnitt



M-Schnitt

Bild 217

Für Röhrengeräte besteht in der Regel die Sekundärseite aus einer Wicklung für die Anodenspannungen und einer oder zwei Wicklungen für die Heizspannungen. Für transistorisierte Geräte werden meistens recht niedere Sekundärspannungen benötigt. Bild 218 zeigt einen Netztransformator.

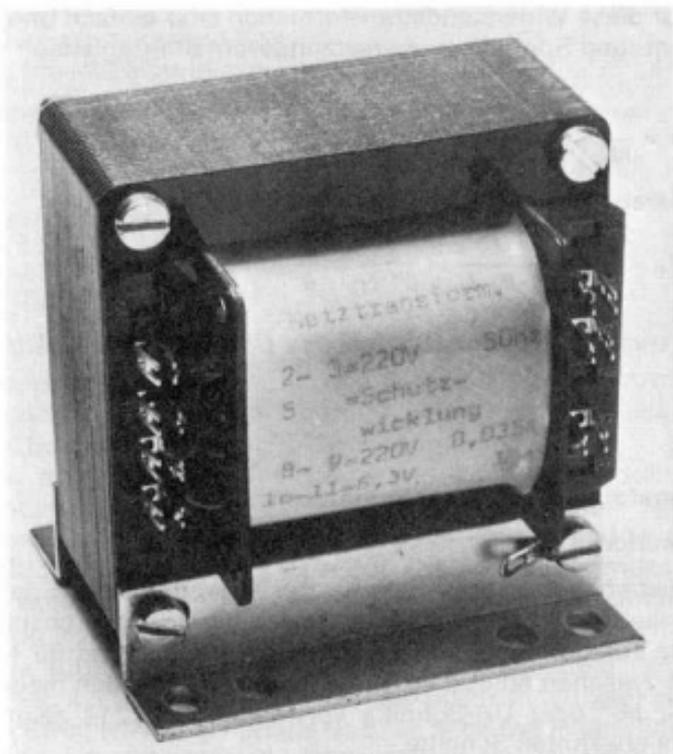


Bild 218

Regeltransformator

Regeltransformatoren erlauben die stufenlose Einstellung der Sekundärspannung. Sie bestehen oft nur aus einer einlagigen Wicklung, welche auf einem Ringkern angebracht ist. Mit einem drehbaren Schleifer kann eine beliebige Anzahl Windungen abgegriffen werden. Das Symbol für den Regeltransformator hält Bild 219 fest.

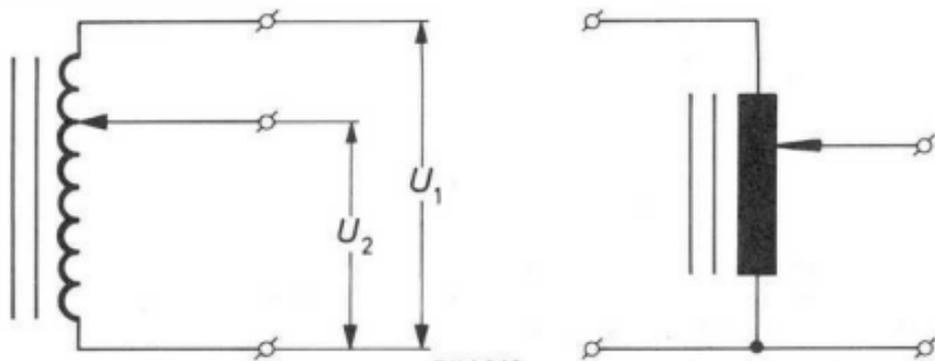


Bild 219

Regeltransformatoren werden überall dort verwendet, wo die Betriebsspannungen genau eingestellt werden müssen.

Niederfrequenztransformatoren (Übertrager)

Niederfrequenztransformatoren (im deutschen Sprachgebrauch oft Übertrager genannt) müssen je nach Verwendungszweck in einem Bereich von etwa 30 Hz bis 20 kHz linear arbeiten. Die tiefste zu übertragende Frequenz bestimmt die Primärinduktivität des Transformators. Die obere Frequenzgrenze ist durch die Wicklungskapazität und die Streuung gegeben. Die Wicklungskapazitäten verursachen zusammen mit den Induktivitäten eine Eigenresonanz des Transformators. Diese Resonanzerscheinung wird oft zur Anhebung der oberen Frequenzgrenze ausgenutzt. Es wird zwischen zwei Arten von Niederfrequenztransformatoren unterschieden:

- Eingangstransformatoren, die sekundärseitig praktisch im Leerlauf arbeiten (zum Beispiel Trafos im Eingang eines Röhrenverstärkers),
- Transformatoren, die sekundärseitig belastet sind (beispielsweise Ausgangsübertrager oder Kopplungstransformatoren zwischen Transistorstufen).

Transformatoren, welche im Leerlauf arbeiten, übertragen praktisch keine Leistung und können deshalb sehr klein gebaut werden. Bild 220a zeigt die Aufnahme eines Eingangsübertragers.

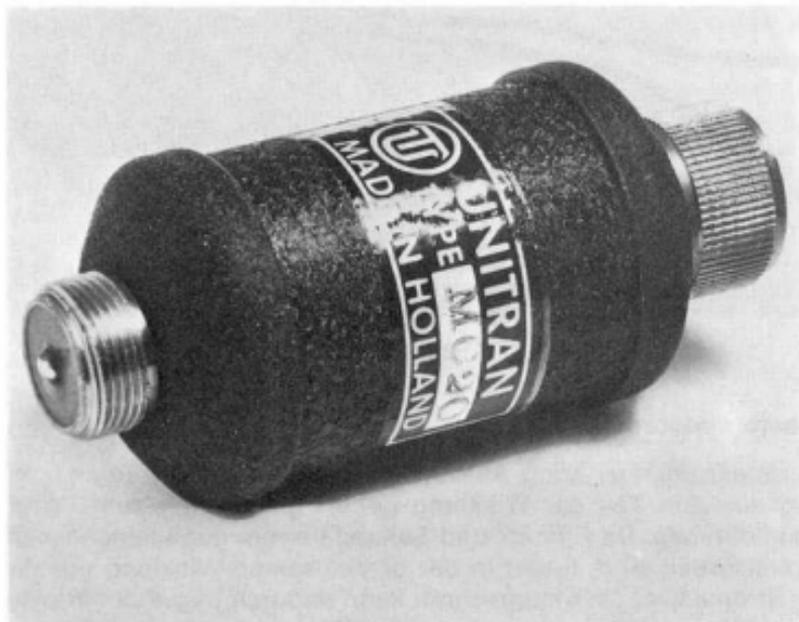


Bild 220a

Ausgangstransformatoren übertragen die Niederfrequenzgangsleistung eines Verstärkers auf das Lautsprechersystem. Sie dienen zugleich der Anpassung des niederohmigen Lautsprechers an die Endröhre oder den Endtransistor. Infolge des Anoden- oder Kollektorgleichstromes, der durch die Primärwicklung des Übertragers fliesst, wird dieser vormagnetisiert. Die dadurch entstehenden Verzerrungen werden verringert, indem man durch Anbringen eines Luftspaltes im Kern den Einfluss der Vormagnetisierung herabsetzt. Ein Ausgangsübertrager für 5 Watt Leistung wird in Bild 220b gezeigt.

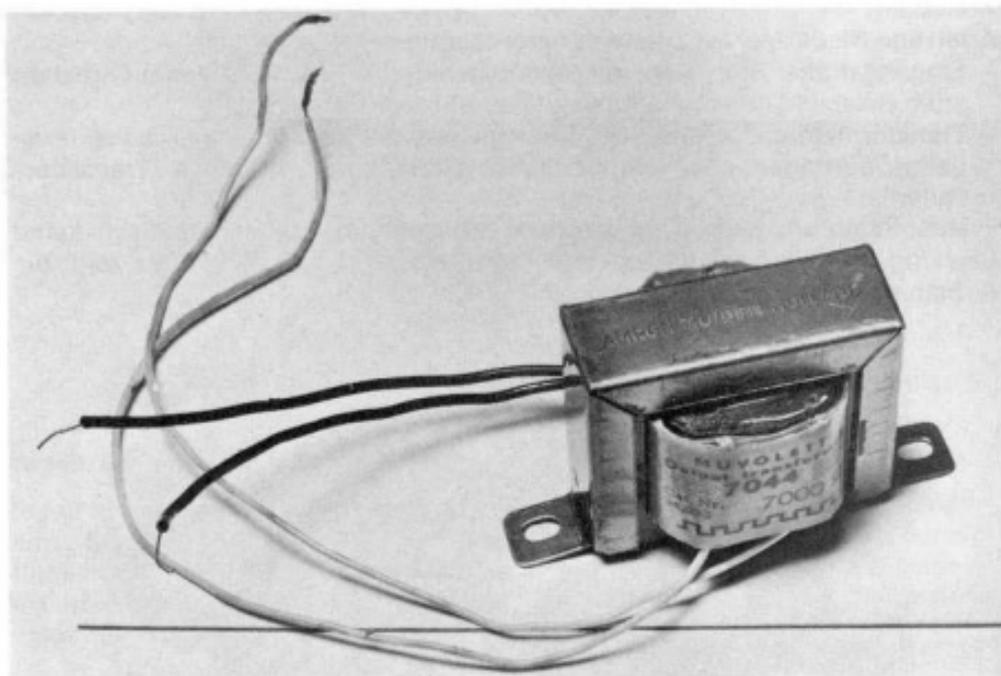


Bild 220b

Spartransformatoren

Der *Spartransformator*, auch Autotransformator genannt, kommt mit einer Wicklung aus. Ein Teil der Wicklung gehört gleichzeitig zum Primär- und zum Sekundärkreis. Da Primär- und Sekundärstrom gegeneinander um 180° phasenverschoben sind, fliesst in der gemeinsamen Wicklung nur die Differenz der Ströme. Der Drahtquerschnitt kann dadurch in diesem Wicklungsteil kleiner gehalten werden. Die galvanische Kopplung mit dem Netz hat aber den Nachteil, dass keine Spannung an Masse gelegt werden darf wegen

Kurzschlussgefahr in «genullten» Netzen und Gefährdung des die Geräte berührenden Personals. Die Schaltung eines Autotransformators ist in Bild 221 zu erkennen.

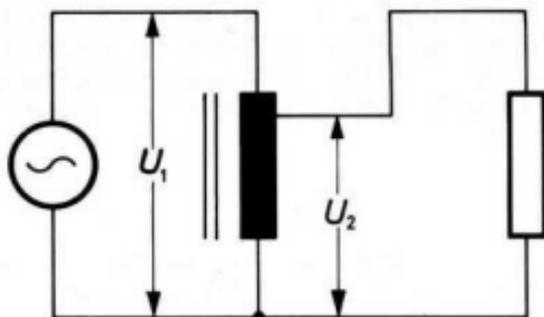


Bild 221

Impulstransformatoren

Der *Impulstransformator* dient der Erzeugung von Impulsspitzen aus einer sinusförmigen Spannung. Er wird oft zur Steuerung von Thyratrons eingesetzt. Der Impulstransformator besteht im wesentlichen aus einer Primär- und einer Sekundärwicklung, welche auf einem zweiteiligen Eisenkern angebracht sind. Für den Teil 1 des Kernes nach Bild 222 wird gewöhnliches Transformatorblech verwendet, während für das Joch 2 hochpermeables Spezialblech gewählt wird. Die Magnetisierungskurve dieses Bleches geht abrupt in die Sättigung über.

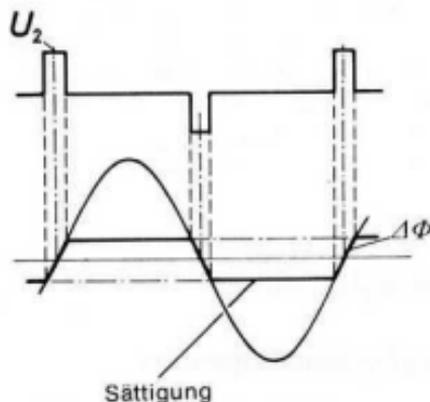
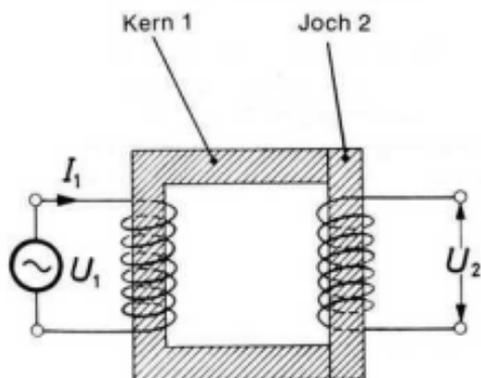


Bild 222

Das Joch ist so dimensioniert, dass der Magnetfluss schon bald nach dem Nulldurchgang des Stromes gesättigt ist. Im Sättigungsgebiet bleibt der Magnetfluss konstant, es wird in der Sekundärspule keine Spannung induziert. Während der Flussänderung dagegen erfolgt die Induktion eines kräftigen Spannungsimpulses. Die Richtung dieses Impulses hängt von der Richtung der Flussänderung ab. Die erzeugten Impulse fallen mit dem Nulldurchgang des Primärstromes zusammen. Das Diagramm in Bild 222 zeigt die Zusammenhänge zwischen Magnetfluss im Joch und induzierter Spannung in der Sekundärwicklung.

i) Kenndaten

Transformatoren werden durch folgende Kenndaten beschrieben:

- *Nennspannungen* sind die Primär- und Sekundärspannungen für welche der Transformator dimensioniert ist.
- *Nennleistung* ist die Leistung, die den Sekundärwicklungen gesamthaft entnommen werden kann.
- Der *Frequenzbereich* ist derjenige Bereich innerhalb eines Frequenzbandes, für welchen der Transformator gebaut wurde. Die tiefste Betriebsfrequenz ist massgebend für den Eisenquerschnitt und somit für das Gewicht des Transformators.
- Der *Wirkungsgrad* ist das Verhältnis von abgegebener Leistung zu aufgenommener Leistung.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_d}$$

P_1 = aufgenommene Leistung, P_2 = abgegebene Leistung

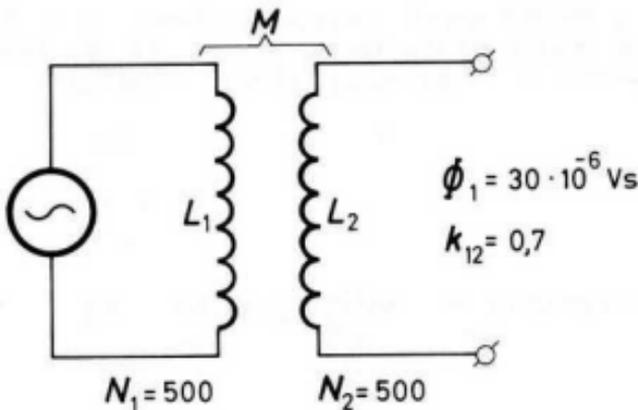
P_d = Leistung, die im Transformator in Wärme umgesetzt wird

Der Wirkungsgrad von Hochleistungstransformatoren ist sehr hoch, er liegt zwischen 97 und über 99%. Kleinere Transformatoren weisen einen entsprechend schlechteren Wirkungsgrad auf. Die Verluste im Transformator setzen sich zusammen aus Eisenverlusten (Hysteresisverluste und Wirbelstromverluste) und aus Kupferverlusten (Gleichstrom-Widerstand der Wicklungen und Wirbelstromverluste).

4. Beispiele

a) Der Kopplungsfaktor

Die Spulen L_1 und L_2 in Bild 223 sind induktiv gekoppelt. Der Fluss durch die Sekundärspule ist zu bestimmen.



Vorgehen:

- Grundformel für den Kopplungsfaktor anschreiben $k = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}$
- nach Φ_2 umformen $\Phi_2 = \Phi_1 \cdot k$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $\Phi_2 = 0,7 \cdot 30 \cdot 10^{-6}$
 $\Phi_2 = 21 \cdot 10^{-6} \text{ Vs}$

b) Streufaktor

Der Streufaktor von L_1 zu L_2 aus Aufgabe a soll ermittelt werden.

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben: $\sigma = \frac{\Phi_s}{\Phi_1}$
- Gleichung für Φ_s anschreiben $\Phi_s = \Phi_1 - \Phi_2$
- Grundformel ergänzen: $\sigma = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Phi_1}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $\sigma = \frac{30 \cdot 10^{-6} - 21 \cdot 10^{-6}}{30 \cdot 10^{-6}}$
 $\sigma = 0,3$

c) Gegeninduktivität

Die Induktivitäten der Spule L_1 und L_2 sowie die Gegeninduktivität des Transformators aus Aufgabe a sind zu berechnen ($I_1 = 0,2 \text{ A}$).

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Induktivitäten L_1 und L_2

- Grundformel anschreiben $L_1 = L_2 = \frac{\Phi_1}{I_1} \cdot N$; (μr konstant)

Diese Formel für die Induktivität kann aus den Regeln für den Elektromagnetismus leicht abgeleitet werden. Wir schlagen im Kapitel «Elektromagnetismus» (Seite 64) nach und finden für den Fluss folgende Formel:

– für B gilt:

$$\Phi = B \cdot A$$

– für H gilt:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

$$H = \frac{I \cdot N}{l}$$

– in die Grundformel für Φ eingesetzt ergibt sich folgende Bestimmungsgleichung

$$\Phi = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot N}{l} \cdot A$$

$$\frac{\Phi}{I} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N}{l} \cdot A$$

$$\frac{\Phi}{I} \cdot N = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2}{l} \cdot A$$

I wird zum Ausdruck links genommen:

beide Seiten mit N erweitert ergibt:

der rechte Ausdruck entspricht der Berechnungsformel für die Induktivität

Der Praktiker braucht diese Ableitungen natürlich nicht auswendig zu wissen. Es geht lediglich darum, zu zeigen, wo diese neue Formel für die Induktivität herkommt.

Wir fahren mit der Lösung unseres Beispiels fort:

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$L_1 = L_2 = \frac{30 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 \cdot 10^3}{0,2} \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

$$L_1 = L_2 = 75 \text{ mH}$$

2. Schritt: Berechnen der Gegeninduktivität

– Grundformel anschreiben

$$M = \frac{\Phi_2}{I_1} \cdot N_2$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$M = \frac{21 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 \cdot 10^3}{0,2} \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

$$M = 52,5 \text{ mH}$$

– Kontrolle:

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

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

$$M = 0,7 \cdot 75 \cdot 10^{-3}$$

$$M = 52,5 \text{ mH}$$

d) Transformator

Der Ausgangsübertrager in Bild 224 dient der Anpassung des niederohmigen Lautsprechers an die hochohmige Endstufe.

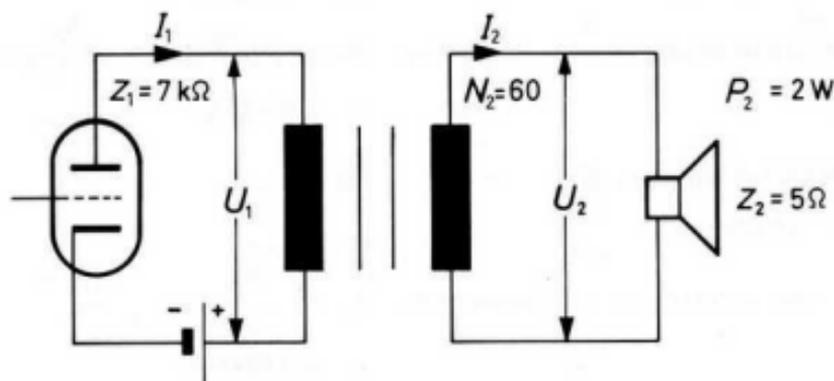


Bild 224

Unter den vereinfachenden Annahmen – Kopplungsfaktor = 1, keine Trafoverluste – sind folgende Werte zu ermitteln:

$$N_1, U_2, U_1, I_2, I_1$$

Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen des Übersetzungsverhältnisses

– Grundformel anschreiben

$$\ddot{u} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\ddot{u} = \sqrt{\frac{7 \cdot 10^3}{5}}$$

$$\ddot{u} = 37,42$$

2. Schritt: Bestimmen der Primärwindungszahl

– Grundformel anschreiben

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2}$$

– nach N_1 umformen

$$N_1 = \ddot{u} \cdot N_2$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$N_1 = 37,42 \cdot 60$$

$$N_1 = 2245$$

3. Schritt: Berechnen von Sekundärspannung und Sekundärstrom

- Grundformel anschreiben $P_2 = \frac{U_2^2}{Z_2}$
- nach U_2 umstellen $U_2 = \sqrt{Z_2 \cdot P_2}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $U_2 = \sqrt{5 \cdot 2}; [U_2] = \sqrt{\frac{V}{A} \cdot VA} = V$
 $U_2 = 3,162 \text{ V}$
- Grundformel anschreiben $P_2 = I_2^2 \cdot Z_2$
- nach I_2 umstellen $I_2 = \sqrt{\frac{P_2}{Z_2}}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $I_2 = \sqrt{\frac{2}{5}}; [I_2] = \sqrt{\frac{VA \cdot A}{V}} = A$
 $I_2 = 0,6325 \text{ A}$
- Kontrolle $P_2 = U_2 \cdot I_2$
 $P_2 = 3,162 \cdot 0,6325$
 $P_2 = 2 \text{ W}$

4. Schritt: Berechnung von Primärstrom und Primärspannung

- Grundformel anschreiben $\ddot{u} = \frac{U_1}{U_2}$
- nach U_1 umstellen $U_1 = \ddot{u} \cdot U_2$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $U_1 = 37,42 \cdot 3,162$
 $U_1 = 118,3 \text{ V}$
- Grundformel anschreiben $\ddot{u} = \frac{I_2}{I_1}$
- nach I_1 umstellen $I_1 = \frac{I_2}{\ddot{u}}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $I_1 = \frac{0,6325}{37,42}$
 $I_1 = 16,9 \text{ mA}$

Kontrolle: $I_1 \cdot U_1$ müssen 2 Watt ergeben

- Formel anschreiben $I_1 \cdot U_1 = 2 \text{ W}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $16,9 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 118,3 \text{ V} = 2 \text{ W}$

5. Das Wesentliche

Der Transformator überträgt nur Wechselströme und -spannungen.

Der *Kopplungsfaktor* k ist das Mass für den Grad der Kopplung zweier Spulen. Er wird ausgedrückt durch das Verhältnis des Flusses der die Sekundärspule schneidet, zum Gesamtfluss der in der Primärspule erzeugt wird.

Der *Streufaktor* σ ist ein Mass für die Streuung, die zwischen zwei gekoppelten Spulen auftritt. Er entspricht dem Verhältnis von Streufluss zu Gesamtfluss.

Die *Gegeninduktivität* M ist ein Mass für die Beeinflussung zweier benachbarter Spulen über den gemeinsamen Anteil des magnetischen Feldes.

Als *Übersetzungsverhältnis* \bar{u} wird das Verhältnis der Primärwindungszahl zur Sekundärwindungszahl bezeichnet. Spannungen werden im Transformator proportional zum Übersetzungsverhältnis, Ströme umgekehrt proportional dazu, transformiert. Impedanzen werden mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses übertragen.

Im unbelasteten Transformator herrscht zwischen Primärspannung und Sekundärspannung eine Phasenverschiebung von 180° . Die Phasenverschiebung zwischen Primärstrom und Sekundärstrom wird im Transformator, welcher mit einem ohmschen Widerstand belastet ist, kleiner als 180° .

Der *Eisenkern* erhöht den Wirkungsgrad des Transformators. Sein Querschnitt nimmt mit der Quadratwurzel der übertragenen Leistung zu und mit der Quadratwurzel der Betriebsfrequenz ab.

Zur Speisung elektrischer Geräte werden *Netztransformatoren* verwendet. *Regeltransformatoren* ermöglichen die stufenlose Regelung der Sekundärspannung. *Niederfrequenzübertrager* dienen der Übertragung von Niederfrequenzsignalen und zur Impedanzanpassung. Der *Spar- oder Autotransformator* hat nur eine Wicklung. Ein Teil der Wicklung wird für die Primärspannung und die Sekundärspannung gemeinsam verwendet. Durch diese Massnahme werden Eisen- und Drahtquerschnitt kleiner als beim Trafo mit Primär- und Sekundärwicklung. Der *Impulstransformator* erzeugt während des Nulldurchganges des Primärstromes sekundärseitig einen Spannungsimpuls, welcher zu Steuerzwecken verwendet wird.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 469)

- Der Kopplungsfaktor von der Primärspule zur Sekundärspule eines Transformators beträgt 95%. Was bedeutet das in bezug auf das Verhältnis zwischen Primärfluss und Sekundärfluss?
- Der Gesamtkopplungsfaktor eines Transformators wurde zu 92% ermittelt. Wie gross ist der Gesamtstreufaktor des Übertragers?
- Die Induktivitäten $L_1 = 5 \text{ H}$ und $L_2 = 3 \text{ H}$ sind miteinander gekoppelt. Der Gesamtkopplungsfaktor beträgt 0,6. Berechnen Sie die Gegeninduktivität der Anordnung.
- Nennen Sie zwei Faktoren, die den Eisenquerschnitt eines Übertragers bestimmen.

- e) Erklären Sie, warum beim unbelasteten Transformator die Phasenverschiebung zwischen Primärspannung und Sekundärspannung 180° beträgt.
- f) Nennen Sie die Vor- und Nachteile des Spartransformators.
- g) Der Ausgangsübertrager nach Bild 225 soll den Belastungswiderstand des Lautsprechers an den Arbeitswiderstand der Endröhre anpassen. Bestimmen Sie folgende Grössen:
- Primärimpedanz Z_1
 - Übersetzungsverhältnis \bar{u}

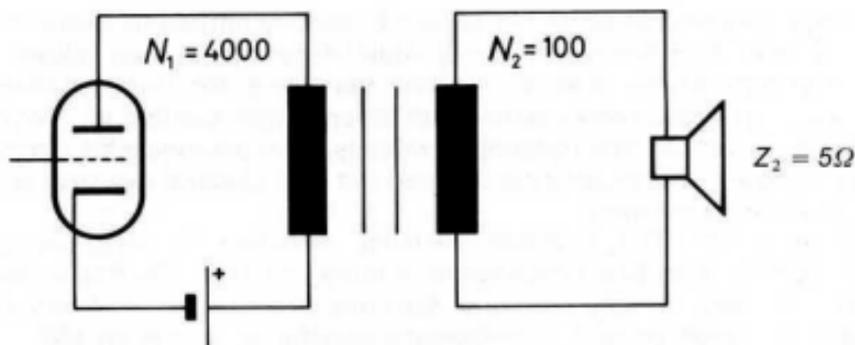


Bild 225

VII. Der Serieschwingkreis

1. Einführung

Schwingkreise spielen in der Nachrichtentechnik und in der Elektronik eine grosse Rolle. Es sind keine Funkgeräte denkbar, die nicht eine beträchtliche Anzahl Schwingkreise benötigen. Moderne Mehrfachtelefonie- und Telegrafianlagen basieren auf dem Zusammenspiel komplizierter Kombinations-schaltungen, deren Grundbausteine Schwingkreise sind. Sogar der einfachste aller Empfänger, der «Detektor» kommt nicht ohne einen Schwingkreis aus.

Die Wichtigkeit der Schwingkreise basiert auf ihrer Eigenschaft, aus einem Frequenzspektrum eine ganz bestimmte Frequenz herauszulesen zu können. Wenn wir an einem Rundfunkgerät eine bestimmte Frequenz wählen, verstellen wir mit Hilfe eines Drehkondensators einen Schwingkreis so lange, bis die gewünschte Frequenz empfangen wird. Drücken wir am Fernsehapparat den Kanalwählschalter, um ein bestimmtes Programm zu sehen, so stimmen wir Schwingkreise auf die Frequenz des gewünschten Senders ab. Der Funker, der an einem Funkgerät einen bestimmten Kanal einstellt, stimmt mit einer Bewegung eine ganze Reihe von Schwingkreisen auf die befohlene Frequenz ab. Der Operateur, der eine Grossfunkstation auf eine vorgeschriebene Frequenz einstellt, stimmt verschiedene Schwingkreise auf die entsprechende Wellenlänge ab.

Schwingkreise lassen sich mit dem Farbfilter aus der Optik vergleichen. Ein Rotfilter lässt vom gesamten Lichtspektrum nur die der roten Farbe zugeordnete Wellenlänge passieren. Ein Grünfilter verhält sich gleich für die Wellenlänge des grünen Lichtes.

Die aus der Aufzählung hervorgehende Bedeutung der Schwingkreise lässt vermuten, dass es sich dabei um recht komplizierte Gebilde handeln müsse. Dem ist jedoch nicht so, die gebräuchlichsten Schwingkreise bestehen lediglich aus der Serie- oder Parallelschaltung von Kapazitäten und Induktivitäten.

Schwingkreise stellen nur einen Sonderfall der bereits behandelten Serie- und Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen dar.

2. Was wissen Sie schon über Serieschwingkreise?

(Lösung Seite 471)

- Aus welchen Elementen bestehen Serieschwingkreise?
- Was bedeutet der Ausdruck «Resonanzfrequenz»?
- Spielt die Spulengüte für das Verhalten des Schwingkreises eine Rolle?
- Warum ist der Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ des Kondensators für die meisten Schwingkreise ohne Bedeutung?
- Kennen Sie ein Anwendungsbeispiel für den Serieschwingkreis?

- f) In der Einführung wurde erwähnt, Schwingkreise seien nur Sonderfälle der Parallel- oder Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen. Können Sie sagen, in was der Sonderfall besteht?

3. Der Serieschwingkreis

a) Der Aufbau des Schwingkreises

Der *Serieschwingkreis* besteht aus der Serieschaltung von Spule und Kondensator. Da Spulen und Kondensatoren nicht als reine Blindwiderstände vorkommen, sondern immer mit Verlusten behaftet sind, fasst man die Spulen und Kondensatorverluste in einem gemeinsamen *Serieverlustwiderstand* zusammen. In der Praxis können die Kondensatorverluste meistens vernachlässigt werden, da sie viel kleiner sind als die Spulenverluste. Bild 226 zeigt einen Serieschwingkreis.

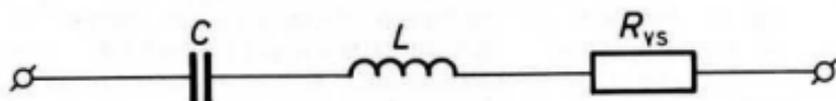


Bild 226

b) Das Arbeitsverhalten des Serieschwingkreises

Wir wollen das Arbeitsverhalten des Serieschwingkreises an einem Versuch studieren. Bild 227 zeigt die Schaltung und Bild 228 den Versuchsaufbau.

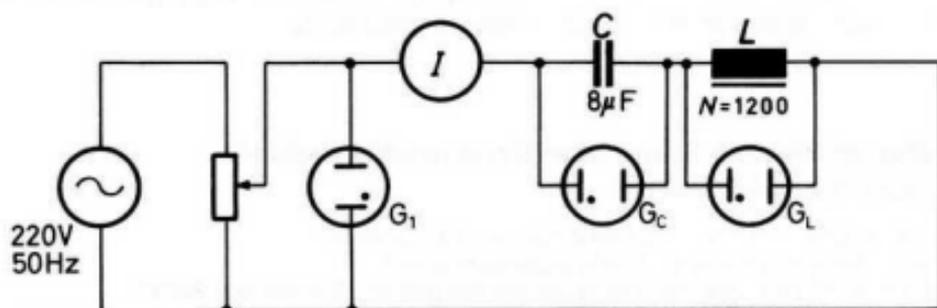


Bild 227

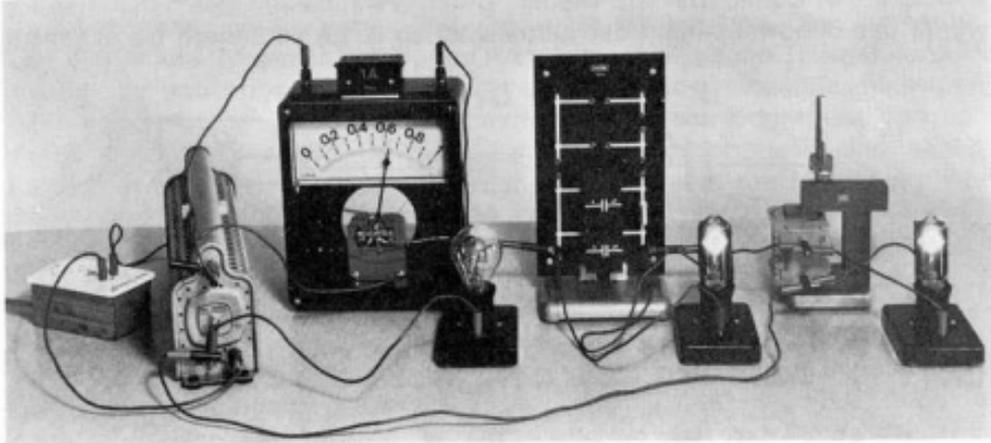


Bild 228

Zu Beginn des Versuches werden die Zündspannungen der Glimmlampen ermittelt, indem jede Glimmlampe an eine veränderliche Gleichspannung gelegt wird. Diese Gleichspannung wird nun so lange erhöht, bis die Lampe zündet. Die Zündspannungen liegen bei ungefähr 130 Volt.

In der Schaltung nach Bild 227 wird die Spannung am Spannungsteiler so eingestellt, dass die Glimmlampe G 1 *nicht* leuchtet. Nun wird das Joch über der Spule unter gleichzeitiger Beobachtung des Ampèremeters ganz langsam verschoben. Der Strom nimmt langsam zu, erreicht einen Maximalwert und sinkt wieder ab. Sobald der Strom in den Bereich des Maximalwertes gelangt, zünden die Glimmlampen über der Spule und über dem Kondensator. Die Glimmlampe G 1 über dem Spannungsteiler bleibt dunkel. Wir stellen fest:

- Durch Verschieben des Joches über der Spule wird der Wert der Induktivität verändert. Für einen ganz bestimmten Wert der Spuleninduktivität erreicht der Kreisstrom seinen Maximalwert.
- Die Spannung über dem Kreis bleibt während der Dauer des Versuches unterhalb der Zündspannung der Glimmlampe G 1.
- Beim Strommaximum steigen die Spannungen über der Spule und der Kapazität beträchtlich an, sie überschreiten die Zündspannung der Glimmlampen G_L und G_C .
- *Die Spannung über Spule und Kondensator ist grösser als die Spannung über dem ganzen Kreis.*

Diese auf den ersten Anblick sonderbaren Messresultate lassen sich mit Hilfe des Vektordiagrammes sehr einfach erklären. Der Serieschwingkreis soll vorerst als eine einfache Serieschaltung von Spule, Kondensator und Widerstand betrachtet werden. In der Versuchsschaltung tritt der Seriewiderstand in Form der Spulenverluste auf.

Bild 229 gibt den Serienschaltkreis wieder. Durch Verschieben des Spulenjoches wurde der Blindwiderstand der Induktivität so lange verändert, bis er gleich

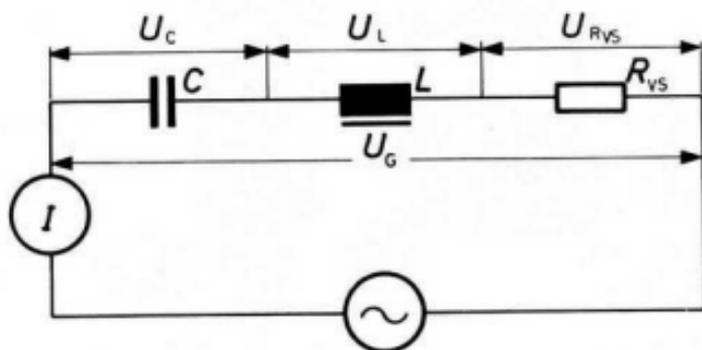


Bild 229

gross wurde wie derjenige des Kondensators. Das Vektordiagramm in Bild 230 zeigt, dass sich die beiden Blindwiderstände in ihrer Wirkung aufheben. Die Impedanz erreicht somit ihren kleinsten Wert und wirkt als rein ohmscher

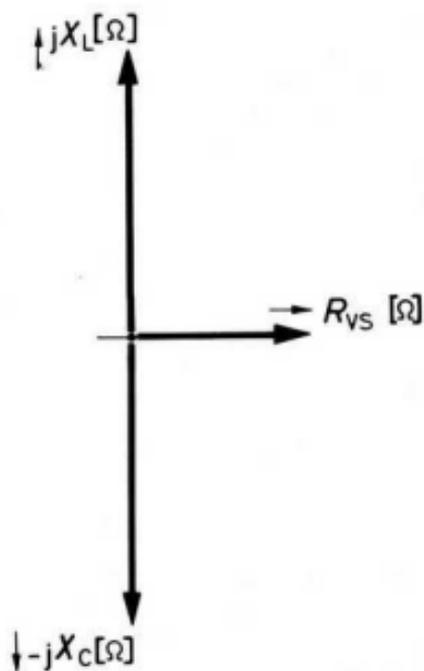


Bild 230

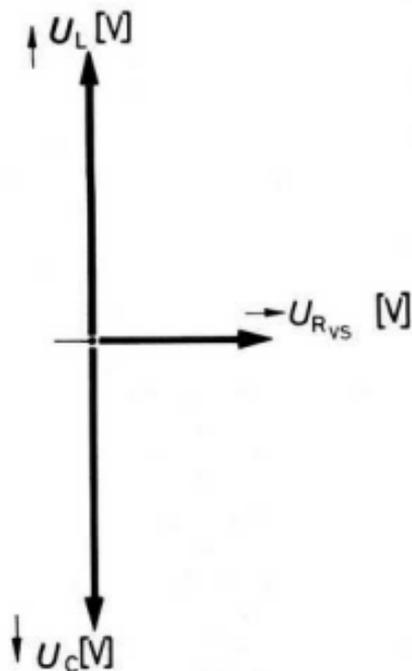


Bild 231

Widerstand. Dadurch erreicht der Strom im Kreis seinen grössten Wert. Die Spannungen am Serienschwingkreis sind in Bild 231 festgehalten. Das Bild erklärt uns, warum die Gesamtspannung am Kreis kleiner ist als die Teilspannungen über Spule und Kondensator. Weil die beiden Blindwiderstände denselben Wert aufweisen, sind auch die Spannungen über der Induktivität und der Kapazität gleich gross. Da aber diese Spannungen gegenphasig sind, heben sie sich in ihrer Wirkung gegenseitig auf. Als wirksame Kreisspannung verbleibt nur der Spannungsabfall über dem ohmschen Widerstand.

c) Die Resonanzbedingung

Die Frequenz, für welche der Serienschwingkreis seine kleinste Impedanz erreicht, heisst *Resonanzfrequenz*. Der Schwingkreis befindet sich in *Resonanz*. Die *Resonanzbedingung* lautet:

Wenn im Serienschwingkreis der kapazitive und der induktive Blindwiderstand gleich gross sind, befindet sich der Kreis in Resonanz.

d) Die Thomsonsche Schwingkreisformel

Aus der Resonanzbedingung lässt sich die *Thomsonsche Schwingkreisformel* ableiten. Diese Formel erlaubt die Berechnung der Resonanzfrequenz von Schwingkreisen. Für die Ableitung dieser Formel wird von der Resonanzbedingung ausgegangen:

– Resonanzbedingung

$$X_L = X_C$$

$$\omega_o L = \frac{1}{\omega_o C}$$

– Kreisfrequenz nach links schaffen

$$\omega_o^2 L = \frac{1}{C}$$

– Kreisfrequenz isolieren

$$\omega_o^2 = \frac{1}{L \cdot C}$$

– Quadratwurzel ziehen

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = 2\pi f_o$$

– f_o isolieren

$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}}$$

e) Die Resonanzkurve

Die Eigenschaften des Schwingkreises werden graphisch in *Resonanzkurven* festgehalten. Für den Serienschwingkreis zeigt die Resonanzkurve den Verlauf der Impedanz oder des Stromes in Abhängigkeit der Frequenz. Im folgenden Versuch wird gezeigt, wie die Resonanzkurve messtechnisch ermittelt wird. Bild

232 zeigt die Versuchsschaltung und Bild 233 den Aufbau der Messanordnung.

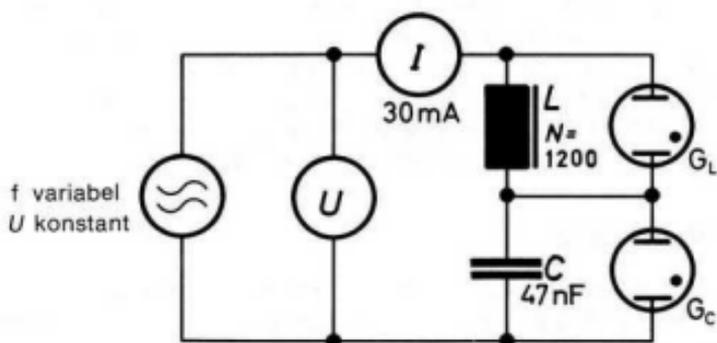


Bild 232

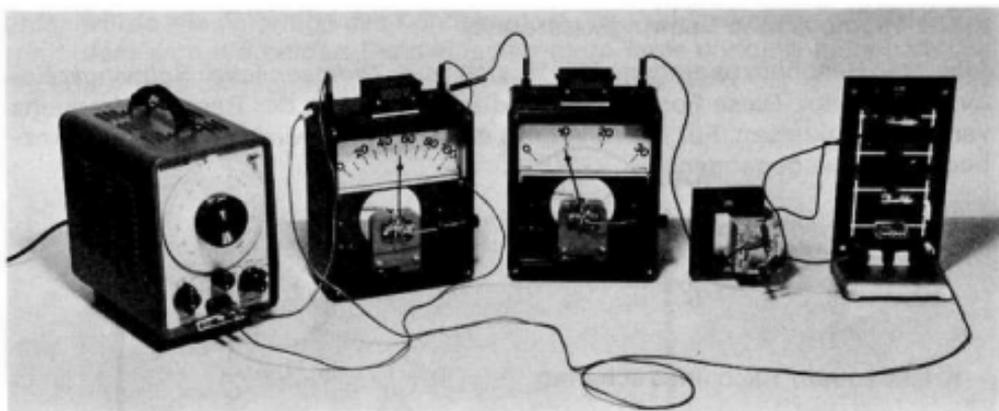


Bild 233

Zuerst wird die Frequenz verändert, bis sich ein Strommaximum einstellt, was den Resonanzfall anzeigt. Hierauf wird die Spannung des NF-Generators verändert, bis ein Strom von 30 mA fließt. Nun werden Frequenz und Spannung nochmals nachreguliert, bis bei der Resonanzfrequenz tatsächlich 30 mA fließen. Für die weiteren Messungen wird der so gefundene Spannungswert konstant gehalten. Nun wird die Frequenz in kleinen Beträgen von der Resonanzfrequenz weg verschoben und für jede Messung der Stromwert in einem Diagramm aufgetragen. Analog dazu wird eine Messreihe für tiefere Frequenzen als die Resonanzfrequenz aufgenommen. Das Diagramm liefert die Stromresonanzkurve. In Bild 234 ist eine Stromresonanzkurve und die dazugehörige Impedanzkurve dargestellt. Diese weist ihr Minimum beim Strommaximum auf.

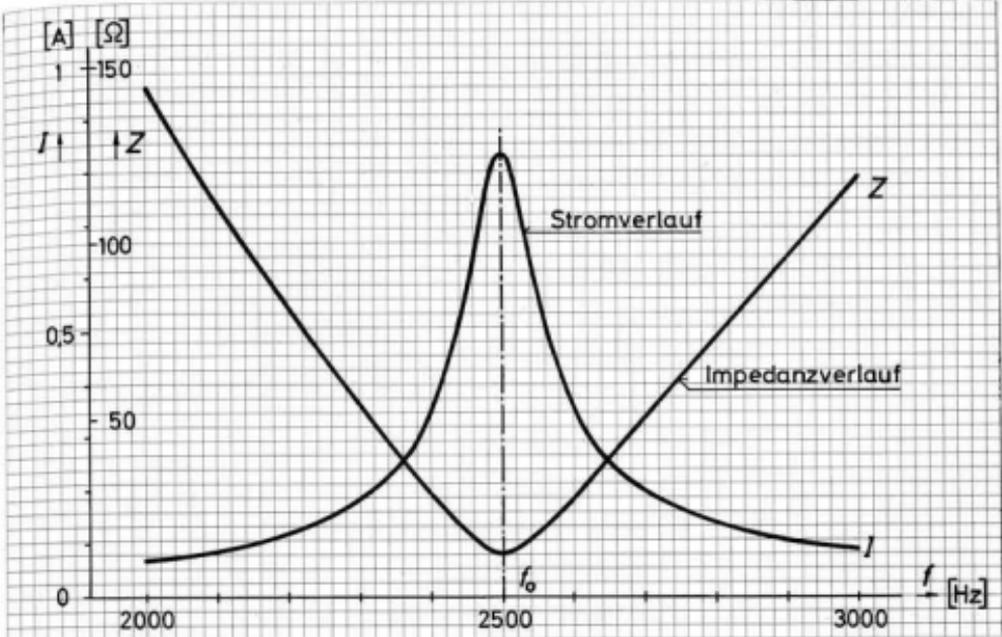


Bild 234

f) Die Kreisgüte Q

Die Güte des Schwingkreises wird durch den *Gütefaktor* ausgedrückt. Bei den weitaus meisten Schwingkreisen wird dieser Gütefaktor durch die Induktivität bestimmt, da die Spulenverluste sehr viel grösser sind als die Verluste im Kondensator. In diesem Fall ist die Spulengüte Q_L der Induktivität mit der *Kreisgüte* Q identisch. Wir dürfen demzufolge schreiben:

$$Q = \frac{X_L}{R_{vs}} \quad R_{vs} = \text{Verlustwiderstand der Spule}$$

Für den Serieschwingkreis drückt die Kreisgüte Q folgende Zusammenhänge aus:

- Im Resonanzfall sind die Teilspannung an der Spule und die Teilspannung am Kondensator Q mal grösser als die Spannung über dem Kreis.
- Im Resonanzfall sind der kapazitive und der induktive Blindwiderstand Q -mal grösser als der Resonanzwiderstand des Kreises.

Der Reziprokwert der Kreisgüte ergibt den *Dämpfungsfaktor* d .

$$d = \frac{1}{Q}$$

g) Die Bandbreite b

Die *Bandbreite* b des Serieschwingkreises ist die Durchlassbreite der Filterkurve, gemessen zwischen zwei Punkten der Kurve, für welche der Strom auf den $1/\sqrt{2}$ -fachen Wert des Resonanzstromes abgesunken ist. Die Bandbreite ist durch die Resonanzfrequenz und die Kreisgüte bestimmt. Je besser die Güte eines Kreises ist, desto kleiner wird die Bandbreite. Der Zusammenhang zwischen Bandbreite und Kreisgüte ist in folgender Gleichung festgehalten:

$$b = \frac{f_0}{Q}$$

Bild 235 zeigt die graphische Ermittlung der Bandbreite für den Serieschwingkreis.

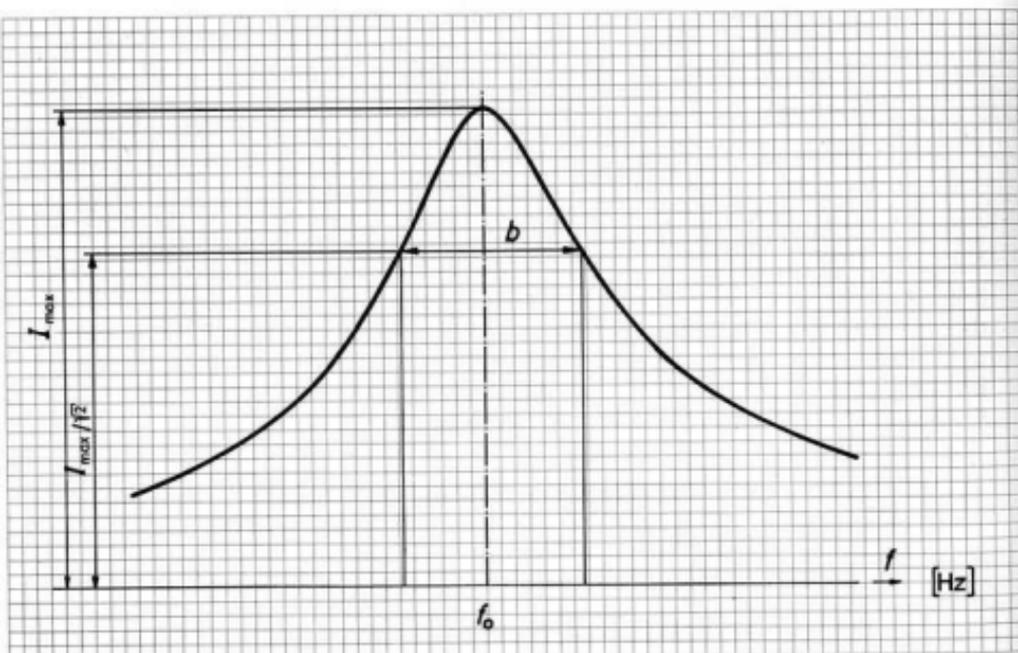


Bild 235

4. Beispiele

a) Berechnen eines Serienschwingkreises

Die Resonanzfrequenz, die Kreisgüte und die Bandbreite des Serienschwingkreises nach Bild 236 sind zu errechnen.

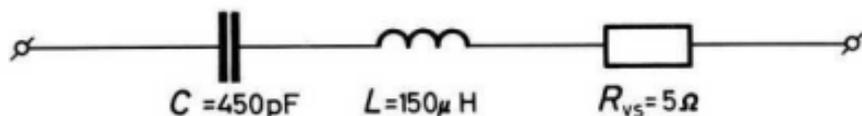


Bild 236

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Resonanzfrequenz

- Grundformel anschreiben $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$; $[f_o] = \frac{1}{\sqrt{\text{As}/\text{V} \cdot \text{Vs}/\text{A}}} = \frac{1}{\text{s}}$
 - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-11}}}$
- $f_o = 613 \text{ kHz}$

2. Schritt: Berechnung der Kreisgüte Q

- Grundformel anschreiben $Q = \frac{\omega_o L}{R}$; $[Q] = \frac{\text{Vs} \cdot \text{A}}{\text{s} \cdot \text{A} \cdot \text{V}} = 1$
 - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,613 \cdot 10^6 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3}}{5}$
- $Q = 116$

3. Schritt: Berechnen der Bandbreite b

- Grundformel anschreiben $b = \frac{f_o}{Q}$
 - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $b = \frac{613 \cdot 10^3}{116}$
- $b = 5,28 \text{ kHz}$

b) Berechnen und Aufzeichnen der Resonanzkurve

Der Serieschwingkreis der Messschaltung nach Bild 237 soll berechnet werden. Die Messresultate sind in Form einer Resonanzkurve graphisch darzustellen.

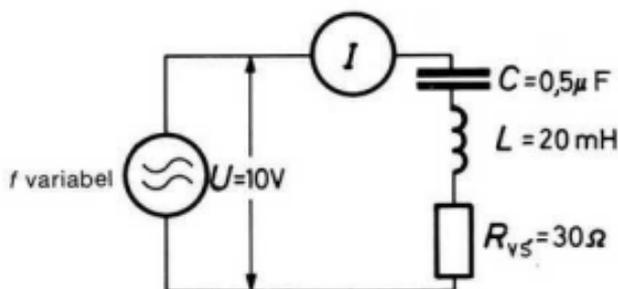


Bild 237

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Resonanzfrequenz

– Grundformel anschreiben

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{20 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}}$$

$$f_o = 1591 \text{ Hz}$$

2. Schritt: Berechnen der Resonanzkurve

Es ist eine Tabelle mit folgenden Werten aufzunehmen:

- Kapazitiver Blindwiderstand
- Induktiver Blindwiderstand
- Wirksamer Gesamtblindwiderstand
- Kreisimpedanz
- Kreisstrom

Die Berechnung hat einen Frequenzbereich von 1100 Hz bis 2100 Hz zu umfassen. Die Werte sind für Frequenzschritte von 100 Hz zu ermitteln.

- Grundformel für X_L anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen ($f = 1100$ Hz)

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot 1,1 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-3}$$

$$[X_L] = \frac{1}{s} \cdot \frac{Vs}{A} = \frac{V}{A}$$

$$X_L = \mathbf{138,2 \Omega}$$

- Grundformel für X_C anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen ($f = 1100$ Hz)

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1,1 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-7}}$$

$$[X_C] = s \cdot \frac{V}{As} = \frac{V}{A}$$

$$X_C = \mathbf{289,4 \Omega}$$

- Grundformel für Kreisimpedanz anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z = \sqrt{30^2 + 151,2^2}$$

$$Z = \mathbf{154,2 \Omega}$$

Diese Rechnungen werden für alle geforderten Frequenzwerte des Spektrums durchgeführt. Um möglichst rationell zu rechnen, werden zuerst alle induktiven Blindwiderstände, dann alle kapazitiven Blindwiderstände, daraufhin alle Differenzblindwerte und am Schluss alle Impedanzwerte ermittelt. In Tabelle 16 sind die Resultate zusammengefasst.

f (Hz)	$X_L(\Omega)$	$X_C(\Omega)$	$X_L - X_C$ (Ω)	$X_C - X_L$ (Ω)	Z (Ω)	I (mA)
1100	138,2	289,4		151,2	154,2	64,8
1200	150,8	265,3		114,5	118,4	84,4
1300	163,4	244,9		81,5	86,8	115,2
1400	175,9	227,4		51,5	59,6	167,8
1500	188,5	212,2		23,7	38,2	262,3
1600	201,1	198,9	2,2		30,1	332,5
1700	213,6	187,2	26,4		40,0	250,0
1800	226,5	176,8	49,7		58,0	172,5
1900	238,8	167,5	71,3		77,4	129,2
2000	251,3	159,2	92,1		96,9	103,5
2100	263,9	151,6	112,3		116,2	86,1

Tabelle 16

3. Schritt: Aufzeichnen der Blindwiderstände in Abhängigkeit der Frequenz

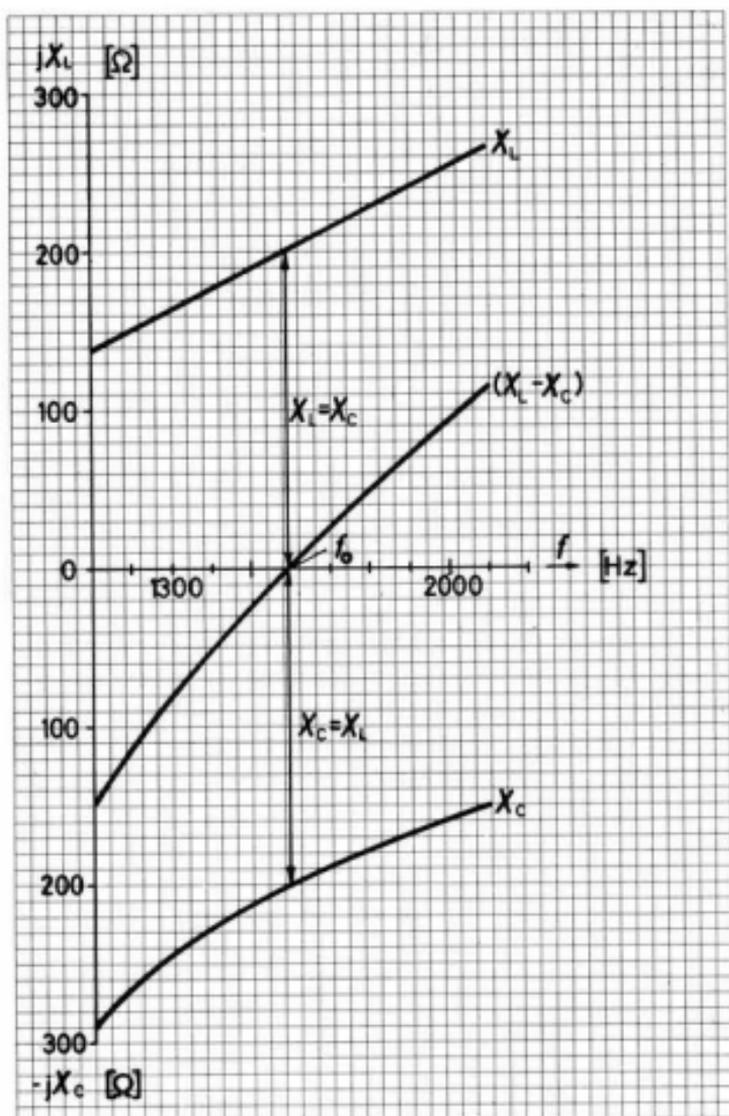


Bild 238

4. Schritt: Aufzeichnen der Resonanzkurve, Bestimmen der Bandbreite

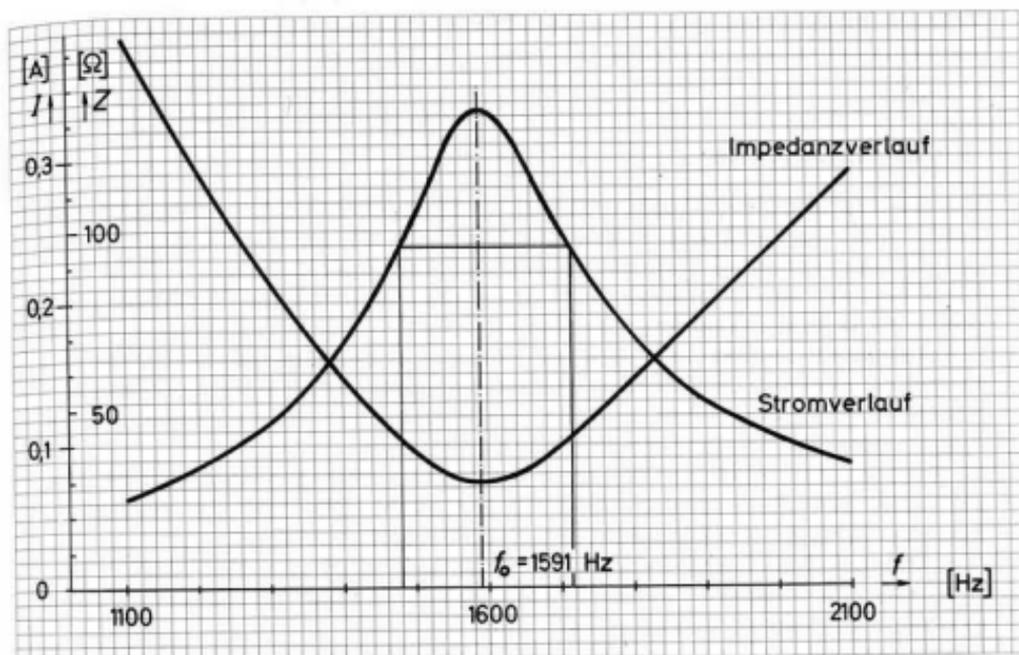


Bild 239

Kontrolle der Bandbreite durch Rechnung:

- Grundformel für Q anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
- Formel für b anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R_{vs}}$$

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1591 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{30}$$

$$Q = 6,66$$

$$b = \frac{f_0}{Q}$$

$$b = \frac{1591}{6,66}$$

$$b = 238,8 \text{ Hz}$$

Die Impedanz- und Stromkurven verlaufen nicht symmetrisch zur Resonanzfrequenz. Diese Asymmetrie hat ihre Ursache im ungleichen Verlauf der Blindwiderstände von Spule und Kondensator in Abhängigkeit der Frequenz. Für

Hochfrequenzkreise kann diese Unsymmetrie vernachlässigt werden, da die viel höheren Kreisgüten bedeutend kleinere Bandbreiten zur Folge haben. Die Kurve des Blindwiderstandes des Kondensators darf im interessierenden kleinen Bereich als linear angenommen werden, dadurch erhält die Resonanzkurve einen symmetrischen Verlauf.

5. Das Wesentliche

Der Serieschwingkreis besteht aus einer Serieschaltung von Kapazität und Induktivität. Die gesamten Schwingkreisverluste werden für die Berechnung des Kreises in einem Serieverlustwiderstand zusammengefasst.

Die Frequenz, für welche der kapazitive und der induktive Blindwiderstand gleich gross sind, heisst Resonanzfrequenz.

Die Resonanzfrequenz lässt sich mit Hilfe der Thomsonschen Schwingkreisformel errechnen. Diese Formel enthält die algebraische Fassung der Resonanzbedingung, die fordert, dass für den Resonanzfall der kapazitive und der induktive Blindwiderstand gleich gross sein müssen.

Im Resonanzfall wirkt der Seriekreis wie ein rein ohmscher Widerstand, dessen Wert dem Serieverlustwiderstand entspricht. Oberhalb der Resonanzfrequenz wirkt der Kreis induktiv, unterhalb davon kapazitiv.

Das Arbeitsverhalten des Kreises wird in der Resonanzkurve dargestellt.

Die Kreisgüte entspricht in der Praxis der Spulengüte, da die Verluste des Kondensators vernachlässigbar klein sind.

Die Durchlassbreite des Kreises wird Bandbreite genannt. Diese wird zwischen den zwei Punkten der Resonanzkurve gemessen, für welche der Schwingkreisstrom um den Faktor $\sqrt{2}$ abgesunken ist.

Die Bandbreite hängt von der Kreisgüte und der Resonanzfrequenz ab. Der Quotient aus Resonanzfrequenz und Kreisgüte ergibt den Wert der Bandbreite.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 471)

- Erklären Sie, warum der Schwingkreis im Resonanzfall als ohmscher Widerstand wirkt.
- Leiten Sie aus der Resonanzbedingung die Thomsonsche Schwingkreisformel ab.
- Berechnen Sie für den Kreis nach Bild 240 die Kapazität, die Kreisgüte und die Bandbreite.

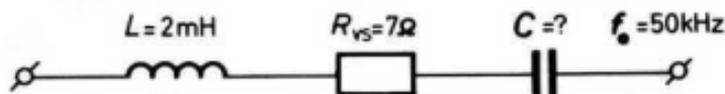


Bild 240

- d) Die Bandbreite eines Schwingkreises beträgt 2 kHz, die Kreisgüte misst 100, der Serieverlustwiderstand hat einen Wert von 4 Ohm. Bestimmen Sie die Schwingkreis-kapazität.
- e) Zeichnen Sie das Vektordiagramm für den Resonanzfall eines Serieschwingkreises mit einem Q von 5 in den richtigen Proportionen.
- f) Warum ist die Kreisgüte praktisch mit der Spulengüte identisch?
- g) Sagt die Bandbreite etwas über die Güte des Kreises aus?

VIII. Der Parallelschwingkreis

1. Einführung

Der Parallelschwingkreis unterscheidet sich in der Schaltungsart und im Arbeitsverhalten vom Serieschwingkreis. Er besteht jedoch aus den gleichen Bauelementen; aus Spule und Kondensator. Der Parallelkreis ist weitaus häufiger anzutreffen, als der Seriemarkreis. Im Parallelkreis steht uns ein typisches Selektionsmittel zur Verfügung. Mit seiner Hilfe werden aus einem Frequenzspektrum ganz bestimmte Frequenzen herausgesiebt. Da der Seriemarkreis im Resonanzfall einen sehr kleinen ohmschen Widerstand darstellt, wird er oft zur Unterdrückung unerwünschter Frequenzen verwendet. Der Parallelkreis verhält sich genau umgekehrt, für seine Resonanzfrequenz stellt er einen sehr hohen ohmschen Widerstand dar. Die Resonanzbedingung dagegen ist für beide Schwingkreisarten dieselbe.

2. Was wissen Sie schon über den Parallelschwingkreis?

(Lösung Seite 474)

- Wie ist ein Parallelschwingkreis aufgebaut?
- Spielt die Spulengüte für die Qualität des Parallelschwingkreises eine Rolle?
- Gilt die Thomsonsche Schwingkreisformel des Seriemarkreises auch für den Parallelkreis?
- Kennen Sie ein Anwendungsgebiet für den Parallelkreis?
- Beeinflusst die Spulengüte im Parallelkreis die Bandbreite des Kreises?

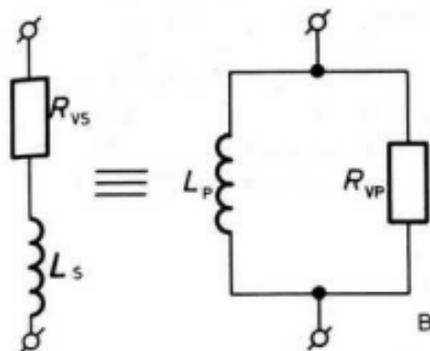
3. Der Parallelschwingkreis

a) Der Aufbau des Parallelschwingkreises

Der *Parallelschwingkreis* besteht aus der Parallelschaltung von Spule und Kondensator. Alle Kreisverluste werden in einem *Parallelverlustwiderstand* zusammengefasst. Dieser Parallelverlustwiderstand ist durch die Umwandlung einer Serieschaltung in eine Parallelschaltung entstanden, da die Verluste der Spule physikalisch gesehen immer als Serieverlustwiderstand auftreten. Die zur Umwandlung eines Serieverlustwiderstandes in einen Parallelverlustwiderstand notwendigen mathematischen Ableitungen würden den Rahmen dieses Lehrganges sprengen. Die grundsätzlichen Überlegungen, die zu dieser Umwandlung führen, sollen jedoch kurz dargelegt werden:

- Spulenverluste sind ihrem Wesen nach *Serieverluste*, diese erscheinen als Seriewiderstand zu einer Induktivität nach Bild 241 linke Hälfte.
- Für die rechnerische Behandlung des Parallelschwingkreises sollten die Kreisverluste in Form eines *Parallelverlustwiderstandes* erfassbar sein, da dadurch die Rechnung wie die graphische Darstellung stark vereinfacht werden.

- Es geht nun darum, eine Induktivität mit Serienverlusten in eine Induktivität mit Parallelverlusten umzuwandeln. Die beiden Schaltungen in Bild 241 müssen gleichwertig sein.



Es gilt folgende Umrechnung:

$$R_{VP} = \frac{R_{VS}^2 + (\omega L_S)^2}{R_{VS}} = R_{VS} \left[1 + \left(\frac{\omega L_S}{R_{VS}} \right)^2 \right]$$

$$\omega L_P = \frac{R_{VS}^2 + (\omega L_S)^2}{\omega L_S} = L_S \left[1 + \left(\frac{R_{VS}}{\omega L_S} \right)^2 \right]$$

Bild 241

- Die Parallelschaltung muss die gleiche Impedanz und den gleichen Phasenwinkel mit umgekehrtem Vorzeichen ($\frac{1}{j} = -j$) aufweisen wie die Serieschaltung. Diese Forderung kann nur erfüllt werden, wenn die Induktivität und der Verlustwiderstand der Parallelschaltung gegenüber der Serieschaltung verändert werden.
- Im praktischen Bereich für Spulengüten über 20 ist die Änderung der Induktivität so gering, dass sie vernachlässigt werden darf.
- Wir merken uns folgendes:
Je kleiner der Serienverlustwiderstand einer Spule, desto grösser wird der Parallelverlustwiderstand.
- Die Spulengüte für die Parallelschaltung ergibt sich zu

$$Q_L = \frac{R_{VP}}{X_{LP}} \quad (R_{VP} = \text{Parallelverlustwiderstand})$$

Für die folgenden Betrachtungen verwenden wir den Parallelschwingkreis mit Parallelverlustwiderstand, wie Bild 242 zeigt.

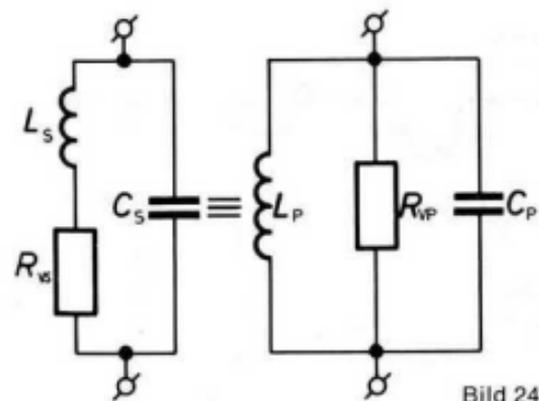


Bild 242

Für die Resonanzfrequenz gilt folgende Umrechnung:

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_S C_S} - \left(\frac{R_{VS}}{L_S} \right)^2}$$

$$L_P \approx L_S$$

$$C_P = C_S$$

$$R_{VP} \approx R_{VS}$$

$$Q = \frac{X_{LS}}{R_{VS}} = \frac{R_{VP}}{X_{LP}}$$

b) Die gedämpfte Schwingung

Eine *gedämpfte Schwingung* ist eine Schwingung, deren Amplitude ausklingt. Ein angestossenes Pendel schwingt infolge der Reibungsverluste mit abnehmender Schwingungsweite, es erzeugt eine gedämpfte Schwingung.

Ein angeregter Schwingkreis erzeugt ebenfalls eine gedämpfte Schwingung. Der folgende Vorgang zeigt die Entstehung einer gedämpften Schwingung:

- Der Kondensator in Bild 243 ist mit Hilfe der Gleichspannungsquelle B aufgeladen worden. Beim Umschalten des Schalters S fließt die im elektrischen Feld des Kondensators aufgespeicherte Ladung als Strom durch die

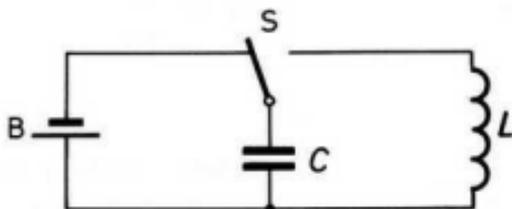


Bild 243

Spule und erzeugt in dieser ein magnetisches Feld. Während der Entladung des Kondensators baut sich das elektrische Feld in diesem ab und sinkt auf den Wert Null. Die im Kondensator gespeicherte elektrische Energie hat sich in magnetische Energie der Spule umgewandelt. Da infolge des Abbaues des elektrischen Feldes im Kondensator der Stromfluss zusammengebrochen ist, fällt auch das magnetische Feld der Spule zusammen, in den Windungen der Spule wird eine Spannung induziert, welche den Kondensator mit umgekehrter Polarität wieder auflädt. Die magnetische

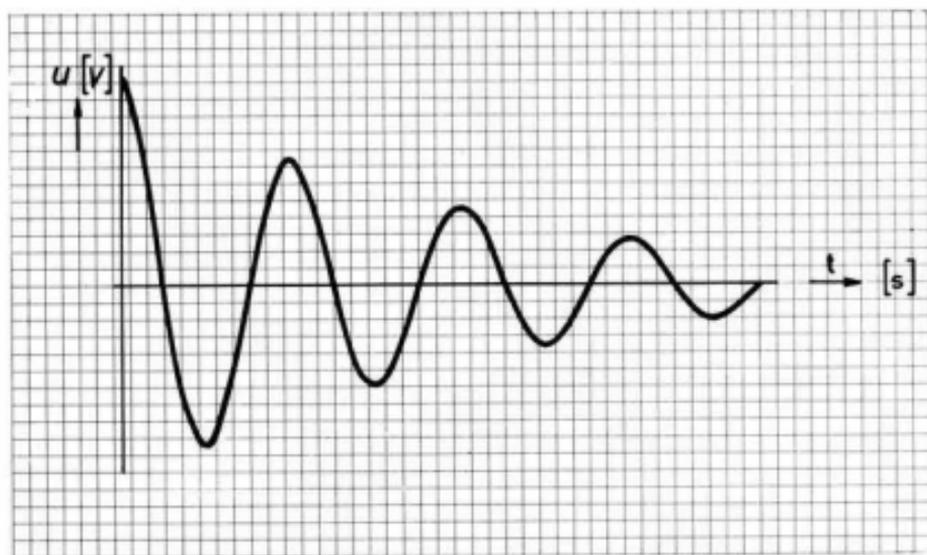


Bild 244

Energie der Spule wurde in elektrische Energie des Kondensators umgesetzt. In einem verlustfreien Schwingkreis würde sich dieser Energiewechsel dauernd wiederholen, der Kreis würde ewig schwingen. Ein solcher Kreis wäre mit einem Pendel vergleichbar, das keine Reibungsverluste aufweist. Das Pendel würde, einmal angestossen, immerwährend schwingen. Da nun aber in jedem Schwingkreis Verluste in Form eines ohmschen Widerstandes auftreten, wird beim Energiewechsel dauernd Leistung in Wärme umgesetzt, da der Strom durch den Verlustwiderstand fliesst. Die Schwingungen klingen demzufolge ab und wir erhalten eine gedämpfte Schwingung, wie sie in Bild 244 gezeigt wird.

Die Energieumwandlung im Kreis beansprucht eine gewisse Zeit. Je grösser Kondensator und Spule gemacht werden, desto langsamer läuft der Schwingungsvorgang ab. Diese Feststellung deckt sich mit der Thomsonschen Schwingkreisformel, die auch für die Parallelschaltung Gültigkeit hat. Der folgende Versuch zeigt die Entstehung einer gedämpften Schwingung. Die Schaltung erkennen wir in Bild 245, während Bild 246 den Versuchsaufbau zeigt.

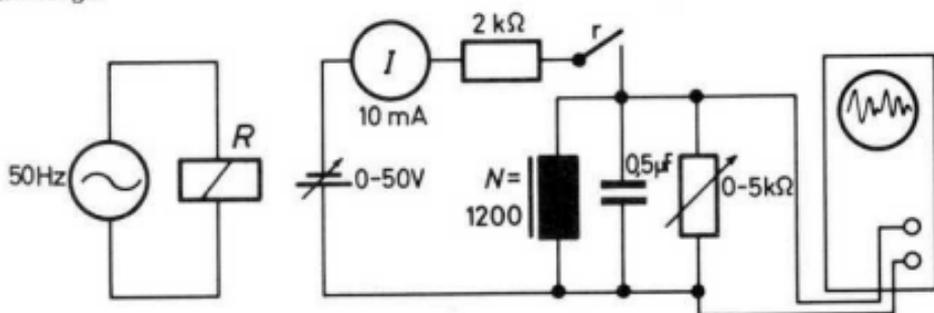


Bild 245

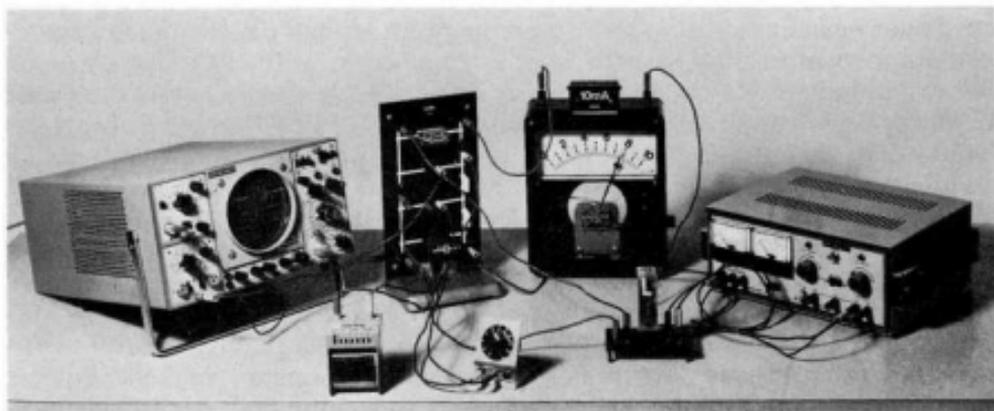


Bild 246

Der Messkreis wird von der Gleichspannungsquelle über den Relaiskontakt r periodisch angeregt. Die Kreisgüte wird mit dem $5 \text{ k} \Omega$ Potentiometer verändert. Auf dem Oszillografen erscheint die gedämpfte Schwingung des Kreises. Der Einfluss der Kreisgüte auf den Schwingungsverlauf wird durch Verstellen des Potentiometers sichtbar gemacht.

Der Vorgang im Schwingkreis lässt sich an Hand eines mechanischen Modells veranschaulichen. In Bild 247 ist die Anordnung skizziert.

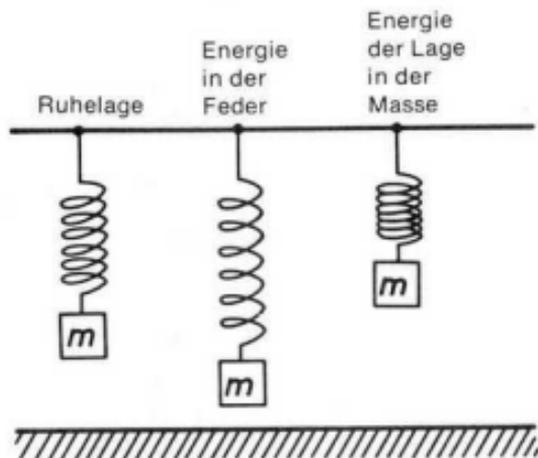


Bild 247

Eine Spiralfeder ist an der Zimmerdecke befestigt. Diese Feder trägt als Masse einen Bleiklotz. Die Länge der Feder ist so bemessen, dass sich die Masse im Ruhezustand auf halber Zimmerhöhe befindet. Der Bleiklotz wird jetzt auf den Boden gedrückt, die Feder wird dadurch gespannt. Die durch das Herunterdrücken der Masse geleistete Arbeit ist nun als Energie in der gespannten Feder gespeichert. Die Feder übernimmt im Modell die Rolle des geladenen Kondensators. Sobald die Masse losgelassen wird, schnell sie nach oben. Im Moment, da die Masse den höchsten Punkt erreicht, wird die Feder vollkommen entspannt. Die ganze Energie befindet sich jetzt als Energie der Lage in der Masse. Die Induktivität wird durch die Masse dargestellt, die im Magnetfeld gespeicherte Energie entspricht der Energie der Lage in der Masse. Die Masse wird jetzt in Richtung zum Boden fallen, die Feder wird wiederum gespannt, die Energie der Lage wandelt sich während des Falles in Energie der Feder um. Ohne die unvermeidlichen Reibungsverluste würde der Schwingungsvorgang ewig dauern. Je grösser die Reibungsverluste werden, desto rascher klingen die Schwingungen ab. Die durch Reibung verursachten Verluste lassen sich mit den ohmschen Verlusten im Schwingkreis vergleichen, beide Verlustarten verursachen eine Dämpfung der Schwingungen.

c) Das Arbeitsverhalten des Parallelschwingkreises

Das Arbeitsverhalten soll am folgenden Versuch studiert werden. Die Schaltung ist in Bild 248 festgehalten, den dazugehörigen Versuchsaufbau erkennen wir in Bild 249.

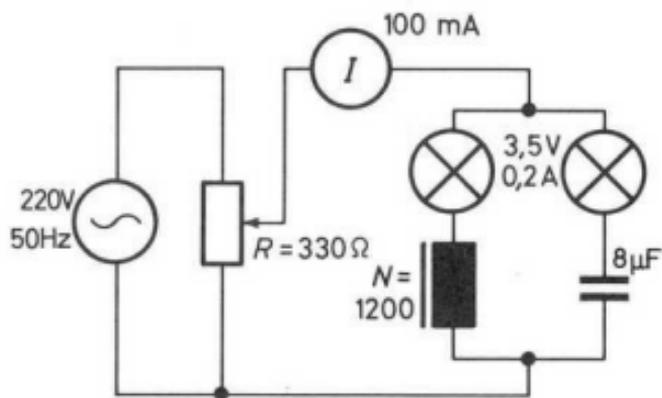


Bild 248

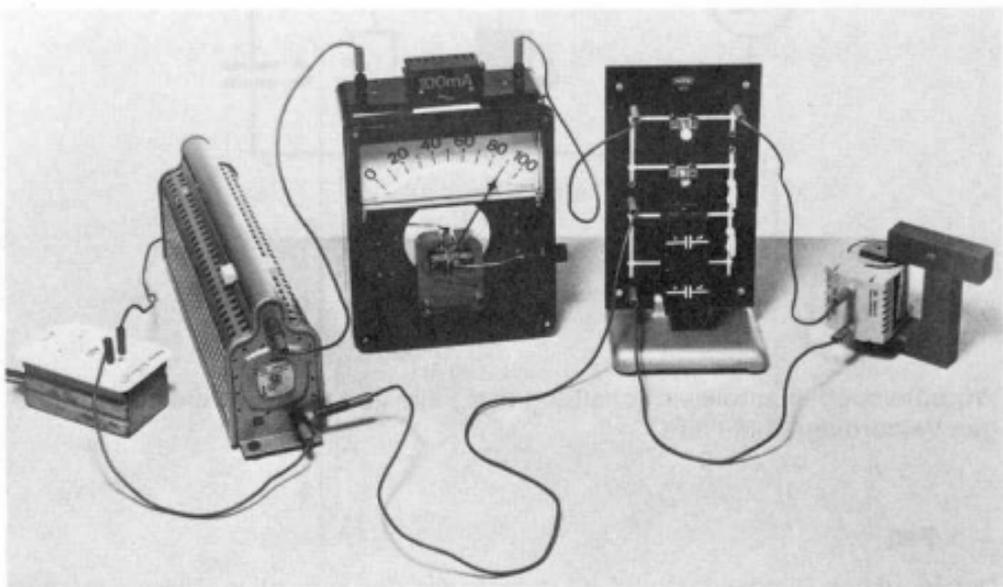


Bild 249

Die Spuleninduktivität wird auf ihren Maximalwert gebracht, indem das Joch genau in die Mitte geschoben wird. Die dem Kreis zugeführte Spannung wird am Schiebewiderstand so lange erhöht, bis sich ein Strom von 100 mA einstellt. Gleichzeitig beginnt das Lämpchen im Zweig des Kondensators zu leuchten, dasjenige im Kreis der Spule bleibt dunkel. Die Induktivität der Spule wird nun langsam verkleinert, indem das Joch weggeschoben wird. Das Lämpchen im Spulenkreis beginnt nun ebenfalls zu leuchten. Für eine bestimmte Stellung des Joches leuchten beide Lämpchen gleich hell, gleichzeitig sinkt der in den Kreis fließende Strom auf seinen kleinsten Wert. Wird die Induktivität weiter verkleinert, so steigt der Kreisstrom wieder an. Das Versuchsergebnis soll mit Hilfe des Vektordiagrammes überlegt werden. Zu diesem Zweck wird die Ersatzschaltung des Kreises aufgezeichnet. Alle Verluste werden in einem Parallelverlustwiderstand zusammengefasst. Grundsätzlich handelt es sich dabei um die bereits bekannte Parallelschaltung von Blind- und Wirkwiderständen. Bild 250 zeigt die Ersatzschaltung.

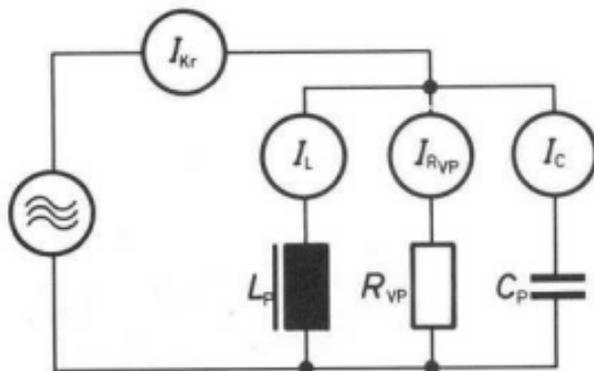


Bild 250

Wir untersuchen an dieser Schaltung drei Fälle und zeichnen die dazugehörigen Vektordiagramme auf.

– 1. Fall

Der induktive Blindwiderstand ist *grösser* als der kapazitive. Diese Situation entspricht der Ausgangslage unseres Versuches. Der Kreis wirkt kapazitiv.

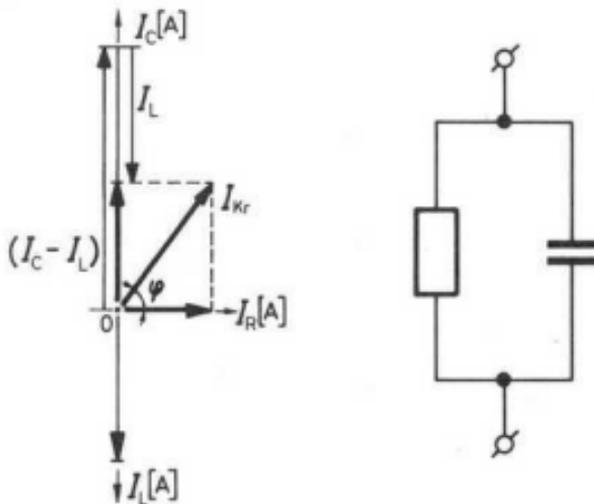


Bild 251

– 2. Fall

Der induktive Blindwiderstand ist *kleiner* als der kapazitive. Dieser Fall entspricht der Endlage unseres Versuches. Der Kreis wirkt induktiv.

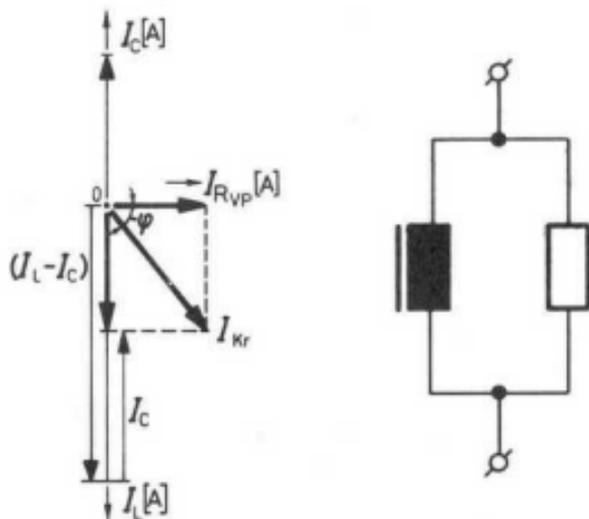


Bild 252

- 3. Fall

Der kapazitive und der induktive Blindwiderstand sind *gleich gross*. Dieser Fall entspricht jener Phase des Versuches, wo beide Lämpchen gleich hell aufleuchteten und der Kreisstrom auf seinen Minimalwert absank. Der Kreis wirkt wie ein ohmscher Widerstand.

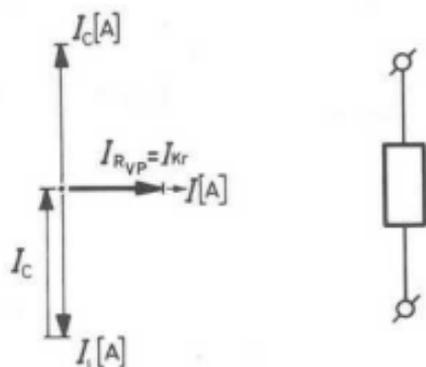


Bild 253

Der kapazitive und der induktive Blindstrom sind gegenphasig, sie heben sich demzufolge gegenseitig auf. Damit die beiden Blindströme gleiche Werte annehmen, müssen die Werte der Blindwiderstände ebenfalls gleich gross werden. In diesem Fall ist nur noch der Parallelverlustwiderstand wirksam. Der folgende Versuch wird die gemachten Beobachtungen bestätigen. Er zeigt das Arbeitsverhalten eines Kreises, der mit einer veränderlichen Frequenz gespeist wird. Die Schaltung zeigt Bild 254, der Versuchsaufbau ist in Bild 255 zu erkennen.

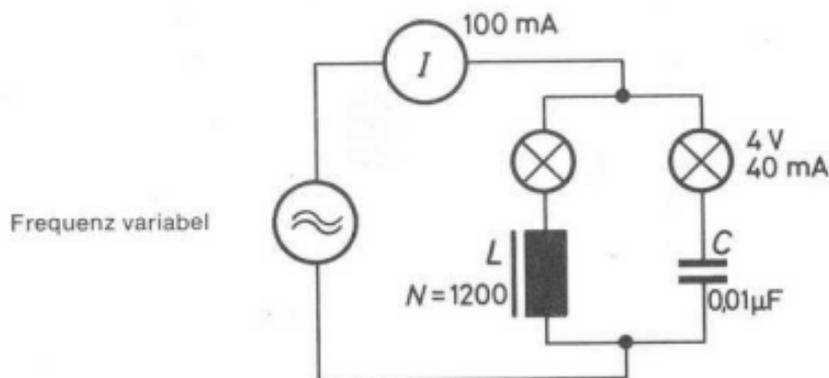


Bild 254

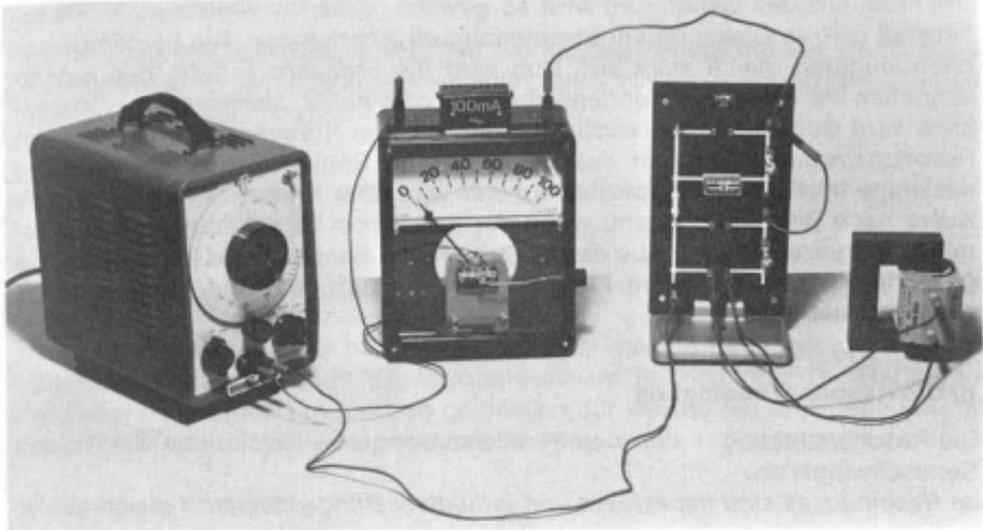


Bild 255

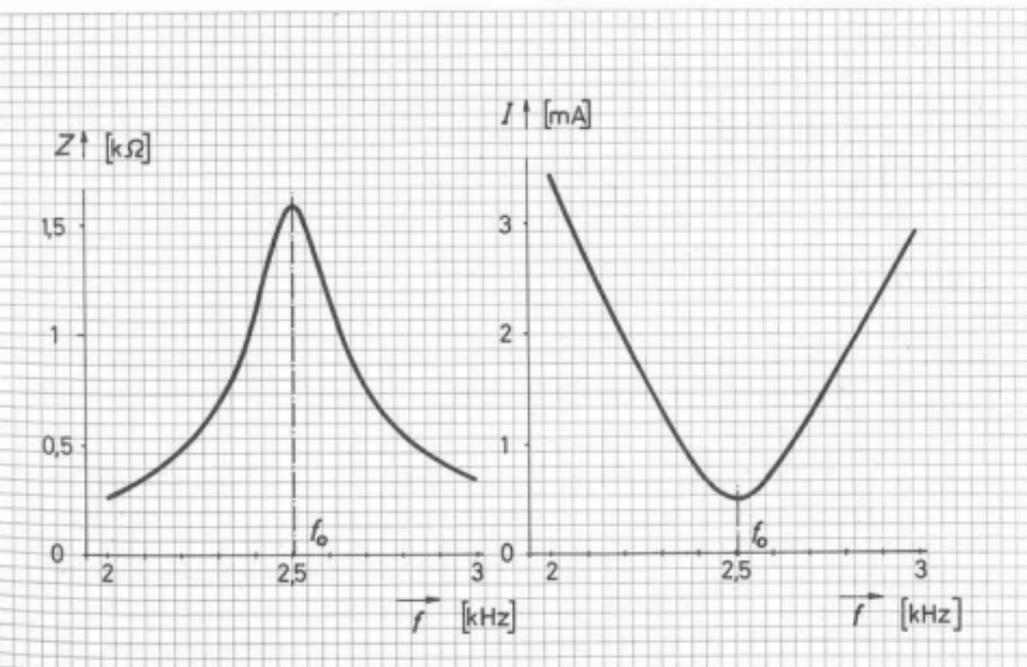


Bild 256

Die Frequenz des Generators wird so gewählt, dass für den Kreis der Resonanzfall eintritt. Dieser ist am Stromminimum zu erkennen. Die beiden Lämpchen leuchten gleich stark auf. Nun wird die Frequenz erhöht, das Signallämpchen im Kreis des Kondensators leuchtet heller, dasjenige im Spulenkreis wird dunkler: Der Kreisstrom steigt an. Bei Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz leuchtet das Lämpchen im Spulenkreis heller, während dasjenige im Kreis der Kapazität dunkler wird: Der Kreisstrom steigt an. Die Kurve nach Bild 256 entsteht, wenn der Kreisstrom in Abhängigkeit der Frequenz aufgetragen wird. Aus dieser Stromkurve lässt sich die Impedanzkurve gewinnen, indem zu jedem Frequenzwert die dazugehörige Kreisimpedanz ausgerechnet wird.

d) Die Resonanzbedingung

Die Resonanzbedingung für den Parallelschwingkreis ist dieselbe wie für den Serieschwingkreis.

Im Resonanzfall sind kapazitiver und induktiver Blindwiderstand gleich gross.

$$X_L = X_C$$
$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

Die Thomsonsche Schwingkreisformel gilt demzufolge auch für den Parallelschwingkreis.

Streng genommen gilt diese Feststellung jedoch nur für Kreise mit einer Güte über etwa 20. Bei kleineren Kreisgüten müsste der Einfluss des Verlustwiderstandes berücksichtigt werden. Die Kreise für den praktischen Gebrauch weisen jedoch alle Güten auf, für welche die Thomsonsche Formel verwendet werden darf.

e) Die Resonanzkurve

Die graphische Auswertung des letzten Versuches ergibt wiederum die Resonanzkurve. Für die praktische Arbeit ist vor allem der Verlauf der Impedanzkurve von Bedeutung. Die linke Kurve in Bild 256 zeigt den Impedanzverlauf eines Parallelschwingkreises.

Der Kurvenverlauf hängt von den Schwingkreiseigenschaften ab. Im Gegensatz zum Seriekreis weist der Parallelkreis im Resonanzfall den grössten Impedanzwert auf. Für die Resonanzfrequenz stellt auch der Parallelkreis einen rein ohmschen Widerstand dar. Der Parallelkreis wird überall dort eingesetzt, wo es darum geht, *aus einem Frequenzspektrum eine bestimmte Frequenz herauszuheben*. Er verhält sich wie ein Farbfilter für fotografische Zwecke, ein Rotfilter beispielsweise lässt aus dem gesamten Lichtspektrum nur rotes Licht passieren, das heisst, dass Licht mit der Wellenlänge Rot herausfiltriert wird.

f) Die Kreisgüte Q

Die Kreisgüte des Parallelkreises hat die gleiche Bedeutung wie die Güte des Seriekreises. Es ist jedoch zu beachten, dass zur Berechnung der Güte der Parallelverlustwiderstand herangezogen wird.

$$Q = \frac{R_{vp}}{\omega_0 L_p} \quad d = \frac{1}{Q} \quad R_{vp} = \text{Parallelverlustwiderstand}$$

g) Die Bandbreite b

Die Bandbreite b hat für den Parallelkreis die gleiche Bedeutung wie für den Seriekreis. Bild 257 zeigt die Verhältnisse am Parallelkreis. Die Bandbreite wird bei den beiden Frequenzen gemessen, für welche die Kreisimpedanz auf den $1/\sqrt{2}$ -fachen Wert der Impedanz im Resonanzfall abgesunken ist.

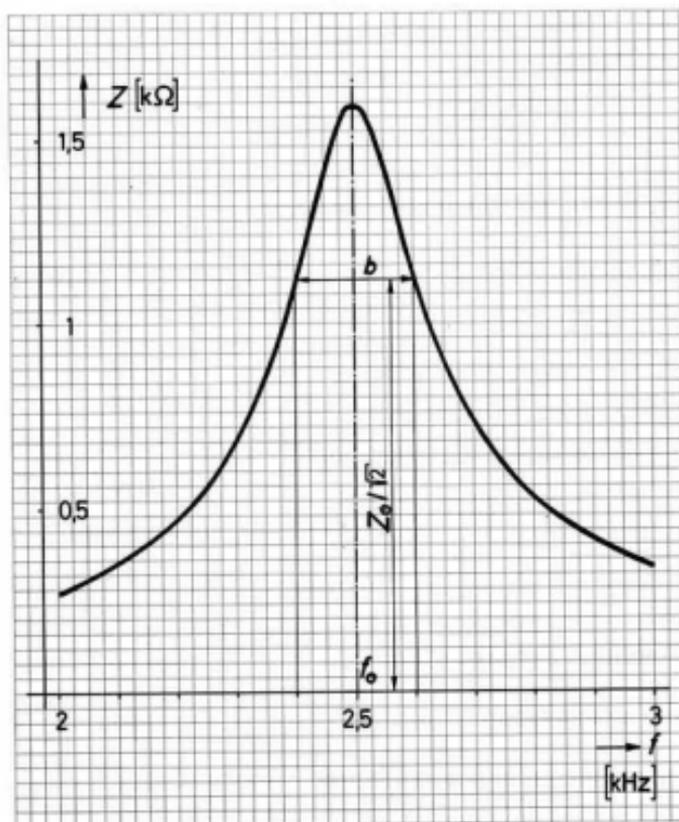


Bild 257

4. Beispiele

a) Bestimmen der Frequenz, der Kreisgüte und der Bandbreite

Der Schwingkreis nach Bild 258 ist zu berechnen. Folgende Werte sind bekannt:

- $L = 150 \mu\text{H}$
- $C = 300 \text{ pF}$
- $R = 120 \text{ k}\Omega$

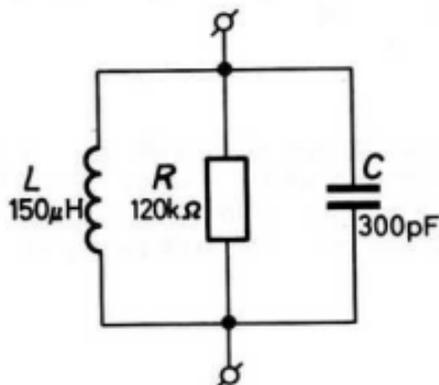


Bild 258

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Resonanzfrequenz f_o .

- Grundformel anschreiben

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$
$$[f_o] = \frac{1}{\sqrt{\frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot \frac{\text{As}}{\text{V}}}} = \frac{1}{\text{s}} = \text{Hz}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{150 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 10^{-12}}}$$

$$f_o = 750,3 \text{ kHz}$$

2. Schritt: Berechnen der Kreisgüte

- Grundformel anschreiben

$$Q = \frac{R_{\text{vp}}}{X_L}; [Q] = \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot \text{s} \cdot \frac{\text{A}}{\text{Vs}} = 1$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = \frac{120 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 0,7503 \cdot 10^6 \cdot 150 \cdot 10^{-6}}$$

$$Q = 169,7$$

3. Schritt: Berechnen der Bandbreite

– Grundformel anschreiben

$$b = \frac{f_o}{Q}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$b = \frac{750,3 \cdot 10^3}{169,7}$$

$$b = 4,42 \text{ kHz}$$

b) Berechnen und Aufzeichnen der Resonanzkurven

Der Parallelschwingkreis nach Bild 259 soll berechnet werden unter der Voraussetzung, dass die Kreisgüte $Q = 6,66$ beträgt. Die Resonanzkurve ist aufzeichnen.

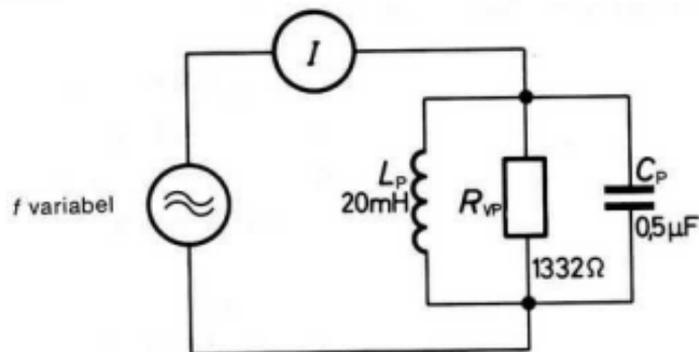


Bild 259

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Resonanzfrequenz

– Grundformel anschreiben

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{20 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}}$$

$$f_o = 1591 \text{ Hz}$$

2. Schritt: Berechnen der Resonanzkurve

Es ist eine Tabelle mit folgenden Werten aufzunehmen.

- Induktiver Blindleitwert
- Kapazitiver Blindleitwert
- Wirksamer Blindleitwert
- Kreisimpedanz

Die Berechnung hat einen Frequenzbereich von 1100 Hz bis 2100 Hz zu umfassen. Die Werte sind für Frequenzschritte von 100 Hz zu ermitteln.

- Grundformeln für den gesamten Rechnungsgang anschreiben:

$$B_L = \frac{1}{\omega L}$$

$$B_C = \omega C$$

$$G = \frac{1}{R_{vp}}$$

$$Z = \frac{1}{\sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}}$$

- Zahlenwerte einsetzen und für alle Frequenzwerte ausrechnen (Es wird nur das Beispiel mit dem ersten Frequenzwert gezeigt)

$$B_L = \frac{1}{2\pi \cdot 1100 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}$$

$$B_L = 7,23 \cdot 10^{-3} \text{ S}$$

$$B_C = 2\pi \cdot 1,1 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-7}$$

$$B_C = 3,45 \cdot 10^{-3} \text{ S}$$

$$G = \frac{1}{1332}$$

$$G = 0,751 \cdot 10^{-3} \text{ S}$$

$$Z = \frac{1}{\sqrt{0,751^2 \cdot 10^{-6} + 3,78^2 \cdot 10^{-6}}}$$

$$Z = 259 \Omega$$

f (Hz)	B_L (10^{-3} S)	B_C (10^{-3} S)	$B_L - B_C$ (10^{-3} S)	$B_C - B_L$ (10^{-3} S)	Z (Ω)
1100	7,23	3,45	3,78		259
1200	6,63	3,77	2,86		338
1300	6,12	4,08	2,04		461
1400	5,68	4,40	1,28		674
1500	5,30	4,71	0,59		1047
1600	4,97	5,03		0,05	1328
1700	4,68	5,34		0,66	1000
1800	4,41	5,65		1,24	690
1900	4,19	5,97		1,78	517
2000	3,98	6,28		2,30	413
2100	3,79	6,59		2,80	344

Tabelle 17

3. Schritt: Aufzeichnen der Resonanzkurve

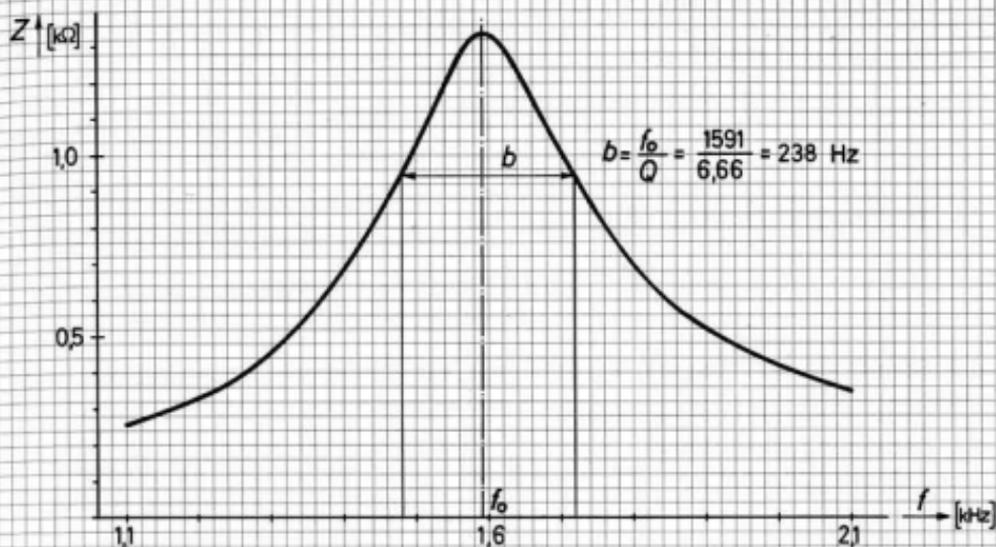


Bild 260

Die Unsymmetrie der Resonanzkurve ist auf die gleichen Ursachen zurückzuführen wie diejenige des Serienschaltkreises (siehe Seite 279).

c) Berechnung der Kreisimpedanz, der Bandbreite und der Kreisströme eines Parallelresonanzkreises

Folgende Daten der Schaltung nach Bild 261 sind für eine Kreisgüte $Q = 120$ zu berechnen:

Impedanz im Resonanzfall Z_0 , Bandbreite b , die Ströme I_R , I_C und I_L für den Resonanzfall.

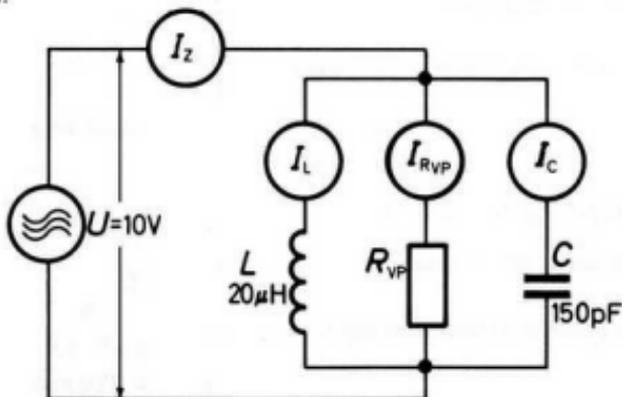


Bild 261

Vorgehen:

1. Berechnen der Resonanzfrequenz

– Grundformel anschreiben

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}}$$
$$[f_o] = \frac{1}{\sqrt{\frac{Vs}{A} \cdot \frac{As}{V}}} = \frac{1}{s} = \text{Hz}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{20 \cdot 10^{-6} \cdot 150 \cdot 10^{-12}}}$$

$$f_o = 2,9 \text{ MHz}$$

2. Schritt: Berechnung von X_L und X_C

– Grundformel für die Resonanzbedingung anschreiben

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_L = X_C = \omega_o L$$

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot 2,9 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 10^{-6}$$

$$X_L = 365 \Omega$$

3. Schritt: Berechnung von Z_o

– Grundformel für Q anschreiben

– nach R_{vp} umstellen

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = \frac{R_{vp}}{X_L}$$

$$R_{vp} = Q \cdot X_L$$

$$R_{vp} = 120 \cdot 365$$

$$R_{vp} = Z_o = 43,8 \text{ k}\Omega$$

4. Schritt: Berechnung der Bandbreite b

– Grundformel anschreiben

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$b = \frac{f_o}{Q}$$

$$b = \frac{2,9 \cdot 10^6}{120}$$

$$b = 24,22 \text{ kHz}$$

5. Schritt: Berechnung der Ströme

– Grundformel für I_R anschreiben

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_R = \frac{U}{Z_o}$$

$$I_R = \frac{10}{43,8 \cdot 10^3}$$

$$I_R = 0,228 \text{ mA}$$

- Grundformel für I_C und I_L anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_L = I_C = \frac{U}{X_L}$$

$$I_L = \frac{10}{365}$$

$$I_L = 27,4 \text{ mA}$$

Kontrolle: Der Blindstrom durch C und L muss im Resonanzfall Q mal grösser sein als der Wirkstrom.

$$I_R \cdot Q = I_C = I_L$$

$$0,228 \cdot 10^{-3} \cdot 120 = 27,4 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

Das Beispiel lässt folgende Schlussfolgerungen zu:

- Im Resonanzfall ist die Impedanz des Parallelschwingkreises Q mal grösser als der kapazitive und der induktive Blindwiderstand.
- Für den Resonanzfall ist im Parallelschwingkreis der Kreisstrom Q mal kleiner als der Blindstrom durch den Kondensator und durch die Spule.

d) Zusammenstellung der wichtigsten Schwingkreisformeln

	Seriekreis	Parallelkreis*
Thomsonsche Schwingkreisformel	$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}}$	$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}}$
Kreisgüte	$Q = \frac{\omega_o L}{R_{vs}}$	$Q = \frac{R_{vp}}{\omega_o L}$
Dämpfung	$d = \frac{1}{Q}$	$d = \frac{1}{Q}$
Bandbreite	$b = \frac{f_o}{Q}$	$b = \frac{f_o}{Q}$
Impedanz für den Resonanzfall	$Z_o = R_{vs} = \frac{\omega_o L}{Q}$	$Z_r = R_{vp} = Q \omega_o L$
Spannungsüberhöhung im Resonanzfall	$U_C = U_L = Q \cdot U_{kr}$ (U_{kr} = Kreisspannung)	-
Stromüberhöhung im Resonanzfall		$I_C = I_L = Q \cdot I_{kr}$ (I_{kr} = Kreisstrom)

* Wenn die Induktivität als Seriewert eingesetzt wird, muss Q grösser als 20 sein, sonst sind die Umrechnungsformeln Seite 283 zu verwenden.

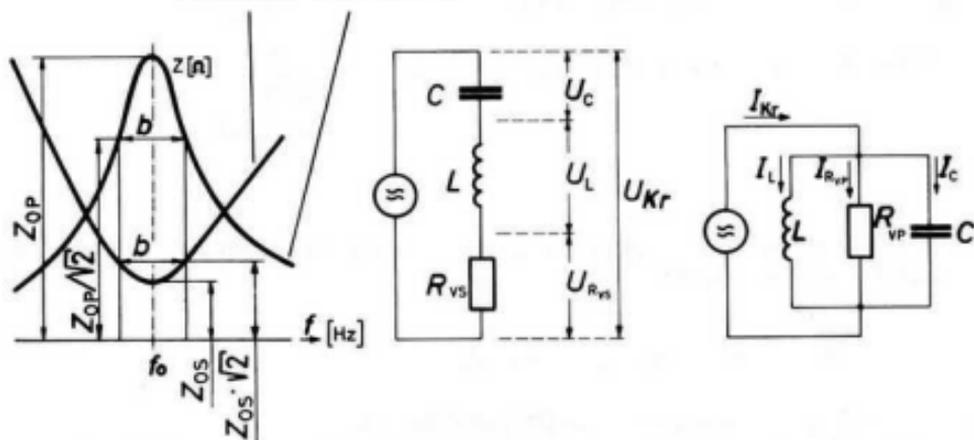


Bild 262

5. Das Wesentliche

Der Parallelschwingkreis besteht aus der Parallelschaltung von Kapazität und Induktivität. Die gesamten Schwingkreisverluste werden in einem Parallelverlustwiderstand zusammengefasst.

Die Frequenz, für welche der kapazitive und der induktive Blindwiderstand gleich gross sind, heisst Resonanzfrequenz.

Die Resonanzfrequenz des Parallelkreises lässt sich mit Hilfe der Thomson'schen Schwingkreisformel errechnen.

Im Resonanzfall wirkt der Parallelkreis wie ein rein ohmscher Widerstand, dessen Wert dem Parallelverlustwiderstand des Kreises entspricht. Oberhalb der Resonanzfrequenz wirkt der Kreis kapazitiv, unterhalb davon induktiv.

Für die Kreisgüte Q ist die Güte der Schwingkreisspule massgebend.

Die Kreisgüte entspricht dem Quotienten aus Parallelverlustwiderstand und induktivem Blindwiderstand im Resonanzfall.

Die Bandbreite wird zwischen den zwei Punkten der Resonanzkurve gemessen, für welche die Kreisimpedanz auf den $1/\sqrt{2}$ -fachen Wert der Impedanz im Resonanzfall abgesunken ist.

Die Kreisimpedanz ist im Resonanzfall um den Faktor Q grösser als der kapazitive oder induktive Blindwiderstand.

Parallelschwingkreise werden überall dort verwendet, wo aus einem Frequenzspektrum eine bestimmte Frequenz herausgefiltert werden soll.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 474)

- Welcher Unterschied besteht im Arbeitsverhalten zwischen einem Serie- und einem Parallelschwingkreis?
- Definieren Sie die Güte des Parallelkreises.
- Zeichnen Sie im richtigen Massstab das Vektordiagramm der Leitwerte eines Parallelkreises für den Resonanzfall. Die Kreisgüte beträgt 10.
- Welches Verhältnis gilt für die Blindströme zum Wirkstrom des Parallelkreises für die Resonanzfrequenz?
- Ein Parallelkreis wird mit seiner Resonanzfrequenz gespeist. Die beiden Blindwiderstände X_C und X_L betragen 1200 Ohm. Die Kreisgüte misst 230. Berechnen Sie den Wert des Resonanzwiderstandes.
- Ein Parallelschwingkreis wird oberhalb seiner Resonanzfrequenz betrieben. Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild für diesen Betriebsfall.
- Die Resonanzfrequenz eines Parallelkreises wird zu 600 kHz ermittelt. Der Kreis hat eine Güte von 250. Bestimmen Sie die Bandbreite des Kreises.
- Der Schwingkreis nach Bild 263 soll durch entsprechende Wahl des Kondensators auf eine Resonanzfrequenz von 2,8 MHz gebracht werden.

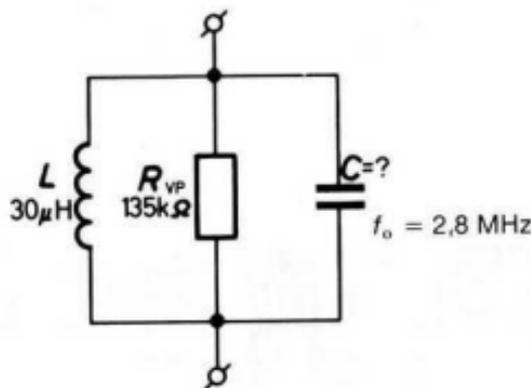


Bild 263

Wie gross muss der Wert des Kondensators gemacht werden?

IX. Die Bandfilter

1. Einführung

Wir haben gesehen, dass man mit Hilfe von Parallelschwingkreisen aus einem Frequenzspektrum eine bestimmte Frequenz, die Resonanzfrequenz des Kreises, herausziehen kann. Wir wissen auch, dass der Schwingkreis eine bestimmte Resonanzkurve mit einer bestimmten Bandbreite aufweist. Jede Nachrichtenübermittlung, gleichgültig ob diese über Draht oder Funk erfolgt, benötigt eine bestimmte Bandbreite im Frequenzspektrum. Diese Bandbreite hängt von der Modulationsart, vom Frequenzumfang der übertragenen Sendung und von der Geschwindigkeit der Zeichenübermittlung ab. Im Empfänger werden die einzelnen Sender mit Schwingkreisen herausfiltriert. Bild 264 zeigt schematisch die Verteilung der Sender in einem Band.

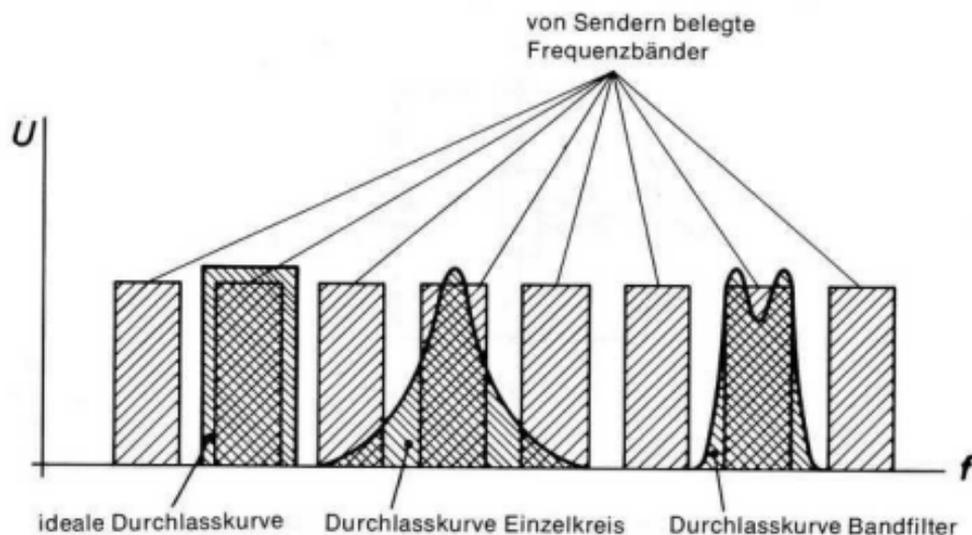


Bild 264

Die Schwingkreise haben nun die Aufgabe, das Frequenzpaket, das die gesamte Information des Senders enthält, aus dem Spektrum herauszuholen. Wir sehen sofort ein, dass ein gewöhnlicher Schwingkreis dieser Aufgabe nicht gerecht werden kann, da seine Resonanzkurve hierzu eine zu ungünstige Form aufweist. Da die Flanken zu wenig steil sind, wird ein Teil der Nachbarsender mitempfangen. Um die einzelnen Sender voneinander sauber trennen zu können, ist ein Selektionsmittel mit viel steileren Flanken not-

wendig. Am idealsten wäre ein Bauelement mit rechteckförmiger Durchlasskurve. Diese Idealkurve erreicht man mit den heutigen Mitteln nicht. Doch bringt bereits ein einfaches Bandfilter eine merkliche Verbesserung gegenüber dem Einzelkreis.

Bandfilter werden überall dort verwendet, wo die Durchlasskurve des Einzelkreises nicht genügt, so beispielsweise in Rundfunkempfängern, in Fernsehgeräten, in Funkgeräten, in Fernschreibenanlagen, in Mehrkanaltelefoniegeräten und in der Messtechnik. Das einfachste Bandfilter besteht aus zwei gekoppelten Einzelkreisen.

2. Was wissen Sie schon über Bandfilter?

(Lösung Seite 476)

- Welchen Vorteil weist das Bandfilter gegenüber dem Einzelkreis auf?
- Welche Faktoren bestimmen die Bandbreite des Einzelkreises?
- Nennen Sie eine Kopplungsart für Bandfilter.
- Gibt es Bandfilter, die aus mehr als zwei Einzelkreisen bestehen?
- Was verstehen Sie unter dem Begriff «induktive Kopplung»?

3. Die Bandfilter

a) Grundsätzliches zum Bandfilter

Das *Bandfilter* besteht aus wenigstens zwei gekoppelten Schwingkreisen. Die *Kopplung* erfolgt durch ein beiden Kreisen gemeinsames Element. In der Regel wird eine *induktive* oder *kapazitive Kopplung* angewendet. Die *galvanische Kopplung* über einen gemeinsamen Widerstand ist nur in Ausnahmefällen anzutreffen. Die Kopplung zwischen den Einzelkreisen kann von sehr lose bis sehr eng eingestellt werden, daraus ergeben sich verschiedene Kopplungsgrade. Man unterscheidet zwischen *unterkritischer*, *kritischer* und *überkritischer Kopplung*. Der Kopplungsgrad beeinflusst die Durchlasskurve des Filters. Durch Kombination verschiedener Einzelkreise und Wahl der notwendigen Kopplungsgrade lassen sich Durchlasskurven mit sehr steilen Flanken verwirklichen.

b) Kopplungsarten

Die induktive Kopplung

Bei der *induktiven Kopplung* von Bandfiltern wird die Energie durch das gemeinsame Magnetfeld übertragen. Die Kopplung wird fester, je enger die Kreisinduktivitäten miteinander gekoppelt sind. In Bild 265 ist das Prinzip der induktiven Kopplung dargestellt.

gemeinsames Magnetfeld

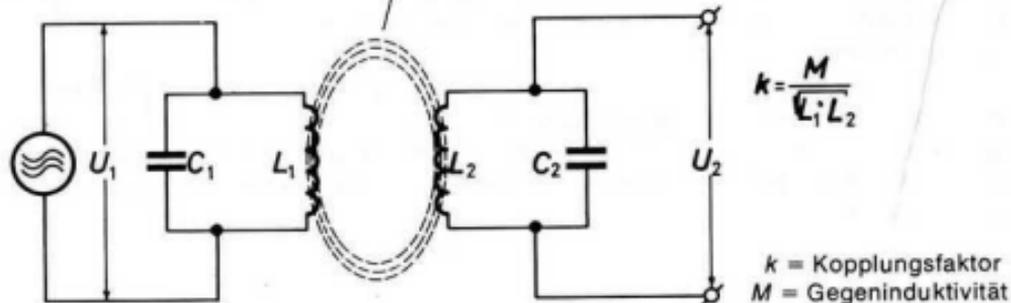


Bild 265

In induktiv gekoppelten Bandfiltern wird die elektrische Energie auf die gleiche Art übertragen wie beim Transformator. Der Unterschied besteht lediglich im Kopplungsgrad. Beim Transformator wird ein Kopplungsfaktor von 100% angestrebt, während beim Bandfilter je nach Kreisgüte und erwünschter Bandbreite Kopplungsfaktoren von weniger als einem Prozent bis zu einigen Prozenten üblich sind.

Der folgende Versuch zeigt das Arbeitsverhalten eines induktiv gekoppelten Bandfilters. Die Versuchsanordnung ist nach Bild 266 geschaltet, Bild 267 zeigt den Versuchsaufbau.

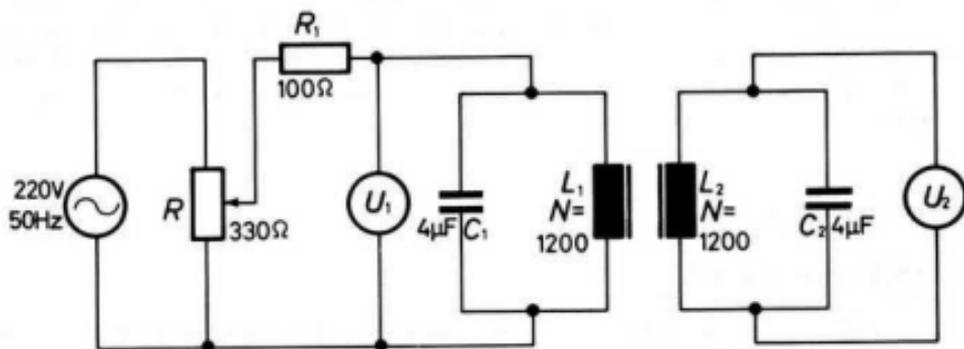


Bild 266

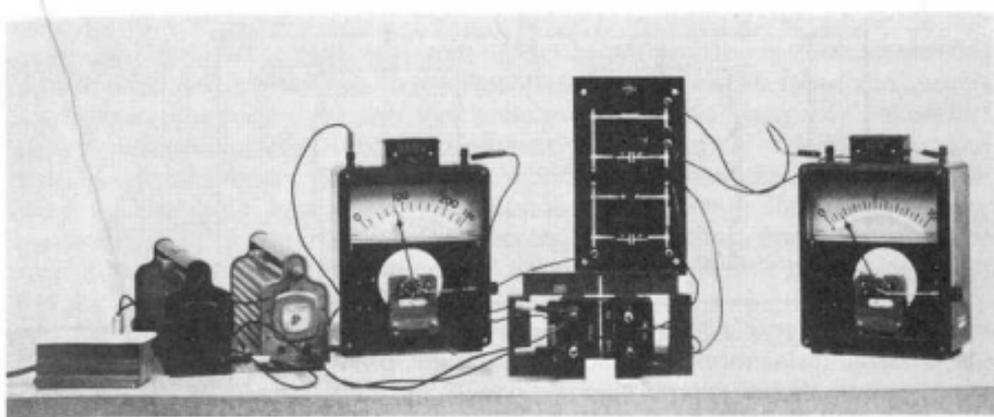


Bild 267

Dem Primärkreis wird über den Spannungsteiler eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 50 Hz zugeführt. Durch Verschieben des Joches wird dieser abgestimmt. Die Resonanzlage zeigt sich durch ein Maximum der Primärspannung an. Der Vorwiderstand R_1 entkoppelt den Primärkreis vom Netz. Der Sekundärkreis wird nun ebenfalls in Resonanz gebracht, indem das Joch so lange verschoben wird, bis die Spannung am Sekundärkreis ebenfalls ihren Maximalwert erreicht hat.

Da die beiden Kreise über das gemeinsame Magnetfeld gekoppelt sind, beeinflussen sie sich gegenseitig. Der Sekundärkreis entzieht dem Primärkreis Energie. Durch Vergrössern der Distanz von Primärkreis zu Sekundärkreis kann die Kopplung loser gemacht werden, die Spannung über dem Sekundärkreis nimmt mit loser werdender Kopplung ab.

Diese Art der Kopplung von Bandfiltern ist in der Praxis sehr oft anzutreffen. Oft werden die Filter so aufgebaut, dass sich eine Spule bewegen lässt, wodurch der Kopplungsgrad und somit die Form der Durchlasskurve verändert werden kann.

Die kapazitive Kopplung

Bei kapazitiv gekoppelten Kreisen wird die elektrische Energie über einen Kondensator vom Primärkreis zum Sekundärkreis übertragen. Die Kopplung wird umso enger, je grösser die Kapazität des Kopplungskondensators ist. Bild 268 zeigt die Prinzipschaltung.

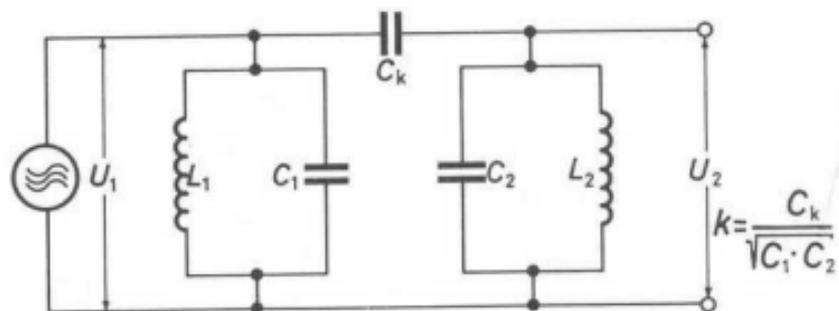
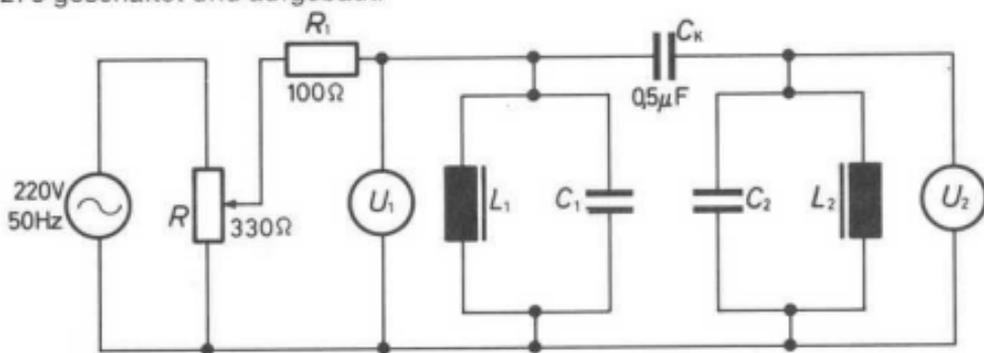


Bild 268

Der folgende Versuch gibt uns Gelegenheit, das Arbeitsverhalten eines kapazitiv gekoppelten Bandfilters zu studieren. Der Versuch ist nach Bild 269 und 270 geschaltet und aufgebaut.



$$L_1 = L_2; N = 1800; C_1 = C_2 = 4 \mu F$$

Bild 269

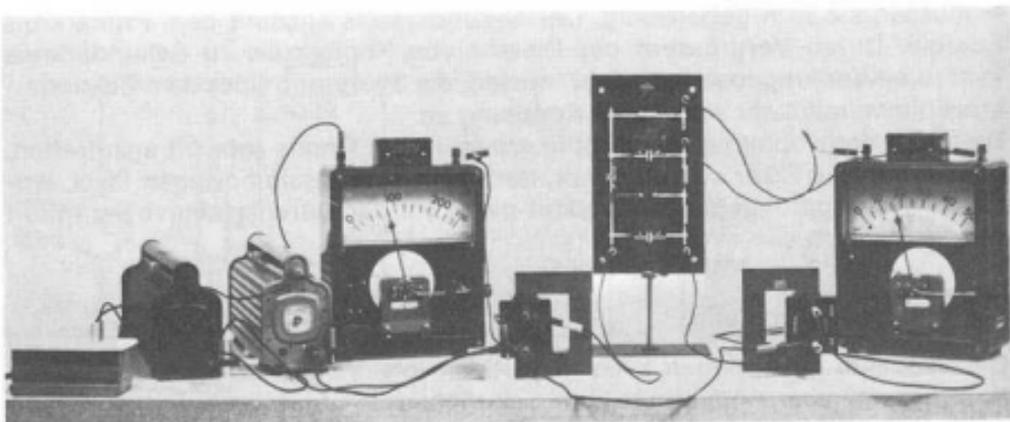


Bild 270

Dem Primärkreis wird über den Spannungsteiler und den Entkopplungswiderstand R_1 eine Wechselfeldspannung (mit 50 Hz) zugeführt. Durch Verschieben des Joches wird der Primärkreis in die Resonanzlage gebracht, diese wird durch ein Spannungsmaximum über dem Kreis angezeigt. Nun wird der Sekundärkreis ebenfalls auf die Resonanzfrequenz abgestimmt, das Voltmeter zeigt die Resonanzlage an. Der Kopplungskondensator von $0,5 \mu\text{F}$ wird durch einen solchen von $1 \mu\text{F}$ ersetzt, die Spannung am Sekundärkreis steigt an, die Kopplung ist enger geworden. Durch die Kopplung über den gemeinsamen Kopplungskondensator beeinflussen sich die Kreise gegenseitig, der Sekundärkreis entzieht dem Primärkreis Energie.

Die kapazitive Kopplung erlaubt auf eine einfache Art eine Änderung des Kopplungsgrades. Verwendet man als Kopplungskondensator einen Drehkondensator, dann lässt sich der Kopplungsgrad kontinuierlich ändern. Konstruktiv muss dafür gesorgt werden, dass sich die Kreise induktiv nicht beeinflussen können, da sonst zusätzlich eine Energieübertragung auf induktivem Wege zustande kommt. Diese unerwünschte induktive Kopplung wird am einfachsten dadurch vermieden, indem die beiden Kreise in Abschirmbecher untergebracht werden.

Die galvanische Kopplung

In galvanisch gekoppelten Kreisen erfolgt die Energieübertragung vom Primärkreis auf den Sekundärkreis über einen ohmschen Widerstand. Diese Kopplungsart ist mit Verlusten verbunden. Sie ist in der Praxis recht selten anzutreffen.

c) Der Kopplungsfaktor k

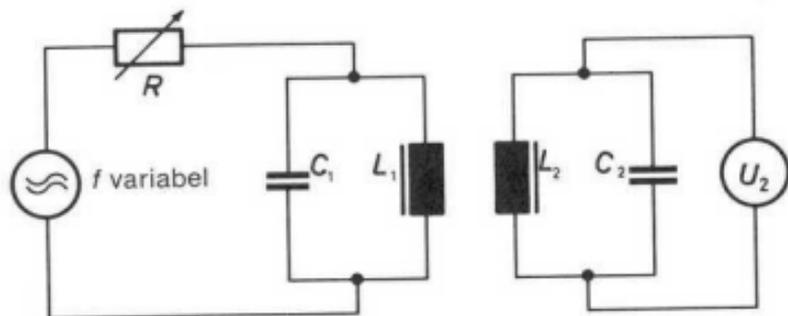
Der *Kopplungsfaktor* k ist ein Mass für die Kopplung. Bei induktiv gekoppelten Kreisen gelten die gleichen Gesetze wie beim Transformator. (Siehe Bild 205 im Kapitel VI «Der Transformator»). Wird alle Energie vom Primärkreis auf den Sekundärkreis übertragen, so erreicht der Kopplungsfaktor den Wert Eins. Der Kopplungsfaktor von HF-Bandfiltern liegt in der Grössenordnung von Bruchteilen von Prozenten bis einige Prozent.

Die Form der Durchlasskurve wird durch die Kreisgüten und den Kopplungsfaktor bestimmt. Wird der Kopplungsfaktor eines Bandfilters veränderlich gemacht, so kann damit die Filterkurve und mit ihr die Bandbreite variiert werden.

d) Die Übertragungseigenschaften

Die Feststellung, dass Kopplungsfaktor und Kreisgüte die Form der Durchlasskurve eines Bandfilters bestimmen, soll im nachfolgenden Versuch überprüft werden. Die Versuchsanordnung wird nach Bild 271 und 272 aufgebaut. Die induktive Kopplung wird dadurch veränderlich gemacht, indem der Ab-

stand zwischen den beiden Spulen vergrößert oder verkleinert wird. Der Widerstand R dient der Entkopplung des Primärkreises vom Niederfrequenzgenerator. Die beiden Kerne werden in einem Abstand von etwa 2 cm voneinander aufgestellt. Die Frequenz des Niederfrequenzgenerators wird so lange verändert, bis das Voltmeter über dem Sekundärkreis das Spannungsmaximum anzeigt. Nun werden beide Kreise durch Verschieben des Joches auf die Resonanzfrequenz abgestimmt. Der Sekundärkreis wird jetzt dem Primärkreis langsam genähert, die Spannung über dem Sekundärkreis steigt langsam an. Sobald der Abstand zwischen den Kernen kleiner als 1 cm wird, sinkt die Sekundärspannung wieder langsam ab. Wir halten den Abstand zwischen den Kernen fest, für welchen die Sekundärspannung ihren Maximalwert erreicht.



f = Tonfrequenz, variabel
 $C_1 = C_2 = 0,1 \mu\text{F}$
 $L_1 = L_2; N = 300$

Bild 271

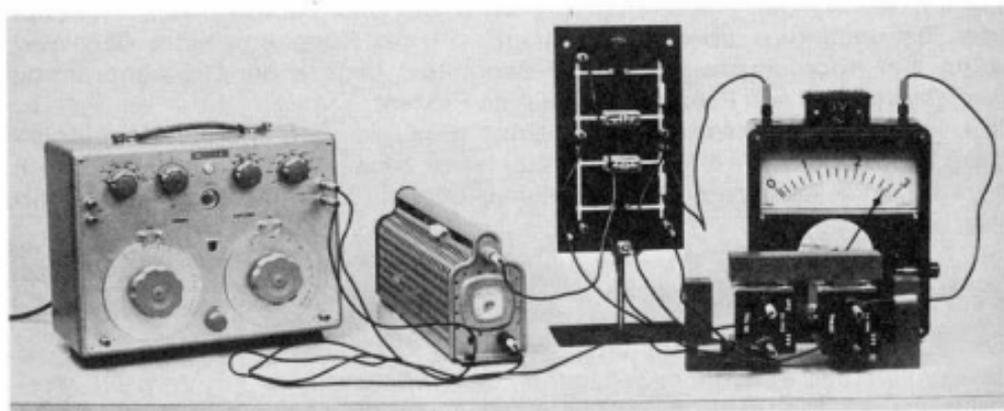


Bild 272

Für diese Kopplung soll nun die Durchlasskurve des Filters aufgenommen werden, indem der Wert der Sekundärspannung in Abhängigkeit der Frequenz festgehalten wird. Die resultierende Kurvenform ist in Bild 273 festgehalten.

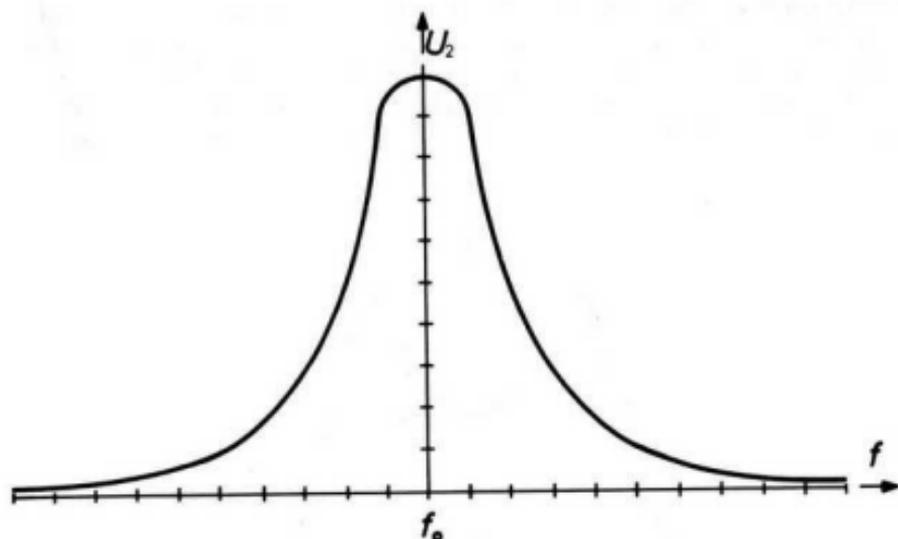


Bild 273

Die durchgeführte Messung ergibt die Durchlasskurve für ein *kritisch gekoppeltes* Bandfilter. *Kritische Kopplung* tritt dann ein, wenn der Kopplungsgrad so eng gemacht wird, dass am Sekundärkreis für die Resonanzfrequenz die grösste Spannung auftritt.

Für die nächste Messung wird der Abstand zwischen den Spulen so weit vergrössert, bis die Sekundärspannung auf etwa die Hälfte des Wertes bei kritischer Kopplung abgesunken ist. Der Messvorgang wird wiederholt und ergibt graphisch festgehalten die Durchlasskurve nach Bild 274.

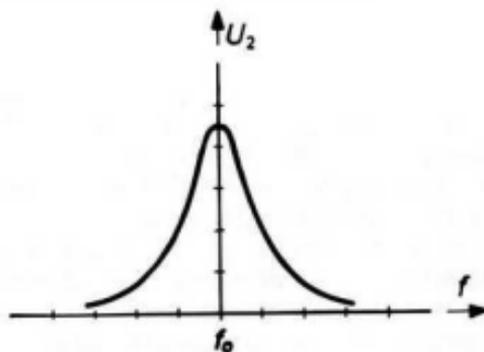


Bild 274

Die durchgeführte Messreihe zeigt den Kopplungsgrad für die *unterkritische Kopplung*, oft auch *lose Kopplung* genannt. Die *unterkritische Kopplung* umfasst den gesamten Bereich aller Kopplungsgrade unterhalb der kritischen Kopplung.

Die nächste Messung wird mit einem Kopplungsgrad durchgeführt, der enger ist als derjenige für die kritische Kopplung. Zu diesem Zweck wird der Abstand zwischen Primärkreis und Sekundärkreis soweit verringert, dass die Sekundärspannung für die Resonanzfrequenz unter den Maximalwert absinkt. Bild 275 hält die Bandfilterkurve für diesen Kopplungsgrad fest.

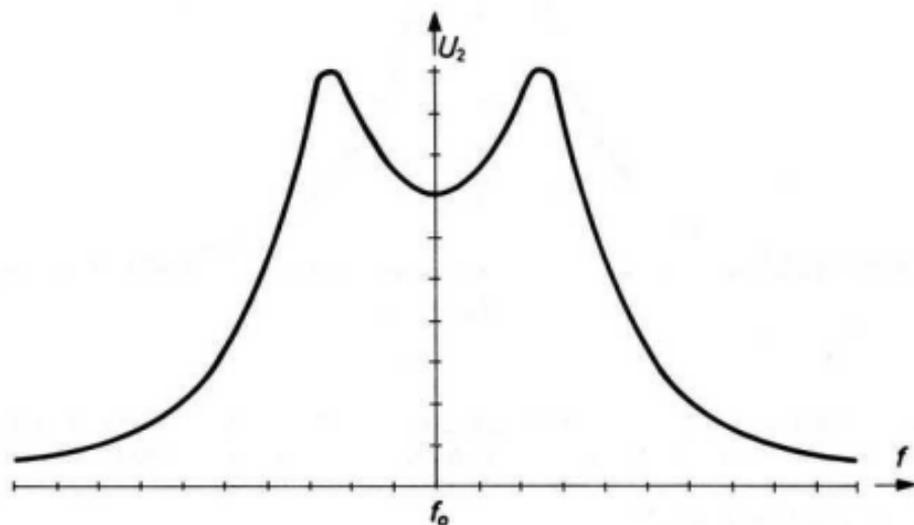


Bild 275

Die Durchlasskurve weist für diese Frequenz eine Einsattelung auf; symmetrisch dazu treten zwei Höcker auf. Kopplungsgrade, für welche eine Einsattelung der Durchlasskurve für die Resonanzfrequenz entsteht, nennt man *überkritisch*. Die *überkritische Kopplung* umfasst den gesamten Bereich aller Kopplungsgrade oberhalb der kritischen Kopplung.

Die sehr enge Kopplung wirkt sich auf den Primärkreis so aus, als ob er durch den Sekundärkreis verstimmt würde. Den gleichen Effekt verursacht der Primärkreis im Sekundärkreis. Dadurch werden die Resonanzfrequenzen der beiden Kreise gegeneinander verschoben, was die Höckerbildung verursacht.

e) Die Bedingungen für die verschiedenen Kopplungsgrade

Kritische Kopplung

Kritische Kopplung tritt dann auf, wenn das Produkt aus Kopplungsfaktor und Kreisgüte gleich Eins wird.

$$k \cdot Q = 1$$

k = Kopplungsfaktor

Q = Güte des Filters

$$Q = \sqrt{Q_1 \cdot Q_2}$$

für Filter, bei welchen die Güte des Primärkreises Q_1 und die Güte des Sekundärkreises Q_2 nicht gleich gross sind

Für die kritische Kopplung wird die Bandbreite um den Faktor $\sqrt{2}$ mal grösser als die Bandbreite eines Einzelkreises mit gleicher Güte.

Überkritische Kopplung

Überkritische Kopplung tritt dann auf, wenn das Produkt aus Kopplungsfaktor und Kreisgüte grösser als Eins wird.

$$k \cdot Q > 1$$

Der Wert sollte 2,41 nicht überschreiten, da sonst die Sekundärspannung für die Resonanzfrequenz unter den $1/\sqrt{2}$ fachen Wert der Maximalspannung absinkt. Eine so tiefe Einsattelung hätte erhebliche Verzerrungen des übertragenen Signals zur Folge. Für diese maximal zulässige Kopplung wird die Bandbreite um den Faktor 3,1mal grösser als diejenige eines Einzelkreises mit gleicher Güte.

Unterkritische Kopplung

Unterkritische Kopplung tritt dann auf, wenn das Produkt aus Kreisgüte und Kopplungsfaktor kleiner als Eins ist.

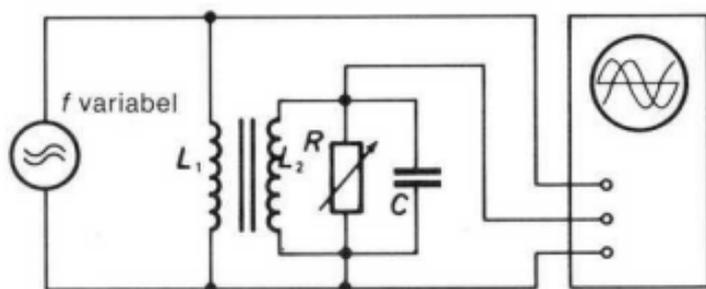
$$k \cdot Q < 1$$

Für einen Wert von 0,67 weist das Bandfilter die gleiche Bandbreite auf wie ein Einzelkreis gleicher Güte.

f) Phasenlage zwischen Primärspannung und Sekundärspannung im Bandfilter

Die Phasenlage zwischen Primär- und Sekundärspannung am Bandfilter ist dann von Bedeutung, wenn es als Bestandteil eines Diskriminators verwendet

wird. Wir werden später sehen, dass die meisten modernen Empfänger Diskriminatoren für die Demodulation frequenzmodulierter Signale verwenden. Vor-erst wollen wir uns lediglich mit den Phasenlagen im Bandfilter befassen. Der folgende Versuch soll uns helfen, die Phasenverhältnisse im Filter messtechnisch zu erfassen. Schaltung und Versuchsaufbau sind in Bild 276 und 277 festgehalten.



f = Tonfrequenz, variabel
 $L_1 \rightarrow N = 300$; $L_2 \rightarrow N = 600$
 $C = 8 \div 12 \mu\text{F}$

Bild 276

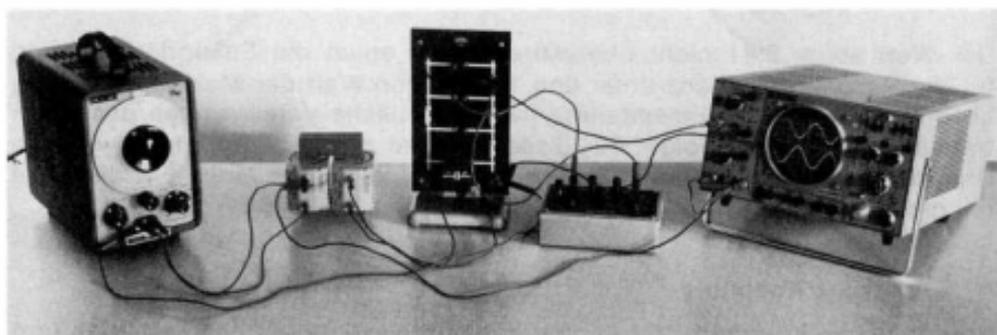


Bild 277

Der Primärkreis braucht nicht abgestimmt zu werden, da Strom und Spannung an der Primärinduktivität in bezug auf die Phasenlage das gleiche Verhalten zeigen wie beim abgestimmten Kreis. Die Generatorfrequenz wird so lange verstellt, bis das System den Resonanzfall anzeigt, was durch sprunghaftes Ansteigen des Signals auf dem Oszillografen festgestellt werden kann. Der Zweistrahloszillograf erlaubt das gleichzeitige Sichtbarmachen der Spannung am Primärkreis und derjenigen des Sekundärkreises. Ein Bild gibt die Spannung am Primärkreis, das andere diejenige am Sekundärkreis wieder. Für die Resonanzfrequenz wird eine Phasenverschiebung von 90° zwischen

Primärspannung und Sekundärspannung sichtbar. Für die nächste Messung wird die Generatorfrequenz höher als die Resonanzfrequenz gewählt. Die Phasenverschiebung wird grösser als 90° . Für eine Generatorfrequenz unterhalb der Resonanzfrequenz wird die Phasenverschiebung kleiner als 90° . Die Erläuterung der Gründe, die zu dieser Phasenverschiebung führen, würde den Rahmen des Lehrganges sprengen. Wir wollen diese Phasenbedingungen zur Kenntnis nehmen, ohne den mathematischen Beweis zu erbringen.

4. Beispiel

In einem Empfänger wird ein Bandfilter mit veränderlicher Kopplung verwendet. Es handelt sich dabei um ein symmetrisches Filter mit einer Güte von 200. Die Resonanzfrequenz beträgt 455 kHz.

Folgende Werte sind zu ermitteln:

- Für kritische Kopplung: Bandbreite und Kopplungsfaktor
- Für überkritische Kopplung: Bandbreite und Kopplungsfaktor für die maximal zulässige Kopplung.
- Für unterkritische Kopplung: Kopplungsfaktor für eine Bandbreite, welche derjenigen eines gleichwertigen Einzelkreises entspricht.

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung von Bandbreite und Kopplungsfaktor für kritische Kopplung.

– Grundformel anschreiben:

$$b = \frac{f_o}{Q} \cdot \sqrt{2}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$b = \frac{455 \cdot 10^3}{200} \cdot \sqrt{2}$$

$$b = \mathbf{3,22 \text{ kHz}}$$

– Grundformel anschreiben

$$k \cdot Q = 1$$

– nach k umstellen

$$k = \frac{1}{Q}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$k = \frac{1}{200} \cdot 100\%$$

$$k = \mathbf{0,5\%}$$

2. Schritt: Berechnung von Bandbreite und Kopplungsfaktor für maximal zulässige überkritische Kopplung

– Grundformel anschreiben

$$b = \frac{f_o}{Q} \cdot 3,1$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$b = \frac{455}{200} \cdot 3,1 \cdot 10^3$$

$$b = \mathbf{7,05 \text{ kHz}}$$

- Grundformel anschreiben
- nach k umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$k \cdot Q = 2,41$$

$$k = \frac{2,41}{Q}$$

$$k = \frac{2,41}{200} \cdot 100\%$$

$$k = 1,205\%$$

3. Schritt: Kopplungsfaktor für gerade noch zulässige unterkritische Kopplung berechnen

- Grundformel anschreiben
- nach k umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

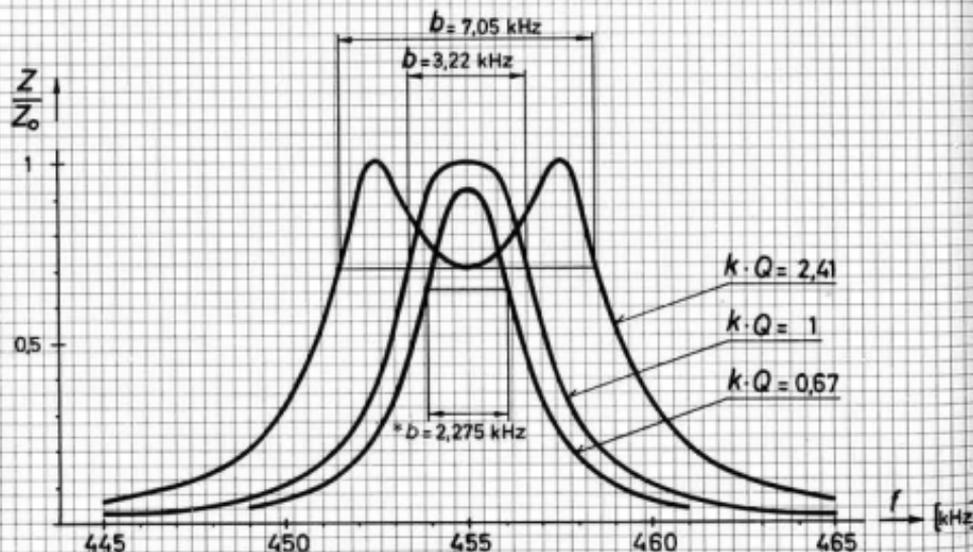
$$k \cdot Q = 0,67$$

$$k = \frac{0,67}{Q}$$

$$k = \frac{0,67}{200} \cdot 100\%$$

$$k = 0,335\%$$

Die Durchlasskurven dieses Beispiels wurden errechnet und in Bild 278 aufgezeichnet.



$$*b = \frac{455 \cdot 10^3}{200}$$

Bild 278

5. Das Wesentliche

Das Bandfilter besteht aus mindestens zwei gekoppelten Schwingkreisen. Bei den meisten Filtern erfolgt die Kopplung induktiv oder kapazitiv.

Das Bandfilter weist steilere Flanken auf als der Einzelkreis, es ermöglicht daher bessere Trennschärfe bei ausreichender Bandbreite.

Die Form der Durchlasskurve wird durch den Kopplungsfaktor und die Kreisgüte bestimmt. Bei loser (unterkritischer) Kopplung ähnelt die Durchlasskurve derjenigen des Einzelkreises. Bei kritischer Kopplung entsteht am Sekundärkreis die grösste Spannung, die Flanken werden steil und die Bandbreite wird grösser als beim Einzelkreis mit gleicher Güte. Bei überkritischer Kopplung wächst die Bandbreite weiter an, für die Resonanzfrequenz entsteht in der Durchlasskurve eine Einsattelung.

Für den Resonanzfall besteht zwischen der Primärspannung und der Sekundärspannung am Bandfilter eine Phasenverschiebung von 90° . Für Frequenzen, die von der Resonanzfrequenz abweichen, wird diese Phasenverschiebung grösser oder kleiner als 90° .

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 477)

- Welche Vorteile zeichnet das Bandfilter gegenüber dem Einzelkreis aus?
- Wo werden Bandfilter hauptsächlich eingesetzt?
- Welche Kopplungsarten kennen Sie?
- Welche Faktoren beeinflussen die Durchlasskurve eines Bandfilters?
- Wie lautet die Bedingung für die kritische Kopplung?
- Bei welchem Kopplungsgrad tritt die Höckerbildung auf?
- Zeichnen Sie die Durchlasskurven für ein Filter bei unterkritischer, kritischer und überkritischer Kopplung.
- Wie lässt sich beim induktiv gekoppelten Filter der Kopplungsgrad am einfachsten verändern?