

BIPOL



hopf

BIPOL

Elektronik-Lehrbaukasten 61202



Inhalts-Übersicht

	Versuch	Seite
Einleitung (bitte beachten!)		4
1. Grundbegriffe des Wechselstromes		
1.1 Scheitelwert und Momentanwert	1	8
1.2 Effektive Stromstärke	2	10
1.3 Effektive Spannung	3	12
1.4 Effektivwert und Galvanischer Mittelwert Verhältnis zum Scheitelwert		14
1.5 Effektivwert und Scheitelwert	4	16
1.6 Galvanischer Mittelwert und Scheitelwert	5	18
2. Gleichrichterschaltungen		
2.1 Einweggleichrichtung (ca. 1 Hz)	6	20
2.2 Anwendung der Einweggleichrichtung bei einem Voltmeter für Wechselspannung (50 Hz)	7	22
2.3 Doppelweggleichrichtung (50 Hz)	8	24
2.4 Graetzschaltung (ohne Baustein, ca. 1 Hz)	9	26
2.5 Graetzschaltung (50 Hz, Baustein) Aufbau eines Voltmeters	10	28
2.6 Glättung mit Ladekondensator (ca. 1 Hz)	11	30
2.7 Glättung mit Siebkette (Einweggleichrichtung 1 Hz)	12	32
2.8 Glättung mit Ladekondensator, Einweggleichrichtung und Graetzschaltung (50 Hz)	13	34
2.9 Glättung durch Ladekondensator Akustischer Nachweis bei 50 Hz	14	36
2.10 Spannungsverdoppelung nach Villard	15	38
2.11 Greinacher-Schaltung, Glättung und Spannungsverdoppelung	16	40
2.12 Gleichrichterschaltung mit Glättung und Spannungsvervielfachung (Kaskadenschaltung)	17	42
3. Aufbau eines vielseitigen Wechselstrominstrumentes		
3.1 Aufbau und Eichung eines Wechselstrommeßinstrumentes. Meßbereich 35 mA	18	44
3.2 Erweiterung des Meßbereiches	19	46
3.3 Meßbereich des Voltmeters	20	48
4. Kapazität und Induktivität im Wechselstromkreis		
4.0 Magnetismus, Induktion, Selbstinduktion, Ferromagnetische Stoffe		50
4.1 Nachweis der Induktion	21	56
4.2 Nachweis der Selbstinduktion	22	58
4.3 Nachweis der Lenzschen Regel	23	60
4.4 Induktiver Widerstand R_L , (Informativer Versuch)	24	62
4.5 Kapazitiver Widerstand R_C , (Informativer Versuch)	25	64
4.6 Nachweis der Phasenverschiebung bei kapazitivem Widerstand (1 Hz)	26	66
4.7 $R_C = \frac{1}{\omega C}$, Nachweis mit 50 Hz	27	68
4.8 Induktiver Widerstand einer Spule bei 50 Hz	28	70

	Versuch	Seite
4.9 Ohmscher Widerstand und kapazitiver Widerstand in Reihe Scheinwiderstand	29	72
4.10 Ohmscher Widerstand und induktiver Widerstand in Reihe Scheinwiderstand	30	74
4.11 R_O , R_L und R_C in Reihe	31	76
4.12 R_C und R_L parallel	32	78
5. Generatoren		
5.0 Elektrische Schwingungen, Mechanische Analogie		82
5.1 Gedämpfte elektrische Schwingungen	34	84
5.2 Ungedämpfte elektrische Schwingungen, Meißnersche Rückkopplungsschaltung	35	86
5.3 Allgemeine Erklärung der Meißnerschaltung	36	88
5.4 Meißnerschaltung (Tonfrequenz)	37	90
5.5 3-Punkt-Schaltung (Thomsonformel, Oktav, Dreiklang)	38	92
5.6 R_C bzw. R_L in Abhängigkeit von f und C	39	94
5.7 R_L und R_C in Reihe (Resonanzkurve)	40	96
5.8 Gleichspannungswandler	41	98
6. Impulsumformung		
6.1 Dioden mit Vorspannung	42	100
6.2 Impulsdehnung	43	102
6.3 Rechteckimpulse	44	104
7. Transistor als Verstärker		
7.1 Grundprinzip der Verstärkung	45	106
7.2 Niederfrequenzverstärkung	46	108
7.3 Gleichstromverstärkung	47	110
8. Elektronische Schalter		
8.1 Schmitt-Trigger mit Potentiometer	48	112
8.2 Schmitt-Trigger als Zeitgeber, Dämmerungsschalter oder Temperaturwächter	49	114
8.3 Astabiler Multivibrator (0,1 Hz) Blinkschaltung	50	116
8.4 Astabiler Multivibrator (Tonfrequenz)	51	118
8.5 Monostabiler Multivibrator	52	120
8.6 Bistabiler Multivibrator	53	122
8.7 Flip-Flop	54	124
9. Übersicht über die wichtigsten im Lehrbuch I und II vorkommenden physikalischen Größen und Maßeinheiten.		126
10. Wichtige Hinweise, Verzeichnis geeigneter Fachbücher		127
11. Verpackungsübersicht und Stückliste zu Baukasten 612 02		128

Einleitung

Wichtige Hinweise für Experimentieren

Der Lehrbaukasten 612 02 will in die Probleme des Wechselstromes einführen. Ohne Kenntnis der Zusammenhänge, die sich – wenn auch nicht ganz mühelos – mit diesem Lehrbaukasten anhand von zahlreichen Versuchen erarbeiten lassen, ist ein solides Verständnis der Elektronik nicht möglich. Die grundlegenden Kenntnisse über den Gleichstromkreis, über Kondensatoren und Halbleiter, soweit sie der Lehrbaukasten 612 01 vermittelt, werden vorausgesetzt. Im vorliegenden Lehrbuch II wird deshalb häufig auf das Lehrbuch I verwiesen. So bedeutet z. B. (I, 9.2), daß im Lehrbuch I im Abschnitt 9.2 diejenigen Dinge besprochen werden, die für das Verständnis des gerade anstehenden Problems notwendig sind. Wer sich mit den Versuchen des Lehrbaukastens 612 01 eingehend beschäftigt hat, befindet sich jetzt – um ein Bild zu gebrauchen – gewissermaßen auf der Mittelstation einer Bergbahn. Während einen auf der ersten Teilstrecke zumeist noch die Bäume und Matten des Tales begleiten, wird auf der zweiten Teilstrecke die Landschaft karger und die Luft dünner, d. h. der vorliegende Lehrbaukasten wird im Vergleich zum ersten etwas erhöhte Forderungen stellen.

Wie im Lehrbuch I wird auch im vorliegenden Lehrbuch der Stoff systematisch dargestellt. Es ist daher zweckmäßig, die Experimente in der angegebenen Reihenfolge durchzuführen, da die meisten Abschnitte auf Ergebnissen und Erkenntnissen aus den vorausgegangenen Versuchen aufbauen. Vor dem eigentlichen Versuch wird wie bei Lehrbuch I, wenn nötig, eine allgemeine Einführung und Herleitung der Begriffe und Zusammenhänge gegeben. Es werden in den Abschnitten 2 und 4 ohne höhere Mathematik und ohne trigonometrische Funktionen etwas schwierige, für den Wechselstromkreis aber wichtige Begriffe wie Effektivwert, Zeigerdiagramm, Induktion, Selbstinduktion, kapazitiver Widerstand, induktiver Widerstand, Scheinwiderstand hergeleitet. Es liegt in der Natur der Sache, daß diese Darstellung bei der knappen Form, die hier geboten ist, nicht immer voll befriedigen kann. Man kann sich aber in Physikbüchern für die Oberstufe der Gymnasien und besonders in technischen Fachbüchern über den Wechselstromkreis notfalls eingehend informieren.¹⁾

Am Ende von quantitativen Versuchen, d. h. von Versuchen, bei denen ein gesetzmäßiger Zusammenhang durch exakte Messungen bestätigt wird, ist eine Tabelle mit Meßergebnissen aufgestellt. Diese Meßergebnisse sind durch eine mit Bausteinen eines normalen Baukastens durchgeführte Messung gewonnen worden. Abweichungen von diesen Werten sind entsprechend den Toleranzen der Bauteile (Kondensatoren, Widerstände usw.), die bis 30 % betragen können, durchaus zu erwarten.

Die Genauigkeit der quantitativen Versuche hängt wie gesagt von der Toleranz der benutzten Bauteile, aber auch von der Genauigkeit des benutzten Meßinstruments ab. Es ist deshalb notwendig, die in Abschnitt 3 dieses Lehrbuches besprochenen und durchgeführten Eichungen mit dem eigenen Baukasten sorgfältig durchzuführen und die Eichkurven in der angegebenen Weise für das eigene Meßinstrument aufzunehmen und auf Millimeterpapier aufzutragen. Wenn man die Eichung mehrmals wiederholt, gewinnt man einen Überblick über die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit des Meßinstruments.

Bei der Durchführung einer Meßreihe muß man sich deshalb zunächst die Skalenteile notieren und nach Abschluß der Messung aus den Eichkurven die Ampere- bzw. Voltwerte ablesen. Eine andere Möglichkeit ist, mit Hilfe der Eichkurven zunächst passende Skaleneinteilungen anzufertigen und diese für die Messung z. B. mit einem Tesafilm vorübergehend auf dem Meßinstrument zu befestigen (vgl. Abb. 3.1.3 und Abb. 3.3.3).

Dieser Baukasten 612 02 zusammen mit dem Baukasten 612 01 ist gedacht für alle, die sich ernstlich für die Elektronik und ihre Anwendungen interessieren und die nicht bei der ersten kleinen Schwierigkeit die Flinte ins Korn werfen. Die beiden Baukästen bedeuten ferner eine wertvolle Hilfe für Schüler von Volksschulen, Gymnasien und Fachschulen und vermitteln ihnen wertvolle Anregungen, da viele grundlegende Schulversuche und eine große Zahl lehrreicher ergänzender Experimente zur Elektrizitätslehre der Mittel- und Oberstufe von den Schülern zu Hause selbständig durchgeführt werden können. Endlich bieten die beiden Baukästen bei geringen Kosten die Möglichkeit, im Schulunterricht große Teile der Elektrizitätslehre völlig gefahrlos mit „Versuchen in gemeinsamer Front“ zu erarbeiten.

Bevor es nun ans Experimentieren geht, noch einige Bemerkungen zu den Bezeichnungen im Lehrbuch und zu den Bausteinen des vorliegenden Baukastens.

¹⁾ Hinweise auf Fachliteratur auf Seite 127

Die in diesem Lehrbuch neu eingeführten Bezeichnungen, die sich auf physikalische Größen und Maßeinheiten beziehen, werden im Text erklärt. Darüber hinaus können alle Bezeichnungen in der Tabelle 9. nachgesehen werden, in der alle im Lehrbuch I und im Lehrbuch II vorkommenden physikalischen Größen, deren Maßeinheiten und deren Zusammenhänge zusammengestellt sind. Zwei häufig auftretende Rechensymbole sollen noch kurz erläutert werden.

Schon im 1. Band, häufiger aber im 2. Band, tritt bei Rechnungen das Symbol Δ (lies: Delta) auf. Δ ist das griechische große D und bedeutet Differenz. Wenn z. B. zur Zeit t_1 der Strom die Stromstärke I_1 und zur Zeit t_2 die Stromstärke I_2 hat, so steigt in der Zeitdifferenz $t_2 - t_1 = \Delta t$ der Strom um $I_2 - I_1 = \Delta I$ an.

$\frac{\Delta I}{\Delta t}$ nennt man den Stromanstieg. Entsprechendes gilt für die Ladung Q und die Spannung U . Mit dem Symbol \sim wird eine Proportionalität ausgedrückt. Wenn man z. B. Zucker kauft, ist der Preis P der Menge des Zuckers M proportional, d. h. für die doppelte Menge muß man den doppelten Preis bezahlen. Man schreibt: $P \sim M$. Zum Aufbau der im Lehrbuch II besprochenen Versuche sind selbstverständlich auch die Bausteine und Bauteile des Lehrbukaustens 612 01 erforderlich. Neu hinzu kommt, daß bei allen Bausteinen nicht nur die Kontakte, die Bauelemente und Verbindungen der oberen, sogenannten A-Ebene (vgl. Abb. 10.1) benutzt werden, sondern auch die Verbindungen und die Kontakte der unteren B-Ebene. Da diese Verbindungen und Kontakte bei den meisten Bausteinen einheitlich ausgeführt sind, werden diese, sofern sie von der Norm nicht abweichen, nicht eigens durch eine Beschriftung dargestellt. Auf diese Kontakte und Verbindungen in der B-Ebene wird im folgenden noch näher eingegangen. Die Bauelemente und die Verbindungen der A-Ebene sind bei den Bausteinen des vorliegenden Baukastens wie beim Baukasten 612 01 aus der 2 mm breiten schwarzen Beschriftung des oberen weißen Deckels mit den genormten Symbolen zu erkennen. Bei den meisten Bausteinen (z. B. alle Bausteine des Baukastens 612 01) besteht keine elektrische Verbindung von der A- zur B-Ebene. Im vorliegenden Baukasten sind nun einige Bausteine enthalten, die davon eine Ausnahme machen. Manche Bausteine weisen nur eine Kontaktierung in der B-Ebene auf, so der Netztrafo 608 19 und der Spannungsteiler 610 46. Der Verbindungsbaustein 610 00 hat Anschlüsse von der A- zur B-Ebene. An der mit (+) bezeichneten Stelle sind die beiden mittleren Kontakte der

A-Ebene mit den beiden mittleren der B-Ebene verbunden. An der mit (-) bezeichneten Stelle sind die mittleren Kontakte der A-Ebene mit den beiden äußeren Kontakten der B-Ebene verbunden.

Die Anschlußbuchse 610 38 weist in der A-Ebene eine Kreuzverbindung auf, die keinen Anschluß an die B-Ebene hat, aber über die Buchsen im oberen Deckel kann eine Verbindung mit der B-Ebene hergestellt werden. Die mit (+) bezeichnete rote Buchse hat eine Verbindung zu den inneren Kontakten der B-Ebene, und die mit (-) bezeichnete blaue Buchse hat eine Verbindung zu den äußeren Kontakten der B-Ebene. Verbindet man einen oder mehrere normal, d. h. ohne seitliche Verschiebung zusammengesteckte Bausteine mit der Anschlußbuchse 610 38, so sind die inneren Kontakte der B-Ebene bei allen Bausteinen mit der (+) Buchse und die äußeren Kontakte der B-Ebene aller Bausteine mit der (-) Buchse der Anschlußbuchse verbunden. Mit einem Blick durch die Öffnungen der unteren schwarzen Bodendeckel kann man sich leicht davon überzeugen.

Entsprechendes gilt, wenn man einen oder mehrere normal zusammengesteckte Bausteine mit dem Trafo 608 19 verbindet. Zwischen den inneren und äußeren Kontakten der B-Ebene aller angeschlossenen Bausteine besteht dann bei eingeschaltetem Trafo, d. h. wenn das Kontroll-Lämpchen leuchtet, eine nicht regelbare pulsierende Gleichspannung, äußere Kontakte (-), innere Kontakte (+). Schaltet man zwischen den Trafo 608 19 und die Bausteine den Spannungsteiler 610 46, so herrscht zwischen den inneren und äußeren Kontakten der B-Ebene bei allen Bausteinen eine mit dem Potentiometer des Spannungsteilers zwischen 0 und etwa 20 V regelbare geglättete Gleichspannung. Beim Spannungsteiler bezieht sich die auf dem weißen Deckel angebrachte Zeichnung auf die Schaltung in der B-Ebene.

Will man nun einen einfachen Stromkreis herstellen, muß man an der Stelle, an der einem Bauelement der A-Ebene Strom zugeführt werden soll, die inneren Kontakte der A-Ebene mit den inneren Kontakten der B-Ebene verbinden. Dies erreicht man mit dem oben erwähnten Baustein 610 00. Entsprechendes gilt für die Abnahme des Stromes. An dieser Stelle ist die A-Ebene mit den äußeren Kontakten der B-Ebene zu verbinden.

Ein einfacher Gleichstromkreis kann auch aufgebaut werden, wenn man an Stelle des Trafos mit Spannungsteiler 610 46 die Anschlußbuchse 610 38

anschließt und mit zwei Kabeln eine Verbindung von der (+) Buchse der Anschlußbuchse zur (+) Klemme einer Batterie und entsprechend von der (-) Buchse des Bausteins zur (-) Klemme der Batterie herstellt.

Ein einfacher Wechselstromkreis läßt sich aufbauen, wenn man eine Verbindung von der (+) Buchse bzw. (-) Buchse der Anschlußbuchse zu irgend zwei von den 4 mit a, b, c, d bezeichneten Buchsen des Trafos herstellt.

Diesen Klemmen kann man etwa folgende Wechselspannungen entnehmen: ab: 3 V; ac: 9 V; ad: 15 V; bc: 6 V; bd: 12 V; cd: 6 V.

Baut man eine Schaltung auf, bei der Bausteine seitlich versetzt sind (vgl. Versuch 33), so sind in den versetzten Bausteinen, und nur in ihnen, die inneren Kontakte der B-Ebene mit (-) und die äußeren Kontakte der B-Ebene mit (+) verbunden.

Beim Experimentieren mit den in diesem Baukasten enthaltenen Elementen können durch unsachgemäße Behandlung einzelne Elemente zerstört werden. Besonders gefährdet sind Halbleiter, Potentiometer, Elkos und das Instrument. Wir bitten deshalb nachfolgende Hinweise zu beachten:

1. Potentiometer

Die im Baukasten vorhandenen Potentiometer und der Spannungsteiler haben eine max. Belastbarkeit von $\frac{1}{4}$ W. Bei den zum Experimentieren verwendeten Spannungen tritt die Gefahr der Überlastung praktisch nur dann auf, wenn sehr kleine Widerstandswerte einreguliert werden (kurz vor dem Anschlag). Um die Gefahr zu verhindern und auch eventuelle Gefährdung anderer Bauelemente in der Schaltung zu vermeiden, müssen vor dem Einschalten alle Potentiometer in Mittelstellung gedreht werden.

2. Lampen

Die mitgelieferten Lämpchen sind für eine max. Betriebsspannung von 6 V (bei Wechselspannung 6 V eff.). Bei dieser Nennspannung nehmen sie einen Strom von ca. 50 mA auf. Diese Stromaufnahme kann aber, bedingt durch Herstellungstoleranzen, um einen größeren Betrag schwanken. Werden die Lämpchen mit einer höheren Spannung betrieben, so sinkt die Lebensdauer erheblich ab.

3. Drehspulinstrument

Das bei den Versuchen verwendete Meßinstrument hat bei einem Innenwiderstand an 1,2 k Ω 0,1 mA bzw. 0,12 V Vollausschlag (Gleichspannung). Sollen größere Ströme oder höhere Span-

nungen gemessen werden, so müssen entsprechende Shunts bzw. Vorwiderstände verwendet werden. Insbesondere bei den Shunts ist auf eine gute Kontaktierung zu achten. Zum Wechseln des Parallelwiderstandes muß der Strom auf jeden Fall abgeschaltet werden. Ist der zu messende Strom nicht bekannt, so sollte die erste Messung auf jeden Fall mit dem kleinsten Parallelwiderstand bzw. mit dem höchsten Vorwiderstand beim Spannungsmesser begonnen werden.

4. Elektrolytkondensatoren

Elkos sind elektrisch polarisierte Elemente, die nur bis zu einer bestimmten Spannung (aufgedruckter Wert meist Scheitelspannung) und in einer dem Aufdruck entsprechenden Polung verwendet werden dürfen. Höhere Spannungen oder falsche Polung zerstören diese Bauelemente. Wird ein Elko längere Zeit mit reiner Wechselspannung (ohne Gleichspannungsanteil) betrieben, so tritt ein Kapazitätsverlust ein, der in den meisten Fällen durch längeren Betrieb mit Nenngleichspannung (Formieren) wieder ausgeglichen werden kann.

5. Netztransformator (Trafo)

In diesem Baukasten ist ein Netztransformator enthalten, der zur Stromversorgung verwendet wird. Beim Experimentieren mit demselben als Spannungsquelle muß darauf geachtet werden, daß dieser nicht durch zu hohe Stromentnahme überlastet wird. Durch Überlastung bzw. Kurzschluß ist der eingebaute Gleichrichter besonders gefährdet. Unter allen Umständen muß beachtet werden, daß die Schmelzsicherung den vorgeschriebenen Wert hat. Dieser Trafo ist so konstruiert, daß er die größtmögliche Sicherheit bietet. Es ist jedoch darauf zu achten, daß der Transformator auf keinen Fall von „Nichtfachleuten“ geöffnet werden darf. Sollten Reparaturen notwendig sein, so muß diese Arbeit unter allen Umständen im Fachgeschäft durchgeführt werden. Außerdem ist zu beachten, daß das Netzkabel nicht durch scharfe Gegenstände beschädigt wird.

6. Dioden

Bei den mitgelieferten Dioden gibt der aufgedruckte Ring die Kathodenseite an. Um die Diode vor mechanischer Schädigung zu schützen, dürfen die Anschlußdrähte nicht direkt am Körper gebogen werden. Zweckmäßigerweise wird der Anschlußdraht zwischen die Gestelle und Diodenkörper mit einer Pinzette oder Flachzange gehalten. Dioden sind wie alle anderen Halbleiterbauelemente insbesondere durch 3 Arten von elektrischer Überlastung gefährdet:

a) Thermische Überlastung

Wird der Halbleiter mit hohem Strom bei ungenügender Kühlung betrieben, so daß die im Inneren entstehende Wärme nicht abfließen kann, so tritt eine Überhitzung des Kristalls auf, die je nach Größe der Überlastung in mehr oder weniger kurzer Zeit zur Zerstörung führt. Auf die gleiche Weise kann der Halbleiter auch beim Löten beschädigt werden.

b) Überlastung durch Stromspitzen

Stromspitzen, auch wenn sie nur Bruchteile einer Millisekunde anliegen, können Halbleiter zerstören, sobald sie die in den Datenblättern angegebenen Grenzwerte überschreiten. In diesem Fall schmelzen die außerordentlich dünnen Zuleitungsdrähte im Inneren der Halbleiter durch, ohne daß eine fühlbare Erwärmung auftritt. Diese Stromspitzen treten insbesondere als Lade- oder Entladeströme von Kondensatoren auf. Bei Schaltungen, in denen Kondensatoren direkt mit Halbleiterbauelementen verbunden sind, ist darauf zu achten, daß Überlastung durch Stromspitzen vermieden wird (Schutzwiderstände).¹⁾

c) Überlastung durch Spannungsspitzen

Kurzzeitige Überspannung (in Sperrrichtung) zerstört die Sperrschicht im Halbleiter und macht ihn dadurch unbrauchbar. Genauso wie bei der Stromüberlastung genügen bei Überspannung unter Umständen einige Mikrosekunden, um den Halbleiter zu zerstören. Die Gefahr der Überspannung tritt hauptsächlich bei induktiven Lasten als Abschaltspitze auf. In diesem Fall muß durch entsprechende Schutzwiderstände¹⁾ oder Schutzdioden die Spannungsspitze auf das zulässige Maß begrenzt werden²⁾.

7. Transistoren

Bei Transistoren gilt im wesentlichen, was bereits für Dioden gesagt wurde. Es sei besonders nochmals darauf hingewiesen, daß der richtige Anschluß des Transistors in der Schaltung beachtet wird, da ein Vertauschen einzelner Anschlüsse (Kollektor mit Basis) in den meisten Fällen zur Zerstörung des Transistors führt³⁾.

1) Schutzwiderstände sind in den Schaltungen meist mit R bezeichnet.

2) Siehe wichtige Hinweise Seite 127

Das BIPOL-Programm

1. Lehrprogramm

Grundgedanke ist, die Elektrizitätslehre in einem systematischen Aufbau durch einfache und klare Versuchsbeispiele darzulegen. Der Aufbau des jedem Baukasten beigegebenen Lehrbuches ist so gewählt, daß auf der linken Seite Theorie und Versuchsbeschreibung, auf der rechten Seite Schaltbild, Stückliste und Fotografie oder Blockschaltbild des Versuchs erscheinen. Insgesamt sind 4 Lehrgänge vorgesehen:

- Lehrbaukasten 612 01 Gleichstromkreis
- Lehrbaukasten 612 02 Wechselstromkreis
- Lehrbaukasten 612 03 Computertechnik
- Lehrbaukasten 612 04 HF-Technik

Der Kasten 612 02 baut auf 612 01 auf; die Kästen 612 03 und 612 04 können beide parallel verwendet werden.

2. Experimentierprogramm

Während beim Lehrprogramm in jedem BIPOL-Würfel wegen der Übersichtlichkeit lediglich ein Bauelement eingelötet ist, werden beim Experimentierprogramm ganze Schaltungen, also eine Mehrzahl von Bauteilen, in einem BIPOL-Würfel untergebracht. Dies hat den Vorteil, daß zu komplizierten Versuchsanordnungen weniger Bausteinwürfel verwendet werden müssen. Grundsätzlich sind die mit den BIPOL-Experimentierbausteinen möglichen Schaltungen in zwei Grundrichtungen aufgeteilt, nämlich in analoge und digitale Schaltungen.

- Experimentierbaukasten 612 50, Analogschaltungen
- Experimentierbaukasten 612 51, Digitalschaltungen
- Experimentierbaukasten 612 60
- Ausbaukasten 612 61

Die Schaltungen und Bausteine des Experimentierprogramms sind in den Heften Experimentiersystem, Experimentierbaukästen und Bausteinreihe 608 00/610 00 ausführlich aufgeführt.

3. Laborprogramm

Sinn und Zweck der dafür vorgesehenen Bausteine soll sein, dem Versuchenden im Labor ein Bausteinsystem an Hand zu geben, das mit Vielfältigkeit eingesetzt werden kann. Lötarbeiten bleiben bei trotzdem sich ergebender Kontaktsicherheit weitgehend erspart. Hierfür gibt es 10 verschiedene Bausteine, in die an der Oberseite elektrische Bauelemente eingesteckt werden können. Die BIPOL-Bausteine selbst stellen praktisch die Stromversorgungen und die Verbindung untereinander her. Diese Bausteine tragen die Typennummer 614 00. Außerdem stehen leere Würfel mit den entsprechenden Kontaktteilen als Einzelteile zur Verfügung, so daß sich jeder die beabsichtigte Kontaktierung zusammenstellen kann.

4. Computerprogramm

Das Computersystem besteht aus einer Anzahl von Einzelbausteinen mit der Typennummer 609 00, die zum größten Teil mit integrierten Schaltungen bestückt sind. Dadurch wurde es möglich, in die Einzelbausteine komplexe Baugruppen unterzubringen. Mit diesem System können selbst umfangreiche Schaltungen auf relativ kleinem Raum aufgebaut werden. Unter den Bausteinen dieser Reihe finden sich neben einfachen Verbindungen Kontrolllampen, die den Schaltzustand anzeigen, und Schalter zur Eingabe, hauptsächlich die für die digitale Computertechnik typischen Elemente wie z. B. Gatter verschiedenerer Funktion (und, oder, nand, nor), Inverter, Buffer, Flip-Flops.

Dieses System bietet sich hauptsächlich für die Verwendung in Labors, Schulen und Universitäten an. Es kann sowohl für die Erprobung von Laborschaltungen als auch für den Unterricht und für das Praktikum in Schaltungs-Algebra eingesetzt werden. Auf Grund der in den einzelnen Bausteinen verwendeten Elemente können diese Schaltungen ohne Schwierigkeiten mit vorhandenen digitalen Geräten (Steuerungen, Rechnern oder ähnlichem) kombiniert werden.

1. Grundbegriffe des Wechselstromes

1.1 Scheitelwert und Momentanwert

Wechselströme sind Ströme, deren Stärke und Richtung nach bestimmten Gesetzen periodisch schwanken. In Abbildung 1.1.1 ist ein solcher Wechselstrom in Abhängigkeit von der Zeit grafisch dargestellt.

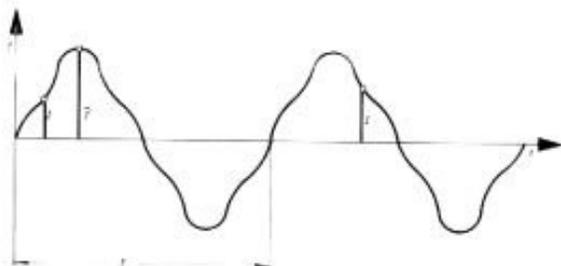


Abb. 1.1.1

Die Zeit, nach der der Stromverlauf sich jeweils wiederholt, nennt man die Periode oder Schwingungsdauer T . Die Frequenz f gibt an, wieviel Perioden innerhalb einer Sekunde durchlaufen werden. Es gilt:

$$f = \frac{1}{T} \quad [f] = \frac{1}{[T]} = \frac{1}{s} = 1 \text{ Hz (1 Hertz)}$$

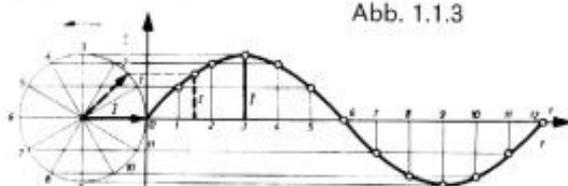
Den Wert, den der Strom in irgendeinem Zeitpunkt t hat, nennt man den Momentanwert I , den positiven oder negativen Höchstwert des Stromes den Scheitelwert \hat{I} (lies I Dach).

Die üblichen technischen Wechselströme haben Frequenzen zwischen 40 und 60 Hz und weisen den in Abb. 1.1.2 dargestellten zeitlichen Verlauf auf (sinusförmiger Verlauf).

Bei der Festsetzung dieser Frequenzen war maßgebend, daß bei Glühlampen kein Flimmern in Erscheinung treten darf. Bei reinen Kraftanlagen, z. B. Bahnnetzen, sind 15 Hz, $16\frac{2}{3}$ Hz und 25 Hz üblich.

Man erhält die einzelnen Momentanwerte und damit den zeitlichen Verlauf beim sinusförmigen Strom, wenn man in Gedanken einen Zeiger, dessen Länge \hat{I} entspricht, um eine Achse gleichmäßig so rotieren läßt, daß er in der Zeit T gerade einen Umlauf macht. Projiziert man wieder in Gedanken den sich drehenden Zeiger durch horizontale, parallele Lichtstrahlen auf einen senkrechten Schirm, so entspricht in jedem Zeitpunkt die Schattenlänge dem Momentanwert I (vgl. Abb. 1.1.3).

Abb. 1.1.3



Der Zeiger legt in der Zeit T den Winkel 360° zurück. Man kann nun einen Winkel statt in Grad auch durch die Bogenlänge eines Kreises mit Radius 1 (Einheitskreis) angeben. 360° entspricht dem Umfang des Voll-Kreises ($u = 2\pi \cdot 1 = 6,28$), 180° entspricht dem Umfang des Halbkreises ($\frac{u}{2} = \pi = 3,14$), 90° entspricht dem Umfang des Viertelkreises ($\frac{u}{4} = \frac{\pi}{2} = 1,57$) usw. (vgl. Abb. 1.1.4)

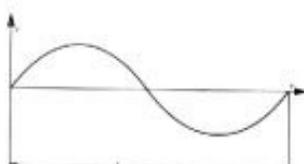


Abb. 1.1.2

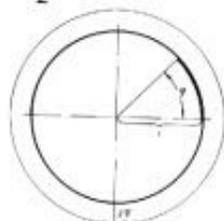


Abb. 1.1.4

Der Zeiger legt bei diesem Winkelmaß in der Zeit T den Winkel 2π zurück. Der Zeiger hat die Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

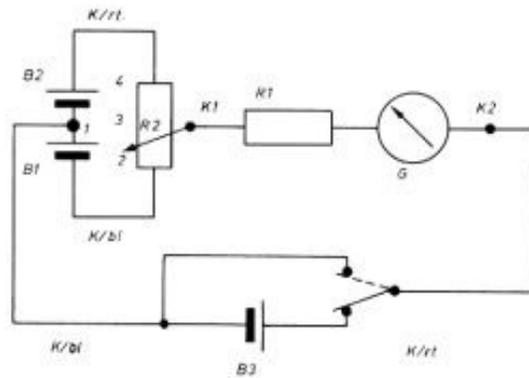
Diese Größe nennt man auch die Kreisfrequenz ω des Wechselstromes.

$$\text{Es gilt: } \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Beim technischen Wechselstrom ist $f = 50 \text{ Hz}$ und $\omega = 314 \frac{1}{s}$

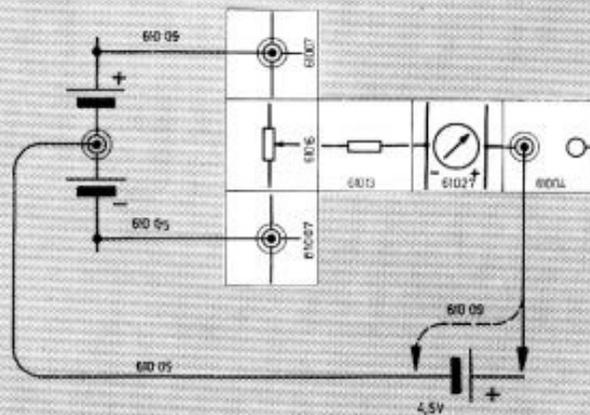
Versuch 1

Zum Veranschaulichen von Wechselstrom mit Frequenzen höher als 1 Hz benötigt man Oszillographen (oszillieren [lat.] = schwingen; graphein [griech.] = schreiben). Liegt die Frequenz bei 1 Hz, kann man den Wechselstrom auf einem Meßinstrument verfolgen. Mit der angegebenen Schaltung kann man einen mit dem Meßinstrument beobachtbaren Wechselstrom herstellen. Ist der Gleitkontakt in 3, so ist an den Klemmen K_1 und K_2 die Spannung $U = 0$, da bei 3 infolge des Spannungsabfalles die gleiche Spannung herrscht wie in 1. Ist der Gleitkontakt in 2, so ist K_1 negativ gegenüber K_2 . Ist der Gleitkontakt in 4, so ist K_1 positiv gegen K_2 . Bewegt man den Gleitkontakt von 3 nach 2 und zurück nach 3, dann nach 4 und wieder zurück nach 3, so erhält man gerade eine Periode des Wechselstromes. Die Frequenz hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der man den Potentiometerknopf dreht. Da das mitgelieferte Meßinstrument den 0-Punkt links hat, kann man ohne Umschalten nur eine halbe Periode beobachten. Schaltet man aber eine Batterie mit 4,5 V in Reihe, so überlagert sich ein Gleichstrom dem Wechselstrom. Der Wechselstrom kann nun vollständig beobachtet werden.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2/B3	3	Batterie, 4,5 V	x
	2	Verbindung	610 07
	1	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
G	1	Instrument	610 27
R1	1	Widerstand, 100 kΩ	610 13
R2	1	Potentiometer, 1 kΩ	610 16
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0
K/b	2	Kabel, blau	610 05
K/r	2	Kabel, rot	610 09

x Nicht im Baukasten enthalten



1.2 Effektive Stromstärke

Die Wärmewirkung des Stromes ist von der Richtung des Stromes unabhängig (I, 2.3). Ein Glühlämpchen brennt gleich hell, gleichgültig ob Gleich- oder Wechselstrom durchfließt, wenn nur dieselbe Wärmeleistung bei beiden Stromarten vorliegt. Entsprechendes gilt für den Hitzdraht eines Hitzdrahtinstrumentes. Er nimmt bei gleicher Wärmeleistung unabhängig von der Stromart die gleiche Temperatur an und ergibt denselben Ausschlag.

Man nennt denjenigen Wert des Stromes, den ein Gleichstrom haben müßte, um dieselbe Leistung wie der betreffende Wechselstrom zu vollbringen, die effektive Stromstärke I_{eff} des Wechselstromes.

Wenn Gleich- und Wechselstrom dieselbe Wärmeleistung erzeugen, ist es einleuchtend, daß der Scheitelwert \hat{I} des Wechselstromes größer sein muß als der Gleichstrom I_{-} , da der Wechselstrom ja während bestimmter Zeitabschnitte kleiner ist als der immer konstant bleibende Gleichstromwert. Die Momentanleistungen der beiden Stromarten sind verschieden, aber die mittleren Leistungen sind gleich.

Versuch 2

Man kann die effektive Stromstärke I_{eff} in einem Wechselstromkreis mit einem geeigneten Glühlämpchen als Amperemeter messen, indem man ein gleichartiges Glühlämpchen in einen getrennten Gleichstromkreis schaltet und mit einem Gleichstromamperemeter die Gleichstromstärke I_{-} so einreguliert, daß beide Glühlampen gleich hell leuchten. Nützlich ist beim Einregulieren folgende alte Schätzregel: Man reguliert die gleichstrombetriebene Lampe so ein, daß sie gerade etwas heller erscheint und liest das Amperemeter ab, dann reguliert man die gleichstrombetriebene Lampe so ein, daß sie gerade etwas dunkler erscheint, liest wieder ab und nimmt den Mittelwert der beiden Ablesungen.

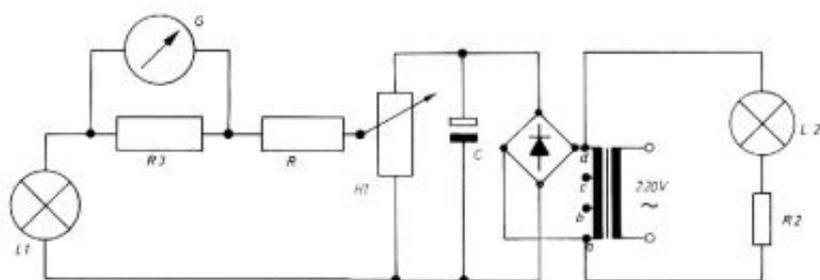
An den Buchsen des Transformators kann man verschiedene Wechselspannungen abgreifen, die zu entsprechenden Stromstärken führen.

Die Stromstärken des Gleichstromkreises regelt man mit dem Potentiometer des Spannungsteilers.

Man erhält das Ergebnis der Tabelle 1.2.1

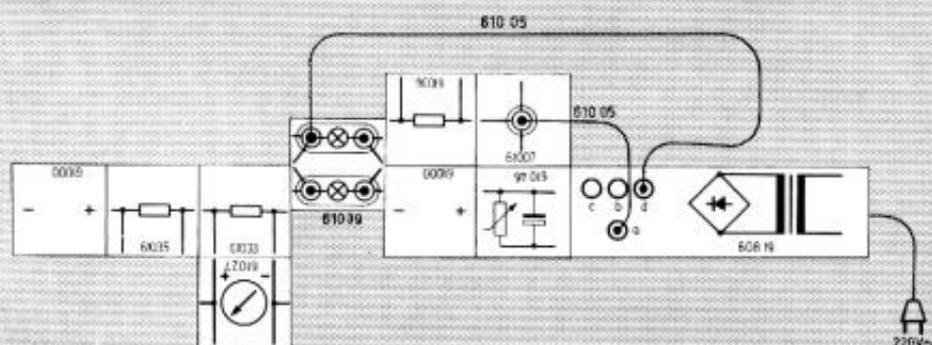
Tabelle 1.2.1

Klemmen am Trafo	$I_{eff} = I_{-}$
b, d	70 mA
b, c	45 mA
a, d	85 mA
a, b	25 mA
a, c	60 mA



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
R1/C	1	Spannungsteiler	610 46
	2	Verbindung + -	610 00
	1	Verbindung	610 07
R2	1	Widerstand, 133 Ω	610 36
	1	Buchse, 4fach	610 39
G	1	Instrument	610 27
R3	1	Widerstand 1,2 Ω	610 33
K1/K2	2	Kabel, blau	610 05
	2	Stecker, 2fach	610 40
L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
R	1	Widerstand, 12 Ω ¹⁾	610 35

1) Schutzwiderstand



1.3 Effektive Spannung

In jedem Zeitpunkt ist die Ursache für die Momentanstromstärke I eine Momentanspannung $U = R \cdot I$, wobei R der Widerstand des Wechselstromkreises ist. Das heißt, das bisher über den Wechselstrom Gesagte gilt in entsprechender Weise auch für die Spannung. Man hat also den Scheitelwert der Spannung \hat{U} , den Momentanwert der Spannung U und den effektiven Wert der Spannung U_{eff} zu unterscheiden.

In Abb. 1.3.1 ist $\hat{I} = 2 \text{ A}$, $R = 2 \Omega$ und $\hat{U} = \hat{I} \cdot R = 4 \text{ V}$ angenommen.

Die daneben angegebene Zeigerdarstellung sagt in knapper Form genau dasselbe aus wie die Darstellung durch Strom- und Spannungskurve.

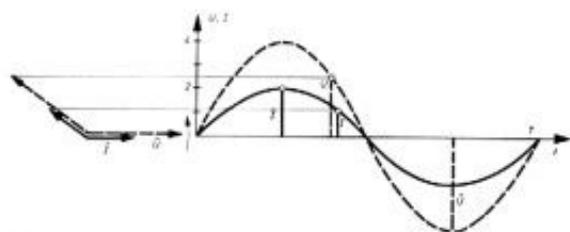


Abb. 1.3.1

Versuch 3

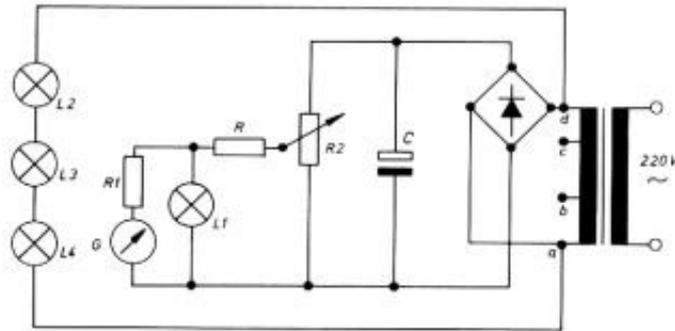
Die Wechselspannungen, die an den Klemmen a, b, c, d des Transformators abgegriffen werden können, sollen gemessen werden. Nimmt man zwei gleiche Glühlämpchen, legt an das eine eine Gleichspannung von beispielsweise 5 V und an das zweite eine Wechselspannung, so leuchtet die zweite Lampe gleich hell, wenn die angelegte Spannung $U_{eff} = 5 \text{ V}$ ist.

Man legt die zu messende Wechselspannung, die an den Klemmen a, b, c und d des Transformators abgegriffen werden kann, an die in Reihe geschalteten Glühlämpchen. Je nach Größe der abgegriffenen Spannung wählt man 3, 2 oder 1 Lämpchen. An ein Lämpchen kann maximal 5 V angelegt werden. Der Transformator liefert aber bis zu 17 V. Man regelt wie bei Versuch 2 die Gleichspannung so ein, daß das gleichstrombetriebene Lämpchen gleich hell leuchtet wie das oder die mit Wechselstrom betriebenen (Schätzregel wie bei Versuch 2). Man liest die Gleichspannung ab, multipliziert, wenn 2 bzw. 3 Lämpchen im Wechselstromkreis liegen, den abgelesenen Wert mit dem Faktor 2 bzw. 3 und hat damit U_{eff} bestimmt.

Es ergeben sich die Meßwerte der Tabelle 1.3.1

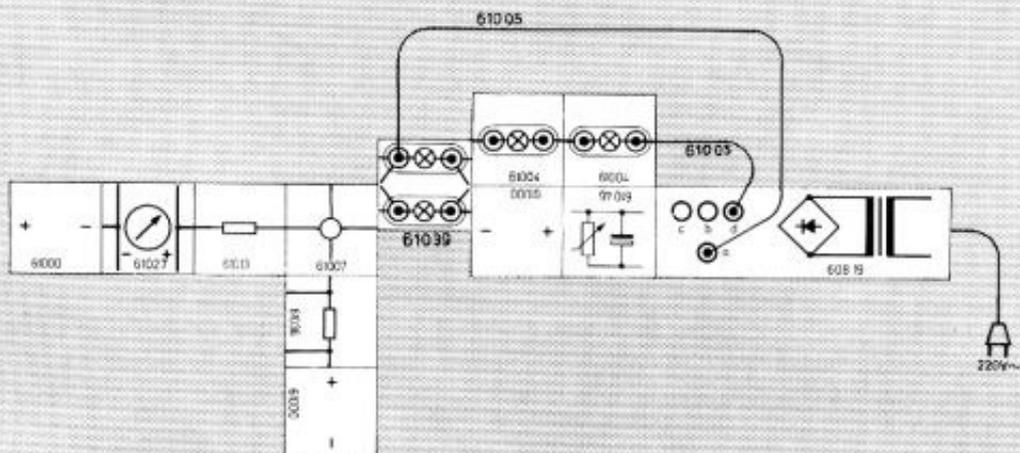
Tabelle 1.3.1

Klemmen am Trafo	Zahl der Lämpchen	U_- (V)	U_{eff} (V)
b, d	3	4,7	14
c, d	2	3,5	7
a, d	3	5,5	16,5
b, c	2	3,5	7
a, b	1	3,4	3,4
a, c	2	5	10



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
R2/C	1	Spannungsteiler	610 46
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	3	Verbindung + -	610 00
	1	Verbindung	610 07
	1	Buchse, 4fach	610 39
R1	1	Widerstand, 100 k Ω	610 13
G	1	Instrument	610 27
K/bl.	2	Kabel, blau	610 05
L1/2/3/4	4	Lampen, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
	4	Stecker, 2fach	610 40
R	1	Widerstand 133 Ω)	610 36

i) Schutzwiderstand



1.4 Effektivwert und Galvanischer Mittelwert Verhältnis zum Scheitelwert

Im allgemeinen ist I_{eff} kleiner als \hat{I} (1.2). Das Verhältnis I/I_{eff} hängt von der Form des Wechselstromes ab. Da die meisten in der Praxis vorkommenden Wechselströme Sinusform haben bzw. auf sinusförmige Wechselströme zurückzuführen sind, soll das Verhältnis \hat{I}/I_{eff} zunächst für einen sinusförmigen Wechselstrom genauer untersucht werden.

Wir betrachten zu dem Zweck einen Gleichstrom und einen sinusförmigen Wechselstrom der Frequenz $f = 0,5$ Hz, die beide während der Zeit $T = 2$ s (Periode des Wechselstromes) in einem Glühlämpchen mit dem Widerstand $R = 2 \Omega$ die gleiche elektrische Arbeit verrichten und damit die gleiche Wärmemenge erzeugen.

Wird an ein Glühlämpchen mit $R = 2 \Omega$ während der Zeit $T = 2$ s die Gleichspannung $U = 2,82$ V angelegt, so ist $I = 1,41$ A und die Leistung $P = U \cdot I = 2,82 \text{ V} \cdot 1,41 \text{ A} = 4 \text{ W}$. Trägt man U , I und P in Abhängigkeit von der Zeit t auf, so erhält man das Diagramm der Abb. 1.4.1

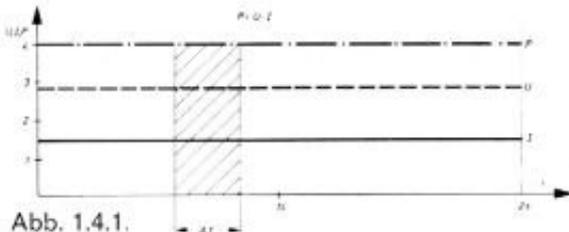


Abb. 1.4.1.

Die Arbeit ΔW während eines kurzen Zeitabschnitts Δt ist gleich der Fläche des schraffierten Streifens ($\Delta W = P \Delta t$).

Die Gesamtarbeit des Gleichstromes während der Zeit $T = 2$ s bezeichnet man mit W_{\sim} . Diese setzt sich aus den Teilarbeiten ΔW zusammen. W_{\sim} ist die Summe der Teilarbeiten ΔW , oder anders ausgedrückt: Die Arbeit W_{\sim} des Gleichstromes während der Zeit $T = 2$ s ist gleich dem Flächeninhalt des Rechtecks mit der Höhe $P = U \cdot I$ und der Breite T .

$$(1.4.1) \quad W_{\sim} = U \cdot I \cdot T = I^2 \cdot R \cdot T, \text{ da } U = R \cdot I \text{ ist.}$$

$$W_{\sim} = 2 \text{ A}^2 \cdot 2 \Omega \cdot 2 \text{ s} = 8 \text{ Ws.}$$

Legt man an dieses Glühlämpchen mit $R = 2 \Omega$ eine sinusförmige Wechselspannung mit $\hat{U} = 4$ V, so ist $\hat{I} = 2$ A. Die Momentanleistung $P_M = U \cdot I$ ist in Abb. 1.4.2 für eine Periode aufgezeichnet. P_M schwankt zwischen 0 und 8 W.

Mit der Momentanleistung P_M erhält man für jeden kurzen Zeitabschnitt Δt , für den P_M als konstant gelten kann, die elektrische Arbeit $\Delta W = P_M \cdot \Delta t$ (Streifen mit der Höhe P_M und der Breite Δt in Abb. 1.4.2).

Die Gesamtarbeit W_{\sim} während der Zeit T ergibt

sich als Summe aller Arbeiten ΔW . Die Summe aller Streifen ist gleich dem Flächeninhalt der glockenförmigen P_M -Kurve. Der Flächeninhalt der Glockenkurve ist, wie man direkt sieht (Gleichheit der querschraffierten Flächen) gleich der Fläche des Rechtecks mit $\frac{U \hat{I}}{2}$ als Höhe und T als Breite.

Es ist:

$$(1.4.2)$$

$$W_{\sim} = \frac{U \hat{I}}{2} \cdot T = \frac{I^2 R}{2} \cdot T, \text{ da } U = \hat{I} R \text{ ist.}$$

$$W_{\sim} = \frac{4 \text{ A}^2 \cdot 2 \Omega}{2} \cdot 2 \text{ s} = 8 \text{ Ws}$$

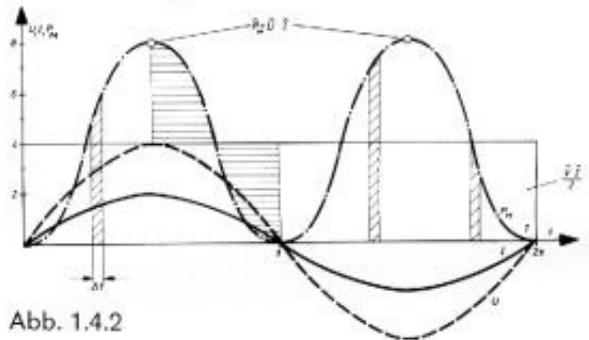


Abb. 1.4.2

Im vorliegenden Fall ist die Arbeit des Gleichstromes während der Zeit $T = 2$ s gleich der Arbeit des Wechselstromes während der Zeit $T = 2$ s. $W_{\sim} = W_{\sim} = 8 \text{ Ws}$.

Ein Gleichstrom mit der Stromstärke $I = 1,41$ A verrichtet in der Glühlampe mit $R = 2 \Omega$ dieselbe Arbeit wie ein sinusförmiger Wechselstrom mit der Scheitelstromstärke $\hat{I} = 2$ A. Da nun aber der Effektivwert I_{eff} (vgl. 1.2) gleich demjenigen Gleichstromwert ist, der während einer Periode dieselbe Arbeit leistet, ist in unserem Falle $I_{\text{eff}} = I = 1,41$ A und

$$\frac{\hat{I}}{I_{\text{eff}}} = \frac{2}{1,41} = 1,41 = 1/\sqrt{2}$$

Da die Arbeit des Wechselstromes während der Zeit T gleich der Arbeit des Gleichstromes ist während derselben Zeit, kann man auch sagen, die mittlere Leistung des Wechselstromes ist gleich der Leistung des Gleichstromes. Wenn man nun im allgemeinen von der Leistung eines Wechselstromes spricht, meint man immer diese mittlere Leistung des Wechselstromes.

Setzt man allgemein die Arbeit W_{\sim} des Wechselstromes gleich der Arbeit W_{\sim} eines Gleichstromes, so erhält man: $W_{\sim} = W_{\sim}$.

Durch Einsetzen von

$$W_{\sim} = I^2 \cdot R \cdot T \quad (\text{vgl. 1.4.1})$$

$$W_{\sim} = \frac{\hat{I}^2 \cdot R}{2} \cdot T \quad (\text{vgl. 1.4.2})$$

und bei Berücksichtigung der Definition des

Effektivwertes (1.2) ergibt sich:

$$(1.4.3) \quad I^2 \cdot R \cdot T = I_{\text{eff}}^2 \cdot RT = \frac{\dot{I}^2}{2} R \cdot T$$

In der vorstehenden Beziehung (1.4.3) hebt sich R und T heraus. Man erhält als allgemein gültige Beziehungen:

$$(1.4.4) \quad I_{\text{eff}}^2 = \frac{\dot{I}^2}{2} \quad \text{und}$$

$$(1.4.5) \quad I_{\text{eff}} = \frac{\dot{I}}{\sqrt{2}}$$

Entsprechend gilt auch:

$$(1.4.6) \quad U_{\text{eff}} = \frac{\dot{U}}{\sqrt{2}}$$

Durch Kürzen erscheint also T in der Endformel nicht mehr. Dementsprechend ist das Verhältnis I/I_{eff} nur von der Form des Wechselstromes und nicht von der Frequenz abhängig.

Beim galvanischen Mittelwert wird nicht die Leistung, sondern die insgesamt transportierte Ladung Q bei Gleich- und Wechselstrom verglichen. Für eine während der Zeit Δt transportierte Ladung ΔQ gilt: $\Delta Q = I \cdot \Delta t$.

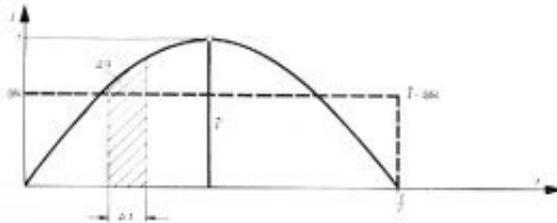


Abb. 1.4.3

In Abb. 1.4.3 entspricht ΔQ ein Streifen mit der Höhe I und der Breite Δt . Die gesamte während der Zeit $\frac{T}{2}$ transportierte Ladung Q ist die Summe aller Ladungen ΔQ . Der Ladung Q entspricht somit die Fläche des Kurvenbogens.

Die Fläche des Kurvenbogens bei sinusförmigem Strom ist, wie eine hier nicht wiedergegebene Rechnung zeigt, gleich dem Flächeninhalt eines Rechtecks mit der Höhe $\dot{I} \cdot 0,64$ und der Länge $\frac{T}{2}$.

Ein Gleichstrom der Stromstärke $I = \dot{I} \cdot 0,64$ würde in der Zeit $\frac{T}{2}$ dieselbe Ladung Q transportieren.

Allgemein kann man sagen: Der galvanische Mittelwert eines veränderlichen Stromes I ist gleich demjenigen Gleichstrom, der während einer Periode dieselbe Ladung transportiert. Wird also während der Zeit T die Gesamtladung Q transportiert, so gilt:

$$(1.4.7) \quad I = \frac{Q}{T} \quad \text{und} \quad \frac{I}{\dot{I}} = \frac{Q}{T \cdot \dot{I}}$$

Der galvanische Mittelwert des sinusförmigen Wechselstromes ist 0, da bei jeder 2. Halbwelle die Ladung gerade in umgekehrter Richtung fließt.

Zur weiteren Erläuterung von effektivem und galvanischem Mittelwert werden im folgenden bei einigen nicht sinusförmigen Wechselstromformen die Beziehungen $\frac{I_{\text{eff}}}{\dot{I}}$ und $\frac{I}{\dot{I}}$ kurz hergeleitet.

Beispiel 1

Für W_{\sim} und W_{\pm} erhält man bei einem Stromverlauf gemäß Abb. 1.4.4:

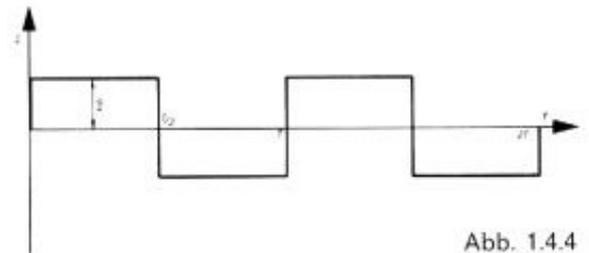


Abb. 1.4.4

$$(1.4.8) \quad W_{\sim} = \dot{I}^2 R \frac{T}{2} + (-\dot{I})^2 R \frac{T}{2}$$

$$W_{\sim} = \dot{I}^2 RT$$

$$W_{\pm} = I_{\text{eff}}^2 RT$$

$$\dot{I}^2 RT = I_{\text{eff}}^2 RT$$

$$\dot{I}^2 = I_{\text{eff}}^2$$

$$\dot{I} = I_{\text{eff}}$$

Für die während der Zeit T transportierte Ladung erhält man:

$$Q = I \cdot \frac{T}{2} - I \cdot \frac{T}{2} = 0 \quad \text{und für den galvanischen Mittelwert somit:}$$

$$I = \frac{Q}{T} = \frac{I \cdot \frac{T}{2} - I \cdot \frac{T}{2}}{T} = \frac{0}{T} = 0$$

Die Beziehung (1.4.8) bedeutet, daß die Leistung des Stromes von der Stromrichtung unabhängig ist.

Beispiel 2

Bei einem Stromverlauf nach Abb. 1.4.5 sieht man ohne Rechnung, daß $\frac{I}{\dot{I}} = 0$ ist und schätzt

$$\frac{I_{\text{eff}}}{\dot{I}} \approx 0,1 \text{ bis } 0,2.$$

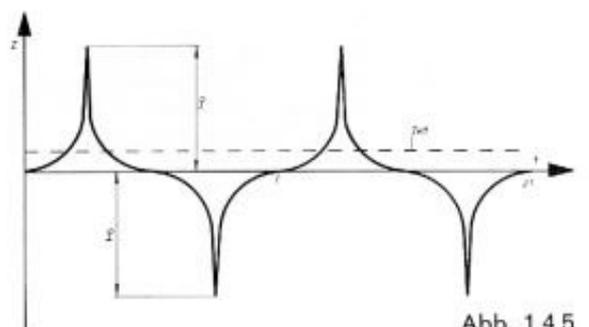


Abb. 1.4.5

Beispiel 3

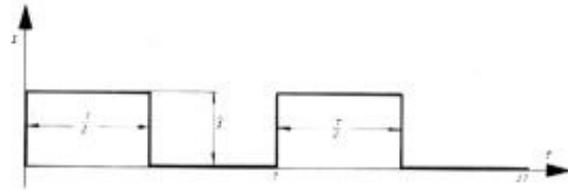


Abb. 1.4.6

Für W_{\sim} und W_{-} ergibt sich bei einem Stromverlauf entsprechend Abb. 1.4.6:

$$W_{\sim} = \bar{I}^2 \cdot R \cdot \frac{T}{2} + 0 \cdot R \cdot \frac{T}{2}$$

$$W_{-} = I_{\text{eff}}^2 \cdot R \cdot T$$

$$\bar{I}^2 \cdot R \cdot \frac{T}{2} = I_{\text{eff}}^2 \cdot R \cdot T$$

$$\frac{\bar{I}^2}{2} = I_{\text{eff}}^2 \quad I = \frac{\bar{I}}{\sqrt{2}}$$

Für die während der Zeit T transportierte Ladung erhält man:

$$Q = I \cdot \frac{T}{2} + 0 \cdot \frac{T}{2} = \bar{I} \cdot \frac{T}{2}$$

$$\text{und damit: } I = \frac{Q}{T} = \frac{\bar{I} \cdot T}{2T} = \frac{\bar{I}}{2}$$

Beispiel 4

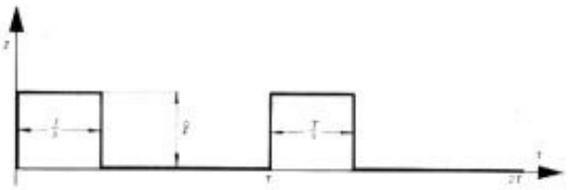


Abb. 1.4.7

Für W_{\sim} und W_{-} ergibt sich nach Abb. 1.4.7:

$$W_{\sim} = \bar{I}^2 \cdot R \cdot \frac{T}{3} + 0 \cdot R \cdot \frac{2T}{3} = \bar{I}^2 \cdot R \cdot \frac{T}{3}$$

$$W_{-} = I_{\text{eff}}^2 \cdot R \cdot T$$

$$\frac{\bar{I}^2}{3} = I_{\text{eff}}^2 \quad I_{\text{eff}} = \frac{\bar{I}}{\sqrt{3}}$$

Für die während der Zeit T transportierte Ladung erhält man:

$$Q = \bar{I} \cdot \frac{T}{3} + 0 \cdot \frac{2T}{3} = \bar{I} \cdot \frac{T}{3} \quad \text{und somit:}$$

$$I = \frac{Q}{T} = \frac{\bar{I} \cdot T}{3T} = \frac{\bar{I}}{3}$$

Der galvanische Mittelwert \bar{I} stellt eine Mittelbildung über den Strom I dar. Deshalb wird der galvanische Mittelwert von Meßinstrumenten angezeigt, deren Ausschlag proportional I ist, z. B. von einem Drehspulinstrument, also einem Meßinstrument, wie es in dem Baukasten enthalten ist.

Der effektive Mittelwert I_{eff} stellt eine Mittelbildung über die Leistung $I^2 \cdot R$ dar, also über eine Größe, die proportional zu I^2 ist. Der effektive Mittelwert wird daher von Meßinstrumenten an-

gezeigt, bei denen der Ausschlag proportional zu I^2 ist, also z. B. von einem Hitzdrahtinstrument.

1.5 Effektivwert und Scheitelwert

Das übliche Gerät, mit dem man den Scheitelwert einer Wechselspannung feststellt, ist der Oszillograph (vgl. 1.1).

Im folgenden Versuch wird eine Methode beschrieben, mit der man mit einfachen Mitteln und

dennoch guter Annäherung das Verhältnis $\frac{U_{\text{eff}}}{\hat{U}}$ beim technischen Wechselstrom ermitteln kann.

Versuch 4

In der angegebenen Schaltung wird ein Kondensator $C = 100 \mu\text{F}$ über eine Diode mit einer Wechselspannungsquelle verbunden. Während der einen Halbwelle nimmt der Kondensator beim Ansteigen der Spannung U fast augenblicklich diese Spannung an und erreicht die Spannung $U_c = \hat{U}$, da die Diode in Durchlaßrichtung einen kleinen Widerstand besitzt (I, 9.2). Wenn die Spannung U zurückgeht und ihre Polung ändert, kann die aufgenommene Ladung nur ganz langsam abfließen, da die Diode in der Sperrichtung einen sehr großen Widerstand besitzt. Schaltet man das im Baukasten befindliche Voltmeter mit $100 \text{ k}\Omega$ Vorwiderstand parallel zum Kondensator, so entlädt sich der Kondensator auch etwas über das Meßinstrument bzw. den Vorwiderstand. Doch auch diese Entladung fällt bei raschem Wechsel (50 Hz) kaum ins Gewicht, das heißt für die am Kondensator gemessene Spannung U_c gilt: $U_c \approx \hat{U}$. Zur Beobachtung dieser Entladung benützt man zunächst Wechselstrom mit ca. 1 Hz (1.1). Man erhält den in Abb. 1.5.1 dargestellten Verlauf für U_c .

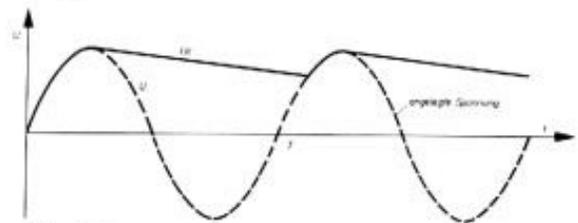


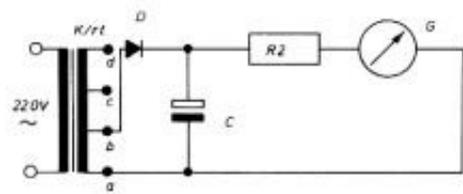
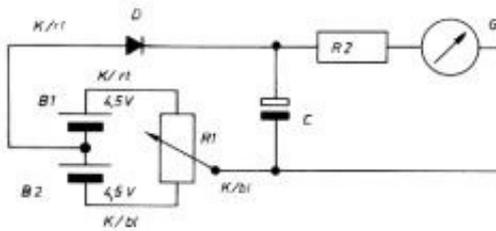
Abb. 1.5.1

Bei Benützung von technischem Wechselstrom (Transformator) erhält man die Werte der Tabelle 1.5.1

Tabelle 1.5.1

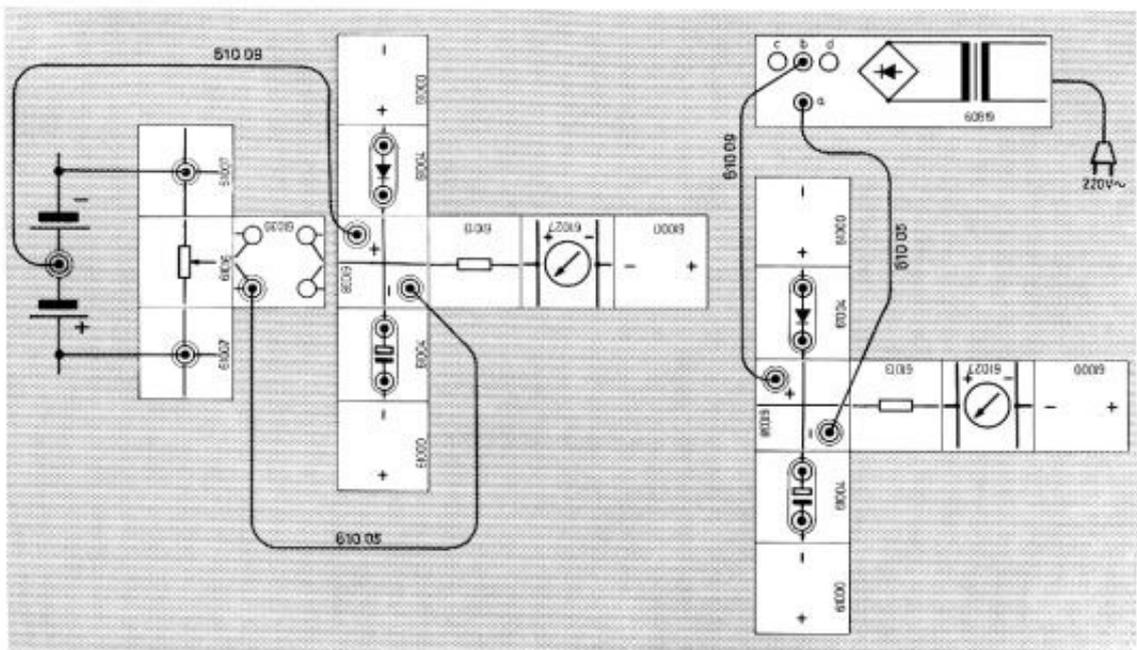
Klemmen am Trafo	U_{eff}	$\hat{U} \approx U_c$	\hat{U}/U_{eff}
a, b	3,4 V	4,75 V	$1,4 = \sqrt{2}$
b, c	7 V	10 V	$1,4 = \sqrt{2}$

Die angegebenen Werte von U_{eff} wurden in 1.3 gemessen.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	1	Trafo	608 19
	2	Verbindung	610 07
R1	1	Potentiometer, 1 kΩ	610 16
	1	Buchse, 4fach	610 39
	3	Verbindung + -	610 00
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
R2	1	Widerstand, 100 kΩ	610 13
G	1	Instrument	610 27
K/bl.	2	Kabel, blau	610 05
K/rt	2	Kabel, rot	610 09
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0
C	1	Elko, 100 µF	923 7 2122 0
D	1	Diode, BA 130	901 7 2105 0
	2	Stecker, 2fach	610 40

x Nicht im Baukasten enthalten



Versuch 5

Schaltet man in den Wechselstromkreis, bestehend aus Spannungsquelle (Trafo), 100 kΩ Widerstand und Meßinstrument, eine Diode ein, so liegt eine Einweggleichrichtung vor, die in 2.1 näher besprochen wird. Man erhält den pulsierenden Gleichstrom der Abb. 1.6.1.

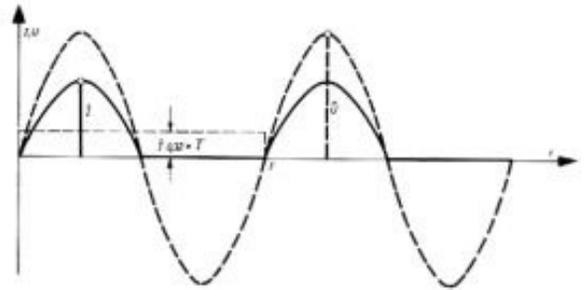


Abb. 1.6.1

Schaltet man den Meßgleichrichter ein, so ergibt sich eine Doppelweggleichrichtung, die in 2.4. ausführlich behandelt wird. Man bekommt den pulsierenden Gleichstrom der Abb. 1.6.2.

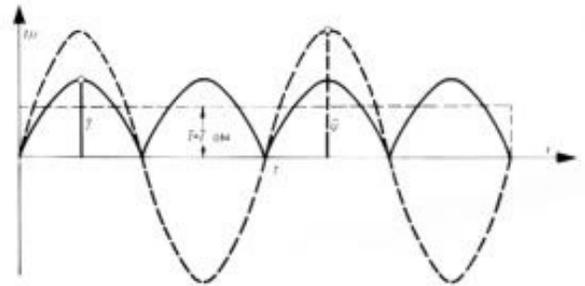


Abb. 1.6.2

Der Strom I in Durchlaßrichtung der Dioden ist im wesentlichen aus der Klemmenspannung am Trafo und dem 100 kΩ Widerstand bestimmt, da die Dioden in Durchlaßrichtung einen kleinen Widerstand aufweisen. Man erhält:

$$\bar{U} = U_{\text{eff}} \cdot \sqrt{2}, \quad \bar{I} = \frac{\bar{U}}{R}$$

Das Meßinstrument zeigt \bar{I} (galv. Mittelwert) an. Mit den Messungen aus 1.5 erhält man:

Tabelle 1.6.1

Klemmen am Trafo	U_{eff} (V)	\bar{U} (V)	\bar{I} (μA)	I (μA)	$\frac{I}{\bar{I}}$	Bemerkung
a, b	3,4	4,75	47	16	0,33	Einweggleichrichtg.
b, c	7	10	100	32	0,32	
a, b	3,4	4,75	47	32	0,66	Doppelweggleichrichtg.
b, c	7	10	100	65	0,65	

1.6 Galvanischer Mittelwert und Scheitelwert

Um das in 1.4 angegebene Verhältnis I/\bar{I} (1.4.7) durch das Experiment zu überprüfen, wird in Versuch 5 pulsierender Gleichstrom benützt. Hat der pulsierende Gleichstrom die Form der Abb. 1.6.1, so gilt für die während der Zeit T transportierte Ladung Q (vgl. Abb. 1.4.3):

$$Q = \bar{I} \cdot 0,64 \cdot \frac{T}{2} + 0 \cdot \frac{T}{2} = \bar{I} \cdot 0,32 \cdot T$$

Für I ergibt sich gemäß (1.4.7):

$$I = \frac{Q}{T} = \frac{\bar{I} \cdot 0,32 \cdot T}{T} = \bar{I} \cdot 0,32$$

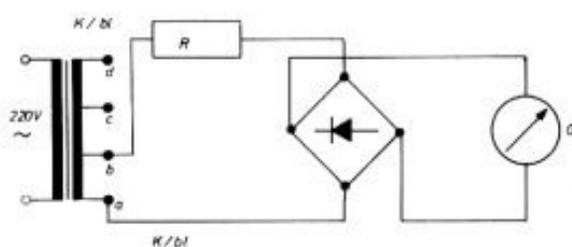
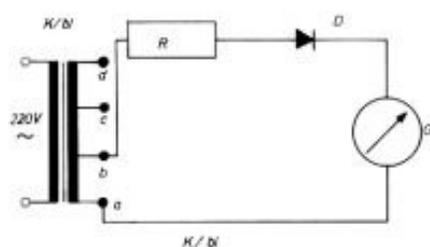
$$\frac{I}{\bar{I}} = 0,32$$

Hat der pulsierende Gleichstrom die Form der Abb. 1.6.2, so ergibt sich:

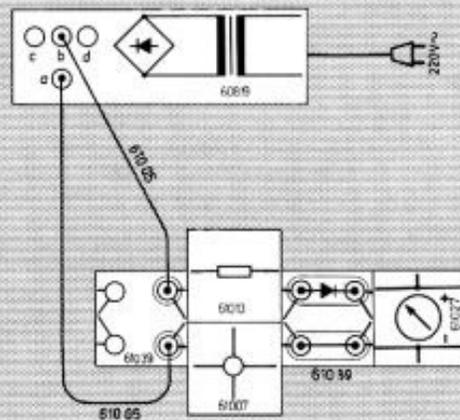
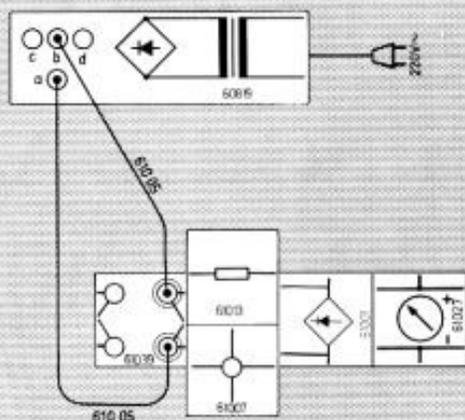
$$Q = \bar{I} \cdot 0,64 \cdot \frac{T}{2} + \bar{I} \cdot 0,64 \cdot \frac{T}{2} = \bar{I} \cdot 0,64 \cdot T$$

$$I = 0,64 \bar{I}$$

$$\frac{I}{\bar{I}} = 0,64$$



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
	2	Buchse, 4fach	610 39
R	1	Widerstand, 100 kΩ	610 13
	1	Verbindung	610 07
	1	Meßgleichrichter	610 01
G	1	Instrument	610 27
	2	Stecker, 2fach	610 40
D	1	Diode, BA 130	901 7 2105 0
K/bl.	2	Kabel, blau	610 05
	1	Kurzschlußbügel	610 2 3006 0



2. Gleichrichterschaltungen

2.1 Einweggleichrichtung (ca. 1 Hz)

Ein Gleichrichter ist ein Bauelement zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom durch Ventile, die den Strom in einer Richtung durchlassen, in der anderen dagegen sperren. Die große Bedeutung der Gleichrichter liegt darin, daß die elektrische Energie im allgemeinen in Form von Wechselstrom erzeugt und verteilt wird, für viele technische Zwecke aber nur Gleichstrom verwendet werden kann. Als Ventile dienen u. a. Glühkathodenröhren, Glimmlicht-Gleichrichter, Quecksilberdampfgleichrichter, Elektrolyt-Gleichrichter und Halbleiterdioden.

Nach der Schaltung der Ventile unterscheidet man Einweggleichrichtung, Zweiweggleichrichtung und Graetzschaltung. In den im folgenden besprochenen Schaltungen werden nur Halbleiterdioden (I, 9.2) benutzt.

Versuch 6

Um die Wirkungsweise der Einweggleichrichtung übersehen zu können, untersuchen wir in Ermangelung eines Oszillographen zunächst die Wirkung der Diode bei einem Wechselstrom mit einer Frequenz von etwa 1 Hz, den man gemäß 1.1 herstellt und dessen Wirkung mit dem Meßinstrument beobachtet werden kann.

Man erkennt, daß vom Wechselstrom nur die positiven Halbwellen durch die Diode können, bei den negativen Halbwellen sperrt die Diode (Abb. 2.1.1).

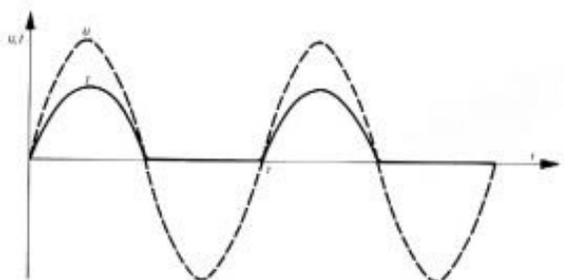
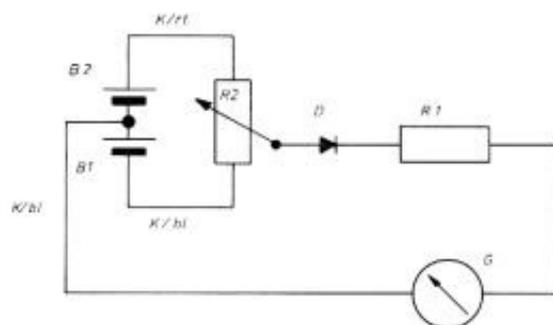


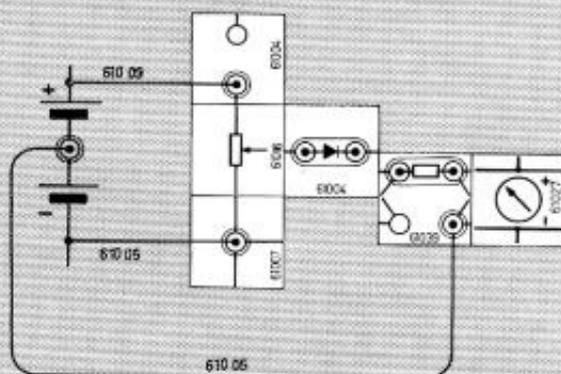
Abb. 2.1.1

Man erhält einen pulsierenden Gleichstrom.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	1	Krocodileklemme	970 7 2146 0
D	1	Diode, BA 130	901 7 2105 0
	2	Stecker, 2fach	610 40
R1	1	Widerstand, 100 kΩ	930 7 1473 0
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Verbindung	610 07
	1	Buchse, 4fach	610 39
G	1	Instrument	610 27
R2	1	Potentiometer, 1 kΩ	610 16
K/bl.	2	Kabel, blau	610 05
K/rt.	1	Kabel, rot	610 09

x Nicht im Baukasten enthalten



2.2 Anwendung der Einweggleichrichtung bei einem Voltmeter für Wechselspannung (50 Hz)

Die schaltungsmäßig besonders einfache Einweggleichrichtung findet in der Praxis manche Anwendung. So arbeiten die meisten Netzgleichrichter, die in Rundfunk- und Fernsehgeräten die für den Betrieb der Röhren erforderliche Gleichspannung herstellen, mit Einweggleichrichtung. Die Höhe der Spannung wird durch entsprechende Wahl der Sekundärwicklung der Netztransformatoren erreicht. Ist die Spannung in der Größe von mehreren hundert Volt, so müssen bei Verwendung von Halbleiterdioden mehrere in Reihe geschaltet werden, da die einzelne Diode in diesem Baukasten nicht mehr als 20 bis 25 V sperren kann. Ist eine Gleichspannung von mehreren hundert kV erforderlich, so müssen die Gleichrichter Glühventile sein. Eine solche Gleichrichtung wird nötig beim Betrieb von Röntgenröhren.

Hier soll im folgenden die Einweggleichrichtung benützt werden zur Herstellung eines einfachen Wechselspannungsmessers.

Versuch 7

Man schaltet 2 gleiche Glühlämpchen in der Weise, daß das eine mit der regelbaren Gleichspannung des Trafos, das zweite mit den am Trafo abgreifbaren Wechselspannungen (soweit sie unter 6 V bleiben) betrieben wird. Man regelt die Gleichspannung so ein, daß beide Lämpchen gleich hell leuchten. Man mißt die Gleichspannung U_{-} an den Klemmen der gleichstrombetriebenen Lampe wie üblich. Für die Spannung U_{eff} an der wechselstrombetriebenen Lampe gilt dann: $U_{eff} = U_{-}$.

Als Voltmeter für U_{eff} benutzt man nun die folgende Anordnung: Man schaltet 100 k Ω , eine Diode und das Meßinstrument in Reihe und legt diese Anordnung, die nun ein Voltmeter für Wechselspannung darstellt, zu der wechselstrombetriebenen Lampe parallel. Man kann nun die U_{eff} entsprechenden Skalenteile an dem Wechselspannungsvoltmeter ablesen und so das Voltmeter eichen. Man erhält die Werte der Tabelle 2.2.1

Tabelle 2.2.1

Klemmen am Trafo	$U_{eff} = U_{-}$	Skalenteile	Volt/Skt.
b, c	7 V	3,3 (33 μ A)	2,1
a, b	3,4 V	1,5 (15 μ A)	2,2

Diese Werte hatte man nach Tabelle 1.5.1 zu erwarten. Das Meßinstrument in dem Wechselspannungsvoltmeter zeigt den galvanischen Mittelwert an, dieser beträgt bei Einweggleichrichtung 32 % des Scheitelwertes \bar{I} (1.5).

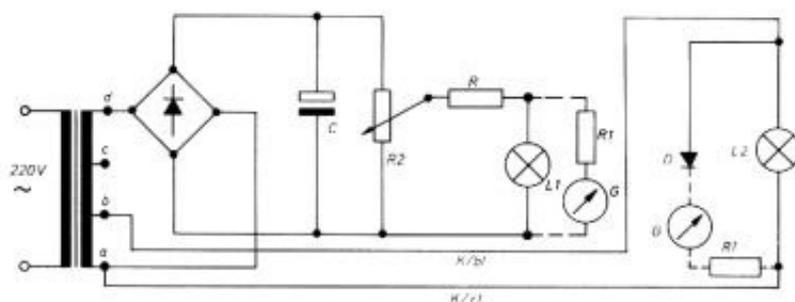
Für den Scheitelwert \bar{I} gilt: $\bar{I} = \frac{\bar{U}}{R}$

Dabei ist $R = 100$ k Ω , da der Widerstand der Diode in Durchlaßrichtung gegen 100 k Ω vernachlässigbar ist.

Da \bar{U} in jedem Fall gleich $U_{eff} \cdot \sqrt{2}$ ist, ist offensichtlich der Ausschlag des Wechselspannungsmessers proportional zu U_{eff} . Der Vollausschlag des Meßinstrumentes entspricht nach Tabelle 2.2.1 einer effektiven Spannung von 22 V.

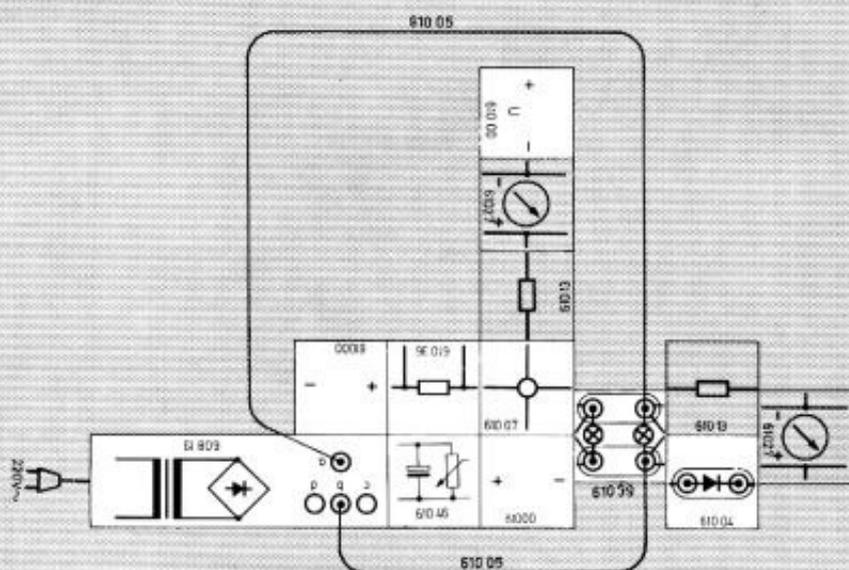
Die Eichung kann kontrolliert werden, wenn man das Wechselspannungsvoltmeter (ohne Glühlampe!!) mit den Transformator клемmen a u. d (ca. 17 V) bzw. b u. d (ca. 14 V) direkt verbindet.

Ohne Diode würde über den 100 k Ω Widerstand der Strom $I_{eff} = \frac{U_{eff}}{R}$ fließen, das ergibt mit den Werten aus Tabelle 2.2.1 70 μ A bzw. 34 μ A, mit Diode werden 33 μ A bzw. 15 μ A gemessen, d. h. etwa 45 % des effektiven Wertes.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
R2/C	1	Spannungsteiler	610 46
	3	Verbindung + -	610 00
	1	Buchse, 4fach	610 39
	3	Stecker, 2fach	610 40
R1	1	Widerstand, 100 k Ω	610 13
G	1	Instrument	610 27
	1	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
D	1	Diode, BA 130	901 7 2105 0
K/bl.	2	Kabel, blau	610 05
R	1	Widerstand, 133 Ω ¹⁾	610 36
	1	Verbindung	610 07

1) Schutzwiderstand



2.3 Doppelweggleichrichtung (50 Hz)

Bei der Doppelweggleichrichtung soll auch die zweite Halbwelle des Wechselstromes ausgenutzt werden. Man benötigt 2 Dioden und einen Transformator mit Mittelanzapfung. An den beiden Außenanschlüssen des Transformators (Klemme b u. d) liegen die beiden Dioden mit gleicher Polung. Bei jeder Halbwelle kann ein Strom über die in Durchlaßrichtung liegende Gleichrichterstrecke zur Mittelanzapfung (Klemme c) fließen. Die an jede Diodenstrecke angelegte Wechselspannung ist natürlich nur halb so groß wie bei der Einweggleichrichtung. Man kann deswegen keine größere Gleichspannung erwarten als bei der Einweggleichrichtung (ca. 45 %). Auch die Doppelweggleichrichtung wird im Netzteil von Rundfunkgeräten, vor allem mit Glühkathoden, bei denen meist zwei Gleichrichterstrecken in einem Röhrenkolben untergebracht sind, benützt und bei der Herstellung von hohen Gleichspannungen für den Betrieb von Röntgenröhren.

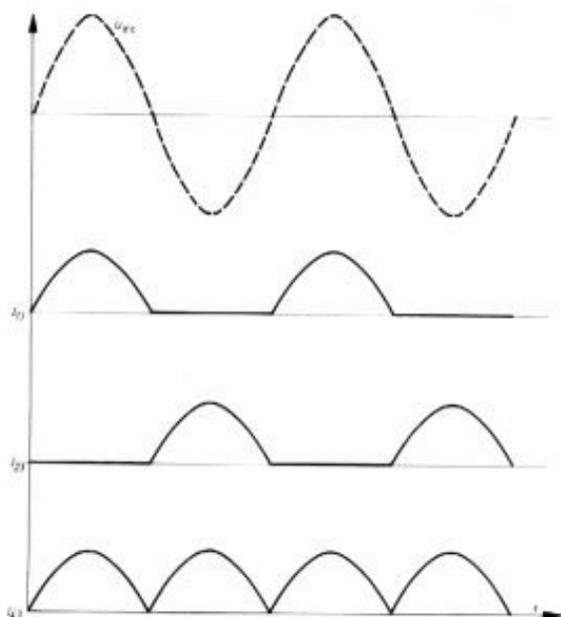


Abb. 2.3.1

Versuch 8

In der angegebenen Anordnung mißt das Meßinstrument den galvanischen Mittelwert I bei Doppelweggleichrichtung, bei Einweggleichrichtung mit halber Spannung und bei Einweggleichrichtung mit voller Spannung.

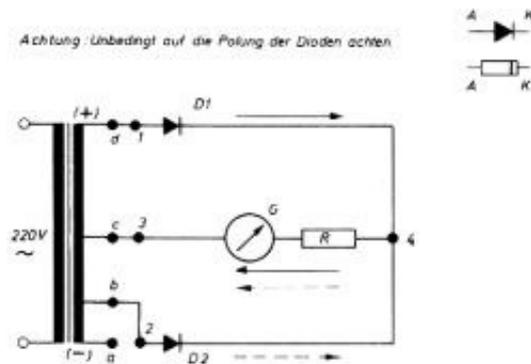
In Tabelle 2.3.1 sind die gemessenen und berechneten Werte zusammengestellt:

Tabelle 2.3.1

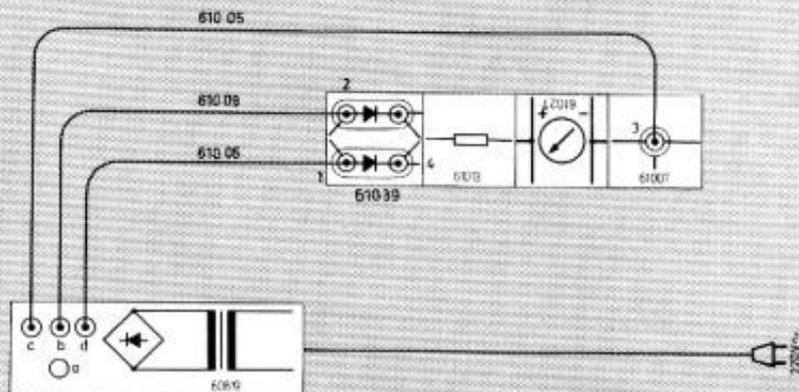
Art der Gleichr.	Klemmenverbindung	$U_{eff}^{1)}$ (V)	$I_{eff}^{2)}$ (μA)	$I^{3)}$ (μA)	$\frac{I}{I_{eff}}$
Doppelweg	d1, b2, c3	14	140	65	45 %
Einweg	d1, c3	7	70	33	45 %
Einweg	b2, c3	7	70	33	45 %
Einweg	d1, b3	14	140	65	45 %

¹⁾ aus (1.3), ²⁾ $I_{eff} = \frac{U_{eff}}{R}$ (ohne Diode), ³⁾ mit Diode

Achtung: Unbedingt auf die Polung der Dioden achten



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
	1	Buchse, 4fach	610 39
R	1	Widerstand, 100 kΩ	610 13
G	1	Instrument	610 27
	1	Verbindung	610 07
	2	Stecker, 2fach	610 40
D1/D2	2	Diode, BA 130	901 7 2105 0
K/bl.	2	Kabel, blau	610 05
K/rt.	1	Kabel, rot	610 09



2.4 Graetzschaltung (ohne Baustein, ca. 1 Hz)¹⁾

Die Graetzschaltung stellt eine Brückenschaltung mit 4 Dioden dar. Der Vorteil gegenüber der Doppelweggleichrichtung liegt darin, daß kein Trafo mit einer Mittelanzapfung erforderlich ist und trotzdem die zweite Halbwelle ausgenützt wird. Man erreicht mit der halben Wechselspannung dasselbe wie bei der Doppelweggleichrichtung.

Die Graetzschaltung mit 4 Glühventilröhren ist auch für den Betrieb von Röntgenröhren gut geeignet.

Wenn während der einen Halbwelle des Wechselstromes 1 positiv und 2 negativ ist, liegen die Dioden D_1 und D_4 in Durchlaßrichtung, die Dioden D_2 und D_3 in Sperrichtung. Der Strom fließt von 1 über D_1 , 3, das Meßinstrument, den Widerstand R_2 , 4, D_4 nach 2. Bei der folgenden Halbwelle (2 positiv und 1 negativ) liegen D_2 und D_3 in Durchlaßrichtung, D_1 und D_4 in Sperrichtung. Der Strom fließt von 2 über D_3 nach 3 und von dort über das Meßinstrument, den Widerstand R_2 , 4 und D_2 nach 1. Das Gleichspannungsinstrument wird also von jeder Halbwelle in der gleichen Richtung durchflossen: Beide Halbwellen sind gleichgerichtet.

Versuch 9

Um das Auftreten beider Halbwellen in dem pulsierenden Gleichstrom ohne Oszillographen beobachten zu können, soll die Graetzschaltung zunächst mit einem Wechselstrom der Frequenz $f \approx 1$ Hz betrieben werden, den man gemäß 1.1 durch entsprechendes Drehen des Potentiometerknopfes herstellen kann.

Das Entstehen eines Stromverlaufes gem. Abb. 2.4.1 läßt sich gut verfolgen.

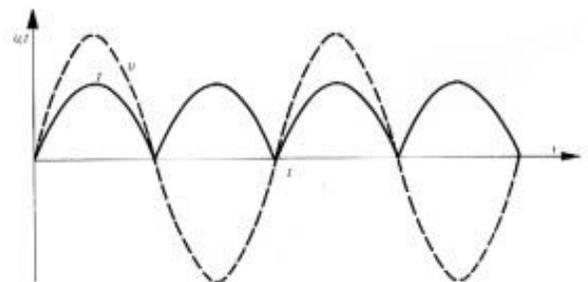
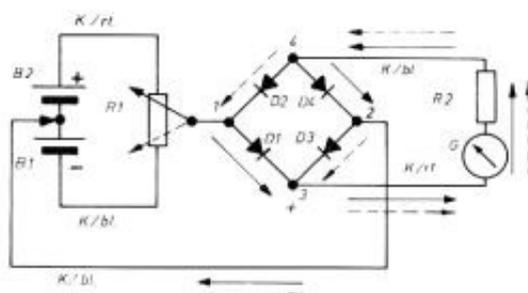


Abb. 2.4.1

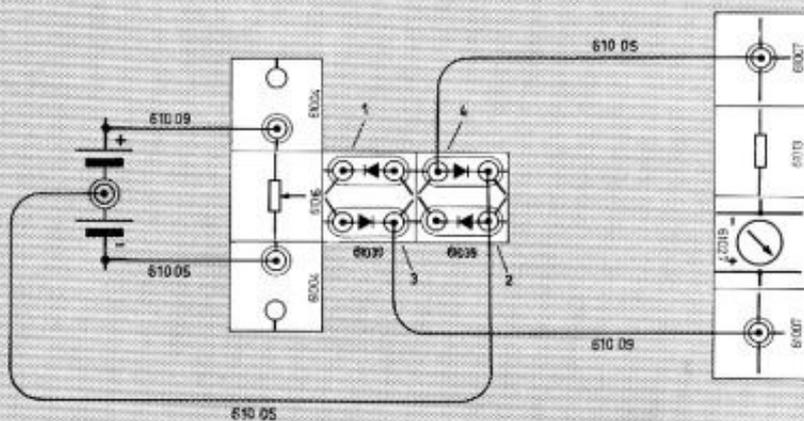
¹⁾ nach Leo Graetz 1856–1936

Achtung Unbedingt auf die Polung der Dioden achten



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	2	Buchse, 4fach	610 39
	2	Verbindung	610 07
R1	1	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
R2	1	Widerstand, 100 k Ω	610 13
G	1	Instrument	610 27
K/bl.	3	Kabel, blau	610 05
K/rt.	2	Kabel, rot	610 09
	4	Stecker, 2fach	610 40
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0
D1/2/3/4	4	Diode, BA 130	901 7 2105 0
	1	Kurzschlußbügel	610 2 3006 0

x Nicht im Baukasten enthalten



2.5 Graetzschaltung (50 Hz, Baustein) Aufbau eines Voltmeters

Da die Graetzschaltung ohne Mittelanzapfung die doppelte Spannung liefert gegenüber der Einweggleichrichtung, benützt man sie meist als Meßgleichrichter in Wechselstrommeßinstrumenten. Diesem Baukasten liegt deshalb ein besonderer Baustein mit einer Graetzschaltung bei, der vor allem bei der Benützung des Gleichstrommeßinstrumentes als Wechselstrommeßinstrument benötigt wird. Im folgenden Versuch wird wie bei 2.2 ein Wechselspannungsmesser aufgebaut, der jedoch, da die Graetzschaltung benützt wird, unter sonst gleichen Bedingungen den doppelten Ausschlag liefert. Im übrigen wird diese Schaltung in 3.3 noch ausführlicher besprochen werden.

In 3.3 wird auch eine ausführliche Eichung des Voltmeters durchgeführt.

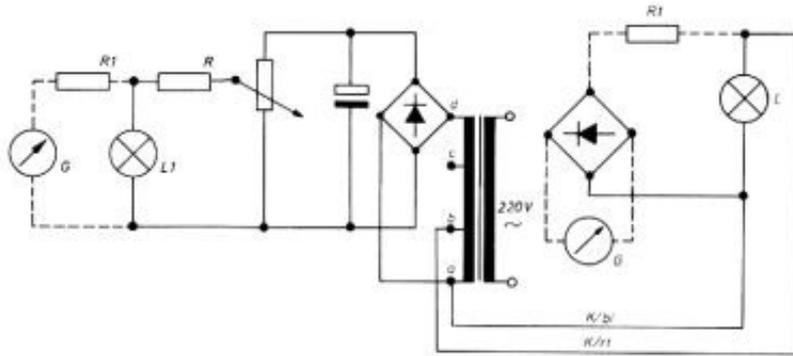
Versuch 10

Zwei gleiche Glühlämpchen werden wie in 2.2 auf gleiche Helligkeit eingestellt. Bei gleicher Helligkeit hat die mit Wechselstrom betriebene Lampe die Spannung $U_{eff} = U_-$. U_- ist die am Gleichspannungsvoltmeter abgelesene Spannung. In Tabelle 2.5.1 sind die Meßwerte zusammengestellt.

Tabelle 2.5.1

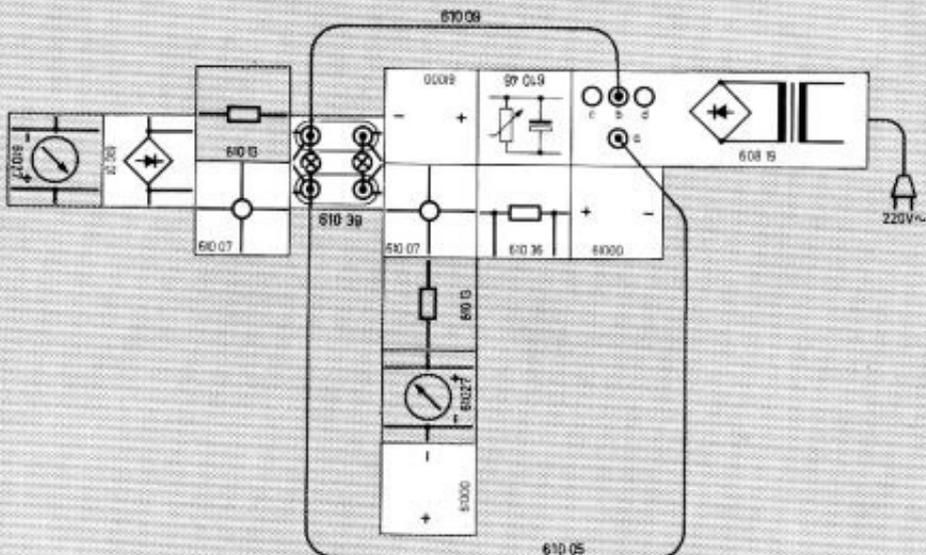
Klemmen am Trafo	$U_{eff} = U_-$	Skalenteile	Volt/Skt.
b u. c	7 V	6,5 (65 μ A)	1
a u. b	3,4 V	3 (30 μ A)	1

Vergleicht man wie in 2.2 I_{eff} (Strom, der ohne Gleichrichter über $R = 100 \text{ k}\Omega$ fließen würde) mit dem Strom I , der mit Gleichrichter fließt, so erhält man: $I/I_{eff} \approx 90 \%$.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
	1	Spannungsteiler	610 46
	3	Verbindung + -	610 00
	1	Buchse, 4fach	610 39
	2	Verbindung	610 07
	1	Meßgleichrichter	610 01
G	1	Instrument	610 27
R1	1	Widerstand, 100 k Ω	610 13
	2	Stecker, 2fach	610 40
K/bl.	1	Kabel, blau	610 05
L/L1	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
R	1	Widerstand, 133 Ω ¹⁾	610 36
	1	Kabel, rot	610 09

1) Schutzwiderstand



2.6 Glättung mit Ladekondensator (ca. 1 Hz)

Der durch die Gleichrichtung erzeugte pulsierende Gleichstrom hat – wie man sagt – eine starke „Welligkeit“. Dieser Umstand ist in vielen Fällen ohne Bedeutung, z. B. beim Laden von Akkumulatoren und beim Galvanisieren. Anders ist es, wenn man beispielsweise einen Transistorradio aus dem Lichtnetz über Gleichrichter speisen will. Durch die Welligkeit würde das Radio stark brummen. Der pulsierende Gleichstrom muß dann geglättet werden. Im einfachsten Fall schaltet man einen Ladekondensator C parallel zum Verbraucher. Der Kondensator lädt sich auf, wenn der Strom ansteigt. Will er wieder absinken, liefert der Kondensator zusätzlich Strom an den Verbraucher. Ist kein Verbraucher angeschlossen, bleibt die Kondensatorspannung $U_C = \bar{U}$ (1.4). Ist ein Verbraucher angeschlossen, so sinkt die Spannung U_C je nach Größe des Verbraucherwiderstandes R und der Kapazität C mehr oder weniger ab, bis der nächste Lade Stoß den Kondensator wieder aufladet (I, 6.3). Diese Art der Glättung ist in dem Spannungsteiler (Abb. 2.6.1) durchgeführt, dort liegt parallel zu einem Verbraucherwiderstand von $1\text{ k}\Omega$ als Glättungskondensator die Kapazität $C = 500\text{ }\mu\text{F}$. Die Spannung wird über einen Gleitkontakt an dem Widerstand abgegriffen (Potentiometer).

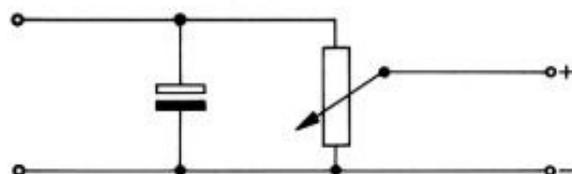


Abb. 2.6.1

Versuch 11

Um den Einfluß des Ladekondensators in allen Einzelheiten beobachten zu können, benützen wir Einweggleichrichtung (2.1) und eine Frequenz von 0,5 bis 2 Hz (1.1).

Zunächst schaltet man zwischen 1 und 2 einen Kondensator $C_1 = 100\text{ }\mu\text{F}$ und mißt seine Spannung mit dem Voltmeter (Meßbereich 10 V, $R_3 = 100\text{ k}\Omega$).

Die Kondensatorspannung steigt auf $U = \bar{U} \approx 4\text{ V}$ an und bleibt auf diesem Wert, da der Kondensator in den Ladepausen über das hochohmige Voltmeter nur unwesentlich entladen wird (Abb. 2.6.2).

Schaltet man zwischen 3 und 4 einen Verbraucherwiderstand $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ ein, so geht die Spannung je nach Länge der Ladepausen mehr oder weniger zurück.

Bei einer Frequenz $f_1 \approx 1\text{ Hz}$ ist $\Delta U \approx 1,5\text{ V}$, bei einer Frequenz $f_2 \approx 2\text{ Hz}$ ist $\Delta U \approx 0,7\text{ V}$. Erhöht man die Kapazität durch Parallelschalten von $C_2 = 100\text{ }\mu\text{F}$ auf das Doppelte, geht ΔU zurück. Ersetzt man $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ durch $R_2 = 5\text{ k}\Omega$, steigt ΔU an.

Man erhält die in Tabelle 2.6.1 zusammengestellten Werte.

Tabelle 2.6.1

f (Hz)	C (μF)	R ($\text{k}\Omega$)	\bar{U} (V)	ΔU (V)
1	100	10	4	1,5
2	100	10	4	0,7
1	100	5	4	2,5
1	200	5	4	1,5
0,5	200	5	4	2,5

Der ungefähre Spannungsverlauf ist aus Abb. 2.6.2 zu ersehen.

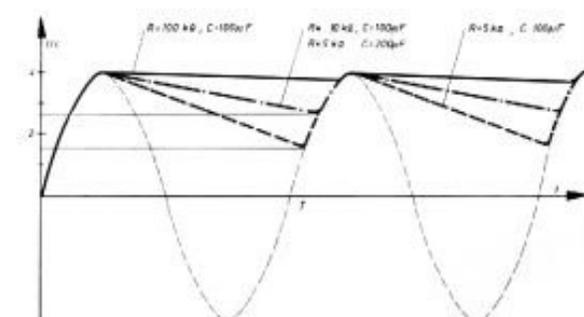
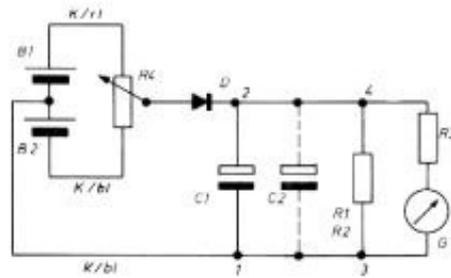


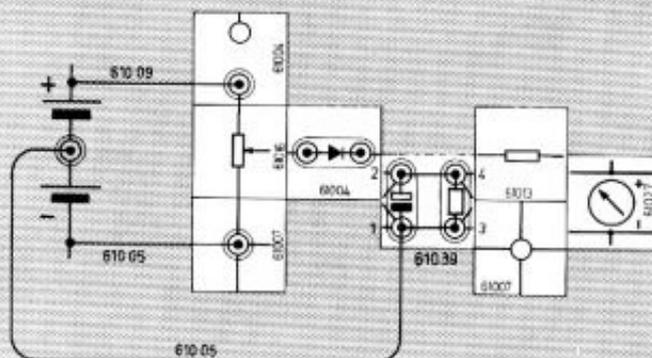
Abb. 2.6.2

—	$R = 100\text{ k}\Omega, C = 100\text{ }\mu\text{F}$
- - -	$R = 10\text{ k}\Omega, C = 100\text{ }\mu\text{F}$
- · - ·	$R = 5\text{ k}\Omega, C = 200\text{ }\mu\text{F}$
· · · ·	$R = 5\text{ k}\Omega, C = 100\text{ }\mu\text{F}$



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
K/rt.	1	Kabel, rot	610 09
K/bl.	2	Kabel, blau	610 05
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
R4	1	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
	2	Verbindung	610 07
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Buchse, 4fach	610 39
G	1	Instrument	610 27
R3	1	Widerstand, 100 k Ω	610 13
	3	Stecker, 2fach	610 40
C1/C2	2	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0
	2	Kurzschlußbügel	610 2 3006 0
	1	Diode, BA 130	901 7 2105 0
R2	1	Widerstand, 5,1 k Ω	930 7 1786 0
R1	1	Widerstand, 10 k Ω	930 7 1961 0
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0

x Nicht im Baukasten enthalten



2.7 Glättung mit Siebkette (Einweggleichrichtung 1 Hz)

Ersetzt man im vorausgegangenen Versuch den Kurzschlußbügel zwischen 2 und 4 durch einen Widerstand R, so erhält man eine C–R–C-Sieb-
kette.

Ersetzt man den Widerstand R durch eine Drosselspule mit der Induktivität L (= 1 H), so erhält man eine C–L–C-Sieb-
kette (Abb. 2.7.1).

Das Wort Siebkette deutet an, daß aus dem pul-
sierenden Gleichstrom, der im Grunde ein Gem-
isch aus Gleich- und Wechselstrom ist (1.1), der
Gleichstromanteil herausgesiebt und der Wech-
selstrom unterdrückt wird.

Mit einer C–R–C-Sieb-
kette und besonders mit
einer C–L–C-Sieb-
kette erhält man im all-
gemeinen eine bessere Glättung als mit dem einfachen
Ladekondensator.

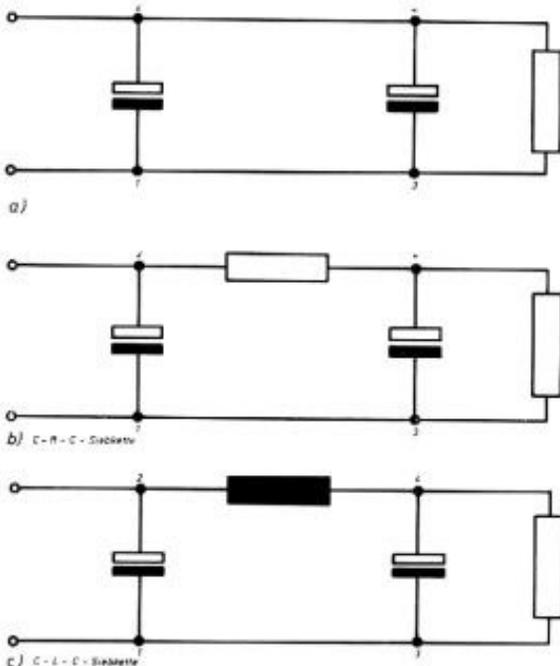
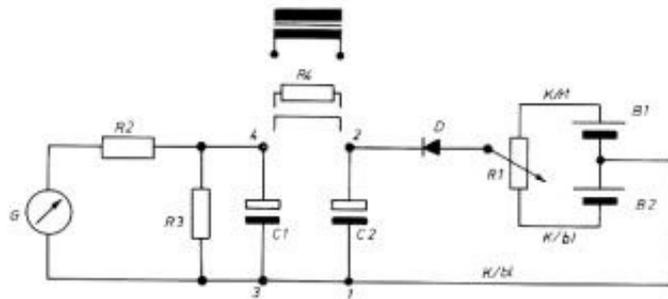


Abb. 2.7.1

Versuch 12

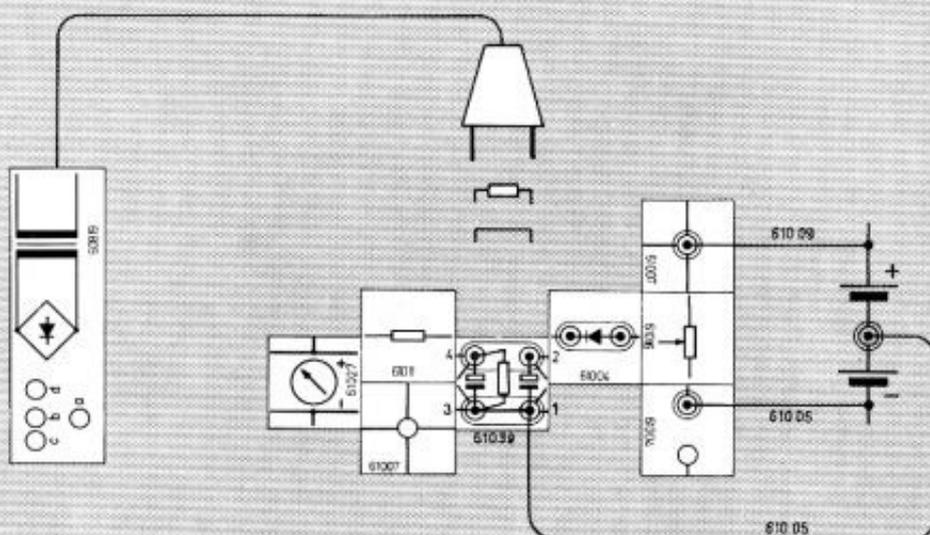
Man ersetzt in Versuch 11 den Kurzschlußbügel zwischen 2 und 4 durch den Widerstand $R = 1 \text{ k}\Omega$ bzw. durch die Primärspule des Transformator-
blocks. Der Gerätestecker faßt gerade in die seit-
lichen Bohrungen des Aufsatzsteckers. Um die
Spule anzuschließen, muß man natürlich den
Schalter an dem Trafoblock betätigen. Bei Ver-
wendung der 1 Hz-Wechselspannung kann man
allerdings keine wesentlichen Verbesserungen
gegenüber dem einfachen Ladekondensator be-
merken; diese treten erst bei höheren Frequen-
zen zutage. Hochfrequente Vorgänge können je-
doch nur mit einem Kathodenstrahloszillograph
beobachtet werden, da die Anzeige trägheitslos
durch einen Elektronenstrahl erfolgt.

Glättung mit Siebkette (Einwegglättung, 1 Hz)



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	2	Verbindung	610 07
R1	1	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
	1	Buchse, 4fach	610 39
R2	1	Widerstand, 10 k Ω	610 11
G	1	Instrument	610 27
	3	Stecker, 2fach	610 40
C1/C2	2	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0
R3	1	Widerstand, 10 k Ω	930 7 1961 0
R4	1	Widerstand, 1 k Ω	930 7 1441 0
	2	Kurzschlußbügel	610 2 3006 0
D	1	Diode, BA 130	901 7 2105 0
K/bl.	2	Kabel, blau	610 05
K/rt.	1	Kabel, rot	610 09
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0

x Nicht im Baukasten enthalten



2.8 Glättung mit Ladekondensator Einweggleichrichtung und Graetzschaltung (50 Hz)

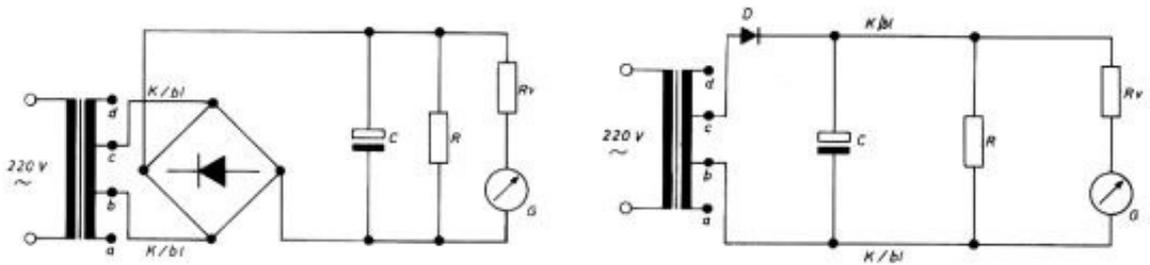
Der nachfolgende Versuch soll den Unterschied von Einweggleichrichtung und Doppelweggleichrichtung (Graetz) bei technischem Wechselstrom sowie in beiden Fällen den Einfluß des Ladekondensators zeigen.

Versuch 13

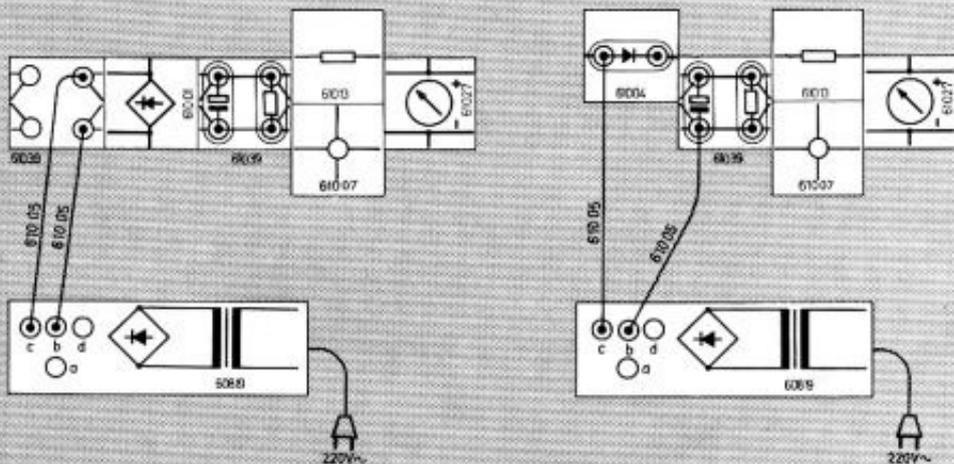
Die Glättung wird durch den Kondensator $C = 100 \mu\text{F}$ bewirkt, der zu dem Verbraucherwiderstand $R = 10 \text{ k}\Omega$ parallelgeschaltet ist. Mit einem Gleichspannungsvoltmeter (Meßbereich 10 V, Vorwiderstand $R_v = 100 \text{ k}\Omega$) wird die Spannung des Kondensators, die gleich der Spannung am Verbraucher ist, gemessen. Die Gleichrichtung wird einmal durch eine Diode (Einweggleichrichtung) und dann mit dem Meßgleichrichter durchgeführt. Ohne Kondensator C erhält man bei Einweggleichrichtung $U \approx 3,5 \text{ V}$ und bei Zweiweggleichrichtung $U \approx 6,5 \text{ V}$. Mit Kondensator erhält man in beiden Fällen $U = 9 \text{ V}$. Mit Kondensator ist in beiden Fällen die Spannung $U \approx \hat{U}$ (vgl. 2.6).

Ohne Kondensator mißt man die Spannung $U = \bar{I} \cdot R$.

Der galvanische Mittelwert ist aber bei Graetzschaltung doppelt so groß wie bei Einweggleichrichtung (1.5).



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
	2	Buchse, 4fach	610 39
	1	Meßgleichrichter	610 01
	1	Verbindung	610 07
	1	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
Rv	1	Widerstand, 100 kΩ	610 13
G	1	Instrument	610 27
K/bl.	2	Kabel, blau	610 05
	3	Stecker, 2fach	610 40
	2	Kurzschlußbügel	610 2 3006 0
C	1	Elko, 100 μF	923 7 2122 0
R	1	Widerstand, 10 kΩ	930 7 1961 0
D	1	Diode, BA 130	901 7 2105 0



2.9 Glättung durch Ladekondensator Akustischer Nachweis bei 50 Hz

Liegt die Frequenz des Wechselstromes im Bereich der Tonfrequenz (16 bis 16 000 Hz), so ist es möglich, die Glättung mit einem Lautsprecher nachzuweisen. Bei vollkommen geglättetem Gleichstrom ist der Lautsprecher stumm. Enthält der Strom über den Lautsprecher noch eine kleine „Welligkeit“, so hört man entsprechend den Amplituden des Wechselstromes, der dem Gleichstrom überlagert ist, einen mehr oder weniger lauten Ton. Benützt man technischen Wechselstrom, so ergibt sich bei Graetzschaltung ein Frequenzgemisch mit der Grundfrequenz $f = 100$ Hz. Der Ton des Lautsprechers ist dann höher als der 50 Hz-Ton, der sich ergibt, wenn man den technischen Wechselstrom durch den Lautsprecher fließen läßt. Er hat wegen der Oberfrequenzen auch einen anderen Klangcharakter. Fließt ein sinusförmiger Strom durch einen Lautsprecher, erhält man einen reinen Grundton, wie z. B. von einer Stimmgabel, dessen Lautstärke mit der Stromstärke und dessen Höhe mit der Frequenz ansteigt. Überlagern sich bestimmte Oberfrequenzen (zweifache Grundfrequenz, dreifache usw.), so erhält der vom Lautsprecher abgestrahlte Ton eine bestimmte Klangfarbe, die von den Oberfrequenzen abhängt.

Versuch 14

Man schließt zunächst den Lautsprecher über das 1 k Ω Potentiometer direkt an etwa 7 V Wechselspannung an und regelt den Strom so ein, daß der tiefe Ton hörbar wird ($f = 50$ Hz, reiner Grundton).

Danach schaltet man den Lautsprecher wieder über das 1 k Ω Potentiometer und ein Gleichstromamperemeter (Meßbereich 0,1 A, 1,2 Ω -Shunt) direkt an den Gleichstromausgang des Netztrafos. Dieser Trafoausgang liefert pulsierenden Gleichstrom entsprechend der eingebauten Graetz-Doppelweggleichrichtung. Der Lautsprecher ergibt jetzt einen 1 Oktave höheren Ton mit einer recht typischen Klangfarbe (Oberfrequenzen, Obertöne).

Das Amperemeter zeigt den galvanischen Mittelwert $I = 25$ mA an. Legt man jetzt über die Klemmen der Anschlußbuchse, 2fach 610 04 einen Kondensator $C_1 = 0,5 \mu\text{F}$ parallel, so wird der Lautsprecher etwas leiser, während I unwesentlich ansteigt, schaltet man $C_2 = 5 \mu\text{F}$ dazu parallel, so wird der Lautsprecher noch etwas leiser und der I steigt auf 30 mA an. Schaltet man endlich $C_3 = 100 \mu\text{F}$ parallel, verstummt der Lautsprecher, während I auf 40 mA ansteigt.

Das Leiserwerden des Lautsprechers zeigt, daß die Welligkeit des Wechselstromanteiles mit steigender Kapazität abnimmt (2.1). Mit kleiner werdendem Abfall der Spannung ist auch der galvanische Mittelwert höher (Abb. 2.9.1).

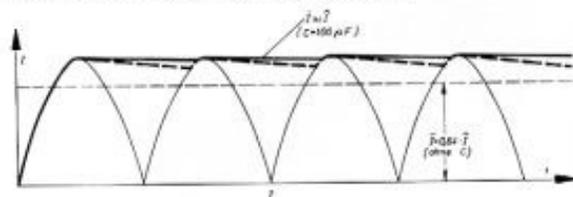
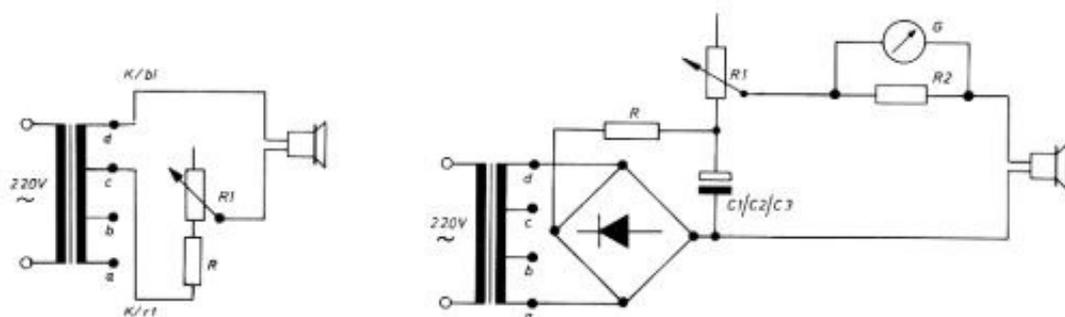
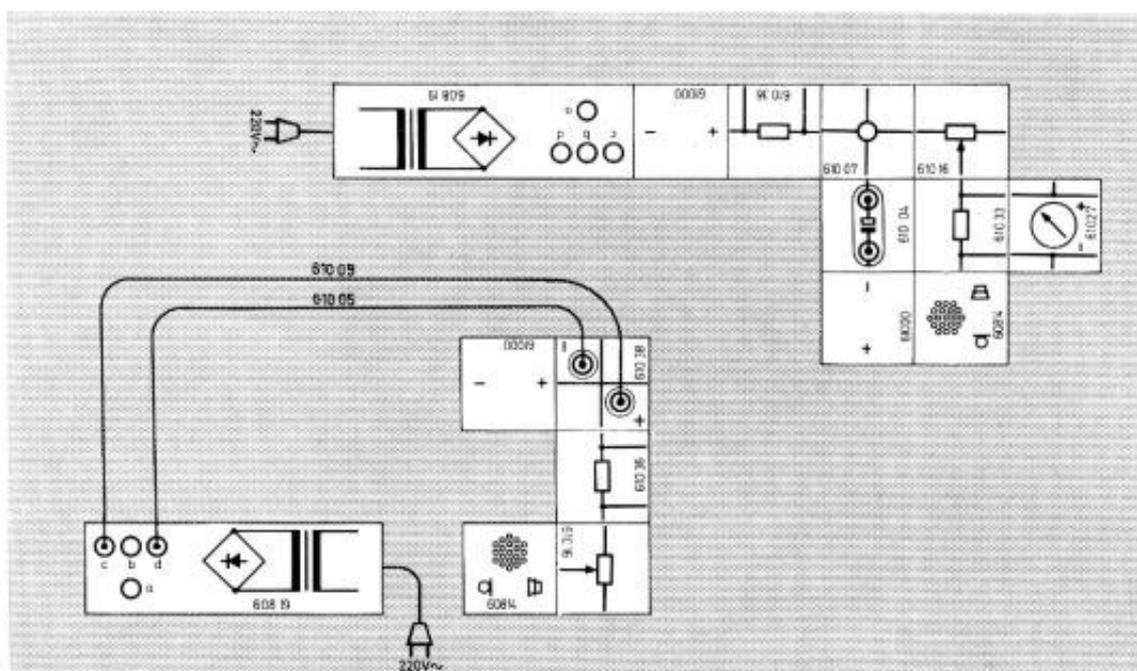


Abb. 2.9.1



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
	3	Verbindung + -	610 00
	1	Anschlußbuchse + -	610 38
R1	2	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
G	1	Instrument	610 27
R2	1	Widerstand, 1,2 Ω	610 33
	1	Mikrofonlautsprecher	608 14
	1	Stecker, 2fach	610 40
K/bl.	1	Kabel, blau	610 05
K/rt.	1	Kabel, rot	610 09
R	1	Widerstand, 133 Ω ¹⁾	610 36
	1	Verbindung	610 07
	1	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
C3	1	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0
C2	1	Elko, 5 μ F	923 7 2323 0
C1	1	Kondensator, 0,47 μ F	926 7 2126 0

1) Schutzwiderstand



2.10 Spannungsverdoppelung nach Villard

Im folgenden sollen einige Schaltungen besprochen werden, in denen Spannungsverdoppelung bzw. Spannungsvervielfachung, meist mit einer Glättung, erreicht wird. Diese Schaltungen finden fast ausschließlich Verwendung im Hochspannungsbereich und dienen der Erzeugung von Gleichspannung für den Betrieb von Röntgenröhren und der Erzeugung von Hochspannung zur Beschleunigung geladener Teilchen im Bereich der Kernphysik. Für den Betrieb der Röntgenröhren braucht man Spannungen von etwa 100 kV. Zur Beschleunigung von geladenen Teilchen werden mit solchen Schaltungen Spannungen von mehreren MV erzeugt. Natürlich werden da als Gleichrichter Glühventile und Kondensatoren von großer Durchschlagfestigkeit benützt. Die hier vorgesehenen Schaltungen sollen nur das Prinzip verständlich machen.

Eine für den Betrieb von Röntgenröhren häufig benützte Schaltung ist die Schaltung nach Villard, die keine Glättung, aber eine Spannungsverdoppelung liefert.

Versuch 15

Die Spannungsverhältnisse sollen zunächst mit Wechselstrom einer Frequenz von etwa 1 Hz (1.1) untersucht werden.

Wird 1 negativ gegen 2, so lädt sich der Kondensator auf. Es fließt ein Ladestrom über die Diode. Punkt 3 hat während des Aufladens die gleiche Spannungen wie 2, d. h. $U_{32}^{(1)} = 0$. Geht U_{12} auf 0 zurück, behält der Kondensator seine Ladung, da in Sperrichtung der Diode keine Ladung abfließen kann, d. h. U_{32} steigt auf \bar{U} , wenn U_{12} auf 0 absinkt. Wird U_{12} positiv, steigt U_{32} auf $2\bar{U}$ an. Die Kondensatorspannung $U_{31} = \bar{U}$ und die Transformatorspannung $U_{12} = \bar{U}$ sind in Reihe und addieren sich zu $U_{32} = 2\bar{U}$. Wenn U_{12} negativ wird, nähert sich U_{32} wieder dem Wert 0.

In Abb. 2.10.1 ist das Zusammenspiel von U_{12} und U_{32} dargestellt.

Den Spannungsverlauf U_{32} kann man mit dem Gleichspannungsvoltmeter (Meßbereich 10 V, $R_v = 100 \text{ k}\Omega$) bei $f \approx 1 \text{ Hz}$ gut beobachten.

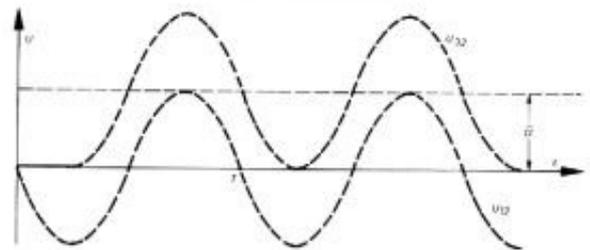


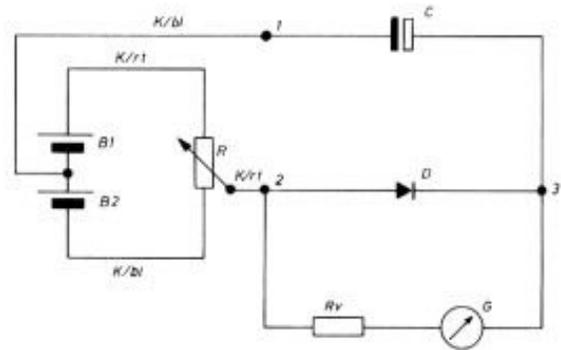
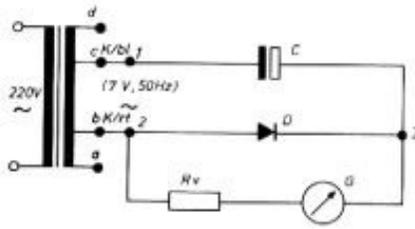
Abb. 2.10.1

Legt man an die Villardschaltung technischen Wechselstrom aus dem Trafo, z. B. $U_{eff} = 7 \text{ V}$ an, so zeigt das Voltmeter $U \approx 10 \text{ V}$ an.

Mit $U_{eff} = 7 \text{ V}$ ist $\bar{U} = \sqrt{2} \cdot 7 \text{ V} = 10 \text{ V}$, $2\bar{U} = 20 \text{ V}$, galvanischer Mittelwert $\bar{U} = 10 \text{ V}$.

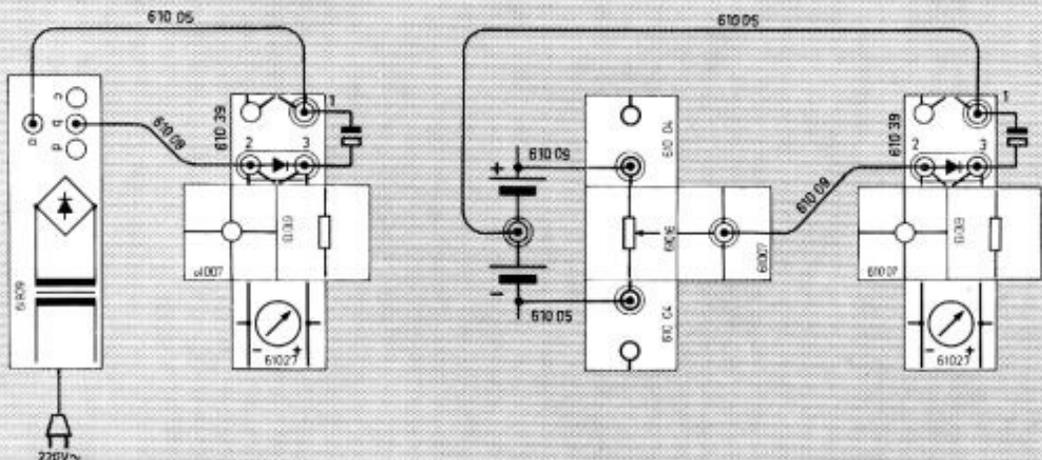
Der galvanische Mittelwert wird vom Drehspulinstrument aber angezeigt (Abb. 2.10.1).

¹⁾ U_{32} ist die Spannung zwischen Punkt 3 und 2, entsprechend ist U_{12} , U_{31} usw. zu verstehen.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	1	Trafo	608 19
	1	Buchse, 4fach	610 39
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	2	Verbindung	610 07
R	1	Potentiometer, 1 kΩ	610 16
Rv	1	Widerstand, 100 kΩ	610 13
G	1	Instrument	610 27
K/bl.	2	Kabel, blau	610 05
K/r.	2	Kabel, rot	610 09
	1	Stecker, 2fach	610 40
	1	Stecker, 1fach	610 43
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0
C	1	Elko, 100 μF	923 7 2122 0
D	1	Diode, BA 130	901 7 2105 0

x Nicht im Baukasten enthalten



2.11 Greinacher-Schaltung Glättung und Spannungsverdoppelung

Wie die Schaltung von Villard (2.10) ist auch die Schaltung nach Greinacher eine für den Betrieb von Röntgenröhren sehr häufig angewandte Schaltung. Die Greinacherschaltung liefert wie die Villardschaltung eine Spannungsverdoppelung, aber auch eine Glättung der Gleichspannung.

Der folgende Versuch soll die Wirkungsweise mit kleinen Spannungen und Dioden an Stelle der Glühventile erläutern.

Versuch 16

Auch hier läßt sich der Spannungsverlauf am besten zunächst mit einer Wechselspannung von ca. 1 Hz untersuchen. Ist während einer Halbwelle der Wechselspannung 1 positiv gegen 2, so leitet D_1 solange U_{12} ansteigt, und C_1 wird aufgeladen auf $U_1 = \bar{U}$ (vgl. 1.4). Wenn U_{12} auf 0 zurückgeht, sperrt die Diode, die Ladung und damit die Spannung des Kondensators bleibt erhalten. Wird bei der 2. Halbwelle 1 negativ gegen 2, so leitet entsprechend D_2 und C_2 wird auf $U_2 = \bar{U}$ aufgeladen. C_1 kann sich nicht entladen, da D_1 sperrt.

Nun haben die Kondensatoren C_1 und C_2 die Spannungen $U_1 = \bar{U}$ bzw. $U_2 = \bar{U}$. Da die Kondensatoren C_1 und C_2 in Reihe geschaltet sind, hat man an 3 und 4 die Spannung $U_{34} = U_1 + U_2 = 2 \bar{U}$.

Legt man die Trafospannung $U_{eff} = 3,4 \text{ V}$ an die Punkte 1 und 2, so ergeben sich folgende Meßwerte:

$$\begin{aligned} U_{12} &\approx 3,4 \text{ V (effektiv)} \\ \bar{U}_{12} &\approx 5 \text{ V} \\ U_{32} &\approx 5 \text{ V} \\ U_{24} &\approx 5 \text{ V} \\ U_{34} &\approx 10 \text{ V} \end{aligned}$$

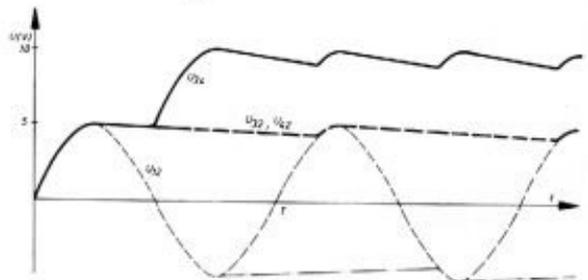
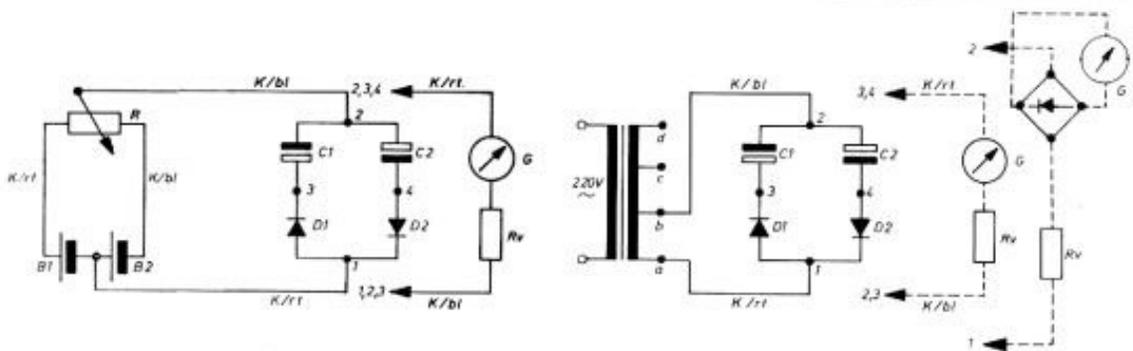


Abb. 2.11.1

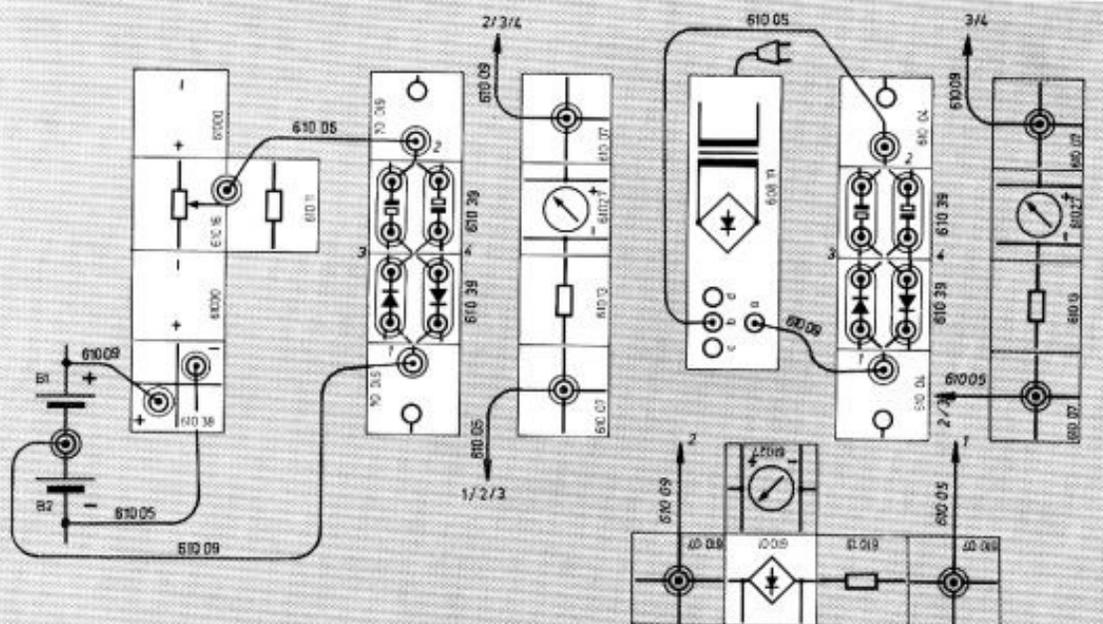
Abb. 2.11.1 gibt den Spannungsverlauf für U_{12} , U_{32} , U_{24} , U_{34} wieder, den man mit dem Voltmeter bei $f \approx 1 \text{ Hz}$ verfolgen kann. Bei diesem Verlauf ist $\bar{U} \approx \bar{U}$.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	1	Trafo	608 19
	2	Buchse, 4fach	610 39
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	2	Verbindung	610 07
	2	Verbindung, + -	610 00
R	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
Rv	1	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
G	1	Widerstand, 100 k Ω	610 13
	1	Instrument	610 27
	1	Widerstand, 10 k Ω ¹⁾	610 11
	4	Stecker, 2fach	610 40
K/bl.	3	Kabel, blau	610 05
K/rt.	3	Kabel, rot	610 09
C1/C2	2	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0
D1/D2	2	Diode, BA 130	901 7 2105 0
	1	Prüfspitze	610 2 2974 0
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0
	1	Meßgleichrichter	610 01

x Nicht im Baukasten enthalten

¹⁾ Wird nur zum Befestigen der Prüfspitze verwendet.



2.12 Gleichrichterschaltung mit Glättung und Spannungsvervielfachung (Kaskadenschaltung)

Bei der Kaskadenschaltung (nach Greinacher) werden mehrere Gleichrichterstufen kaskadenartig hintereinander geschaltet. Die Kondensatoren werden auf die Scheitelspannungen der speisenden Wechselspannung aufgeladen, und durch Reihenschaltung werden deren Spannungen addiert. Der Vorteil dieser Anordnung gegenüber einer einstufigen besteht darin, daß die einzelnen Bauelemente nur für einen Teil der Gesamtspannung ausgelegt sein müssen.

Man hat Kaskaden für Spannungen bis zu 3 Mill. Volt gebaut und vor allem in der Entwicklungszeit der Kernphysik zum Aufbau von Teilchenbeschleunigern viel verwendet. Heute werden dafür aber meist Zyklotrone benützt.

Im folgenden soll die Wirkungsweise einer Kaskadenschaltung für kleine Spannungen mit Dioden untersucht werden.

Versuch 17

Es wird auch jetzt zunächst wieder mit einer Wechselspannung der Frequenz $f \approx 1$ Hz gearbeitet, damit der Spannungsverlauf mit dem Voltmeter beobachtet werden kann. Die Kaskadenstufe 1, 2, 3, 4 setzt sich aus den Kreisen 1, 2, 3 und 2, 3, 4 zusammen.

Der Kreis 1, 2, 3 stellt eine Villardschaltung dar (2.10). Wie dort liegt zwischen den Punkten 2 und 3 eine zwischen 0 und $2 \bar{U}$ pulsierende Gleichspannung. In dem Kreis 2, 3, 4 wird deshalb Punkt 4 auf $2 \bar{U}$ gegenüber Punkt 2 aufgeladen (vgl. 1.4). Es ist daher: $U_{32} = \bar{U} \pm \bar{U}$, $U_{12} = 2 \bar{U}$ (vgl. Abb. 2.12.1).

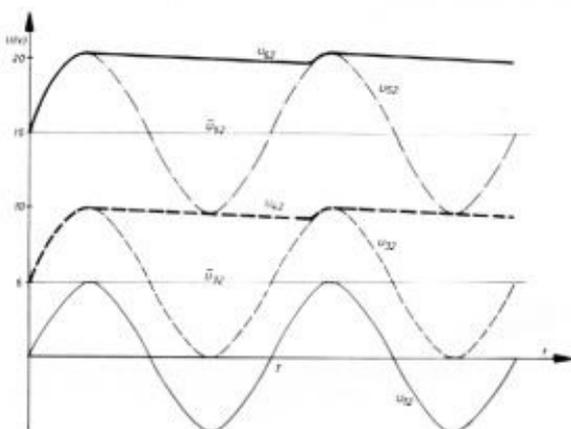


Abb. 2.12.1

Baut man die 2. Kaskadenstufe 3, 4, 5, 6 an, so erhält man in den Punkten 5 und 6 um $2 \bar{U}$ angehobene Spannungen.

Es ist dann: $U_{52} = 3 \bar{U} \pm \bar{U}$ und $U_{62} = 2 \bar{U} + 2 \bar{U} = 4 \bar{U}$.

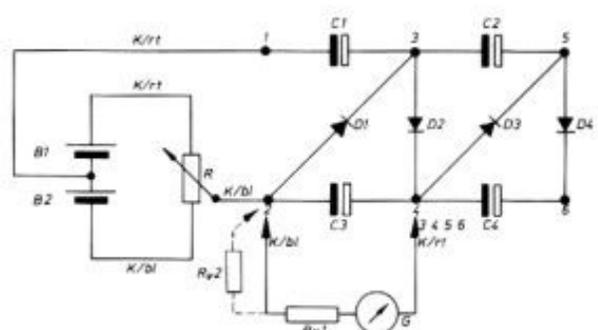
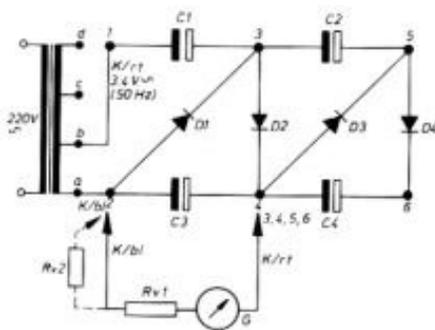
Beim Anbau einer weiteren Kaskadenstufe würde man erhalten: $U_{72} = 5 \bar{U} \pm \bar{U}$ und $U_{82} = 4 \bar{U} + 2 \bar{U} = 6 \bar{U}$.

Diese Spannungen können gemessen werden, wenn man das Voltmeter durch Vorschalten eines weiteren $100 \text{ k}\Omega$ Widerstandes auf einen Meßbereich von 20 V erweitert.

Schließt man aus dem Trafo die Spannung $U_{e11} = 3,4 \text{ V}$ an, so erhält man die folgenden Werte:

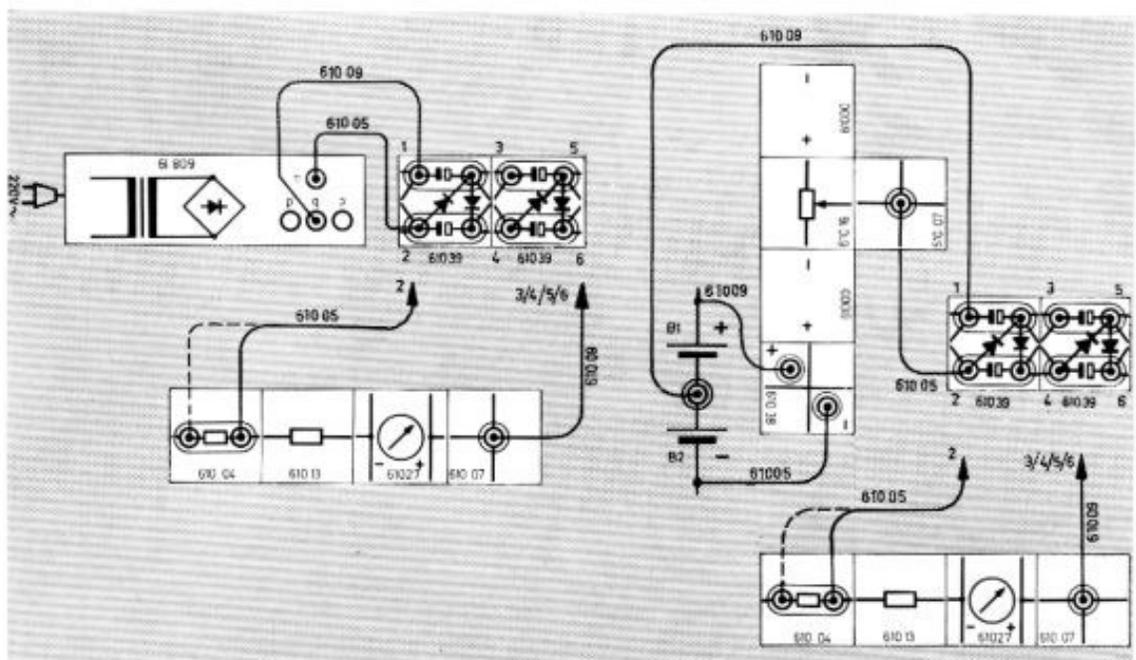
$$U_{12} = \bar{U} = 5 \text{ V}, U_{22} \approx 10 \text{ V}, U_{32} \approx 15 \text{ V}, \\ U_{42} \approx 20 \text{ V}.$$

Die Spannungen U_{32} und U_{52} sind galvanische Mittelwerte (vgl. Abb. 2.12.1).



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	1	Trafo	608 19
	2	Buchse, 4fach	610 39
	1	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	2	Verbindung	610 07
	2	Verbindung + -	610 00
R	1	Potentiometer, 1 kΩ	610 16
G	1	Instrument	610 27
Rv 1	1	Widerstand, 100 kΩ	610 13
	5	Stecker, 2fach	610 40
K/bl.	3	Kabel, blau	610 05
K/rt	3	Kabel, rot	610 09
C1/C2/C3/C4	4	Elko, 100 µF	923 7 2122 0
D1/D2/D3/D4	4	Diode, BA 130	901 7 2105 0
Rv 2	1	Widerstand, 100 kΩ	930 7 1473 0
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0

x Nicht im Baukasten enthalten



Versuch 18

Der Gleichstromkreis ist der gleiche wie in 1.2. Im Wechselstromkreis wird die Stromstärke mit dem regelbaren Widerstand so eingestellt, daß die beiden Glühlämpchen gleich hell leuchten. An dem Wechselstromamperemeter, das aus dem $12\ \Omega$ Shunt, dem Meßgleichrichter und dem Meßinstrument besteht, werden die Skalenteile abgelesen, die bestimmten Gleichstromstärken I_{-} entsprechen. Die Gleichstromstärke I_{-} wird mit dem Potentiometer des Spannungsteilers eingestellt. Man erhält die Meßwerte der Tabelle 3.1.1.

Tabelle 3.1.1

I_{-} (mA)	16	22	29	36
Skt.	2	4	7	10

Trägt man die Meßwerte in ein Diagramm ein, so erhält man das Schaubild der Abb. 3.1.1. Es ist für die Berechnung der weiteren Meßbereiche zweckmäßig, die Skalenteile, die abgelesen werden, in Abhängigkeit von der Spannung U_{eff} an den Enden des Shunts aufzutragen. Bei 36 mA Gesamtstrom kann der Strom über das Meßwerk ($I = 100\ \mu\text{A}$ bei 10 Skalenteilen) innerhalb der Meßgenauigkeit vernachlässigt werden. Mit dieser Vernachlässigung erhält man die Werte der Tabelle 3.1.2 und das Schaubild der Abb. 3.1.2.

Tabelle 3.1.2

Skt.	2	4	6
$R_s \cdot I_{\text{eff}}$	$12\ \Omega \cdot 16\ \text{mA}$	$12\ \Omega \cdot 22\ \text{mA}$	$12\ \Omega \cdot 26\ \text{mA}$
$= U_{\text{eff}}$	$= 0,19\ \text{V}$	$= 0,26\ \text{V}$	$= 0,31\ \text{V}$

Skt.	8	10
$R_s \cdot I_{\text{eff}}$	$12\ \Omega \cdot 31\ \text{mA}$	$12\ \Omega \cdot 36\ \text{mA}$
$= U_{\text{eff}}$	$= 0,37\ \text{V}$	$= 0,43\ \text{V}$

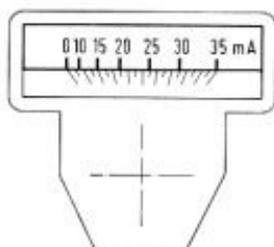


Abb. 3.1.3

3. Aufbau eines vielseitigen Wechselstrominstrumentes

3.1 Aufbau und Eichung eines Wechselstrommeßinstrumentes, Meßbereich 35 mA

In 1.2 wurde I_{eff} in einem Wechselstromkreis durch ein in diesen Kreis geschaltetes Glühlämpchen gemessen, das mit einem in einen getrennten Gleichstromkreis geschalteten 2. Glühlämpchen verglichen wurde. Bei gleicher Helligkeit war I_{eff} gleich I_{-} . I_{-} wurde durch ein Gleichstromamperemeter bestimmt. Diese Methode ist unbefriedigend, da man mit ihr nur in dem Strombereich, in dem das Glühlämpchen leuchtet, Messungen durchführen kann. Im folgenden soll nun mit diesem Prinzip die Eichung eines normalen Wechselstromamperemeters durchgeführt werden, dessen Meßbereich dann durch Rechnung erweitert wird.

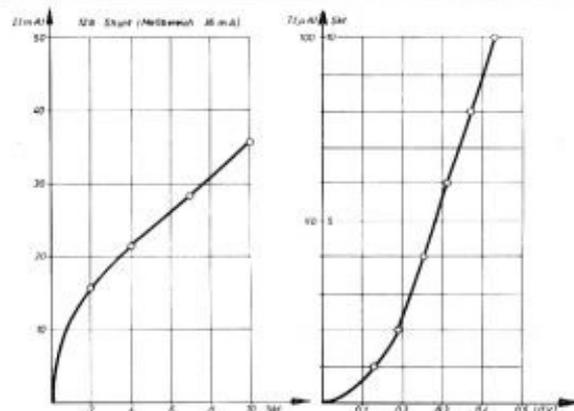
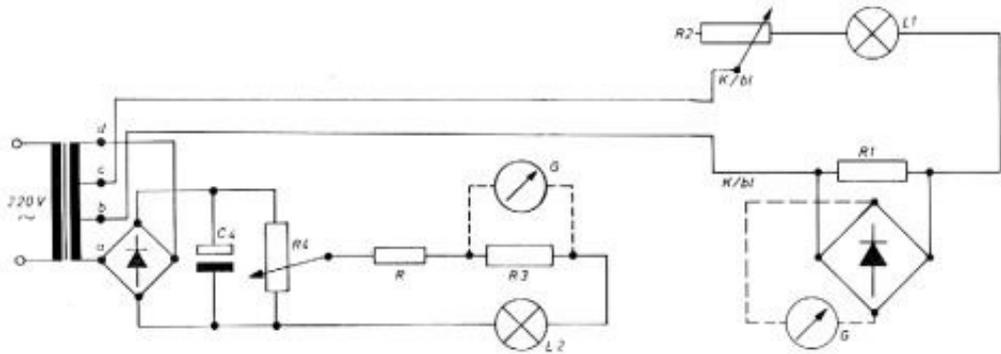


Abb. 3.1.1

Abb. 3.1.2

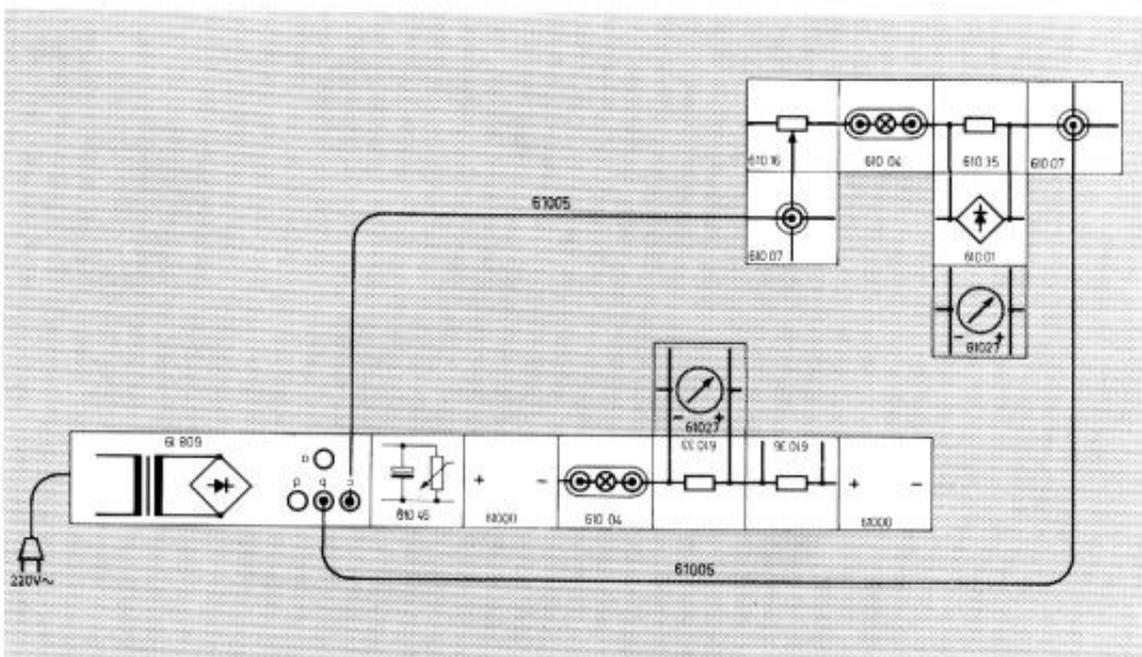
Abb. 3.1.1 ist die Eichkurve für den Meßbereich 36 mA. Dieser Eichkurve müssen bei Messungen die Stromwerte entsprechend den abgelesenen Skalenteilen entnommen werden (5 Skt. entsprechen 24 mA, 1 Skt. entspricht 11 mA).



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	2	Verbindung, + -	610 00
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	2	Stecker, 2fach	610 40
K/bl	2	Kabel, blau	610 05
	1	Trafo	608 19
R4/C	1	Spannungsteiler	610 46
	2	Verbindung	610 07
L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
R3	1	Widerstand, 1,2 Ω	610 33
R2	1	Potentiometer, 1 kΩ	610 16
R1	1	Widerstand, 12 Ω	610 35
	1	Meßgleichrichter	610 01
G	1	Instrument	610 27
R	1	Widerstand, 133 Ω ¹⁾	610 36

1) Schutzwiderstand

Zur Vergleichsmessung müssen sich die zu vergleichenden Lämpchen gegenüberstehen.



3.2 Erweiterung des Meßbereiches

Benützt man an Stelle des 12Ω Shunts den $1,2 \Omega$ Shunt, so ist innerhalb der Meßgenauigkeit der Strom, der über das Meßwerk fließt, gegenüber dem Gesamtstrom völlig zu vernachlässigen. Man erhält im Meßinstrument einen Ausschlag von 10 Skt., wenn an den Enden des Shunts eine Spannung $U_{\text{eff}} = 0,43 \text{ V}$ liegt (Abb. 3.1.2), d. h. wenn über den Shunt ein Strom $I_s = \frac{0,43 \text{ V}}{1,2 \Omega} = 360 \text{ mA}$ fließt. Der Gesamtstrom I_{eff} ist ebenfalls 360 mA , da der Strom über das Meßwerk $\approx 0,1 \text{ mA}$ zu vernachlässigen ist. Das bedeutet, daß die Eichkurve für den Meßbereich 360 mA aus Abb. 3.1.1 erhalten wird, indem man die Stromwerte mit dem Faktor 10 multipliziert (Abb. 3.2.1).

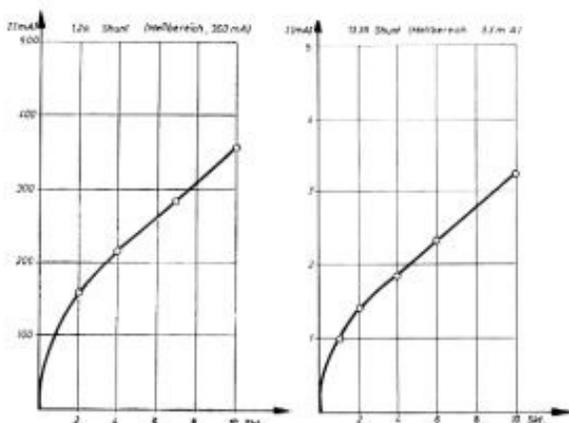


Abb. 3.2.1

Abb. 3.2.2

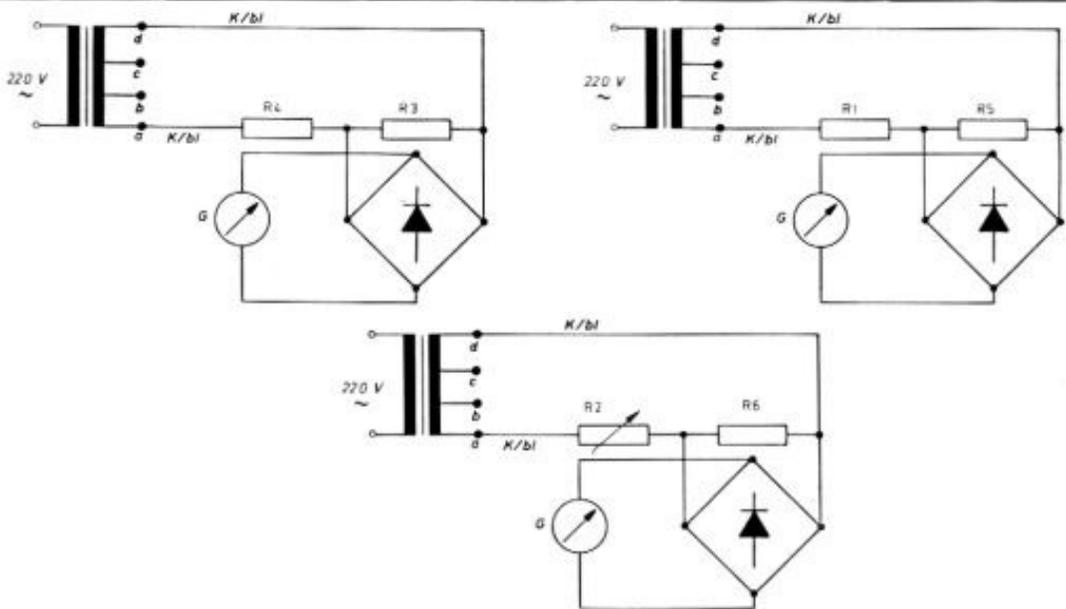
Ersetzt man den 12Ω Shunt durch den 133Ω Shunt, so ist bei einem Ausschlag von 10 Skalenteilen der Strom über den Shunt $I_s \approx \frac{0,43 \text{ V}}{133 \Omega} = 3,24 \text{ mA}$, der Strom über das Meßwerk $I \approx 0,1 \text{ mA}$. Der Gesamtstrom und damit der Meßbereich $I_{\text{eff}} = 3,3 \text{ mA}$. Die Eichkurve für diesen Meßbereich erhält man aus Abb. 3.1.1, indem man die Stromwerte mit dem Faktor $1/10$ multipliziert und noch 10% abzieht. Man erhält die Eichkurve der Abb. 3.2.2

Versuch 19

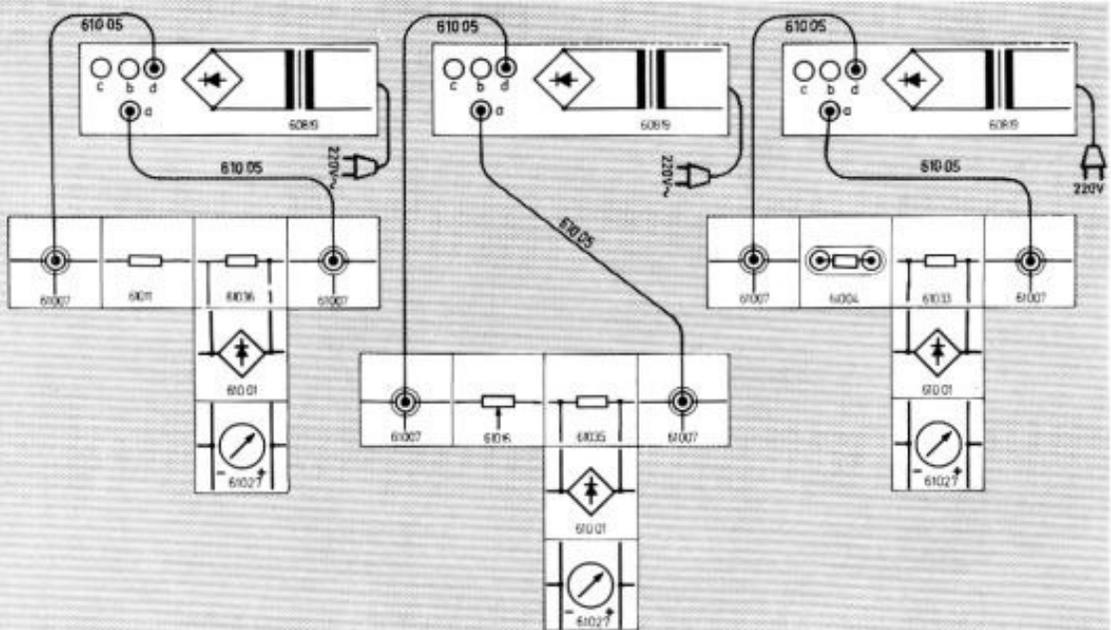
Man schaltet das Amperemeter mit 133Ω Shunt in Reihe mit $10 \text{ k}\Omega$ bzw. $1 \text{ k}\Omega$ Widerstand, legt die bekannten Spannungen (1.3) des Transformators an, berechnet die Stromstärken nach dem Ohmschen Gesetz und kontrolliert so die berechnete Eichkurve der Abb. 3.2.2.

Für eine Kontrolle der Eichkurve in Abb. 3.2.1 muß man sich einen geeigneten Widerstand aus Konstantendraht herstellen (vgl. 1.4.9) und den

Strom $I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{R}$ ausrechnen, wo R sich zusammensetzt aus dem Widerstand des Konstantendrahtes und $1,2 \Omega$ des Shuntes. Für genauere Messungen ist es allerdings unerlässlich, U_{eff} an den Klemmen zu messen, da bei starker Belastung die Klemmenspannung des Trafos absinkt. Wegen eines Voltmeters sind die Ausführungen in 3.3 zu beachten.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
R5	1	Widerstand, 1,2 Ω	610 33
	1	Trafo	608 19
	2	Verbindung	610 07
R4	1	Widerstand, 10 k Ω	610 11
R3	1	Widerstand, 133 Ω	610 36
	1	Meßgleichrichter	610 01
G	1	Instrument	610 27
	1	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Stecker, 2fach	610 40
R2	1	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
K/bl	2	Kabel, blau	610 05
R1	1	Widerstandsdraht	610 45
R6	1	Widerstand, 12 Ω	610 35



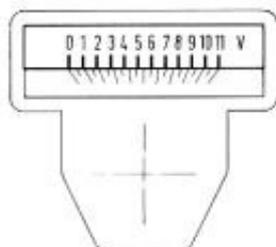


Abb. 3.3.3

3.3 Meßbereich des Voltmeters

Die in 3.1 und 3.2 besprochenen Eichkurven (Abb. 3.1.1, Abb. 3.2.1, Abb. 3.2.2) ergeben eine recht unbequeme Eigenschaft des Amperemeters: Es ist im unteren Teil der Skala relativ unempfindlich. Das bedeutet, daß die Ablesegenauigkeit jeweils für die kleinen Meßwerte gering ist. Bei der Charakteristik, die die Dioden besitzen, ($I, 9.2$) ist das nicht anders zu erwarten (Abb. 3.1.2 ist praktisch die Kennlinie, und Abb. 3.2.2 und 3.2.1 folgen aus 3.1.2).

Bessere Eichkurven kann man beim Voltmeter erwarten, da bei diesen Schaltungen die Dioden mit dem Vorwiderstand in Reihe geschaltet sind (2.5) und in Durchlaßrichtung der Diodenwiderstand gegenüber dem Widerstand R_v (10 k Ω , 100 k Ω u. 1 M Ω) vernachlässigt werden kann. Der Ausschlag des Meßwerkes eines Drehspulinstrumentes ist proportional dem galvanischen Mittelwert \bar{I} , \bar{I} ist aber proportional U_{eff}/R_v (Diodenwiderstand ist ja vernachlässigbar). Das bedeutet: der Ausschlag ist proportional U_{eff} . Man hat also eine Gerade als Eichkurve zu erwarten.

Die Eichung wird mit Lampenvergleich (1.3), aber mit einem Voltmeter nach 2.5 durchgeführt.

Versuch 20

In den Gleichstromkreis wird ein Glühlämpchen und das Voltmeter parallel zum Glühlämpchen geschaltet. Die Spannung am Glühlämpchen wird mit dem Potentiometer des Spannungsteilers eingeregelt. In dem Wechselstromkreis wird die Spannung durch geeigneten Abgriff am Trafo und Regelwiderstand eingestellt. Je nach Spannung wird 1 oder werden 2 Glühlämpchen in Reihe geschaltet (1 Glühlampe bis 6 V). Das Wechselspannungsvoltmeter wird zu dem bzw. den Lämpchen parallel geschaltet. Die gemessenen Werte sind in der Tabelle 3.3.1 zusammengestellt und in Abb. 3.3.1 aufgetragen.

Tabelle 3.3.1 ($R_v = 100 \text{ k}\Omega$)

Zahl der Lämpchen	U_n (V)	U_{eff} (V)	Skt.
1	1,1	1,1	1
1	1,8	1,8	1,5
1	3,3	3,3	3
2	3,2	6,4	5,4
2	3,8	7,6	7
2	5,7	11,4	10

Es ergibt sich also mit $R_v = 100 \text{ k}\Omega$ ein Meßbereich von 12 V, und die Eichkurve stellt innerhalb der Meßgenauigkeit eine Gerade dar.

Den Meßbereich für $R_v = 10 \text{ k}\Omega$ kann man auf die gleiche Weise ermitteln. Man kann allerdings keine Spannungen unter 0,9 V einstellen. Bei dieser Spannung zeigen die Glühlämpchen gerade noch schwache Rotglut. Man erhält die Meßwerte der Tabelle 3.3.2 und die Eichkurve der Abb. 3.3.2.

Tabelle 3.3.2 ($R_v = 10 \text{ k}\Omega$)

Zahl der Lampen	U_n (V)	U_{eff} (V)	Skt.
1	0,77	0,77	4,5
1	0,9	0,9	6
1	1,6	1,6	9,7

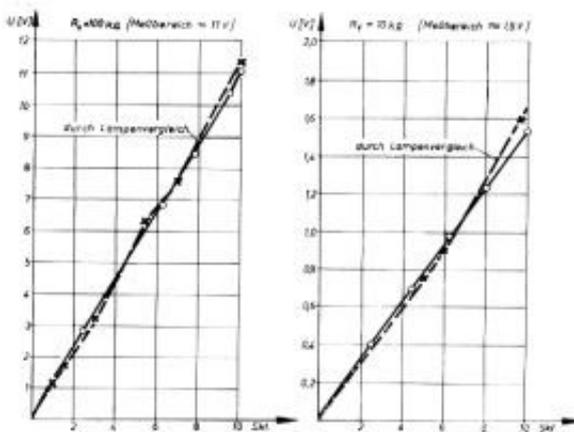
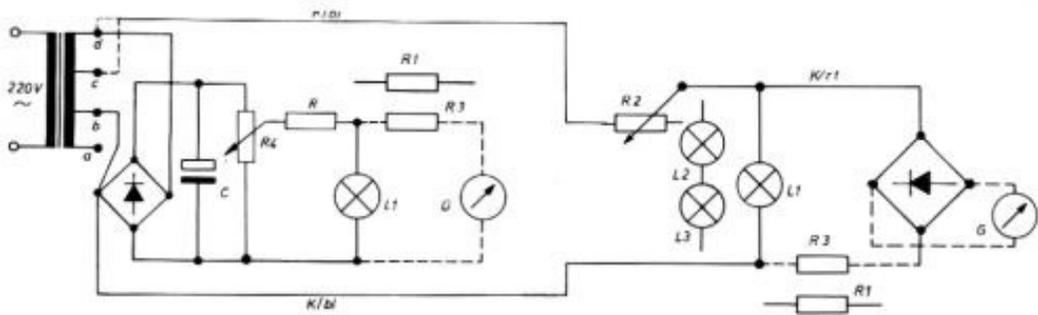


Abb. 3.3.1

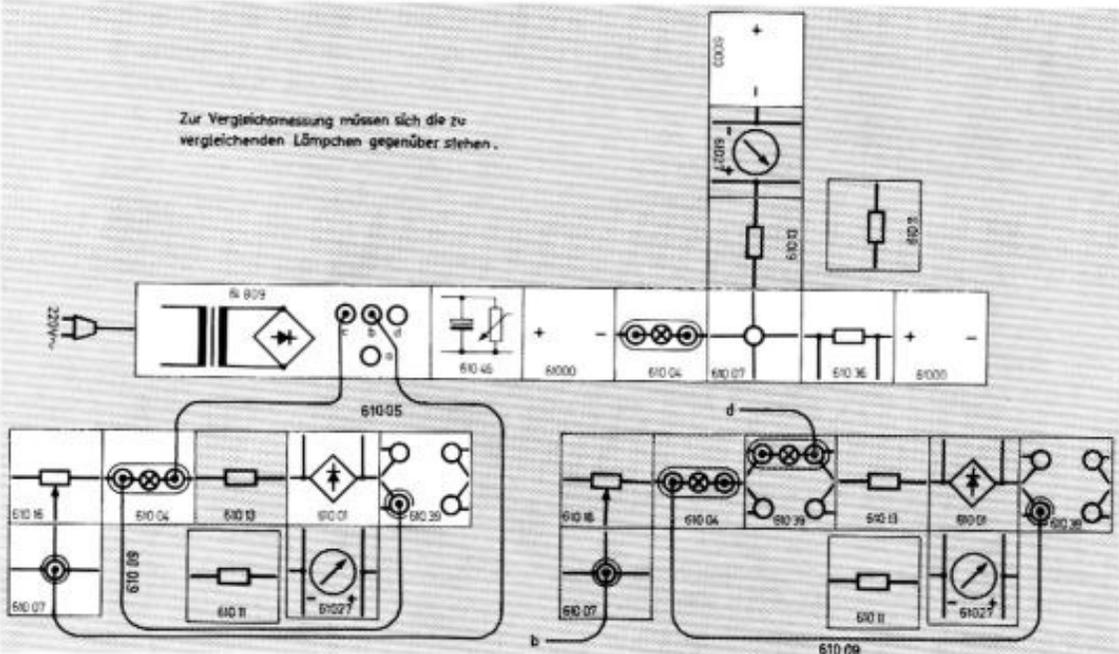
Abb. 3.3.2



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
R4/C	1	Spannungsteiler	610 46
	3	Verbindung, + -	610 00
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
G	1	Instrument	610 27
R3	1	Widerstand, 100 kΩ (RV)	610 13
R2	1	Potentiometer, 1 kΩ	610 16
	2	Verbindung	610 07
	1	Meßgleichrichter	610 01
K/bl.	2	Kabel, blau	610 05
	2	Buchse, 4fach	610 39
R1	1	Widerstand, 10 kΩ (RV)	610 11
	3	Stecker, 2fach	610 40
L1/L2/L3	3	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
R	1	Widerstand, 133 Ω ¹⁾	610 36
K/rt	1	Kabel, rot	610 09

1) Schutzwiderstand

Zur Vergleichsmessung müssen sich die zu vergleichenden Lämpchen gegenüber stehen.



4.0 Magnetismus, Induktion, Selbstinduktion, Ferromagnetische Stoffe

a) Magnetismus

In [I, 2.5] wurde gezeigt, daß ein mit einem isolierten Leiter umwickelter Weicheisenkern (Nagel) magnetisch wird, wenn man durch den Leiter einen Strom schiebt.

Der aus diesem Versuch ersichtliche Zusammenhang zwischen Strom und magnetischer Wirkung soll im folgenden etwas ausführlicher besprochen werden.

Es ist üblich, die magnetischen Kraftwirkungen, die in der Umgebung eines Stabmagneten oder eines stromdurchflossenen Leiters auftreten, durch sogenannte magnetische Kraft – oder Feldlinien anschaulich zu machen. Die Richtung der Feldlinien deckt sich vereinbarungsgemäß mit der Richtung, die eine leicht bewegliche Magnetonadel mit ihrem Nordpol anzeigt, und die Dichte der Feldlinien charakterisiert die Stärke des Magnetfeldes, das heißt z. B. die Kraft, die nötig ist, um die Magnetonadel aus der eingenommenen Stellung herauszudrehen.

In Abb. 4.0.1 und 4.0.2 sind die Feldlinien bei einem Stabmagnet und einem geraden stromdurchflossenen Leiter gezeichnet.

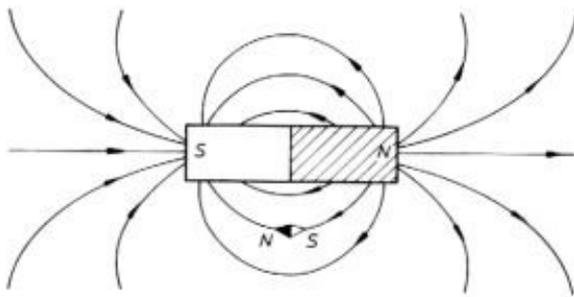


Abb. 4.0.1

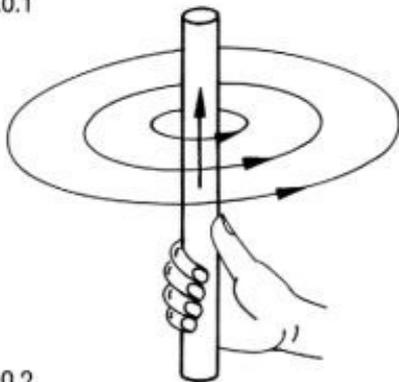


Abb. 4.0.2

Durch Ausstreuen von Eisenfeilspänen kann man den Verlauf der Kraftlinien sichtbar machen.

Aus den Abb. 4.0.1 und 4.0.2 ist deutlich zu erkennen, daß in der Nähe der Pole und in der nächsten Umgebung des stromdurchflossenen Leiters,

also in Bereichen, in denen das Magnetfeld stärker ist, auch die Feldlinien eine größere Dichte aufweisen.

Die Zeichnung der Abb. 4.0.2 wird meist durch die schematische Darstellung der Abb. 4.0.3 bzw. 4.0.4 ersetzt. Der Punkt in dem Leiterquerschnitt deutet die Spitze und das Kreuz (x) das Ende des Strompfeiles an.

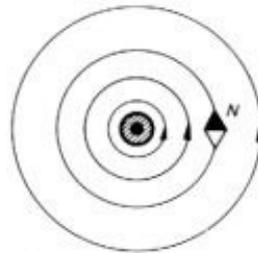


Abb. 4.0.3

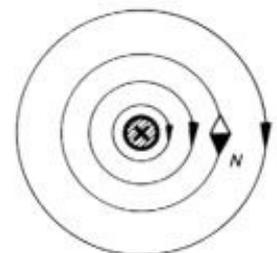


Abb. 4.0.4

Abb. 4.0.3 entsteht, wenn man in Abb. 4.0.2 von oben auf den Leiter, Abb. 4.0.4, wenn man von unten auf den Leiter blickt.

Den Richtungssinn der magnetischen Feldlinien erhält man mit der folgenden Regel:

Rechte-Faust-Regel:

Zeigt der abgespreizte Daumen die Richtung des Stromes an, so zeigen die gekrümmten Finger die Richtung der magnetischen Feldlinien (vgl. Abb. 4.0.2).

Bewickelt man eine längere Papprolle gleichmäßig mit isoliertem Draht (so wie in [I, 2.5] der Eisennagel bewickelt wurde), so erhält man eine Spule. Bei Stromfluß entsteht durch Überlagerung der Magnetfelder der einzelnen Drahtwindungen der Feldlinienverlauf der Abb. 4.0.5 und 4.0.6. Entgegengesetzte gerichtete Feldlinien heben sich auf, gleichgerichtete verstärken sich.

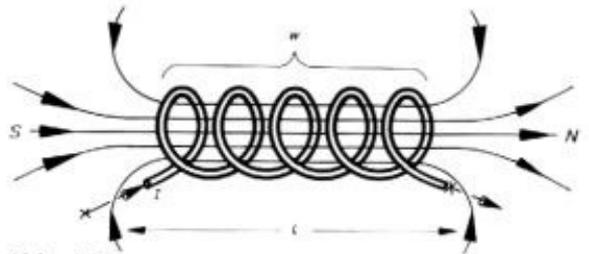


Abb. 4.0.5

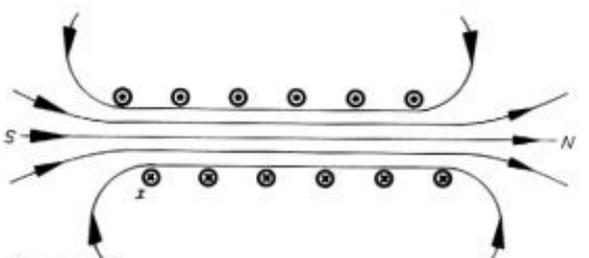


Abb. 4.0.6

Das rechte Ende der Spule in Abb. 4.0.5 bzw. 4.0.6 bezeichnet man als Nordpol des Elektromagneten, weil hier wie beim Nordpol des Stabmagneten (Abb. 4.0.1) die Kraftlinien ausgehen. Beim Südpol münden sie wieder ein.

Die Stärke des Magnetfeldes ist proportional der das Magnetfeld erregenden Stromstärke I_{err} und der Windungsdichte $\frac{w}{l}$.

Eine Spule mit $w = 2000$ Windungen und der Länge $l = 2$ m hat im Inneren dieselbe magnetische Feldstärke wie eine Spule mit $w = 1000$ Windungen und $l = 1$ m, sofern I_{err} konstant gehalten wird.

Die Stärke des Magnetfeldes ist jedoch unabhängig von dem Querschnitt der Spule A . Man kann daher das Produkt $I_{err} \cdot \frac{w}{l}$ als Maß für die magnetische Feldstärke H verwenden und schreiben:

$$(4.0.1) \quad H = I_{err} \cdot \frac{w}{l}, [H] = \frac{[I]}{[l]} = \frac{A}{m}$$

Bewickelt man z. B. eine 1 m lange Papprohre mit einem Durchmesser von beiläufig 5 cm mit 1000 Windungen und schickt einen Strom $I_{err} = 1$ mA durch, so herrscht im Inneren der Röhre die Feldstärke $H = \frac{1 \text{ mA} \cdot 1000}{1 \text{ m}} = 1 \frac{A}{m}$.

Das Erdfeld hat bei uns vergleichsweise etwa $H \approx 38 \frac{A}{m}$.

Das Magnetfeld wird auch nicht merklich geändert, wenn man irgendwelche Stoffe (z. B. Holz, Messing) als Kern in die Spule einschiebt, es sei denn, der Kern besteht aus sogenanntem ferromagnetischem Material (Eisen, Nickel, Kobalt, bestimmte Eisenlegierungen). Dann tritt ein erheblicher Verstärkungsfaktor μ_r auf. μ_r ist vom Stoff abhängig und beträgt bei Eisen etwa 1000.

b) Induktion

Schickt man durch eine Spule einen Strom, entsteht im Inneren ein Magnetfeld. Man kann sich nun fragen, ob umgekehrt in einer Spule eine Spannung auftritt und bei geschlossenem Kreis ein Strom fließt, wenn man in der Spule ein Magnetfeld erzeugt.

Während die magnetische Wirkung des Stroms schon 1820 von Oerstedt entdeckt wurde, konnte Faraday erst 1831 nach langwierigen Versuchen diese Umkehrung, die sogenannte Induktion, finden.

Es zeigt sich, daß dann und nur dann eine Spannung entsteht (induziert wird), wenn sich in der Spule ein Magnetfeld **ändert**, wobei es gleichgültig ist, ob dieses Magnetfeld von permanenten

Magneten oder von Strömen herrührt. Für eine einfache Formulierung des Induktionsgesetzes ist es zweckmäßig, den Begriff des magnetischen Kraftflusses Φ einzuführen. Unter dem Kraftfluß oder kurz Fluß Φ einer Spule versteht man sozusagen die Gesamtzahl der magnetischen Feldlinien, die diese Spule durch „fließen“. Eine Spannung wird nun solange induziert, solange sich dieser Fluß Φ ändert. Die Größe der induzierten Spannung U_{ind} hängt ab von der Änderungsgeschwindigkeit des Flusses $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ und von der Windungszahl w der Spule.

Man formuliert das Induktionsgesetz wie folgt: Ändert sich im Innern einer Spule mit der Windungszahl w der Fluß Φ in der Zeit Δt gleichmäßig um $\Delta \Phi$, so wird in der Spule während dieser Zeit eine Spannung U_{ind} induziert, für die gilt:

$$(4.0.2) \quad U_{ind} = w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Die Maßeinheit für den Fluß Φ erhält man aus (4.0.2). Man schreibt:

$$[U_{ind}] = \frac{[\Phi]}{[t]}$$

$$[\Phi] = [U_{ind}] \cdot [t] = \text{Vs} = 1 \text{ W (Weber)}.$$

Es ergibt sich die folgende Festlegung: Der magnetische Fluß Φ wird in Vs gemessen. Im Innern einer Spule mit $w = 1$ Windung, d. h. einer Leiterschleife, herrscht der Fluß $\Phi = 1$ Vs, wenn bei einer gleichmäßigen Änderung des Flusses von 0 auf Φ innerhalb 1 sec während dieser Zeit eine Spannung von 1 V induziert wird.

Durch diese Festlegung der Maßeinheit für den Fluß Φ ergibt sich auch eine weitere Maßeinheit für die Stärke eines Magnetfeldes, da, wie schon oben ausgeführt wurde, die Magnetfeldstärke durch die Feldlinien- oder die Kraftflußdichte charakterisiert werden kann.

Der Fluß pro m^2 ist ein Maß für die Stärke eines Magnetfeldes. Man nennt ihn die Kraftflußdichte und schreibt:

$$(4.0.3) \quad B = \frac{|\Phi|}{|A|}, [B] = \frac{[\Phi]}{[A]} = \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = \text{T (Tesla)}$$

Beim Erdfeld ist $B \approx 0,48 \cdot \frac{10^{-4} \text{ Vs}}{\text{m}^2}$, bei starken Elektromagneten ist $B \approx 1 \text{ Vs/m}^2$.

Die Tatsache, daß 2 Maßeinheiten für die Magnetfeldstärke vorliegen, entspricht etwa der Gepflogenheit im Geschäftsleben, den Preis einer Ware in US-\$ oder DM anzugeben. So wie zwischen US-\$ und DM (1 US-\$ = 4,2 DM) besteht auch

zwischen $\frac{Vs}{m^2}$ und $\frac{A}{m}$ bzw. B und H ein fester Zusammenhang. Man schreibt:

$$(4.0.4) \quad B = \mu_0 H$$

μ_0 nennt man die magnetische Feldkonstante. Setzt man für B und H die Werte des Erdfeldes (siehe oben) ein, so erhält man:

$$\mu_0 = \frac{B}{H} = \frac{0,48 \cdot 10^{-4} \text{ Vs}}{m^2 \cdot 38 \text{ A}} = 1,25 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

Neben den angegebenen und in diesem Lehrbuch ausschließlich benutzten Maßeinheiten werden in der Technik auch die folgenden kleineren Einheiten benutzt:

Kraftfluß: $1 \text{ M (Maxwell)} = 10^{-8} \text{ Vs}$

Kraftflußdichte: $1 \text{ G (Gauß)} = 10^{-4} \frac{\text{Vs}}{m^2}$

Die Formel (4.0.2) enthält noch keine Aussage über die Richtung der induzierten Spannung. Diese ergibt sich aus der folgenden Überlegung: Wird in einer Spule durch eine Änderung des Flusses Φ eine Spannung induziert, und bedingt bei geschlossenem Stromkreis diese Spannung einen Strom, so darf dieser Strom die Änderung des Flusses nicht noch verstärken, sonst würde ja diese verstärkte Flußänderung zu einer Zunahme der Spannung, zu einer Verstärkung des Stromes und zu einer erneut verstärkten Flußänderung führen usw. Man würde also gewissermaßen aus dem Nichts elektrische Energie gewinnen. Dies ist aber nach einem physikalischen Grundprinzip, dem Energiesatz, nicht möglich. Der Energiesatz besagt, daß in einem abgeschlossenen System die Gesamtenergie erhalten bleibt. Wenn also elektrische Energie entsteht, muß z. B. die entsprechende mechanische Energie aufgebracht werden. Der durch die induzierte Spannung bedingte Strom muß vielmehr die Flußänderung, also den Vorgang, dem die Spannung ihre Entstehung verdankt, hemmen.

Es gilt die sogenannte **Lenzsche Regel**!):

Der durch die induzierte Spannung bedingte Strom ist stets so gerichtet, daß sein Magnetfeld der Ursache der Induktion entgegenwirkt.

Um das Vorzeichen der induzierten Spannung richtig zu erhalten, muß man daher die Formel (4.0.2) noch mit einem Minuszeichen versehen:

$$(4.0.5) \quad U_{\text{ind}} = -w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Die Richtung des durch eine Kraftflußänderung bedingten Stromes soll an einigen Beispielen gezeigt werden.

Wird in Abb. 4.0.7 der Stabmagnet nach links geschoben, verstärkt sich in dem linken Leiterring

ein Magnetfeld, das von rechts nach links verläuft, der durch den Induktionsvorgang bedingte Strom sucht diese Zunahme des Flusses durch den Ring zu hemmen, er fließt in der Richtung des ausgezogenen Pfeiles und erzeugt ein Magnetfeld (Rechte-Faust-Regel), das die Zunahme verhindert. Im rechten Ring sind die Verhältnisse gerade umgekehrt.

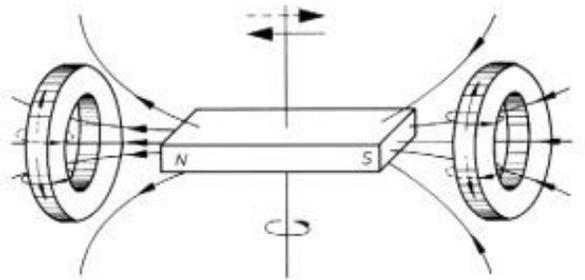


Abb. 4.0.7

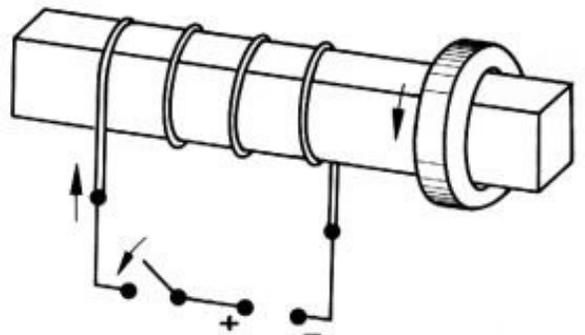


Abb. 4.0.8

Entgegengesetzte Stromrichtungen (gestrichelter Strompfeil) ergeben sich bei einer Bewegung des Stabmagneten nach rechts.

Wird in Abb. 4.0.8 der Schalter geschlossen, setzt in der Spule ein Strom ein, der ein Magnetfeld aufbaut, das links einen **Nordpol** hat. In dem Induktionsring wird aber ein Strom induziert, der den Aufbau eines solchen Magnetfeldes hemmt. Der Induktionsstrom baut nämlich ein Magnetfeld auf, das links einen **Südpol** hat.

Die Abb. 4.0.7 und 4.0.8 zeigen auch das Grundprinzip eines Wechselstromgenerators und eines Transformators. Wenn man in Abb. 4.0.7 den Stabmagnet um die eingezeichnete senkrechte Achse rotieren läßt, entstehen in den Induktionsringen zwei gleichphasige Wechselströme. Bei technischen Generatoren werden natürlich die zwei Ringe durch zwei in Reihe geschaltete Spulen und der Stabmagnet durch einen Elektromagnet ersetzt.

Aus Abb. 4.0.8 erhält man einen Transformator, wenn man die linke Spule (Primärspule) mit Wechselspannung speist und den Induktionsring durch eine Spule (Sekundärspule) ersetzt.

1) H. F. Lenz 1804–1965, Physiker, stellt 1834 in Petersburg diese Regel auf.

c) Selbstinduktion

In jeder stromdurchflossenen Spule besteht ein Magnetfeld. Mit einer Änderung des Stromes ergibt sich auch eine Änderung des Magnetfeldes. Durch den sich ändernden magnetischen Fluß erhält man auch in der das Feld erzeugenden Spule eine induzierte Spannung. Diese Induktionswirkung im eigenen Leiterkreis nennt man Selbstinduktion.

Die induzierte Spannung muß die Stromänderung hemmen und als Gegenspannung wirken.

Wenn die induzierte Spannung eine verstärkte

Stromänderung $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ und damit ein verstärktes

$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ zur Folge hätte, würde die induzierte Spannung, und damit $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ und $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ weiter ansteigen.

Ohne äußeres Dazutun würden also beim Anlegen einer kleinen Spannung Strom und Spannung von sich aus immer größer und größer werden. Dies ist aber nach dem Energiesatz nicht möglich (Lenzsche Regel).

In einer eisenlosen Spule ist der Fluß Φ proportional zum Strom I :

$$(4.0.6) \quad \Phi \sim I$$

Mit (4.0.6) kann man statt (4.0.5) schreiben:

$$U_{\text{ind}} \sim \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{oder}$$

$$(4.0.7) \quad U_{\text{ind}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Den Proportionalitätsfaktor L nennt man den Selbstinduktionskoeffizienten oder kurz die Selbstinduktivität. Das Minuszeichen deutet die Gegenwirkung an. Man mißt die Selbstinduktivität L in Henry (H). Eine Spule hat die Selbstinduktivität 1 H, wenn bei einer Stromänderung von 1 A pro sec eine Gegenspannung von 1 V induziert wird.

$$[L] = \frac{[U] [t]}{[I]} = \frac{V \cdot s}{A} = H$$

Mit den Formeln (4.0.1), (4.0.3) und (4.0.4) kann man die Induktivität einer langgestreckten, eisenlosen Zylinderspule (vgl. Abb. 4.0.5) berechnen.

Aus $H = I \frac{w}{l}$ und $B = \mu_0 H$ folgt:

$$B = \mu_0 I \frac{w}{l}$$

Aus $B = \frac{\Phi}{A}$ folgt $\Phi = B \cdot A = \mu_0 \cdot A \cdot I \frac{w}{l}$ und

$$\Delta \Phi = \mu_0 A \frac{w}{l} \cdot \Delta I$$

Setzt man diesen Ausdruck für $\Delta \Phi$ in (4.0.5) ein, erhält man:

$$(4.0.8) \quad U_{\text{ind}} = -w^2 \cdot \mu_0 \frac{A}{l} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Ein Vergleich mit (4.0.7) liefert:

$$(4.0.9) \quad L = \mu_0 w^2 \cdot \frac{A}{l}$$

Durch Einbringen eines ferromagnetischen Stoffes mit dem Verstärkungsfaktor μ_r erhält man:

$$(4.0.10) \quad L = \mu_0 \mu_r \cdot w^2 \frac{A}{l}$$

Nimmt man eine Zylinderspule mit $l = 1 \text{ m}$, $A = 10 \text{ cm}^2 = 10^{-3} \text{ m}^2$ und $w = 1000$ Windungen an, so erhält man ohne Eisenkern:

$$L = \frac{1,25 \cdot 10^{-6} \text{ Vs} \cdot 10^6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}{1 \text{ m}} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

mit Eisenkern ($\mu_r \approx 1000$):

$$L = \frac{1,25 \cdot 10^{-6} \text{ Vs} \cdot 10^3 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}{1 \text{ m}} = 1,25 \cdot \text{H}$$

Legt man an eine Spule mit der Selbstinduktion L die Klemmenspannung U_{kl} an, so kann der Strom nicht sofort seinen maximalen Wert annehmen. Ein momentaner ($\Delta t = 0$) Stromanstieg bedeutet ein unendlich großes $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ und nach (4.0.7) eine unendlich große Gegenspannung.

Die induzierte Spannung U_{ind} kann bei einer Spule nie größer als die angelegte Spannung U_{kl} sein, sonst würde der Strom ja in der verkehrten Richtung fließen. U_{ind} muß vielmehr, sofern ein Strom I vorhanden ist, kleiner als U_{kl} sein, da für die Gesamtspannung U , die sich aus U_{kl} und U_{ind} zusammensetzt, gilt:

$$(4.0.11) \quad I = \frac{U}{R} = \frac{U_{\text{kl}} - L \frac{\Delta I}{\Delta t}}{R} \quad \text{oder}$$

$$(4.0.12) \quad \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{U_{\text{kl}} - I \cdot R}{L}$$

Beim Anlegen einer Spannung U_{kl} an eine Spule

ist im ersten Moment $I = 0$ und $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{U_{\text{kl}}}{L}$.

Mit steigendem Strom I wird der Stromanstieg $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ kleiner und im Grenzfall $I = \frac{U_{\text{kl}}}{R}$ ist $\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$.

Man erhält einen Stromanstieg entsprechend Abb. 4.0.9.

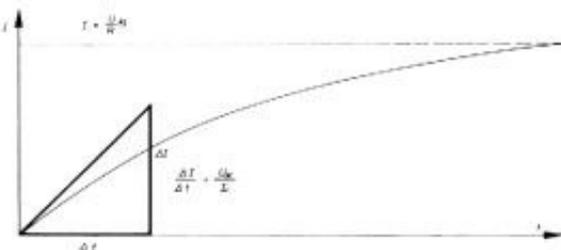


Abb. 4.0.9

Je größer die Induktivität L ist, um so kleiner ist der Stromanstieg und um so länger dauert es, bis der Höchstwert des Stromes annähernd erreicht ist. Es ist recht nützlich, die Zunahme des Stromes I bei einer Spule der Induktivität L , an die eine konstante Spannung U gelegt ist, zu vergleichen mit der Zunahme der Geschwindigkeit v eines Wagens der Masse m , auf den die Kraft F

einwirkt. Wenn die Spule keinen Widerstand R hätte¹⁾, würde der Strom I solange gleichmäßig ansteigen, solange eine konstante Spannung U angelegt ist. Nach Abschalten der Spannung würde der Strom in der erreichten Stärke konstant weiterfließen. Der Stromanstieg $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ wäre immer gegeben durch $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{U_{kl}}{L}$, das heißt bei großem L wäre der Anstieg steil, bei kleinem L wäre der Anstieg flach.

Bei einem Wagen, der keinerlei Reibung erfährt (Widerstand R), nimmt die Geschwindigkeit v (I) so lange gleichmäßig zu, so lange eine konstante Kraft F (U) auf ihn einwirkt. Nach Aufhören der Krafteinwirkung läuft der Wagen mit der erreichten Geschwindigkeit v (I) gleichmäßig weiter. Die zeitliche Zunahme der Geschwindigkeit $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ ist

immer gegeben durch $\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{F}{m}$, das heißt bei großer Masse m (L) ist die Geschwindigkeitszunahme klein, bei kleiner Masse m ist die Geschwindigkeitszunahme groß (vgl. Lastwagen und Sportwagen mit gleich starkem Motor).

Der Wagen besitzt am Ende die Bewegungsenergie $\frac{m}{2} v^2$. Die Spule besitzt am Ende entsprechend die magnetische Energie $\frac{L}{2} I^2$.

Nun gibt es ohne ganz besondere Vorkehrungen keine Spule ohne Widerstand und keinen Wagen ohne Reibung.

Ein Auto kann seine Geschwindigkeit nur so lange steigern, als eine beschleunigende Kraft vorhanden ist. Die Motorkraft F wirkt einer mit der Geschwindigkeit v anwachsenden Reibungskraft F_R entgegen. Ist die Motorkraft F gleich der Reibungskraft F_R , fährt der Wagen mit konstanter Geschwindigkeit.

Mit zunehmender Reibungskraft F_R wird die Geschwindigkeitszunahme $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ immer geringer.

Die für den Stromanstieg verantwortliche Spannung U setzt sich aus U_{kl} (F) und dem mit I wachsenden $I \cdot R$ (F_R) zusammen.

Für $U_{kl} = IR$ ($F = F_R$) bleibt der Strom I (v) konstant.

Mit zunehmendem $I \cdot R$ (F_R) wird die Stromzunahme $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ ($\frac{\Delta v}{\Delta t}$) immer geringer.

Es entsprechen sich also Spannung U und Kraft F , Strom I und Geschwindigkeit v , Induktivität L und Masse m .

d) Ferromagnetische Stoffe

Die schon in 4.0.a kurz erwähnte Verstärkung des Magnetfeldes einer Spule durch ferromagnetische Stoffe soll noch etwas ausführlicher besprochen werden.

Die Größe des Verstärkungsfaktors μ_r bei Eisen, Nickel und Kobalt rührt daher, daß bei diesen sogenannten ferromagnetischen Stoffen Elementarmagnete vorhanden sind. Diese Elementarmagnete sind ohne äußeres Magnetfeld völlig ungeordnet, das heißt sie heben sich in ihrer Wirkung nach außen auf. Bringt man aber einen ferromagnetischen Stoff in das Magnetfeld einer Spule, so richten sich die Elementarmagnete mit Zunahme des erregenden Stromes I_{err} mehr und mehr aus und verstärken das erregende Magnetfeld. Wenn aber alle Elementarmagnete ausgerichtet sind, nimmt das Magnetfeld bei einer weiteren Zunahme von I_{err} nurmehr unwesentlich zu.

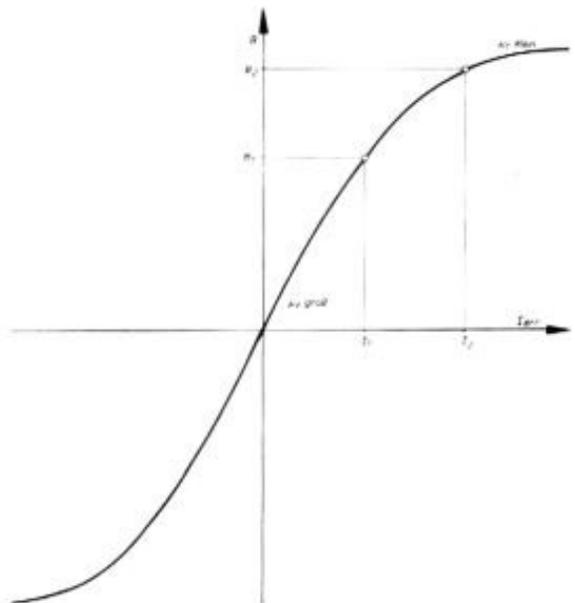


Abb. 4.0.10

In Abb. 4.0.10 ist der Zusammenhang zwischen der Kraftflußdichte B und der erregenden Stromstärke I_{err} qualitativ dargestellt.

Eine Verdoppelung von I_{err} ergibt bei größeren Stromstärken keine Verdoppelung von B .

Der Verstärkungsfaktor μ_r ist daher eigentlich keine Materialkonstante, er hängt vielmehr von I_{err} ab. Damit ist auch die Induktivität L , wenn ferromagnetische Stoffe zur Verstärkung benützt werden (vgl. 4.0.10), keine Konstante mehr. Sie nimmt mit steigender Belastung der Spule ab. Entsprechendes gilt für die Beziehung (4.0.6). $\Phi \sim I$ ist bei Spulen mit Eisenkern nurmehr annähernd richtig.

¹⁾ Durch Abkühlen auf eine Temperatur in der Nähe des absoluten Nullpunktes (-273°C) wird dieser Zustand (Supraleitung) erreicht.

In der folgenden Rechnung wird angenommen, daß zwischen der erregenden Stromstärke I_{err} und der Kraftflußdichte B ein Zusammenhang entsprechend Abb. 4.0.10 besteht. Es wird die mittlere Induktivität berechnet, einmal unter der Annahme, daß der Strom von 0 auf I_1 ansteigt, und dann für einen Stromanstieg von I_1 auf $I_2 = 2 I_1$. Dabei ergeben sich verschiedene Werte für die Selbstinduktion L . Im zweiten Fall erhält man nämlich nurmehr eine halb so große Induktivität. Rechnung:

$$I_2 = 2 \cdot I_1, B_2 = 1,5 \cdot B_1 \text{ (vgl. Abb. 4.0.10)}$$

Mit diesen angenommenen Werten ergibt sich:

$$U_{ind} = w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = wA \frac{\Delta B}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$U_{ind} \cdot \Delta t = wA \Delta B = L \Delta I$$

$$L \approx wA \frac{\Delta B}{\Delta I} \approx wA \frac{B_1 - 0}{I_1 - 0}, \text{ wenn } I \text{ kleiner als } I_1 \text{ ist.}$$

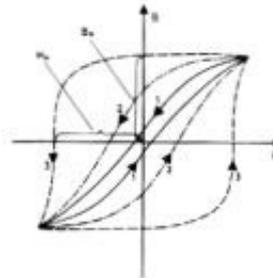
$$L \approx wA \frac{\Delta B}{\Delta I} \approx wA \frac{B_2 - B_1}{I_2 - I_1} = wA \frac{1,5 B_1 - B_1}{2 I_1 - I_1} \\ \approx wA \frac{0,5 B_1}{I_1}, \text{ wenn } I \text{ zwischen } I_1 \text{ und } I_2 \text{ liegt.}$$

Der Zusammenhang der Abb. 4.0.10 stellt nun allerdings eine starke Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse dar. In Abb. 4.0.10 ist nämlich angenommen, daß jeder Erregerstromstärke I_{err} eine bestimmte Kraftflußdichte B gehört. In Wirklichkeit ergeben sich aber für die Kraftflußdichte B verschiedene Werte, je nach dem, ob die Erregerstromstärke I_{err} bzw. die erregende Feldstärke $H = I_{err} \cdot \frac{w}{l}$ zu- oder abnimmt. Nimmt man nämlich an, daß zu Beginn des Magnetisierungsprozesses der ferromagnetische Stoff in der Spule vollständig unmagnetisch ist, d. h. daß seine Elementarmagnete vollständig ungeordnet sind, so richten sich diese Elementarmagnete mit steigender erregender Feldstärke H mehr und mehr aus. Sind alle ausgerichtet, so ist der ferromagnetische Stoff im Zustand der Sättigung, der bei einer bestimmten sogenannten Sättigungsfeldstärke erreicht wird. Die ausgerichteten Elementarmagnete behalten nun aber bei einer Abnahme der erregenden Feldstärke H ihre Richtung mehr oder weniger bei, weil sie sich gegenseitig noch ausrichten. Ein ferromagnetischer Stoff besitzt daher auch nach Abschalten der erregenden Feldstärke noch eine zurückbleibende (remanente) Kraftflußdichte B_R (Nachwirkung). Die vollständige Unordnung der Elementarmagnete tritt erst bei einer bestimmten, entgegengesetzt gerichteten Feldstärke H_K (Koerzitivkraft) ein.

Regelt man über die erregende Stromstärke I_{err} die Feldstärke H von der negativen zur positiven

und wieder zurück zur negativen Sättigungsfeldstärke, so durchlaufen die B -Werte infolge der oben besprochenen Nachwirkung (Hysterese) die sogenannte Hysteresisschleife.

In Abb. 4.0.11 sind typische Hysteresisschleifen von verschiedenen ferromagnetischen Stoffen gezeichnet.



- Hysteresisschleifen
1. weiches Eisen
(z. B. Dynamoblech)
 2. Stahl
(z. B. Alnico-Stahl 250)
 3. Ferrite
(z. B. Ba-Ferrit 100)

Abb. 4.0.11

Unter einem weichen ferromagnetischen Stoff versteht man ein Material, bei dem wenigstens für kleine Feldstärken $B \sim H$ ist und bei dem bei einer Richtungsänderung von H auch B sofort seine Richtung ändert. Abb. 4.0.10 charakterisiert demnach einen ideal weichen ferromagnetischen Stoff. Je enger die beiden Äste der Hysteresisschleife zusammenrücken, kurz, je enger die Schleife ist, d. h. je kleiner die Remanenz B_R und die Koerzitivkraft H_K sind, um so weicher ist der ferromagnetische Stoff (Abb. 4.0.11 Kurve 1). B_R und H_K kennzeichnen das Verhalten eines ferromagnetischen Stoffes.

Zur Verstärkung der Induktivität L in Spulen benutzt man möglichst weiches Material. Mit $B \sim H$ ist ja auch die oben erwähnte Beziehung $\Phi \sim I$ (4.0.6) gegeben. Außerdem bedingt eine breite Hysteresisschleife für eine Spule großen Energieverlust, wenn sie in einen Wechselstromkreis geschaltet wird (vgl. 4.12).

Zur Herstellung von Dauermagneten braucht man Material mit großen B_R - und H_K -Werten. B_R ist ein Maß für die Stärke des Dauermagneten und H_K ein Maß für seine Haltbarkeit bzw. Härte. In Tabelle 4.0.1 sind für einige harte ferromagnetische Stoffe die B_R - und H_K -Werte zusammengestellt.

Tabelle 4.0.1

Stoff	W-Stahl	Alnico 250	Ba-Ferrit 100	Ba-Ferrit 300
$B_R \left(\frac{Vs}{m^2} \right)$	0,9	1,2	0,7	0,2
$H_K \left(\frac{A}{m} \cdot 10^3 \right)$	6	50	80	140

4.1 Nachweis der Induktion

Zum Nachweis des Induktionsgesetzes (4.0.5) wird der Trafobaustein benützt (vgl. Abb. 4.1.1).

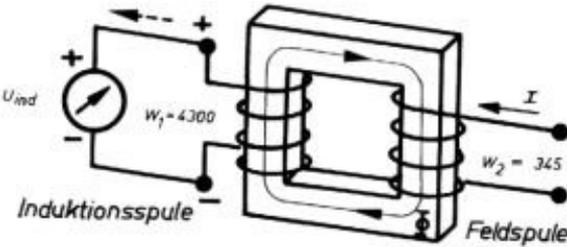


Abb. 4.1.1

Der Trafo besteht aus einem geschlossenen Eisenkern, auf den 2 Spulen gewickelt sind. Die eine Spule, die sogenannte Primärspule, die bei der normalen Benützung mit der Steckdose verbunden wird, hat $w_1 = 4300$ Windungen. Die zweite Spule (Klemmen a und d), an der man im Normalbetrieb $U_{eff} = 17$ V abnimmt, ist die Sekundärspule und hat $w_2 = 345$ Windungen.

Die Primärspule dient als sogenannte Induktionsspule und wird mit dem Meßinstrument verbunden. Da die Primärspule den Widerstand $R_1 = 800 \Omega$, das Meßinstrument den Widerstand $R_i = 1200 \Omega$ besitzt, entspricht der Vollausschlag des Meßinstruments einer induzierten Spannung $U_{ind} = I_m (R_1 + R_i) = 0,1 \text{ mA} \cdot 2 \text{ k}\Omega = 0,2 \text{ V}$. Die Sekundärspule dient als Feldspule. Der Fluß ψ im Eisenkern hängt von der erregenden Stromstärke I ab, die durch die Sekundärspule fließt und die über ein Potentiometer geregelt wird. Für die benutzten Erregerstromstärken ist $\psi \sim I$

$$\text{und } \frac{\Delta \psi}{\Delta t} \sim \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (\text{vgl. 4.0.6 und 4.0.d}).$$

Die Abhängigkeit von der Windungszahl w kann nicht überprüft werden, da nur die Windungszahl $w_1 = 4300$ Windungen zur Verfügung steht.

Man prüft also das Induktionsgesetz in der Form:

$$(4.1.1) \quad U_{ind} = M \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Den Proportionalitätsfaktor M nennt man bei-läufig auch die Gegeninduktivität.

Das Vorzeichen der induzierten Spannung hängt einmal von der Stromrichtung und der dadurch bedingten Richtung des Flusses ψ und zum anderen davon ab, ob der Strom I und damit ψ zu- oder abnimmt. Wenn in Abb. 4.1.1 z. B. der Strom I (\rightarrow) und damit ψ (\rightarrow) zunimmt, entsteht in der Induktionsspule eine Spannung, die den gestrichelt gezeichneten Strom verursacht (Lenz'sche Regel).

Hält man I und damit ψ konstant ($\Delta \psi = 0$, $\Delta I = 0$), so entsteht keine Induktionsspannung.

Versuch 21

Man schließt das Meßinstrument in der angegebenen Schaltung zunächst an den 12Ω Shunt an und mißt den maximalen Erregerstrom I_m . Die Größe von I_m wird mit dem Potentiometer R_2 eingestellt. Danach schaltet man das Meßinstrument in der angegebenen Weise zur Messung der Induktionsspannung. Mit dem Potentiometer R_1 wird die Erregerstromstärke in der Zeit Δt von $-I_m$ bis $+I_m$ geregelt.

Diese Regelung hat so zu erfolgen, daß während der ganzen Zeit Δt U_{ind} einigermaßen konstant bleibt. Zu dem Zweck ist das Potentiometer nicht gleichmäßig durchzudrehen, da die oben angenommene Beziehung (4.0.6) bei einem Eisenkern und bei größeren Stromstärken nurmehr angenähert gilt (vgl. 4.0.d).

Auf die richtige Polung des Meßinstrumentes ist zu achten.

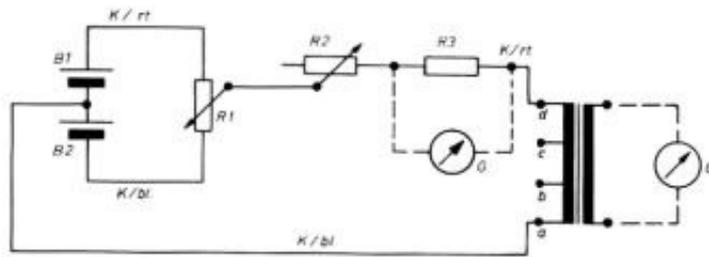
Man erhält die in der Tabelle 4.1.1 zusammengestellten Meßwerte:

Tabelle 4.1.1

I_m (mA)	ΔI (mA)	Δt (s)	$\frac{\Delta I}{\Delta t}$ (mA/s)	U_{ind} (V)	$M = \frac{U_{ind}}{\Delta I / \Delta t}$ (H)
2,5	5	10	0,5	0,08	$1,6 \cdot 10^2$
5,0	10	20	0,5	0,08	$1,6 \cdot 10^2$
2,5	5	5	1	0,16	$1,6 \cdot 10^2$

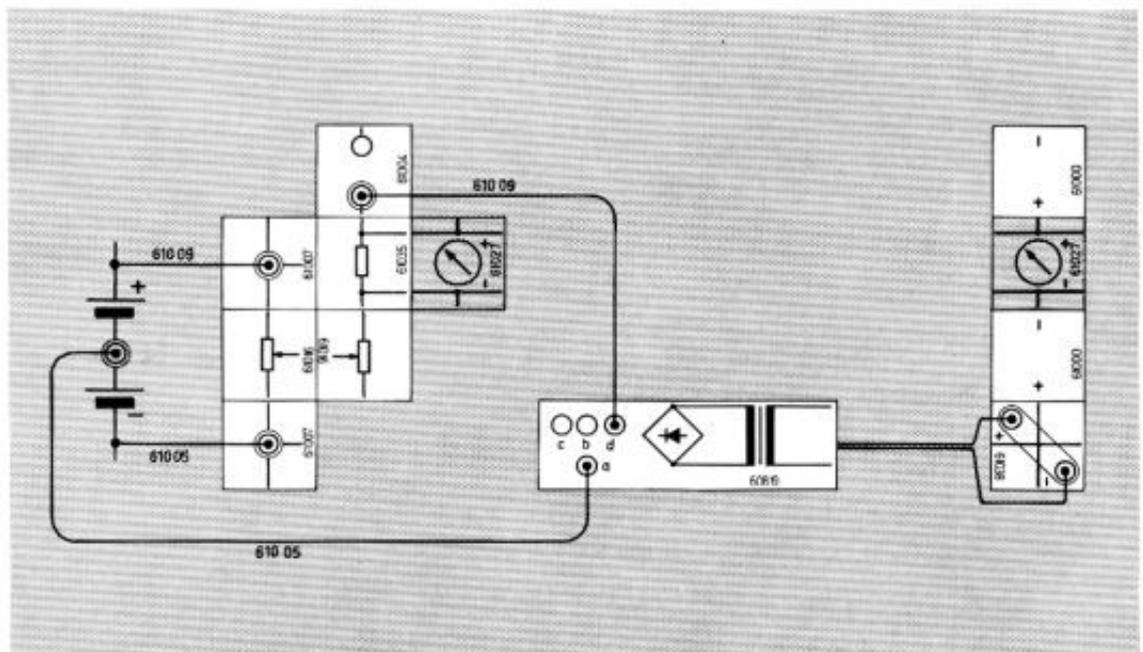
M erweist sich als Konstante, das heißt es ist nachgewiesen:

$$U_{ind} \sim \frac{\Delta \psi}{\Delta t}$$



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	2	Verbindung	610 07
R1/R2	2	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
R3	1	Widerstand, 12 Ω	610 35
	1	Buchse, 2fach	610 04
	1	Trafo	608 19
	2	Verbindung, + -	610 00
G	1	Instrument	610 27
K/bl	2	Kabel, blau	610 05
K/r	2	Kabel, rot	610 09
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38

x Nicht im Baukasten enthalten



4.2 Nachweis der Selbstinduktion

Der in Abb. 4.0.9 dargestellte langsame Stromanstieg kann nun leider bei den vorgegebenen Bausteinen nicht direkt beobachtet werden. Der Spulenbaustein hat bei einer Induktivität $L = 1 \text{ H}$ einen Widerstand $R \approx 15 \Omega$. Daraus ergibt sich, wie eine hier nicht wiedergegebene Rechnung zeigt, daß der Strom I innerhalb einer Zeit $t = \frac{L}{R} \approx \frac{1 \text{ H}}{15 \Omega} \approx 0,07 \text{ s}$ etwa 70 % seines Endwertes erreicht, und eine so kleine Verzögerung kann weder mit dem Meßinstrument noch mit einer Glühlampe beobachtet werden. Entsprechendes gilt für die Sekundär- und die Primärspule des Trafos. Es ist aber möglich, über den Stromanstieg $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ in der Sekundärspule des Trafos Aussagen zu machen. Wenn nämlich dieser Stromanstieg eine bestimmte Größe erreicht, leuchtet die Glimmlampe (Kontrollampe), die parallel zur Primärspule liegt, auf. Bleibt der Stromanstieg unter dieser kritischen Größe, so leuchtet die Glimmlampe nicht auf. Dies ergibt sich aus der Tatsache, daß die Kontrollampe eine Zündspannung von 70 V braucht, um aufzuleuchten. Die in der Primärspule induzierte Spannung U_{ind} muß mindestens 70 V betragen. Voraussetzung hierfür ist ein ganz bestimmtes $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ bzw. $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ (vgl. 4.0.6).

Versuch 22

Der Stromkreis, dessen $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ untersucht werden soll, besteht aus der Sekundärspule des Trafos (Klemmen d u. b, 276 Windg.), Meßinstrument (1,2 Ω Shunt), 12 Ω Widerstand und Spannungsquelle. Legt man eine Spannung von $U_{\text{kl}} = 1,5 \text{ V}$ an, so fließt ein Endstrom von ca. 80 mA. Man beobachtet beim Einschalten kein Aufleuchten, wohl aber beim Abschalten. Beim Unterbrechen fällt der Strom fast

augenblicklich auf 0 ab ($\frac{\Delta I}{\Delta t}$ sehr groß), beim Einschalten wird der Stromanstieg durch die Induktivität L verzögert ($\frac{\Delta I}{\Delta t}$ klein). Da im ersten Mo-

ment des Einschaltens $\frac{\Delta I}{\Delta t} \approx \frac{U_{\text{kl}}}{L}$ ist, muß bei größerer Klemmenspannung, auch beim Einschalten die Glimmlampe aufleuchten. Man erreicht dies mit $U_{\text{kl}} \approx 9 \text{ V}$ (Achtung! Meßinstrument wegnehmen, Shunt lassen).

Wählt man am Trafo eine Spule mit der halben Windungszahl (Klemmen d u. c, $w' = 138$ Windg.), so erhält man schon bei $U_{\text{kl}} = 4,5 \text{ V}$ ein Aufleuchten der Glimmlampe. Aus diesem Ergebnis kann man auf die Abhängigkeit der Induktivität L von der Windungszahl schließen. Einsetzen der Zündung der Glimmlampe einmal bei $U_{\text{kl}} = 9 \text{ V}$, dann bei $U_{\text{kl}} = 4,5 \text{ V}$, bedeutet Gleichheit von

ind. Spannung U_{ind} und von $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$.

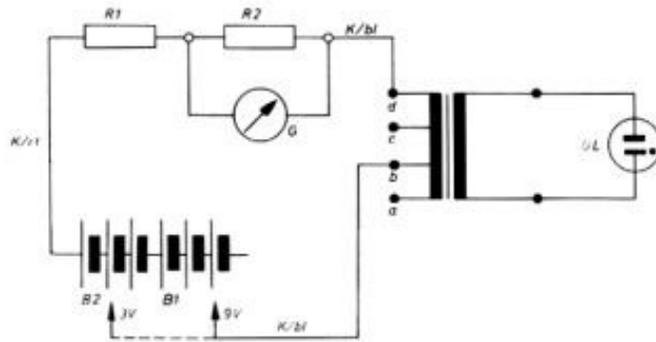
$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ bleibt bei halber Windungszahl nur dann konstant, wenn $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ verdoppelt wird auf $2 \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Man erhält für $w_2 = 276$: $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{U_{\text{kl}}}{L}$

und für $w'_2 = 138$: $2 \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{1/2 U_{\text{kl}}}{L'}$

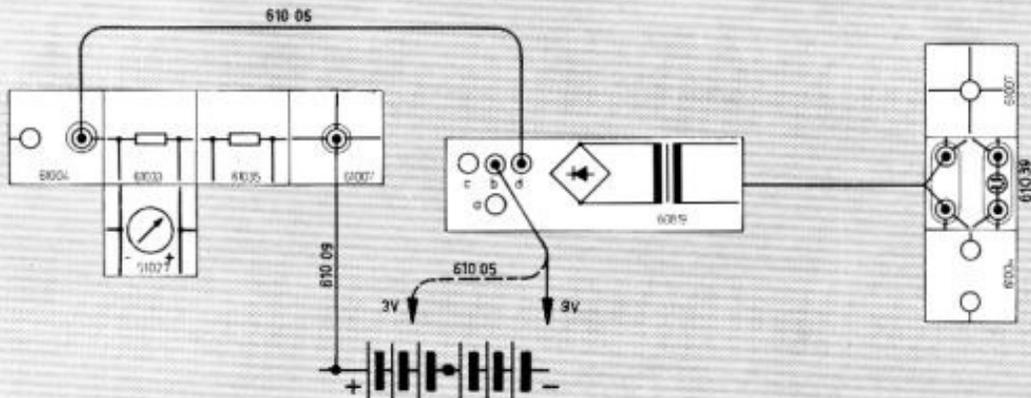
Daraus folgt: $L' = \frac{L}{4}$ oder $\frac{L'}{L} = \left(\frac{w'}{w}\right)^2$

Die Induktivität L wächst mit dem Quadrat der Windungszahlen (vgl. 4.0.8).



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	1	Trafo	608 19
	2	Verbindung	610 07
G	1	Instrument	610 27
R2	1	Widerstand, 1,2 Ω	610 33
R1	1	Widerstand, 12 Ω	610 35
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Buchse, 4fach	610 39
	1	Stecker, 2fach	610 40
K/bl	2	Kabel, blau	610 05
K/rt	1	Kabel, rot	610 09
Gl	1	Glimmlampe	972 7 2140 0
	2	Krokodilklemme	970 7 2146 0

x Nicht im Baukasten enthalten



4.3 Nachweis der Lenzschen Regel

Die Lenzsche Regel (4.0.b) besagt:

Die Induktionsspannung ist immer so gerichtet, daß der durch sie bedingte Strom den Vorgang, dem die Induktionsspannung ihre Entstehung verdankt, zu hemmen sucht.

Dieser Regel zufolge wird beim Einschalten (vgl. Abb. 4.0.9) der Strom nicht sofort seinen Höchstwert annehmen, da der Vorgang, dem die Induktionsspannung ihre Entstehung verdankt, das heißt der Aufbau des Magnetfeldes, gehemmt wird.

Beim Spulenbaustein läßt sich dieser durch die Selbstinduktion L bedingte verlangsamte Strom-

anstieg $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ beim Einschalten ohne Oszillographen nur schwer nachweisen, weil der Strom I schon innerhalb von $\Delta t \approx 0,2$ s praktisch seinen Endwert erreicht (vgl. 4.2).

Beim Abschalten aber muß der Lenzschen Regel zufolge die Induktionsspannung so gerichtet sein, daß sie wieder den Vorgang, dem sie ihre Entstehung verdankt, zu hemmen sucht, das heißt sie sucht den Abbau des Magnetfeldes aufzuhalten, sie treibt den Strom in der alten Richtung weiter. Letzteres läßt sich nun mit dem Spulenbaustein und einer Glimmlampe zeigen.

Versuch 23

Schaltet man eine Glimmlampe parallel zu der Spule mit Eisenkern, so leuchtet die Glimmlampe beim und nach dem Einschalten natürlich nicht, da die angelegte Spannung $U_{kl} = 1,5$ V weit unterhalb der Zündspannung liegt ($U_z \approx 70$ V). Beim Ausschalten dagegen leuchtet die Glimmlampe auf, da durch den raschen Stromabfall und die dadurch bedingte starke Änderung des Flusses eine hinreichend große Induktionsspannung U_{ind} entsteht.

$$U_{ind} = -w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Hat eine Glimmlampe die erforderliche Zündspannung, so leuchtet immer die Elektrode auf, die mit dem Minuspol verbunden ist. Wenn man diese Tatsache beachtet, erkennt man, daß nach dem Abschalten die Induktionsspannung so gerichtet ist, daß sie einen Strom in der alten Richtung verursacht (vgl. Abb. 4.3.1).

Durch die Induktionwirkung wird immer die Ursache des Induktionsvorgangs gehemmt. Ist ein Stromanstieg die Ursache, so wird dieser verlangsamt, ist ein Stromabfall die Ursache, so wird der Abfall des Stromes gehemmt.

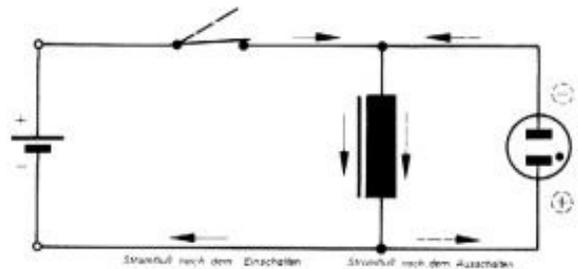
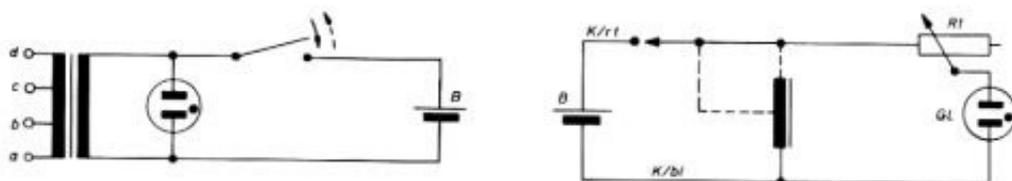


Abb. 4.3.1

Beachte: Die Induktionsspannung hat umgekehrte Polarität wie die Batteriespannung.

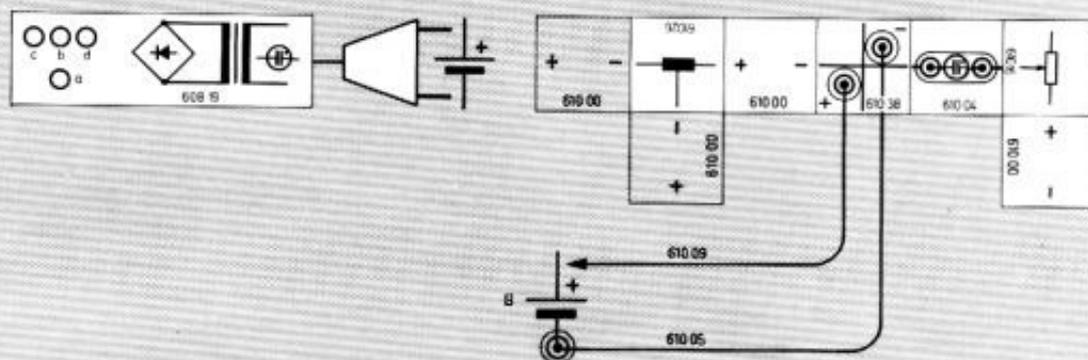
Wählt man den Mittelabgriff ($w' = \frac{w}{2} = 300$, $L' = \frac{L}{4}$), so ist die Wirkung entsprechend schwächer.

Der obige Versuch läßt sich in einfacher Weise auch so durchführen, daß man die Primärspule des Trafobausteines über den Netzstecker mit den Klemmen einer Taschenlampenbatterie verbindet und dann den Ein-Ausschalter betätigt. Beim und nach dem Einschalten leuchtet die Glimmlampe nicht, beim Ausschalten leuchtet sie kurz auf.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B	1	Batterie, 4,5 V	x
	1	Trafo	608 19
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	1	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
R1	1	Potentiometer, 1 kΩ	610 16
	1	Stecker, 2fach	610 40
K/bl	1	Kabel, blau	610 05
K/rt	1	Kabel, rot	610 09
Gl	1	Spule, 1 H	610 26
	3	Glimmlampe	972 7 2140 0
		Verbindung, + -	610 00

x Nicht im Baukasten enthalten



4.4 Induktiver Widerstand R_L (Informativer Versuch)

Legt man an eine Spule mit der Induktivität L eine Gleichspannung U , so steigt die Stromstärke wegen der Selbstinduktion langsam an, weil beim Anwachsen des magnetischen Flusses nach der Lenzschen Regel eine Gegenspannung induziert wird (Formel 4.2.2 und 4.2.3). Die Spule zeigt also, solange die Stromstärke zunimmt, einen größeren Widerstand, als nach dem Ohmschen Gesetz zu erwarten wäre. Diesen zusätzlichen Widerstand nennt man den induktiven Widerstand. Beim Gleichstrom tritt er nur beim Ein- und Ausschalten in Erscheinung.

Legt man an eine Spule mit der Induktivität L und einem zunächst vernachlässigbaren Widerstand des Drahtes ($R \approx 0$) eine Wechselspannung U an, so ist in jedem Augenblick:

$$U = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{und} \quad \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{U}{L} \quad (\text{vgl. 4.2})$$

Es ist $\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$, wenn $U = 0$ ist.

Ist U positiv, ist auch der Stromanstieg $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ positiv, d. h. der Strom I nimmt zu. Der Anstieg ist aber um so kleiner, je größer L ist.

Ist U negativ, ist auch $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ negativ, d. h. der Strom I nimmt ab, und zwar ebenfalls um so weniger, je größer L ist.

Man erhält den in der Abb. 4.4.1 angegebenen Zusammenhang zwischen U und I .

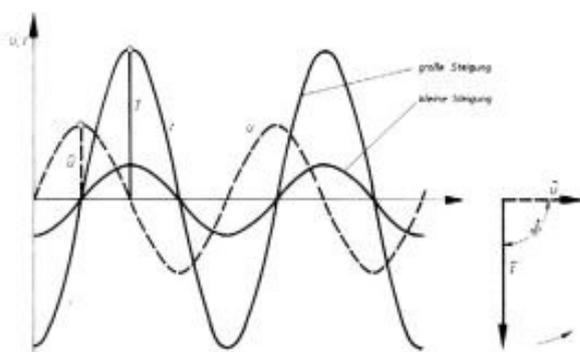


Abb. 4.4.1

Die Höhe des Scheitelwertes \hat{I} , den der Strom erreicht, hängt ab von der Steigung $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{U}{L}$ und der Frequenz f . Je größer L ist, um so weniger **steil** kann der Strom ansteigen, je schneller die Spannung wechselt, um so weniger **lang** kann der

Strom ansteigen. Man bezeichnet als induktiven Widerstand R_L das Verhältnis $\frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}$ und schreibt:

$$R_L = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \frac{U \sqrt{2}}{I \sqrt{2}} = \frac{U}{I}$$

Da nach den vorausgegangenen Überlegungen \hat{I} um so kleiner bleibt, je größer f und L sind, gilt für den induktiven Widerstand R_L :

$$R_L \sim f \quad \text{und} \quad R_L \sim L$$

Zu beachten ist auch die Phasenverschiebung zwischen Spannung U und Strom I in der Abb. 4.4.1. Der Strom I ist $T/4$ oder 90° phasenverschoben gegen die Spannung U , und zwar eilt die Spannung voraus. Die Phasenverschiebung von 90° ist im Zeigerdiagramm besonders deutlich zu ersehen.

Versuch 24

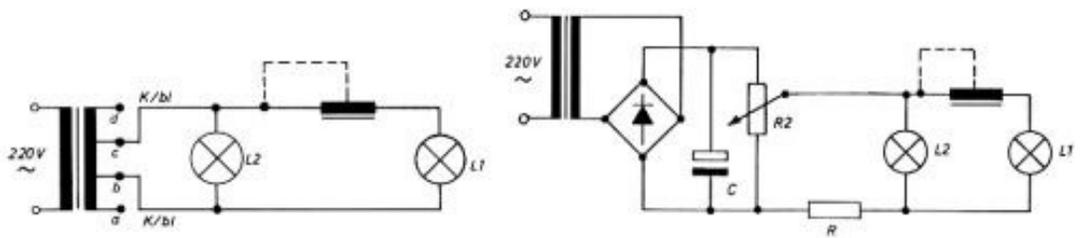
Zunächst soll die Abhängigkeit des induktiven Widerstandes R_L von f und L ganz qualitativ behandelt werden, indem Glühlämpchen die Rolle von Volt- und Amperemeter übernehmen.

Bei technischem Wechselstrom ist $f = 50$ Hz, und bei Gleichstrom ist $f = 0$, d. h. bei Gleichstrom darf ein zusätzlicher Widerstand zum gewöhnlichen Drahtwiderstand der Glühlampen und der Spule gar nicht auftreten.

Bei technischem Wechselstrom ($f = 50$ Hz) muß sich ein zusätzlicher Widerstand bemerkbar machen, und zwar um so mehr, je mehr Windungen die eingeschaltete Spule hat, da $L \sim w^2$ (4.2).

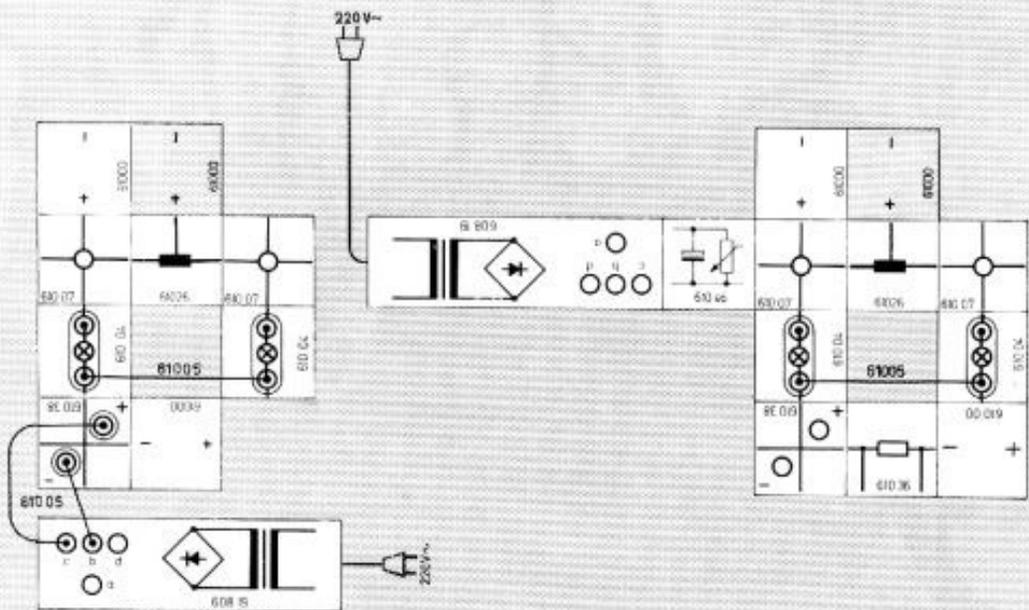
Wenn das als Voltmeter geschaltete Glühlämpchen 2 gleich hell brennt, ist für Gleich- und Wechselstromkreis die Spannung gleich. Wenn dann im einen Fall die als Amperemeter geschaltete Glühlampe 1 leuchtet und im anderen Fall nicht, so ist im einen Fall (Gleichstrom) der Widerstand klein, im anderen (Wechselstrom) groß.

Man ersieht, daß bei Wechselstrom die Spule einen zusätzlichen Widerstand hat, der offensichtlich mit der Frequenz f und der Induktivität L wächst.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
R2/C	1	Spannungsteiler	610 46
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	3	Verbindung, + -	610 00
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Spule, 1H	610 26
K/bl	3	Kabel, blau	610 05
	2	Stecker, 2fach	610 40
L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
	2	Verbindung	610 07
R	1	Widerstand, 133 Ω ¹⁾	610 36

¹⁾ Schutzwiderstand



4.5 Kapazitiver Widerstand R_C (Informativer Versuch)

Legt man an einen Kondensator der Kapazität C eine Gleichspannung U , so bemerkt man nur einen kurzen Stromstoß, bis der Kondensator auf die Spannung $U_C = U$ aufgeladen ist, dann fließt kein Strom mehr, d. h. der Kondensator stellt bei Gleichspannung eine Unterbrechung dar und entspricht einem ∞ großen Widerstand (I, 6.3).

Legt man an den Kondensator der Kapazität C eine Wechselspannung U an, so ist in jedem Augenblick die Ladung des Kondensators $Q = C \cdot U$. Die Ladung schwankt in der gleichen Weise wie U . Wenn eine Ladung größer wird, muß ein positiver Strom fließen, und zwar ist der Strom um so größer, je mehr die Ladung in einer bestimmten Zeit sich ändert. Man schreibt: $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$.

Nimmt die Ladung ab, fließt der Strom in der umgekehrten Richtung, dann ist $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ negativ.

Man erhält also jetzt einen Wechselstrom mit der Frequenz der Wechselspannung. Die zeitliche Ladungsänderung $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ und damit der Lade- bzw.

Entladestrom ist dann am größten, wenn die Spannung $U = 0$ ist. Man erhält den in Abb. 4.5.1 dargestellten Zusammenhang zwischen U und I .

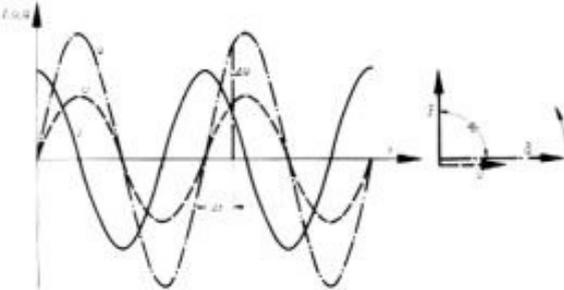


Abb. 4.5.1

$\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ und damit der Scheitelwert des Stromes \hat{I} wird um so größer, in je kürzerer Zeit ein Auf- und Entladen stattfindet und je größer die Ladung \hat{Q} ist. \hat{I} ist also um so größer, je größer f und C sind.

Man bezeichnet als kapazitiven Widerstand R_C das Verhältnis

$$\frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \frac{\hat{U} \cdot \sqrt{2}}{\hat{I} \cdot \sqrt{2}} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}}$$

U_{eff} ist die Spannung, die an den Kondensator gelegt wird, und I_{eff} ist der Strom, der fließt.

Nach den vorausgegangenen Ausführungen gilt:

$$R_C \sim \frac{1}{f}, R_C \sim \frac{1}{C}.$$

Zu beachten ist auch hier die Phasenverschiebung von 90° zwischen Spannung U und Strom I , nur eilt hier der Strom I der Spannung U voraus, während bei der Induktivität die Spannung um 90° vorseilt.

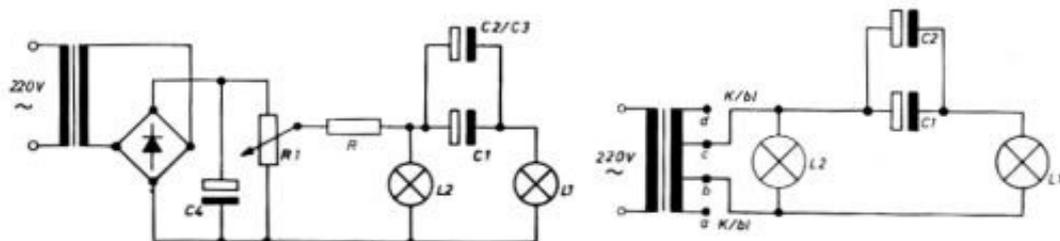
Versuch 25

Die Versuchsanordnung ist die entsprechende zu Versuch 24.

Bei Gleich- und Wechselstrom wird auf die gleiche Spannung eingestellt, d. h. die Lämpchen, die als Voltmeter geschaltet sind, müssen gleich hell brennen. Das Amperelämpchen brennt nun aber bei Gleichspannung nicht, da $R_C = \infty$ ist.

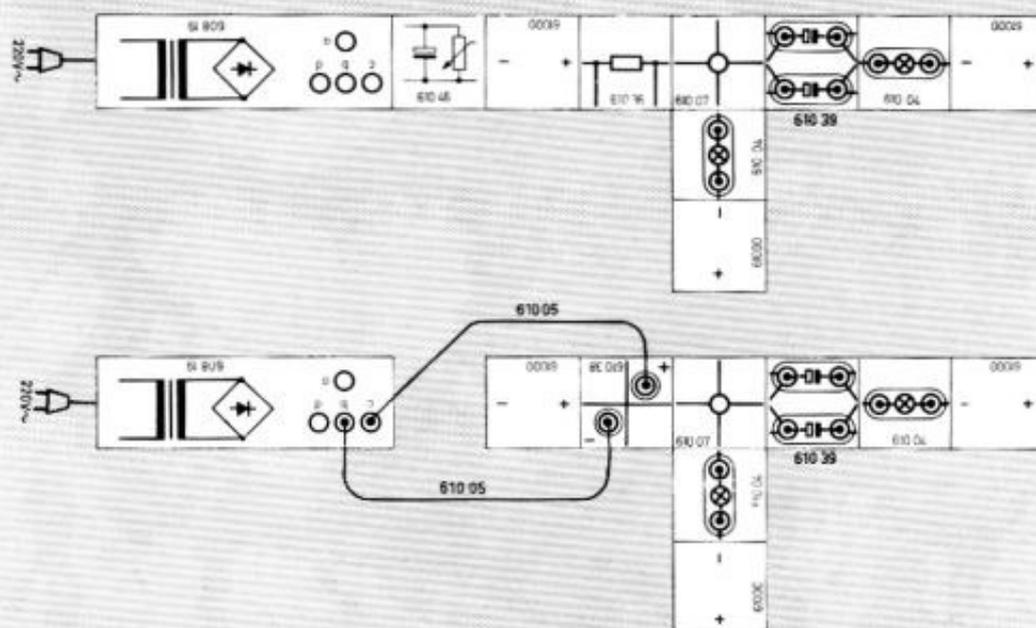
Bei Gleichstrom ist: $f = 0$ u. $R_C \sim \frac{1}{f} = \infty$.

Bei technischem Wechselstrom ($f = 50 \text{ Hz}$) brennt das Amperelämpchen um so heller, je größer C ist ($R_C \sim \frac{1}{C}$).



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
R1/C4	1	Spannungsteiler	610 46
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	3	Verbindung, + -	610 00
	1	Buchse, 4fach	610 39
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	4	Stecker, 2fach	610 40
K/bl	2	Kabel, blau	610 05
L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
C1/C2	2	Elko, 10 μ F	923 7 2134 0
C3	1	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0
	1	Verbindung	610 07
R	1	Widerstand, 133 Ω ¹⁾	610 36

¹⁾ Schutzwiderstand



4.6 Nachweis der Phasenverschiebung bei kapazitivem Widerstand (1 Hz)

Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung kann bei technischem Wechselstrom nur mit einem Oszillographen nachgewiesen werden. Hier soll nun versucht werden, die Phasenverschiebung direkt zu zeigen mit Wechselstrom der Frequenz $f \approx 1$ Hz. Desgleichen soll die Abhängigkeit des kapazitiven Widerstandes R_C von f und C überprüft werden.

Nach 4.5 kann man zunächst nur vermuten:

$$R_C \sim \frac{1}{fC}$$

Es fehlt noch der Proportionalitätsfaktor. Eine Rechnung, die hier nicht mitgeteilt wird, ergibt

den Faktor $\frac{1}{2\pi}$.

Man kann also schreiben:

$$4.6.1 \quad R_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C}$$

Die Richtigkeit dieser Formel soll bestätigt werden.

Versuch 26

An eine Stromverzweigung wird eine Wechselspannung mit $\hat{U} \approx 9$ V und $f \approx 1$ Hz angelegt. Der eine Zweig besteht aus einem Glühlämpchen als Amperemeter und einem Kondensator mit der Kapazität $C = 200$ bzw. $400 \mu\text{F}$, der zweite Zweig besteht aus einem gleichen Glühlämpchen als Amperemeter und einem veränderlichen Widerstand.

Dreht man den Gleitkontakt des Potentiometers R_2 so hin und her, daß eine Wechselspannung mit $f \approx 1$ Hz entsteht, und stellt man den veränderlichen Widerstand R_3 auf 400Ω ein, so leuchten die beiden Glühlämpchen gleich hell auf, nur daß das Lämpchen im kapazitiven Zweig etwas früher aufleuchtet (Phasenverschiebung). Gleiche Helligkeit bedeutet, daß $R_C \approx 400 \Omega$ ist. Wenn die Glühlämpchen nur schwach aufleuchten, braucht man deren Widerstand ($R \approx 100 \Omega$) nicht zu berücksichtigen (vgl. I, 4.10 u. II, 4.9.).

Bei einer Steigerung der Frequenz f brennt das Lämpchen im kapazitiven Zweig heller, und bei einer Herabsetzung der Frequenz f brennt es dunkler. Folgerung: $R_C \sim \frac{1}{f}$.

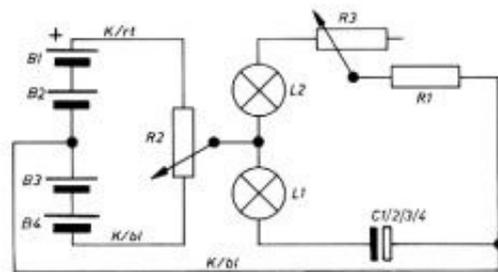
Bei einer Herabsetzung der Kapazität C brennt das Lämpchen ebenfalls schwächer. Folgerung:

$$R_C \sim \frac{1}{C}$$

Zur Kontrolle der Formel 4.6.1 wird R_C gemessen und berechnet.

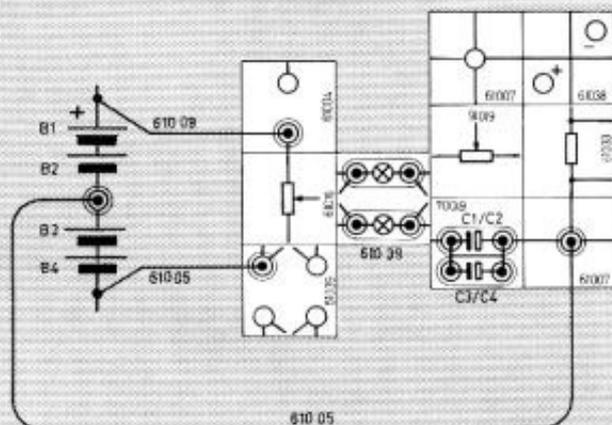
Messung: $R_C \approx 400 \Omega$ (s. o.)

$$\text{Berechnung: } R_C = \frac{1}{\omega C} \approx \frac{1 \text{ s}}{6,28 \cdot 1 \cdot 400 \mu\text{F}} = 400 \Omega$$



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2/B3/B4	4	Batterie, 4,5 V	x
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	2	Buchse, 4fach	610 39
R2/R3	2	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
	2	Verbindung	610 07
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
R1	1	Widerstand, 1,2 Ω	610 33
	4	Stecker, 2-fach	610 40
K/bl	2	Kabel, blau	610 05
K/rt	1	Kabel, rot	610 09
L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
C1/C2/C3/C4	4	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0

x Nicht im Baukasten enthalten



4.7 $R_C = \frac{1}{\omega C}$, Nachweis mit 50 Hz

Im folgenden Versuch soll die Formel $R_C = \frac{1}{\omega C}$ mit bekannten Kapazitäten und technischem Wechselstrom der Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$ überprüft werden. Leider haben die Kondensatoren eine Toleranz von 20 %, so daß keine allzu große Genauigkeit zu erwarten ist.

In der Praxis benützt man umgekehrt, sofern genaue Meßinstrumente zur Verfügung stehen, die angegebene Schaltung, um die Kapazität C eines Kondensators zu bestimmen.

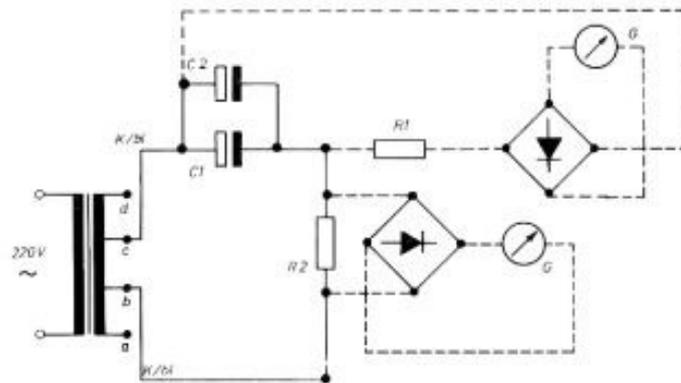
Versuch 27

Der kapazitive Widerstand $R_C = U_{\text{eff}}/I_{\text{eff}}$ wird durch Messung von U_{eff} und I_{eff} ermittelt. Wie beim Gleichstromkreis wird das Amperemeter in Reihe und das Voltmeter parallel zu den Punkten gelegt, zwischen denen man die Spannung messen will. In unserem Fall wird das Voltmeter parallel zum Kondensator gelegt. Da nur **ein** Meßgleichrichter und **ein** Meßinstrument zur Verfügung stehen, werden entweder die beiden Bausteine an den 12Ω Shunt angeschlossen, während der $100 \text{ k}\Omega$ Vorwiderstand allein angeschlossen bleibt, oder die beiden Bausteine werden mit dem $100 \text{ k}\Omega$ Vorwiderstand als Voltmeter geschaltet, dann bleibt der 12Ω Shunt allein angeschlossen.

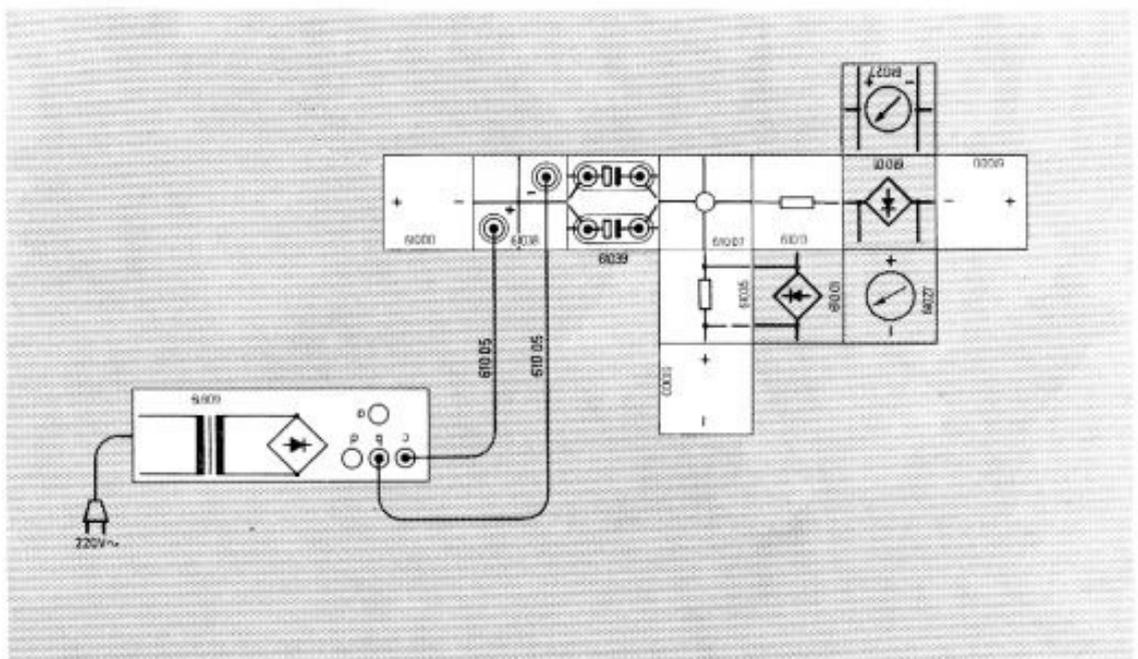
Für die Feststellung der Volt- und Amperewerte muß man die Eichkurven von 3.2 und 3.3 benutzen. Man erhält die Meßwerte der Tabelle 4.7.1.

Tabelle 4.7.1

Klemmen C am Trafo	C (μF)	U_{eff} (V)	I_{eff} (mA)	R_C (Ω)	$C = \frac{1}{\omega R_C}$ (μF)
c und d	$10 \mu\text{F}$	6,5 V	21 mA	310Ω	$10 \mu\text{F}$
c und d	$5 \mu\text{F}$	6,5 V	10 mA	650Ω	$5 \mu\text{F}$
c und d	$15 \mu\text{F}$	6,5 V	34 mA	190Ω	$16 \mu\text{F}$



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
	3	Verbindung, + -	610 00
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	1	Buchse, 4fach	610 39
	1	Verbindung	610 07
R2	1	Widerstand, 12 Ω	610 35
R1	1	Widerstand, 100 k Ω	610 13
	1	Meßgleichrichter	610 01
G	1	Instrument	610 27
K/bl	2	Kabel, blau	610 05
	2	Stecker, 2fach	610 40
C2	1	Elko, 10 μ F	923 7 2134 0
C1	1	Elko, 5 μ F	923 7 2323 0



4.8 Induktiver Widerstand einer Spule bei 50 Hz

In 4.4 wurde gezeigt, daß der induktive Widerstand einer Spule R_L mit der Frequenz f und der Selbstinduktion L wächst. Eine Rechnung, die hier nicht weiter ausgeführt wird, ergibt:

$$4.8.1 \quad R_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \omega L$$

Diese Berechnung soll nun herangezogen werden, um die Induktivität L und L' des Spulenbausteines mit $w = 600$ Windungen und $w' = 300$ Windungen (Mittelabgriff) zu messen.

Wenn man den Widerstand des Spulendrahtes vernachlässigt (vgl. 4.10), kann man schreiben:

$$\frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} \approx R_L = \omega L$$

Versuch 28

Die Versuchsanordnung ist fast die gleiche wie bei Versuch 27. Der Kondensator ist durch den Spulenbaustein ersetzt. Außerdem ist ein Potentiometerbaustein in den Stromkreis geschaltet, um I_{eff} noch regeln zu können. Wenn man effektive Stromstärken zuläßt, die wesentlich über 10 mA hinausgehen, dann geht die Induktivität L zurück. Dies erklärt sich aus der Tatsache, daß der Verstärkungsfaktor μ_r abnimmt bei Zunahme der erregenden Stromstärke I_{err} . (Vgl. Abb. 4.0.d.)

Der Versuch ergibt die folgenden Meßwerte:

Tabelle 4.8.1

Klemmen am Trafo	U_{eff} (V)	I_{eff} (mA)	R_L (Ω)	$L = \frac{R_L}{\omega}$ (H)	Windungszahl
b und d	4	12	330	1	600
b und d	5	20	250	0,8	600
b und d	6,7	40	165	0,5	600
b und d	8	60	133	0,4	600
b und d	0,45	12	80	0,25	300 (Mittelanz.)

Aus Tabelle 4.8.1 ersieht man, daß bei halber Windungszahl L auf $L' = \frac{L}{4}$ zurückgeht (vgl. 4.0.10). Die Abnahme der Induktivität L mit zunehmender Strombelastung wird ebenfalls deutlich.

4.9 Ohmscher Widerstand und kapazitiver Widerstand in Reihe. Scheinwiderstand.

Den Widerstand eines Drahtes z. B., der bei Gleich- und Wechselstrom gleich groß ist, nennen wir im folgenden einen Ohmschen Widerstand R_0 ¹⁾, um ihn von den typischen Wechselstromwiderständen R_C und R_L zu unterscheiden. Bei einem rein Ohmschen Widerstand ist Spannung U und Strom I immer in Phase (Abb. 4.9.1), und in jedem Augenblick ist $U = R_0 \cdot I$.

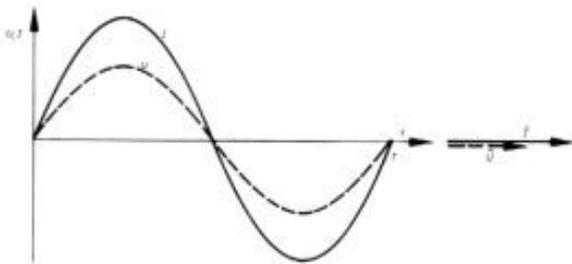


Abb. 4.9.1

Bei einem rein kapazitiven Widerstand eilt der Strom I der Spannung U um 90° voraus (Abb. 4.9.2).

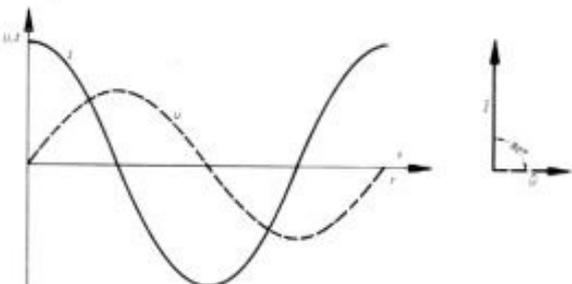


Abb. 4.9.2

Es ist $\dot{U} = R_C \cdot \dot{I}$ und $U_{eff} = R_C \cdot I_{eff}$, aber **nicht** in jedem Augenblick $U = R_C I$.

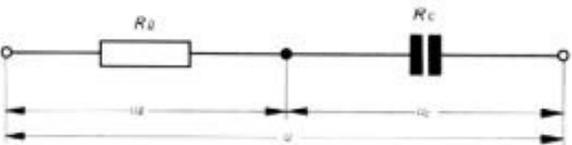


Abb. 4.9.3

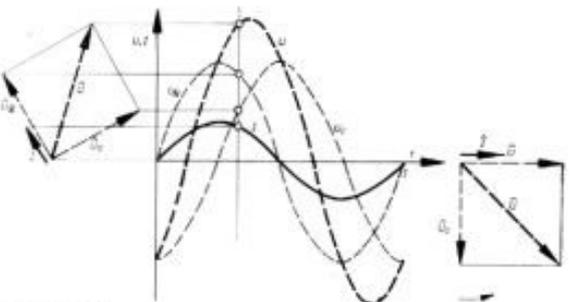


Abb. 4.9.4

In Abb. 4.9.3 ist ein Ohmscher Widerstand R_0 und ein kapazitiver Widerstand R_C in Reihe ge-

schaltet. Legt man eine sinusförmige Wechselspannung U an, so ist der Strom I natürlich in jedem Augenblick für beide Widerstände gleich. Man erhält das Diagramm der Abb. 4.9.4.

Für die momentane Gesamtspannung U gilt in jedem Augenblick: (4.9.1) $U = U_0 + U_C$
Man erhält den Verlauf der Gesamtspannung, wenn man in jedem Augenblick die Momentanwerte U_0 und U_C addiert.

Man zeichnet im Zeigerdiagramm den Zeiger \dot{U} als Diagonale eines Rechtecks, dessen Seiten die Zeiger \dot{U}_C und \dot{U}_0 bilden. Läßt man diese Zeigeranordnung in der bekannten Weise rotieren, so setzt sich in jedem Augenblick die Projektion von \dot{U} aus den Projektionen von \dot{U}_0 und \dot{U}_C zusammen, das heißt es ist in jedem Augenblick $U = U_0 + U_C$ und \dot{U} ist der Zeiger, der die Gesamtspannung U darstellt. Daraus folgt nun:

(4.9.2) $\dot{U}^2 = \dot{U}_0^2 + \dot{U}_C^2$ (Lehrsatz des Pythagoras)
Die gleiche Beziehung gilt auch für die entsprechenden effektiven Werte.

Das Verhältnis $\frac{\dot{U} \cdot \sqrt{2}}{I \cdot \sqrt{2}} = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$ stellt den Gesamtwiderstand dieser Kombination aus R_0 und R_C dar. Man bezeichnet diesen Gesamtwiderstand als den Scheinwiderstand R_S .

Mit $\dot{U}_C = R_C \dot{I}$ und $\dot{U}_0 = R_0 \dot{I}$ erhält man:

$\dot{U} = \dot{I} \sqrt{R_0^2 + R_C^2}$ und daraus:

$$(4.9.3) \quad R_S = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \sqrt{R_0^2 + R_C^2}$$

Versuch 29

In diesem Versuch sollen die Formeln 4.9.2 und 4.9.3 nachgewiesen werden.

Man bestimmt zunächst den kapazitiven Widerstand R_C eines Kondensators mit der Kapazität $C = 10 \mu F$ (vgl. 4.5), stellt das eine Potentiometer (R_3) so ein, daß es einen Ohmschen Widerstand R_0 der gleichen Größe hat, und schaltet die beiden Widerstände in Reihe. Mit dem zweiten Potentiometer (R_4) stellt man den Strom I_{eff} so ein, daß sich brauchbare Spannungen ablesen lassen. Ein geeigneter Wert ist $I_{eff} = 20 \text{ mA}$.

Mit dem getrennt aufgebauten Voltmeter mißt man dann die Spannung am Kondensator (Meßpunkt 1 und 2), am Widerstand (2 und 3) und die gesamte Spannung (1 und 3). Man erhält die folgenden Werte:

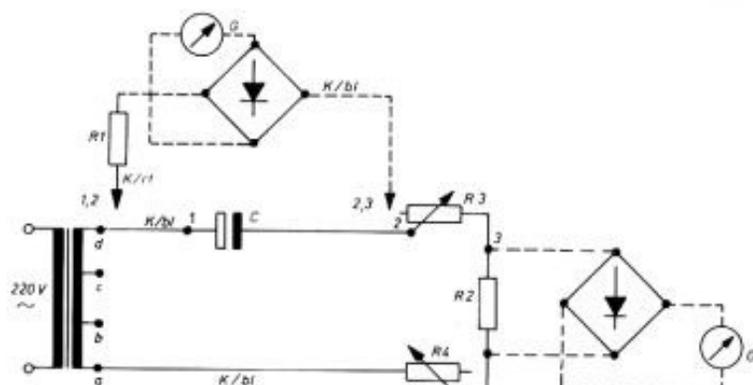
$$U_{12} = 6,5 \text{ V} \quad I = 20 \text{ mA} \quad R_C = 325 \Omega$$

$$U_{23} = 6,5 \text{ V} \quad I = 20 \text{ mA} \quad R_0 = 325 \Omega$$

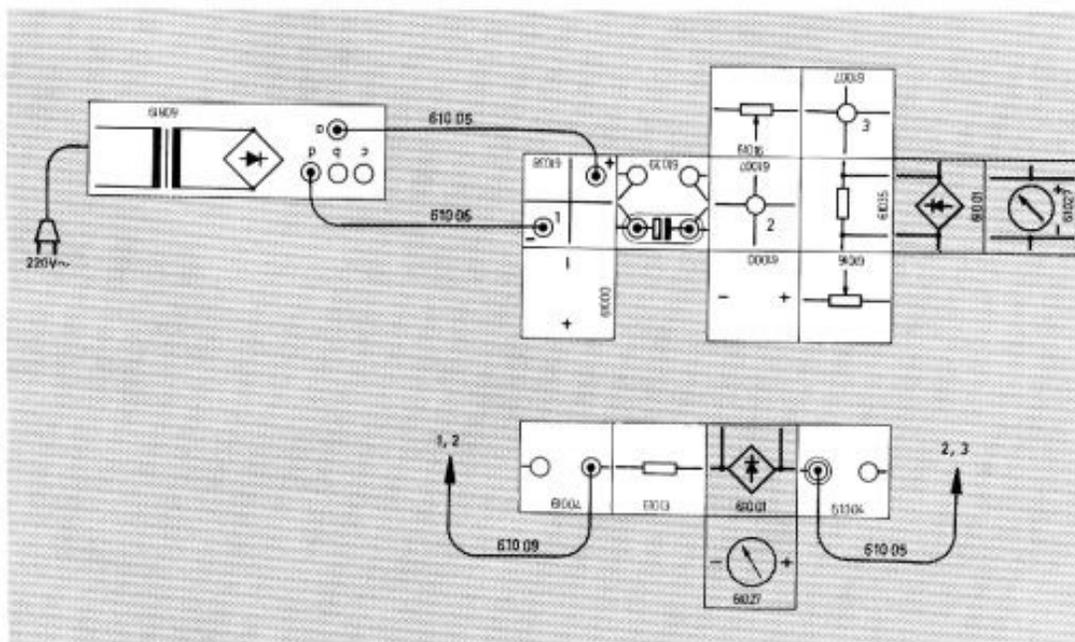
$$U_{13} = 9 \text{ V} \quad I = 20 \text{ mA} \quad R_S = 450 \Omega$$

$$\sqrt{6,5^2 + 6,5^2} = 9,2 \text{ V} \quad \sqrt{325^2 + 325^2} = 460 \Omega$$

¹⁾ Während in den Abbildungen der Ohmsche Widerstand und Spannungen am Ohmschen Widerstand durch den Index Ω charakterisiert sind, muß aus drucktechnischen Gründen im Text der Index Ω (Ohm) benutzt werden.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
	2	Verbindung, + -	610 00
	1	Buchse, 4fach	610 39
	2	Verbindung	610 07
R3/R4	2	Potentiometer, 1 kΩ	610 16
G	1	Instrument	610 27
	1	Meßgleichrichter	610 01
R2	1	Widerstand, 12 Ω	610 35
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
R1	1	Widerstand, 100 kΩ	610 13
K/bl.	3	Kabel, blau	610 05
C	1	Elko, 10 μF	923 7 2134 0
K/rt	1	Kabel, rot	610 09
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	1	Stecker, 2fach	610 40



4.10 Ohmscher Widerstand und induktiver Widerstand in Reihe. Scheinwiderstand

Wenn man in Anlehnung an 4.9 den kapazitiven Widerstand R_C durch einen induktiven Widerstand R_L ersetzt (Abb. 4.10.1), ergeben sich ganz ähnliche Diagramme.

Es ist nur zu beachten, daß bei einem rein induktiven Widerstand der Strom I der Spannung U um 90° nacheilt. An Stelle von Abb. 4.9.4 erhält man die Abb. 4.10.2.

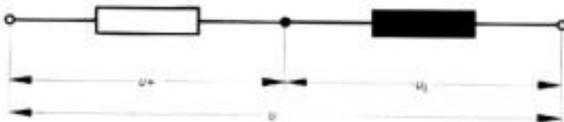


Abb. 4.10.1

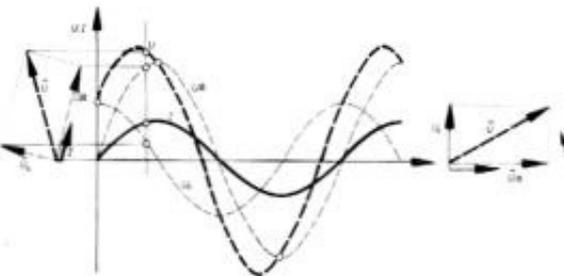


Abb. 4.10.2

Entsprechend den Ausführungen in 4.9 ergibt sich:

$$(4.10.2) \quad U^2 = U_R^2 + U_L^2 \text{ und}$$

$$(4.10.1) \quad U_{\text{eff}}^2 = U_R^2 + U_L^2$$

Für den Scheinwiderstand R_S gilt:

$$(4.10.3) \quad R_S = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \frac{U}{I} = \sqrt{R_0^2 + R_L^2}$$

Versuch 30

Der experimentelle Nachweis der Beziehungen 4.10.2 und 4.10.3 erfolgt auf gleiche Weise wie in Versuch 29.

Bei dem vorliegenden Versuch ist zu beachten, daß die Induktivität des Spulenbausteines und damit sein induktiver Widerstand R_L von der Höhe der effektiven Stromstärke abhängt (vgl. 4.8). Mit steigender Stromstärke geht L und der induktive Widerstand etwas zurück. Für effektive Stromstärken zwischen 10 und 20 mA erhält man eine Induktivität von ungefähr 1 H.

Gemessene Werte ($I_{\text{eff}} = 15 \text{ mA}$):

$$U_{12} = 4,5 \text{ V} \quad R_L \approx 300 \Omega$$

$$U_{32} = 4,5 \text{ V} \quad R_0 \approx 300 \Omega$$

$$U_{13} = 6,5 \text{ V} \quad R_S \approx 430 \Omega$$

$$U_{13} = \sqrt{4,5^2 + 4,5^2} = 6,3 \text{ V}$$

$$R_S = \sqrt{300^2 + 300^2} = 420 \Omega$$

In 4.8 wurde die Induktivität L des Spulenbausteines unter Vernachlässigung des Ohmschen Widerstandes des Spulendrahtes ermittelt. Es soll nunmehr geprüft werden, ob diese Vernachlässigung erlaubt war.

Der Ohmsche Widerstand der Spule beträgt $R_0 = 15 \Omega$

In 4.8 wurde bei einer Spannung $U_{\text{eff}} = 4 \text{ V}$ ein Strom $I_{\text{eff}} = 12 \text{ mA}$ gemessen. Das ergibt unter Vernachlässigung von R_0 :

$$R_L = \frac{4 \text{ V}}{12 \text{ mA}} = 333 \Omega = 314 \frac{1}{\text{s}} \cdot L$$

$$L = \frac{333 \Omega \text{ s}}{314} = 1,060 \text{ H}$$

Berücksichtigt man $R_0 = 15 \Omega$, so erhält man nach 4.10:

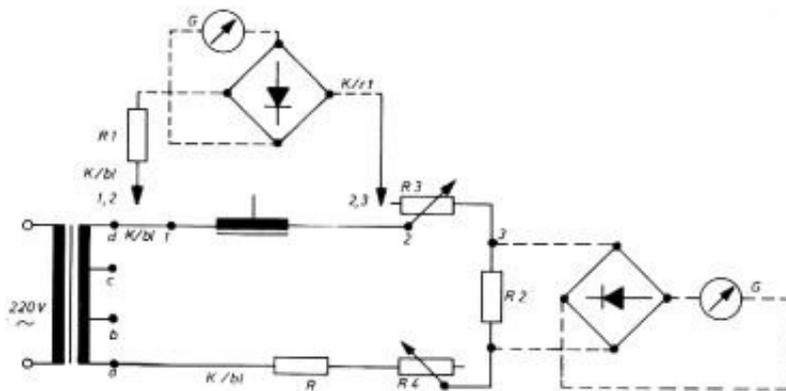
$$R_S = \frac{4 \text{ V}}{12 \text{ mA}} = 333 \Omega = \sqrt{10^2 + (\omega L)^2}$$

$$(\omega L)^2 = 333^2 - 10^2$$

$$L = \frac{\sqrt{333^2 - 15^2}}{\omega} = \frac{331 \Omega \text{ s}}{314} = 1,05 \text{ H}$$

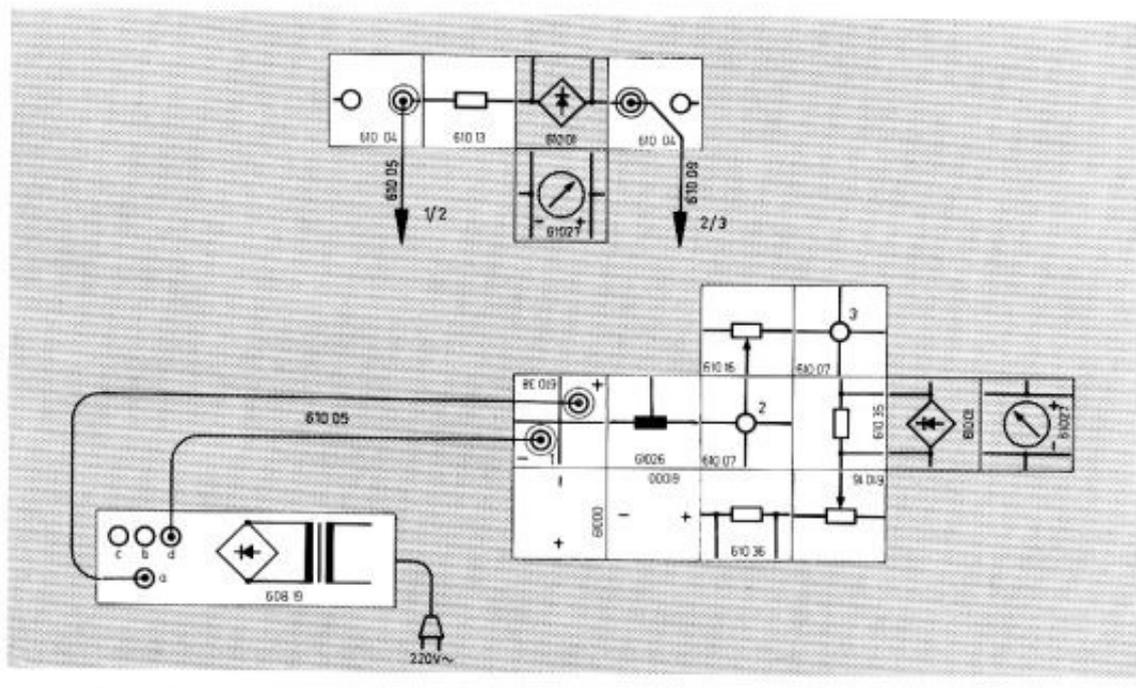
Die Korrektur liegt also weit innerhalb der Meßgenauigkeit.

¹⁾ Während in den Abbildungen der Ohmsche Widerstand und Spannungen am Ohmschen Widerstand durch den Index Ω charakterisiert sind, muß aus drucktechnischen Gründen im Text der Index Ω (Ohm) benutzt werden.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
	2	Verbindung, + -	610 00
	2	Verbindung	610 07
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Spule, 1 H	610 26
R3/R4	2	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
G	1	Instrument	610 27
	1	Meßgleichrichter	610 01
R2	1	Widerstand, 12 Ω	610 35
R1	1	Widerstand, 100 k Ω	610 13
K/bl.	3	Kabel, blau	610 05
R	1	Widerstand, 133 Ω ¹⁾	610 36
K/rt.	1	Kabel, rot	610 09

¹⁾ Schutzwiderstand



4.11 R_0 , R_L und R_C in Reihe

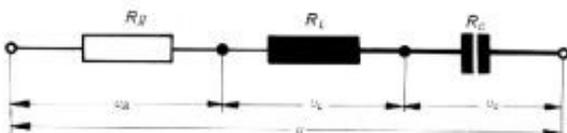


Abb. 4.11.1

Sind Ohmscher Widerstand R_0 , induktiver Widerstand R_L und kapazitiver Widerstand R_C in Reihe geschaltet (Abb. 4.11.1), so werden sie von ein und demselben Strom I durchflossen. Für die Spannungen an den genannten Widerständen gilt:

$$U_0 = R_0 \cdot I, U_L = R_L \cdot I, U_C = R_C \cdot I$$

Man erhält das Diagramm der Abbildung 4.11.2.

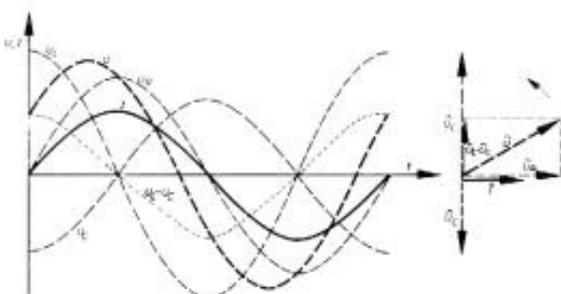


Abb. 4.11.2

Die Gesamtspannung U setzt sich in jedem Augenblick aus den einzelnen Momentanspannungen zusammen:

$$(4.11.1) \quad U = U_0 + U_L + U_C$$

Für \hat{U} ergibt sich aus dem Zeigerdiagramm:

$$(4.11.2) \quad \hat{U}^2 = \hat{U}_0^2 + (\hat{U}_L - \hat{U}_C)^2$$

Für den Scheinwiderstand R_S dieser Widerstandskombination erhält man:

$$R_S = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\hat{I}} = \frac{\hat{I} \sqrt{R_0^2 + (R_L - R_C)^2}}{\hat{I}}$$

und somit:

$$(4.11.3) \quad R_S = \sqrt{R_0^2 + (R_L - R_C)^2}$$

Bei dieser Widerstandskombination kann also der Fall eintreten, daß der Gesamtwiderstand R_S kleiner ist als die Einzelwiderstände. Wenn R_L gleich R_C ist, heben sich diese Widerstände in ihrer Wirkung auf, und der Gesamtwiderstand ist gleich dem Ohmschen Widerstand. Dieser Ohmsche Widerstand ist auch vorhanden, wenn man eine Spule und eine Kapazität allein kombiniert, da der Draht der Spule immer einen Ohmschen Widerstand aufweist.

Versuch 31

Die Versuchsanordnung ist im Prinzip die gleiche wie in 4.9 und 4.10.

Wir schalten den Spulenbaustein, in dem der Ohmsche Widerstand schon enthalten ist, in Reihe mit einem Kondensator der Kapazität C . Von besonderem Interesse ist die Anordnung, bei der kapazitiver Widerstand R_C und induktiver Widerstand R_L gleich groß sind. Bei technischem Wechselstrom mit $f = 50 \text{ Hz}$ bedeutet das, da die Induktivität der Spule je nach Belastung zwischen $L = 1 \text{ H}$ und $L' = 0,5 \text{ H}$ schwankt, eine Kapazität zwischen $C = 10 \mu\text{F}$ und $C' = 20 \mu\text{F}$.

Aus $R_C = \frac{1}{\omega C} = \omega L = R_L$ folgt nämlich:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} \approx \frac{\text{s}^2}{10^3 \cdot 1 \text{ H}} = 10 \mu\text{F}$$

$$C' = \frac{1}{\omega^2 L'} \approx \frac{\text{s}^2}{10^3 \cdot 0,5 \text{ H}} = 20 \mu\text{F}$$

Man erhält die Meßwerte der Tabelle 4.11.1.

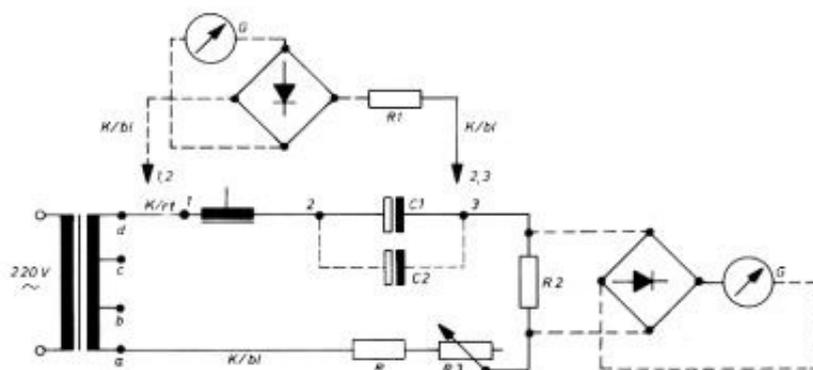
Tabelle 4.11.1

I_{eff} (mA)	C (μF)	L (H)	R_C (Ω)	R_L (Ω)	U (V)	U_C (V)	U_L (V)	R_S (Ω)
10	10	1	320	314	1,8	3,2	3,1	180
20	10	0,8	320	250	3	6,4	5	150
20	15	0,8	210	240	2,3	4,3	4,8	115

Die Meßwerte bestätigen die Formeln 4.11.2 und 4.11.3.

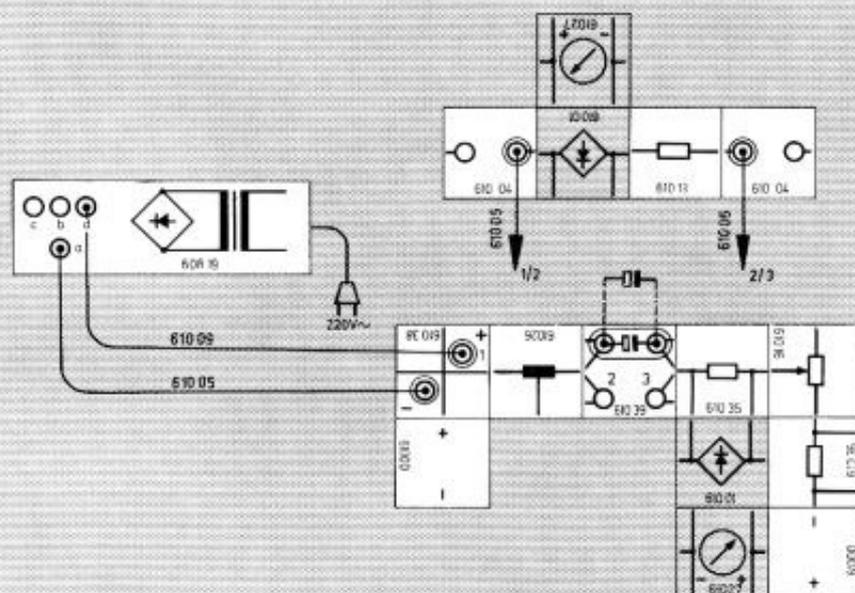
Es fällt auf, daß auch für $R_C \approx R_L$ der Gesamtwiderstand R_S immer noch wesentlich größer ist als der Ohmsche Widerstand der Spule ($R_0 \approx 15 \Omega$). Dieser Unterschied erklärt sich aus der Tatsache, daß in dem Eisenkern beim Ummagnetisieren und im Dielektrikum des Kondensators Wärmeverluste auftreten, die sich wie ein zusätzlicher Ohmscher Widerstand auswirken.

¹⁾ Während in den Abbildungen der Ohmsche Widerstand und Spannungen am Ohmschen Widerstand durch den Index Ω charakterisiert sind, muß aus drucktechnischen Gründen im Text der Index O (Ohm) benützt werden.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
C2	1	Elko, 5 μ F	923 7 1960 0
	1	Trafo	608 19
	2	Verbindung, + -	610 00
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	1	Spule, 1 H	610 26
	1	Buchse, 4fach	610 39
R2	1	Widerstand, 12 Ω	610 35
R3	1	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
	1	Meßgleichrichter	610 01
G	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Instrument	610 27
R1	1	Widerstand, 100 k Ω	610 13
	1	Stecker, 2fach	610 40
K/bl	3	Kabel, blau	610 05
C1	1	Elko, 10 μ F	923 7 2134 0
R	1	Widerstand, 133 Ω ¹⁾	610 36
K/rt	1	Kabel, rot	610 09

¹⁾ Schutzwiderstand



4.12 R_C und R_L parallel

In Abb. 4.12.1 ist die Induktivität zu der Kapazität C parallel geschaltet.

Am induktiven und kapazitiven Stromzweig liegt dieselbe Spannung U . Der Gesamtstrom I ergibt sich als Summe des kapazitiven Stromes

$$I_C = \frac{U}{R_C} \text{ und des induktiven Stromes } I_L = \frac{U}{R_L}.$$

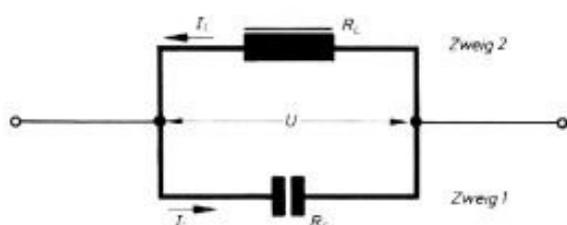


Abb. 4.12.1

Der kapazitive Strom I_C eilt der Spannung U um 90° voraus, während der induktive Strom I_L der Spannung U um 90° nachhinkt (Abb. 4.12.2).

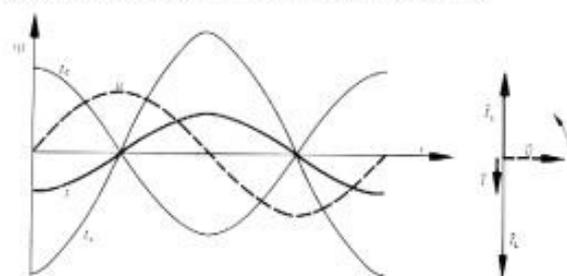


Abb. 4.12.2

Aus Abb. 4.12.2 ersieht man, daß der Gesamtstrom I zu Null wird, wenn die beiden Teilströme I_C und I_L gleich groß sind. Es tritt dann der interessante Fall ein, daß sowohl im induktiven, wie auch im kapazitiven Stromkreis ein starker Strom fließt, während die Stromzuführungen stromlos bleiben. Dies bedeutet, daß für $R_L = R_C$ der Gesamtwiderstand der Anordnung unendlich groß wird.

$$\text{Aus } R_L = R_C \text{ folgt } \omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \text{ und } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Die Parallelschaltung v. Induktivität L u. Kapazität C stellt somit für die Kreisfrequenz $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (Resonanzfrequenz) einen Sperrkreis dar.

Die bisher geschilderten Verhältnisse stellen aber einen Idealfall dar. In jeder Spule stellt der Widerstand des Drahtes, aus dem die Spule gewickelt ist, einen Ohmschen Widerstand dar; außerdem wirken sich die unvermeidlichen Wärmeverluste im Eisenkern der Spule und im Dielektrikum der Kondensatoren so aus, als ob mit der Spule bzw. dem Kondensator ein weiterer

Ohmscher Widerstand in Reihe geschaltet wäre (4.11). Weitere Ohmsche Widerstände sind zu berücksichtigen, wenn man im sogenannten Dreilämpchen-Versuch als Stromanzeiger 3 Glühlämpchen in Haupt- und Zweigleitungen schaltet. Das Zeigerdiagramm nimmt dann das Aussehen der Abb. 4.13.3 an.

I erhält man als Diagonale eines Parallelogramms, dessen Seiten die Zeiger von I_1 und I_2 bilden.

I_1 ist der Strom in dem Zweig, der sich aus Kapazität C und Ohmschem Widerstand R_1 zusammensetzt, I_2 ist der Strom in dem Zweig, der sich durch Induktivität L und Ohmschem Widerstand R_2 zusammensetzt.

Versuch 32

In den Zweig 2 wird zunächst der Spulenbaustein eingeschaltet mit $w = 600$. Der Zweig 1 bleibt unterbrochen. Mit dem Potentiometer wird die Stromstärke $I = I_2 \approx 25 \text{ mA}$ (5 Skalenteile) eingestellt.

Man richtet Stecker mit den Kapazitäten $C = 5 \mu\text{F}$, $10 \mu\text{F}$ und $50 \mu\text{F}$ her. Man steckt erst $5 \mu\text{F}$ ein, dann $10 \mu\text{F}$ dazu parallel, so daß insgesamt $15 \mu\text{F}$ entstehen, dann steckt man noch weitere $50 \mu\text{F}$ dazu parallel, so daß insgesamt $65 \mu\text{F}$ entstehen, und beobachtet den Gesamtstrom I . Man erhält die Meßwerte der Tabelle 4.12.1.

Tabelle 4.12.1

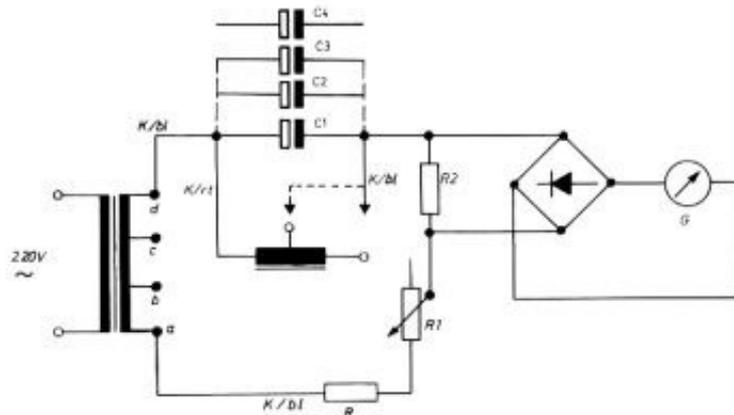
L (H)	C (μF)	I (mA)	R_L (Ω)	R_C (Ω)
0,7	—	26	220	∞
0,7	5	25	220	660
0,7	15	20	220	220
0,7	65	30	220	50

Nunmehr schaltet man in den Zweig 2 den Spulenbaustein mit $w = 300$ und benützt Stecker mit den Kapazitäten $10 \mu\text{F}$, $50 \mu\text{F}$, $100 \mu\text{F}$. Man erhält entsprechend die in Tabelle 4.12.2 zusammengestellten Meßwerte. Die Werte L und L' hängen von der Stromstärke ab. (Vgl. 4.3.)

Tabelle 4.12.2

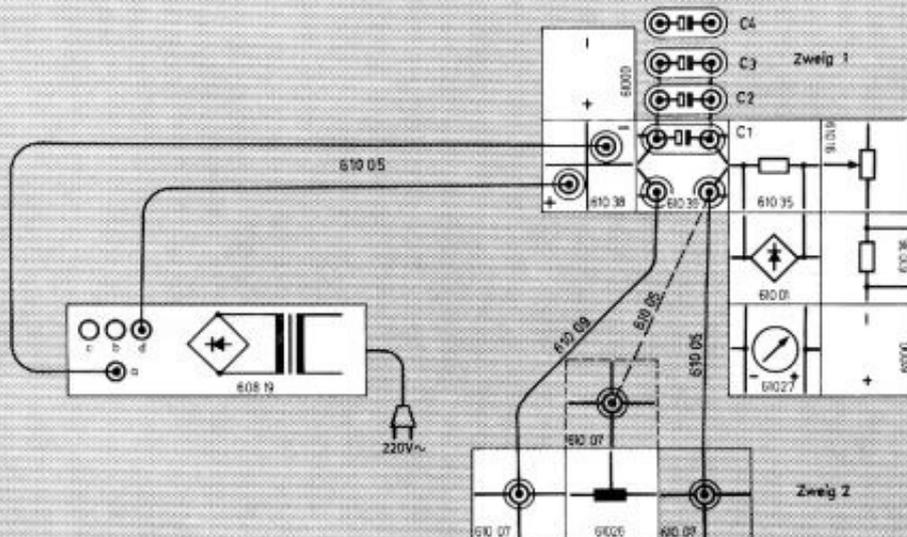
L' (H)	C (μF)	I (mA)	R_L (Ω)	R_C (Ω)
0,17	—	26	54	
0,17	10	25	54	330
0,17	60	24	54	54
0,17	160	27	54	20

Das Meßergebnis bestätigt, daß der Gesamtstrom I entsprechend Abb. 4.12.2 einen Minimalwert aufweist, wenn $I_1 \approx I_2$ ist. Wenn in beiden Zweigen der Ohmsche Widerstand gleich groß angenommen wird, ist $I_1 = I_2$, wenn $R_C = R_L$ ist.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
	2	Verbindung, + -	610 00
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	1	Buchse, 4fach	610 39
R2	1	Widerstand, 12 Ω	610 35
R1	1	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
	1	Meßgleichrichter	610 01
G	1	Instrument	610 27
	2	Verbindung	610 07
K/bl	3	Kabel, blau	610 05
	4	Stecker, 2fach	610 40
C2	1	Elko, 10 μ F	923 7 2134 0
C3	1	Elko, 50 μ F	923 7 1960 0
R	1	Widerstand, 133 Ω ' ¹⁾	610 36
	1	Spule, 1H	610 26
C1	1	Elko, 5 μ F	923 7 2323 0
C4	1	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0
K/r1	1	Kabel, rot	610 09

¹⁾ Schutzwiderstand



4.13 Dreilämpchen-Versuch

Eine Möglichkeit, alle 3 Ströme (I , I_1 u. I_2) gleichzeitig zu beobachten, stellt der „3-Lämpchen“-Versuch dar. 3 Glühlämpchen dienen dabei als Amperemeter für I , I_1 und I_2 . Wenn man die Glühlämpchen bei schwacher Rotglut betrachtet, haben sie einen Widerstand von etwa 100Ω . Bei schwacher Rotglut nehmen sie einen Strom auf von etwa 15 mA . Bei dieser Stromstärke hat der Spulenbaustein die Induktivität $L \approx 1 \text{ H}$. Wählt man einen Kondensator mit $C = 10 \mu\text{F}$, so wird im Zweig 1 ein Ohmscher Widerstand (ohne Wärmeverluste des Kondensators) von 100Ω und ein kapazitiver Widerstand $R_C \approx 320 \Omega$ in Reihe geschaltet. Im Zweig 2 sind ein induktiver Widerstand $R_L \approx 320 \Omega$ und der gleich große Ohmsche Widerstand (ohne Ohmschen Widerstand der Spule und ohne magnetische Verluste) von 100Ω in Reihe geschaltet. Man erhält die Zeigerdiagramme, wie sie in Abb. 4.13. (1–3) dargestellt sind.

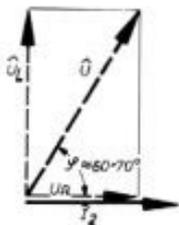


Abb. 4.13.1

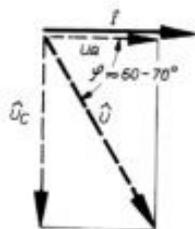


Abb. 4.13.2

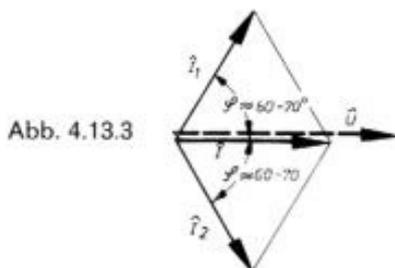


Abb. 4.13.3

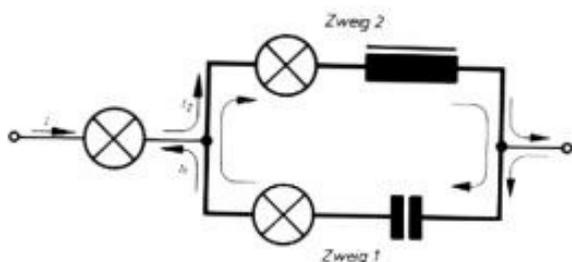


Abb. 4.13.4

Versuch 33

Das Zeigerdiagramm 4.13.3 kann im Versuch leicht kontrolliert werden. Legt man an die angegebene Versuchsanordnung eine Spannung von $\approx 12 \text{ V}$ an (Trafoklemmen b und d), so zeigen alle drei Glühlämpchen eine gleich schwache Rotglut ($\approx 15 \text{ mA}$). Unterbindet man einen Stromzweig, so bleibt der Gesamtstrom etwa gleich. Wählt man eine Spannung $U = 15 \text{ V}$ (Trafoklemmen a und d), so ist I_2 etwas größer als I_1 , da bei größerer Stromstärke die Induktivität L der Spule abnimmt und bei kleinerem induktivem Widerstand R_L über den induktiven Zweig 2 ein größerer Strom als über den kapazitiven Zweig 1 fließt (I_2 größer als I_1). Siehe Abb. 4.13.5.

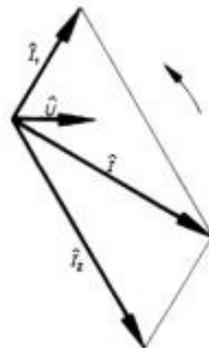


Abb. 4.13.5

Wählt man im Zweig 2 eine Induktivität $L' \approx \frac{L}{4}$ ($w' = 300$, Mittelabgriff) und schaltet entsprechend in den Zweig 1 $C = 20 \mu\text{F}$, so überwiegt in beiden Zweigen der Ohmsche Widerstand, und man erhält das Zeigerdiagramm der Abb. 4.13.6. Aus diesem Diagramm ist ersichtlich, daß I wesentlich größer ist als I_1 bzw. I_2 .

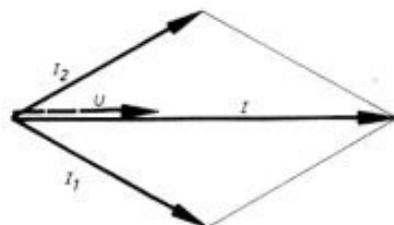


Abb. 4.13.6

5. Generatoren

5.0 Elektrische Schwingungen Mechanische Analogie

Wenn man – es ist mit den vorliegenden Bausteinen leider nicht möglich – den in 4.13 besprochenen „3-Lämpchen-Versuch“ aus einem kapazitiven und einem induktiven Stromzweig mit vernachlässigbarem Ohmschen Widerstand aufbaut, so heben sich in der Zuleitung der kapazitive Strom und der induktive Strom fast vollständig auf, sofern $R_C = R_L$, d. h. $\frac{1}{\omega C} = \omega L$ ist.

Aus $\frac{1}{\omega C} = \omega L$ folgt:

$$(5.0.1) \quad \omega^2 = \frac{1}{LC} \quad \text{und} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Wählt man also eine Spannungsquelle mit der Kreisfrequenz $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, so fließt über die Zuleitung ein unbedeutender Strom, während in dem aus Induktivität und Kapazität gebildeten Stromkreis ein starker Wechselstrom fließt. Man spricht von dem aus L und C gebildeten Schwingkreis und einer elektrischen Schwingung der Kreisfrequenz ω .

In Abb. 4.12.1 ist dieser Schwingkreis durch verstärkte Strichführung besonders hervorgehoben. Entfernt man die Verbindung mit der Wechselstromquelle, so hört die elektrische Schwingung, je nach Größe des noch vorhandenen Widerstandes, mehr oder weniger rasch auf. Man erhält eine sogenannte gedämpfte elektrische Schwingung. Der Strom in der Zuleitung hat vor dem Abtrennen gerade die Wärmeverluste ersetzt und eine ungedämpfte elektrische Schwingung aufrechterhalten.

Der entscheidende Nachteil dieser Anordnung ist, daß für das Anregen einer elektrischen Schwingung schon ein Generator mit der entsprechenden Kreisfrequenz zur Verfügung stehen muß. Ein anderer Weg zur Herstellung und auch zum Verständnis der elektrischen Schwingungen führt über die mechanische Schwingung eines Federpendels. Unter einem Federpendel versteht man einen Körper der Masse m , der an einer elastischen Schraubenfeder (evtl. auch Gummischnur) aufgehängt ist (Abb. 5.0.1).

In der Gleichgewichtslage ist die Feder um das Stück verlängert, das dem Gewicht der Masse entspricht. Zieht man die Masse m mit der Kraft F noch ein Stück s aus der Gleichgewichtslage nach unten, so besitzt die Feder die Spannungsenergie $\frac{1}{2} F \cdot s$. Die Spannungsenergie ist gleich der mechanischen Arbeit, die man aufwenden

muß, um eine Feder um die Strecke s zu dehnen. Beim Ausziehen steigt die Kraft gleichmäßig von 0 auf F an, so daß man bei der Berechnung der Arbeit W (Kraft \times Weg) nur die mittlere Kraft $\frac{F}{2}$ anzusetzen hat.

Man erhält also $W = \frac{F}{2} \cdot s$.

Läßt man jetzt die Masse los, so verwandelt sich die Spannungsenergie der Feder in die Bewegungsenergie $\frac{1}{2} m v^2$, wobei v die Geschwindigkeit ist, mit der die Masse m die Gleichgewichtslage passiert (Abb. 5.0.1 b).

Die kinetische Energie verwandelt sich wieder in Spannungsenergie (5.0.1 c), die Spannungsenergie wieder in kinetische Energie (Abb. 5.0.1 d) usw. Infolge Luftreibung und innerer Reibung der Feder treten Energieverluste auf, und die mechanische Schwingung ist gedämpft.

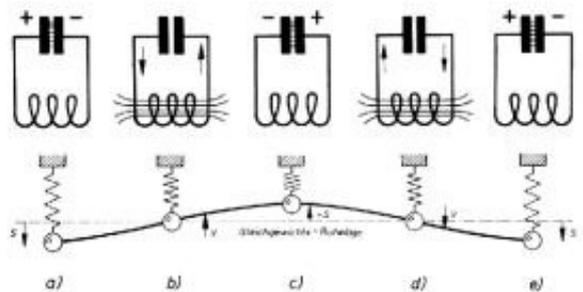


Abb. 5.0.1

Wenn man diesen mechanischen Versuch mit verschiedenen Schraubenfedern bzw. Gummischnüren und verschiedenen Massen durchführt, stellt man fest, daß die Schwingungsdauer T um so größer wird, je größer die angehängte Masse m und je größer die Nachgiebigkeit der Feder f ist. Den beiden wesentlichen Bauteilen des mechanischen Federpendels (Masse und Feder) entsprechen nun bestimmte elektrische Bauelemente. Der Masse m entspricht, wie in 4.0.c ausführlich besprochen wurde, die Induktivität L . Nach den Ausführungen in 4.0.c entspricht der Kraft F die Spannung U und der Geschwindigkeit v die Stromstärke I . Wenn v und I einander entsprechen, müssen es auch der Weg $s = v \cdot t$ und die Ladung $Q = I \cdot t$.

Die Ladung Q , die ein Kondensator aufnimmt, ist um so größer, je größer die Spannung U und die Kapazität C ist ($Q = C \cdot U$). Ganz Entsprechendes gilt nun für eine Feder. Die Strecke s (Q), um die eine Feder verlängert wird, ist um so größer, je größer die Kraft F (U) und die Nach-

giebigkeit f (C) der Feder ist. Die gespeicherte Energie eines Kondensators $\frac{1}{2} QU$ entspricht der Spannungsenergie der Feder $\frac{1}{2} s F$. Feder und Kondensator sind also entsprechende Bauteile. Wie man mit Feder und Masse eine mechanische Schwingung herstellen kann, so kann man mit Spule und Kondensator eine elektrische Schwingung herstellen (Abb. 5.0.1).

Der elektrische Schwingungsvorgang läuft ganz analog zu der mechanischen Schwingung des Federpendels ab.

In Abb. 5.0.1 a ist der Kondensator aufgeladen und besitzt die elektrische Energie $E_{el} = \frac{1}{2} QU$ (I, 6.6). Beim Entladen des Kondensators wandelt sich die elektrische Energie in die magnetische Energie der Spule $E_{magn} = \frac{1}{2} LI^2$, die ihren Höchstwert annimmt, wenn der Kondensator vollständig entladen ist. ($\frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} LI^2$), vgl. Abb.

1b. Die magnetische Energie der Spule wandelt sich wieder in die elektrische Energie des Kondensators, die bei umgekehrter Polung den alten Wert annimmt (Abb. 1c), wenn nicht durch Wärme Energieverluste eingetreten sind. Nunmehr läuft

der Vorgang in umgekehrter Richtung ab und wiederholt sich dann periodisch. Durch die unvermeidlichen Wärmeverluste werden aber die Aufladungen des Kondensators immer kleiner und kleiner. Man erhält eine gedämpfte Schwingung. Wie die Schwingungsdauer des Federpendels von der Nachgiebigkeit f und der Masse m abhängt, so ist die Schwingungsdauer des elektrischen Schwingkreises durch C und L bedingt.

Die Schwingungsdauer der elektrischen Schwingung T ergibt sich aus $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, und $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Man erhält: $\frac{T}{2\pi} = \sqrt{LC}$ oder $T = 2\pi \sqrt{LC}$.

Diese Beziehung nennt man die Thomsonsche Schwingungsformel.

Statt der Nachgiebigkeit f findet man in der Literatur die sogenannte Richtgröße $D = \frac{1}{f}$.

Die Richtgröße gibt an, welche Kraft in Newton (N) erforderlich ist, um eine Feder um 1 m zu dehnen.

$$D = \frac{F}{s} \text{ und } [D] = \frac{[F]}{[s]} = \frac{N}{m}$$

In der nachstehenden Tabelle 5.0.1 sind die sich entsprechenden elektrischen und mechanischen Größen übersichtlich zusammengestellt.

Tabelle 5.0.1

elektrische Größe

Spannung	U
Strom	I
Ladung	Q = I · t
Kapazität	C
Induktivität	L
Leistung	P = U · I
Arbeit	W = UQ
Energie eines Kondensators	$\frac{1}{2} QU$
Energie einer Spule	$\frac{1}{2} LI^2$
Schwingungsdauer eines Schwingkreises	$T = 2\pi \sqrt{LC}$

mechanische Größe

Kraft	F
Geschwindigkeit	v
Weg	s = v · t
Nachgiebigkeit	$f = \frac{1}{D}$
Masse	m
Leistung	P = F · v
Arbeit	W = Fs
Spannungsenergie einer Feder	$\frac{1}{2} s F$
Bewegungsenergie	$\frac{1}{2} m v^2$
Schwingungsdauer eines Federpendels	$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}}$

5.1 Gedämpfte elektrische Schwingungen

Es wäre nun sehr anschaulich, wenn man eine so einfache Schaltung wie in Abb. 5.0.1 aufbauen und den Schwingstrom mit einem in den Schwingkreis geschalteten Meßinstrument verfolgen könnte.

Für eine Beobachtung mit einem Meßinstrument muß die Schwingungsdauer $T \approx 1$ sec. sein. Die zur Verfügung stehende Kapazität ist $C = 4 \times 100 \mu\text{F} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ F}$.

Mit der Thomsonformel erhält man dann für L:

$$L = \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot C} \approx \frac{1 \text{ s}^2}{40 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \text{ F}} \approx 60 \text{ H}$$

Eine Spule mit $L = 60 \text{ H}$ hat, wenn $A \approx 1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$, $l \approx 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ und $\mu_r = 10^3$ angenommen wird, nach Formel (4.0.10) etwa 8000 Windungen. Die Primärspule des Trafos hat nun tatsächlich 4300 Windungen. Leider ist deren Ohmscher Widerstand $R \approx 800 \Omega$. Das bedeutet eine solch starke Dämpfung, daß an eine Beobachtung mit einem Meßinstrument nicht zu denken ist. Soll die Dämpfung nicht zu sehr stören, muß man weniger Drahtwindungen nehmen. Letzteres hat eine wesentlich kleinere Induktivität L und eine zu kleine Schwingungsdauer T zur Folge. Schwingungsdauern T kleiner als 0,01 s können aber gut akustisch mit einem Lautsprecher beobachtet werden.

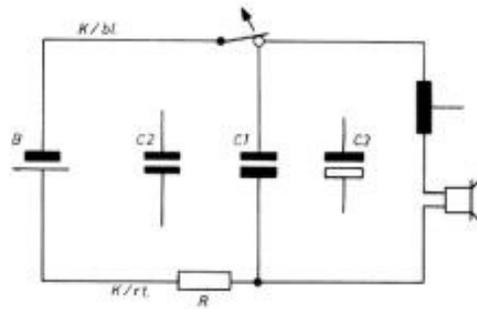
Versuch 34

Man baut einen LC-Schwingkreis gemäß der angegebenen Schaltung auf. Berührt man mit dem einen Bananenstecker die Minus-Klemme der Taschenlampenbatterie (ca. 4,5 V), so wird der Kondensator aufgeladen, und über den Lautsprecher fließt während des Berührens ein Gleichstrom, auf den der Lautsprecher nicht anspricht. Beim Öffnen des Kontaktes entlädt sich der Kondensator über die Spule und den Lautsprecher. Es entsteht eine gedämpfte Schwingung, die einen allerdings sehr kurzen Ton im Lautsprecher verursacht. Hörbare Frequenzen liegen zwischen 16 Hz und 16 000 Hz. Die Tonhöhe steigt mit der Frequenz an (vgl. 5.4). Der Ton ist um so höher, je kleiner die Kapazität C gewählt wird (0,1 μF , 1 μF). Wählt man die Kapazität $C = 400 \mu\text{F}$, so ist nichts mehr zu hören, obwohl der Kondensator jetzt eine wesentlich höhere Energie gespeichert hat, da der in den Schwingkreis geschaltete Lautsprecher bei der kleinen Frequenz zu keinem hörbaren Ton angeregt wird.

Man erhält die in Tabelle 5.1.1 zusammengestellten Verhältnisse (vgl. auch 5.4).

Tabelle 5.1.1

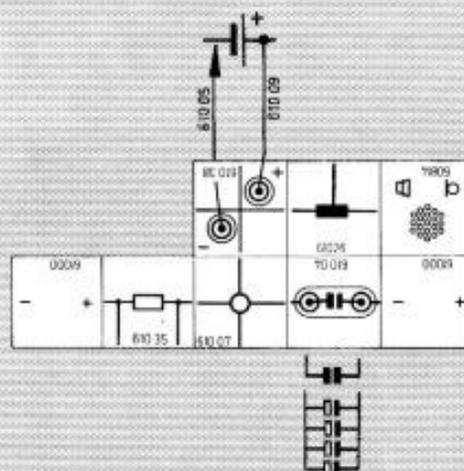
C (μF)	L (H)	T (s)	$f = \frac{1}{T}$ (Hz)	Bem.
0,1	1	0,002	500	hörbar
1	1	0,0063	160	hörbar
400	1	0,125	8	nicht hörbar



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B	1	Batterie, 4,5 V	x
	1	Verbindung	610 07
	2	Verbindung, + -	610 00
	1	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	1	Mikrofonlautsprecher	608 14
	1	Spule, 1 H	610 26
	1	Stecker, 2fach	610 40
K/rt	1	Kabel, rot	610 09
K/bl	1	Kabel, blau	610 05
C3	4	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0
C2	1	Kondensator, 1 μ F	926 7 1976 0
C1	1	Kondensator, 0,1 μ F	926 7 1833 0
	2	Krokodilklemme	970 7 2146 0
R	1	Widerstand, 12 Ω ¹⁾	610 35

x Nicht im Baukasten enthalten

¹⁾ Schutzwiderstand



5.2 Ungedämpfte elektrische Schwingungen Meißnersche Rückkopplungsschaltung

Wenn man eine ungedämpfte elektrische Schwingung erreichen will, muß man die unvermeidlichen Energieverluste wieder ersetzen. Am mechanischen Beispiel des Federpendels läßt sich in stark vereinfachter Weise zeigen, wie man grundsätzlich dabei verfahren muß. Wenn man die Schwingung in Gang setzen will, zieht man die Masse m aus der Gleichgewichtslage (0) um das Stück s nach unten in die Ausgangslage (1) und läßt sie los. Ohne Energiezufuhr kommt die mechanische Schwingung infolge der Reibung nach einiger Zeit zur Ruhe. Wenn man das Federpendel aber oben mit der Hand festhält und im richtigen Augenblick, d. h. immer dann, wenn die Masse wieder die Ausgangslage (1) erreicht hat, die Feder mit der Hand etwas nach oben zieht und die Spannungsenergie der Feder wieder auf den alten Stand bringt, erhält man eine ungedämpfte Schwingung (Abb. 5.2.1a). Der Versuch läßt sich auch mit einer Gummischnur und einem angehängten Gewicht durchführen. Auf die elektrische Schwingung übertragen bedeutet dies folgendes: Wenn der Kondensator wieder die Ausgangspolung, jedoch wegen der Wärmeverluste mit verminderter Ladung und Energie, erreicht, muß der Kondensator wieder auf die alte Energiestufe gebracht werden, indem man ihn über einen gerade in diesem Augenblick geschlossenen Schalter mit einer geeigneten Spannungsquelle verbindet (Abb. 5.2.1b).

Der Schalter muß immer dann geschlossen sein, wenn die Schwingung wieder neu einsetzt, d. h. bei jedem zweiten Nulldurchgang des Schwingstromes I_1 . In Abb. 5.2.1b müßte man ($T \approx 1 - 2$ s vorausgesetzt) zu dem Zweck das Meßinstrument im Schwingkreis beobachten und bei jedem zweiten Nulldurchgang mit der Hand den Schalter S kurzschließen.

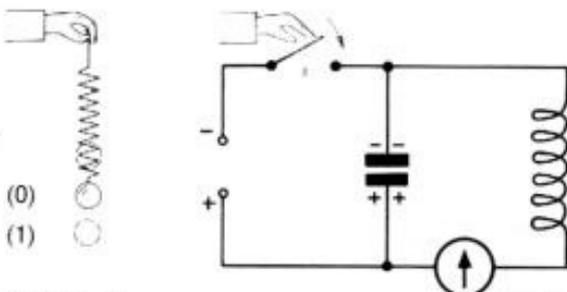


Abb. 5.2.1a

Abb. 5.2.1b

Als Schalter benutzt man bei kurzen Schwingungszeiten den Transistorbaustein, der dann leitend ist und einen geschlossenen Schalter darstellt, wenn die Basis-Emitterspannung positiv ist. In Abb. 5.2.2a, b ist der Schalter S aus Abb. 5.2.1b

durch einen Transistor ersetzt, der durch eine sogenannte Rückkopplungsspule an den Schwingkreis angekoppelt ist. Über den Ohmschen Widerstand der Rückkopplungsspule erhält die Basis eine positive Vorspannung, der sich die durch den Schwingstrom I_1 induzierte Spannung U_2 überlagert. In Abb. 5.2.3 ist U_2 in Abhängigkeit von I_1 aufgetragen entsprechend der in 4.1 besprochenen Formel $U_2 = M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$.

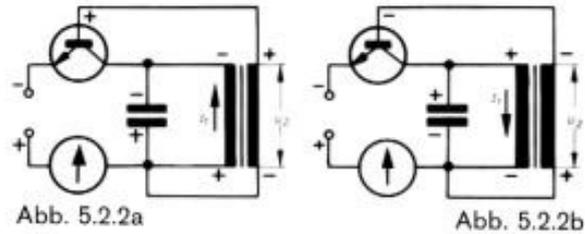


Abb. 5.2.2a

Abb. 5.2.2b

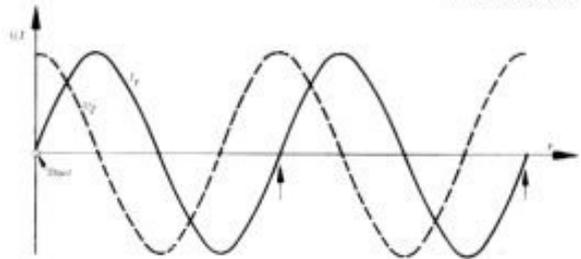


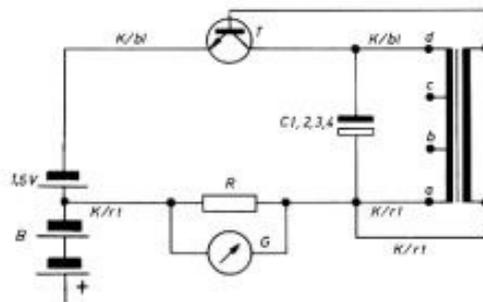
Abb. 5.2.3

U_2 ist in der Tat bei jedem 2. Nulldurchgang des Schwingstromes I_1 positiv. U_2 ist dann am größten, wenn sich der Schwingstrom am stärksten ändert, d. h. wenn $I_1 = 0$ ist.

Versuch 35

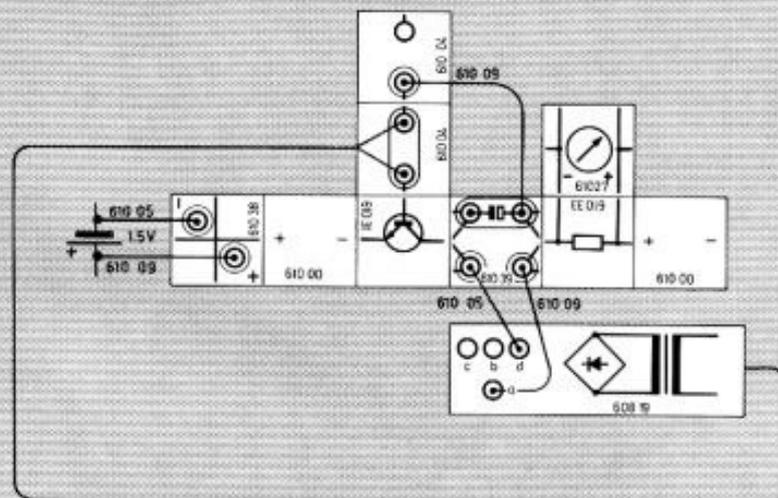
In der angegebenen Versuchsanordnung benützt man die Sekundärspule des Trafos (Klemmen a und d, $w_2 = 345$) als Schwingkreisspule ($L \approx 1$ H) und die Primärspule ($w_1 = 4350$) als Rückkopplungsspule. Als Kapazität wählt man $C = 4 \times 100 \mu\text{F}$.

Man erhält damit $T = 2\pi \sqrt{LC} \approx 6,25 \cdot 0,02 \approx 0,1$ s, also eine Schwingungsdauer, die mit dem Meßinstrument gerade noch beobachtet werden kann. Schaltet man das Meßinstrument, wie es bei diesem Versuch der Fall ist, in die Zuleitung, so mißt das Meßinstrument nicht den eigentlichen Schwingstrom I_1 , sondern das An- und Abschwellen des durch den Transistor fließenden Stromes. Dieser Vorgang läßt sich leichter beobachten als der eigentliche Schwingstrom, da das Meßinstrument den Nullpunkt links und nicht in der Mitte der Skala hat. Wenn nach dem Anlegen einer Spannung von 1,5 V das Hin- und Herpendeln des Zeigers nicht einsetzt, ist meist die Rückkopplung nicht richtig gepolt. Man braucht dann nur den Stecker in der Anschlußbuchse umzudrehen.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B	1	Batterie, 4,5 V	x
	1	Trafo	608 19
	2	Verbindung, + -	610 00
T	1	Transistor	610 31
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	1	Buchse, 4fach	610 39
R	1	Widerstand, 1,2 Ω	610 33
G	1	Instrument	610 27
	1	Stecker, 2fach	610 40
K/bl	2	Kabel, blau	610 05
K/r	3	Kabel, rot	610 09
C1/2/3/4	4	Elko, 100 μF	923 7 2122 0
	2	Krokodilklemme	970 7 2146 0

x Nicht im Baukasten enthalten



5.3 Allgemeine Erklärung der Meißnerschaltung

Wenn man (Abb. 5.3.1) die Meißnerschaltung in einem schematischen Blockschaltbild darstellt, gelangt man zu einer allgemeineren Erklärung, die nicht auf die Meißnerschaltung beschränkt bleibt.

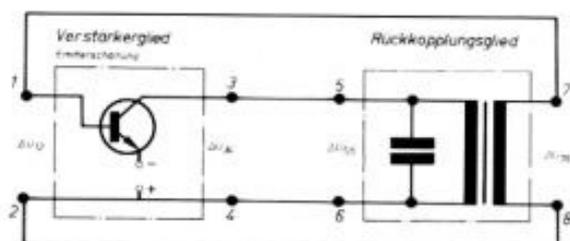


Abb. 5.3.1

Grundsätzlich benötigt man für jede Schaltung, die elektrische Schwingungen erzeugen soll, ein Verstärkerglied und ein Rückkopplungsglied, die beide bestimmte Bedingungen erfüllen müssen. In Abb. 5.3.1 ist für die Meißnerschaltung die Aufgliederung in Verstärkerglied und Rückkopplungsglied gezeichnet.

Führt man dem Eingang des Verstärkergliedes die Spannungsschwankung ΔU_{12} zu, so erhält man am Ausgang des Verstärkers die Spannungsschwankung $\Delta U_{34} = V_u \cdot \Delta U_{12}$, wobei V_u den Verstärkungsfaktor darstellt (vgl. 7.1). Führt man ΔU_{34} dem Eingang des Kopplungsgliedes als ΔU_{56} zu, so ergibt sich am Ausgang des Rückkopplungsgliedes $\Delta U_{78} = K \Delta U_{56} = K \Delta U_{34}$. K nennt man den Kopplungsfaktor. Es stellt sich eine ungedämpfte Schwingung ein, wenn ΔU_{78} wieder dem Eingang des Verstärkers zugeführt wird (Rückkopplung) und $K \cdot V = 1$ (Selbsterregungsgleichung) ist ($\Delta U_{78} = KV \Delta U_{12} = \Delta U_{12}$).

Ist $K \cdot V < 1$, so hört die Schwingung auf, ist $K \cdot V > 1$, so wächst die Schwingung an, bis Vorgänge, die an dieser Stelle nicht besprochen werden können, sie begrenzen.

$\Delta U_{78} = \Delta U_{12}$ bedeutet aber auch, daß die beiden Spannungen nicht nur gleich groß sind, sondern auch die gleiche Phasenlage haben müssen. ΔU_{12} ist gegen ΔU_{34} um 180° phasenverschoben, da einer Zunahme von U_{12} eine Abnahme von U_{34} entspricht (vgl. 7.1). Man schreibt besser: $U_{12} = -V U_{34}$. Die Selbsterregungsgleichung gilt also nur, wenn im Rückkopplungsglied eine zweite Phasenverschiebung von 180° stattfindet. Bei einer Meißnerschaltung ist die Phasenverschiebung gegeben (unbelasteter Transformator). Man kann die Phasenverschiebung von 180° auch durch Schaltungen erreichen, wie sie in Abb. 5.3.2 angegeben sind.

Abb. 5.3.2a stellt eine nur unwesentlich abgewandelte Meißnersche Rückkopplungsschaltung dar (vgl. 5.4). Auch bei Abb. 5.3.2b wird die Phasenverschiebung auf recht einfache Art erreicht. Diese Art der Schaltung nennt man eine 3-Punkt-Schaltung (vgl. 5.5).

Die Schaltungen der Abb. 5.3.2c und 5.3.2d stellen CR- bzw. RC-Glieder dar. Bei ihnen tritt nur für eine ganz bestimmte Frequenz f eine Phasenverschiebung von 180° auf. Und für diese Frequenz ergibt sich eine Schwingung, ohne daß ein spezieller Schwingkreis in der Schaltung vorhanden ist, sofern nur $K \cdot V = 1$ ist.

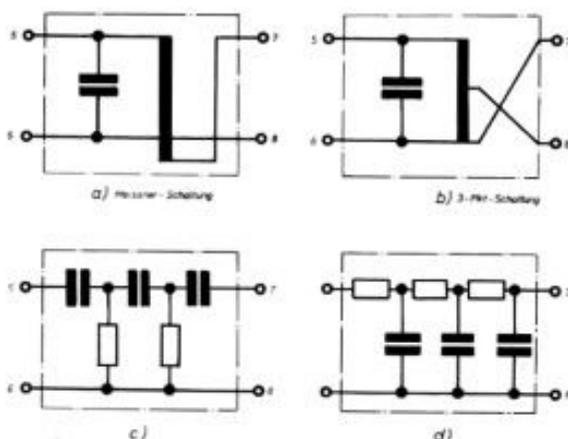
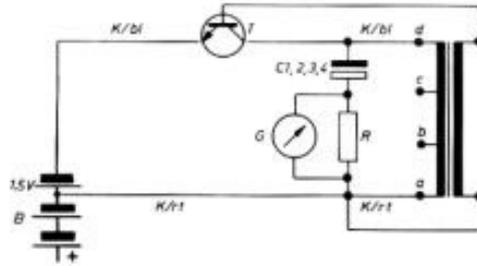


Abb. 5.3.2

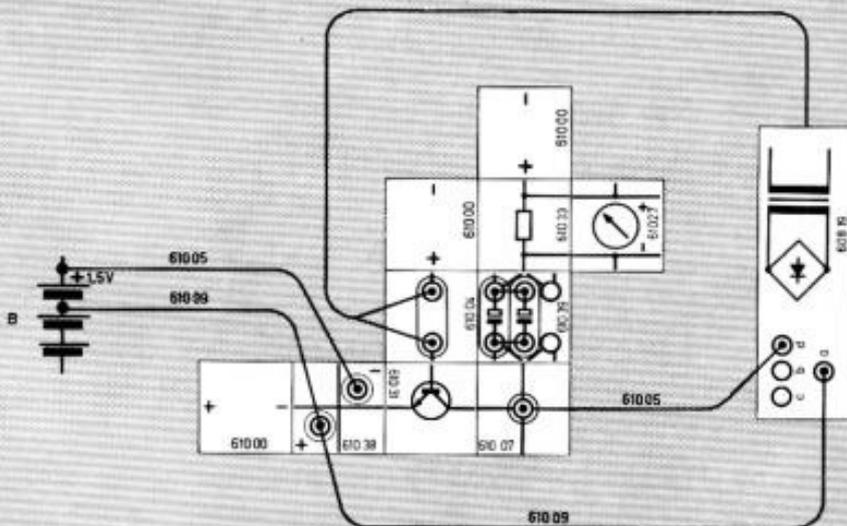
Versuch 36

Die Anordnung des Versuches 36 unterscheidet sich von der Anordnung des Versuches 35 nur dadurch, daß das Meßinstrument den Schwingstrom allein anzeigt. Das ist der Fall, wenn das Meßinstrument in den kapazitiven Stromzweig geschaltet wird, über den ja kein Gleichstromanteil fließen kann. Man muß sich allerdings auf kleinste Ausschläge beschränken, da der Nullpunkt des Meßinstrumentes ja links ist und nicht in der Mitte, d. h. man muß das Meßinstrument möglichst unempfindlich machen (100 mA-Bereich, Shunt = 1,2 Ω).



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B	1	Batterie, 4,5 V	x
	1	Trafo	608 19
	3	Verbindung, + -	610 00
	1	Verbindung	610 07
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	1	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
T	1	Transistor	610 31
	1	Buchse, 4fach	610 39
R	1	Widerstand, 1,2 Ω	610 33
G	1	Instrument	610 27
K/bl	2	Kabel, blau	610 05
K/rt	2	Kabel, rot	610 09
	2	Stecker, 2fach	610 40
C1/C2/C3/C4	4	Elko, 100 µF	923 7 2122 0
	2	Krokodilklemme	970 7 2146 0

x Nicht im Baukasten enthalten



5.4 Meißnerschaltung (Tonfrequenz)

Wenn man das Produkt CL verkleinert, wird die Schwingungsdauer $T = 2\pi \sqrt{LC}$ ebenfalls kleiner und $f = \frac{1}{T}$ entsprechend größer. Man gelangt zunächst in den Bereich der Tonfrequenz. Das menschliche Ohr ist imstande, Schallschwingungen im Frequenzbereich von 16 Hz bis 16 000 Hz als Töne wahrzunehmen (16 Hz tiefster Ton, 16 000 Hz höchster Ton). Schallschwingungen unter 16 Hz werden einzeln gefühlt, ohne daß eine Tonempfindung zustande kommt. Schallschwingungen mit 16 000 Hz können ältere Menschen allerdings nicht mehr wahrnehmen. Schallschwingungen über 16 000 Hz bezeichnet man als Ultraschall. Manche Tiere (Hunde, Fledermäuse, Delphine) können Ultraschall noch aufnehmen.

Wählt man z. B. $L \approx \frac{1}{4}$ H und $C \approx 1 \mu\text{F}$, so erhält man $T = 2\pi \sqrt{LC} = 6,28 \sqrt{\frac{10^{-9}}{4}} = 3,14 \cdot 10^{-3}$ s und $f = \frac{1}{T} = \frac{10^3}{3,14} \approx 300$ Hz.

Der Nachweis für solche Schwingungen kann nicht mehr mit dem Gleichstrom-Meßinstrument erbracht werden, da das System zu träge ist und den Schwingungen nicht mehr folgen kann. Ein einfacher Nachweis ergibt sich mit dem Lautsprecherbaustein. Beim Lautsprecher werden Stromschwankungen über die magnetische Wirkung ($I, 2.5$) des Stromes in entsprechende Schwankungen einer Membrane und damit in Luftschwankungen umgesetzt. Da die Tonhöhe von der Frequenz abhängt, ist über die Tonhöhe eine recht brauchbare Kontrolle der Frequenz möglich. Wer nicht das absolute Gehör hat, muß allerdings zu diesem Zweck eine Stimmgabel oder irgendein Musikinstrument zu Hilfe nehmen. Die meisten Stimmgabeln sind auf den Kamerton a' (eingestrichenes a) abgestimmt, dessen Frequenz $f = 440$ Hz beträgt. Damit man über einen Stimmgabelton oder über ein Musikinstrument die Frequenz eines Schwingkreises beurteilen kann, sind in der Tabelle 5.4.1 die Frequenzen der reinen Durtonleiter und die Frequenzverhältnisse der wichtigsten Tonschritte (Intervalle) angegeben.

Tabelle 5.4.1

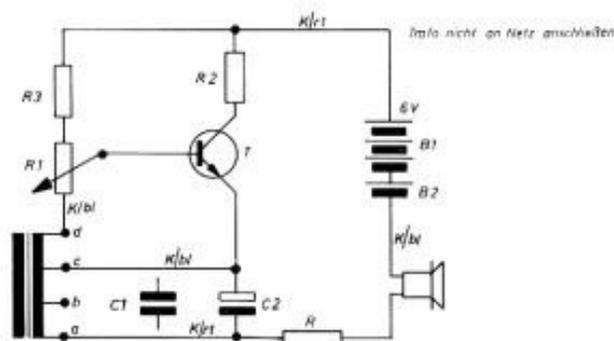
Töne der reinen Durtonleiter

Tonbezeichnung	c	c'	d'			
Frequenz	132	264	297			
Intervall zum Grundton	0,5:1	1:1	9:8			
Intervallbezeichnung	Oktave	Grundton	Sekunde			
e'	f'	g'	a'	h'	c''	c'''
330	352	396	440	495	528	1056
5:4	4:3	3:2	5:3	15:8	2:1	4:1
Terz	Quart	Quint	Sext	Septime	Oktave	2. Okt.

Versuch 37

Die Anordnung des Versuches 37 unterscheidet sich von der des vorausgegangenen Versuches dadurch, daß nicht zwei getrennte Spulen für die Selbstinduktivität des Schwingkreises und für die Rückkopplung benutzt werden. Es wird nur die Sekundärspule des Trafos mit ihren 4 Abgriffen benutzt. Die Windungen von Klemme a bis c dienen als Selbstinduktion, und die Windungen von Klemme c bis d als Rückkopplungsspule (vgl. Abb. 5.3.2 a). Der Lautsprecher wird in die Zuleitung zum Schwingkreis eingeschaltet, damit seine Induktivität nicht bei der Berechnung der Frequenz des Schwingkreises mit beachtet werden muß.

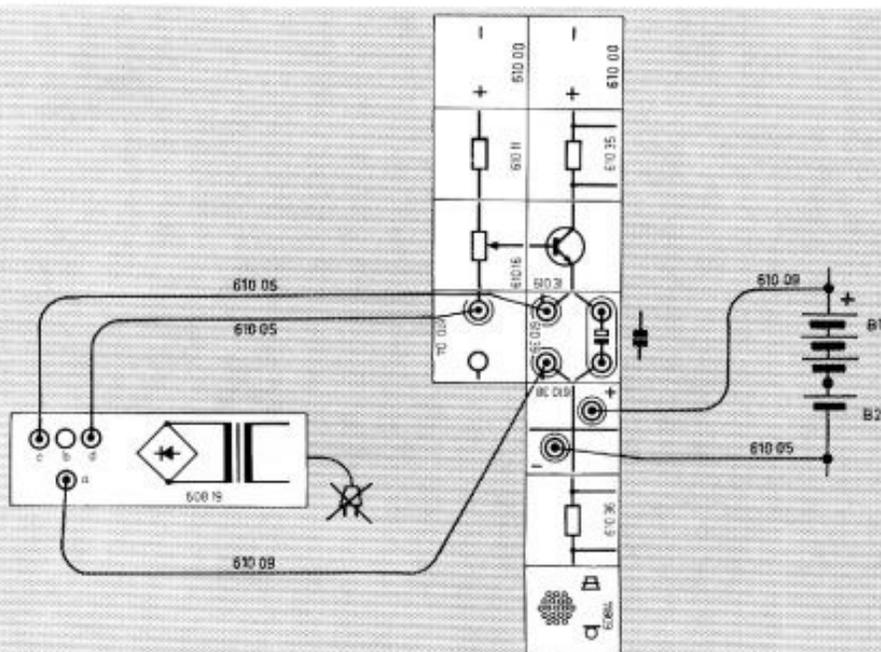
Die Spannung der Rückkopplungsspule wird der Basis nicht direkt zugeführt, sondern überlagert sich einer positiven Vorspannung. Man benötigt eine Spannung von 6 – 9 V. Wenn die Tonfrequenz bei einer Spannung von 9 V nicht einsetzt, ist das Potentiometer etwas nachzuregulieren.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	2	Verbindung, + -	610 00
R3	1	Widerstand, 10 k Ω	610 11
R2	1	Widerstand, 12 Ω	610 35
R1	1	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
T	1	Transistor	610 31
K/rt	2	Kabel, rot	610 09
	1	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Buchse, 4fach	610 39
	1	Mikrofonlautsprecher	608 14
K/bl	3	Kabel, blau	610 05
	1	Stecker, 2fach	610 40
C2	1	Elko, 10 μ F	923 7 2134 0
C1	1	Kondensator 1 μ F	926 7 1976 0
	1	Anschlußbuchse	610 38
R	1	Widerstand, 133 Ω ¹⁾	610 36

x Nicht im Baukasten enthalten

¹⁾ Schutzwiderstand



5.5 3-Punkt-Schaltung (Thomsonformel, Oktav, Dreiklang)

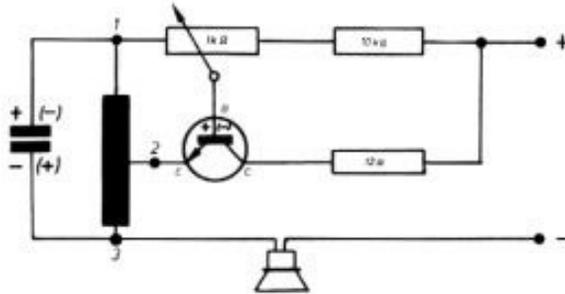


Abb. 5.1.1

Die 3-Punkt-Schaltung stellt eine weitere Vereinfachung dar. Man benötigt eine Induktivität mit Mittelabgriff. Wenn der Kondensator in der Abb. 5.5.1 oben eine +Ladung und unten eine -Ladung hat, muß der Transistor leiten, d. h. einem geschlossenen Schalter entsprechen, damit der Kondensator wieder voll aufgeladen wird. Oder anders ausgedrückt: der Transistor muß leitend sein und einen kleinen Widerstand darstellen, so daß die Batteriespannung fast ganz am Kondensator abfällt und ihn auflädt. Dies ist aber bei der gezeichneten Schaltung der Fall, da die Basis mit der +geladenen Platte und der Emitter mit Punkt 2 verbunden ist. Punkt 2 hat offensichtlich negative Spannung gegen Punkt 1. Nach einer halben Schwingungsdauer ist der Kondensator umgekehrt aufgeladen, er darf jetzt nicht mit der Spannungsquelle verbunden sein. Der Transistor muß einen geöffneten Schalter darstellen. Oder anders ausgedrückt: Der Transistor darf nicht leitend sein, er muß einen großen Widerstand darstellen, damit die ganze Batteriespannung an ihm abfällt. Die Basis muß also negative Spannung gegen den Emitter besitzen. Das ist bei der angegebenen Schaltung der Fall, da die obere Platte, die mit der Basis verbunden ist, jetzt Minus geladen ist und die Basis eine negative Spannung gegen Punkt 2 und damit gegen den Emitter aufweist. Es fließt kein Basisstrom, der Transistor sperrt. Im übrigen ist auch in 5.3 durch Abb. 5.3.2 b eine Erklärung der 3-Punkt-Schaltung gegeben.

Zur Bestätigung der Thomsonformel kann man bei dieser Schaltung die Kapazität C des Schwingkreises so variieren, daß sich akustisch bekannte Intervalle oder Tonschritte ergeben. Der Oktave entspricht das Frequenzverhältnis

$f_2 : f_1 = 2:1$. Aus der Thomsonformel $\frac{1}{f} = T = 2\pi \sqrt{LC}$ folgt dann:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{\sqrt{C_1}}{\sqrt{C_2}} = \frac{2}{1} \text{ und } C_1 : C_2 = 4:1$$

Man erhält also eine Oktave, wenn sich die Kapazitäten wie 4:1 verhalten.

Der Durdreiklang 1, 3, 5 stellt eine Terz und eine Quinte dar. Man erhält die Frequenzverhältnisse: $f_2 : f_1 = 5 : 4$ (Terz) und $f_3 : f_1 = 3 : 2 = 6 : 4$ (Quint)

oder zusammengefaßt:

$$f_1 : f_2 : f_3 = 4 : 5 : 6.$$

Mit der Thomsonformel erhält man:

$$C_1 : C_2 = 25 : 16 \text{ und } C_1 : C_3 = 36 : 16$$

oder zusammengefaßt:

$$C_1 : C_2 : C_3 = 25 \times 36 : 16 \times 36 : 16 \times 25 \approx 9 : 6 : 4.$$

Ändert man die Kapazität im Verhältnis 9 : 6 : 4, so erhält man den Durdreiklang 1, 3, 5.

Versuch 38

Der Aufbau entspricht der Schaltung in Abb. 5.5.1. Man dreht das Potentiometer des Spannungsteilers so weit auf, bis der Schwingkreis einsetzt. Eventuell ist zur Erzielung eines guten Klangs eine Nachregulierung des Potentiometers nötig, auf dem die Basisvorspannung eingestellt wird.

Zur Einstellung der Oktave stellt man zwei Stecker bereit mit den folgenden Kapazitäten: Stecker 1: $0,1 \mu\text{F}$ und Stecker 2: $3 \times 0,1 \mu\text{F}$. Der Stecker 1 wird in die Anschlußbuchse und der Stecker 2 in die seitlichen Bohrungen des Steckers 1 gesteckt und wieder weggenommen, das heißt man erhält abwechselnd die Kapazität $C_1 = 0,4 \mu\text{F}$ (Parallelschaltung) und $C_2 = 0,1 \mu\text{F}$. Die Oktave wird meist nicht gerade rein sein, da die Kondensatoren eine große Toleranz besitzen. Dasselbe gilt auch für den Dreiklang.

Dafür stellt man 3 Stecker bereit mit den folgenden Kapazitäten: Stecker 1: $2 \times 0,1 \mu\text{F}$, Stecker 2: $0,1 \mu\text{F}$, Stecker 3: $0,1 \mu\text{F}$ und $0,047 \mu\text{F} \approx 0,15 \mu\text{F}$.

Stecker 2 wird seitlich an Stecker 1, Stecker 3 seitlich an Stecker 2 befestigt.

Man hat nun zunächst $C_1 = 0,45 \mu\text{F}$ (Stecker 1 + Stecker 2 + Stecker 3). Nach Ziehen des Steckers 3 erhält man $C_2 = 0,3 \mu\text{F}$ und nach Ziehen des Steckers 2 $C_3 = 0,2 \mu\text{F}$. Für die Kapazitäten ergibt sich das gewünschte Verhältnis (s. o.):

$$C_1 : C_2 : C_3 = 0,45 : 0,3 : 0,2 = 9 : 6 : 4.$$

5.6 R_C bzw. R_L in Abhängigkeit von f und C

In 5.5 wurde gezeigt, wie man die Frequenz f des Schwingkreises verändern bzw. verdoppeln kann und wie man diese Verdoppelung akustisch über die Oktave einigermaßen kontrollieren kann.

Damit ist es möglich, die Formeln $R_C \sim \frac{1}{fC}$ und

$R_L \sim fL$ zu kontrollieren, wenigstens innerhalb der Genauigkeit, mit der C und L bekannt sind und innerhalb der Genauigkeit, mit der die Wechselstrommeßinstrumente in 3.1 und 3.3 geeicht wurden.

Es soll gezeigt werden, daß bei Verdoppelung der Frequenz f bzw. bei Verdoppelung der Kapazität C der kapazitive Widerstand R_C jeweils auf die Hälfte absinkt und daß bei Verdoppelung von f bzw. bei Verdoppelung von L der induktive Widerstand R_L jeweils auf das Doppelte ansteigt.

Versuch 39

In der angegebenen Schaltung wird wieder die Sekundärspule des Trafos mit den Klemmen a und c als Induktivität L des Schwingkreises benutzt. Klemme b dient als Zwischenabgriff der

Dreipunktschaltung. Über die Windungen zwischen Klemme c und d wird der Verbraucher, das heißt die zu untersuchenden Kapazitäten und Induktivitäten an den Schwingkreis induktiv angekoppelt. Als Kapazitäten des Schwingkreises wählt man einen Stecker 1 mit $3 \times 0,1 \mu F$ und einen Stecker 2 mit $1 \mu F$. Man erhält so die Kapazitäten $C_1 = 1,3 \mu F$ und $C_2 = 0,3 \mu F$ (Stecker 1 ohne Stecker 2). Diese Kapazitäten verhalten sich innerhalb der Toleranzen ungefähr wie 4 : 1. Für die Frequenzen gilt dann: $f_1 : f_2 \approx 1 : 2$. Um die Formeln für R_C und R_L zu prüfen, wird mit beiden Frequenzen der kapazitive Widerstand der Kapazitäten $C'_1 = 0,47 \mu F$ und $C'_2 = 1 \mu F$ (mit Volt- und Amperemeter) gemessen

$$(R_C = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}).$$

Dasselbe gilt für den induktiven Widerstand des Induktivitätsbausteins ($L'_1 \approx 1 H$, $L'_2 \approx 0,25 H$ bei Mittelabgriff).

Da nur ein Meßinstrument und ein Meßgleichrichter zur Verfügung stehen, kann entweder die effektive Stromstärke I_{eff} oder die effektive Spannung U_{eff} abgelesen werden. Es ist aber wichtig, daß der Shunt bzw. der Vorwiderstand auch ohne angeschlossenes Meßinstrument in der Schaltung bleibt.

Die Meßergebnisse sind in den Tabellen 5.6.1 und 5.6.2 zusammengestellt.

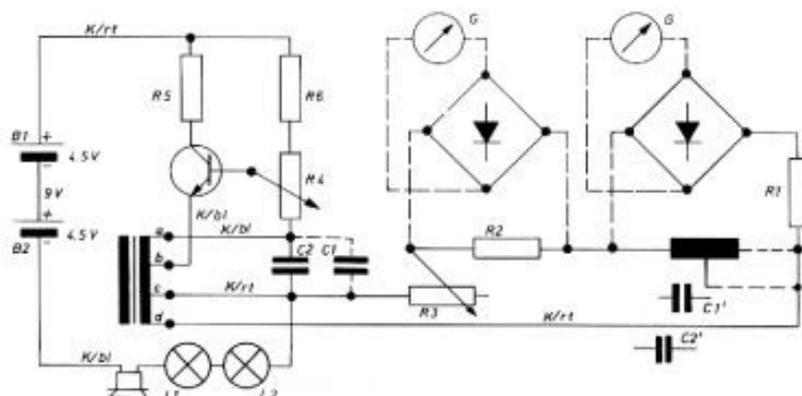
Tabelle 5.6.1

Kapazität d. Schwingkr.		$R_C = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$			
(μF)	C' (μF)	U_{eff} (V)	I_{eff} (mA)	(Ω)	
0,3	0,47	1,4	2,3	600	
0,3	1	0,85	2,9	300	
1,3	1	1,2	2,2	550	
1,3	0,47	1,6	1,45	1100	

Tabelle 5.6.2

Kapazität d. Schwingkr.		$R_L = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$			
(μF)	L' (H)	U_{eff} (V)	I_{eff} (mA)	(Ω)	
0,3	1	1,6	1,6	1000	
0,3	0,25	0,8	3	270	
1,3	1	1,2	1,8	660	
1,3	0,25	0,45	2,8	160	

Man ersieht aus den Tabellen, daß innerhalb einer Meßgenauigkeit von 10 bis 20 % die Formeln für R_C und R_L bestätigt werden.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.	Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x	R2	1	Spule, 1 H	610 26
	1	Trafo	608 19	R1	1	Widerstand, 133 Ω	610 36
	4	Stecker, 2fach	610 40	R1	1	Widerstand, 100 kΩ	610 13
	2	Verbindung, + -	610 00	G	1	Instrument	610 27
R6	1	Widerstand, 10 kΩ	610 11	G	1	Meßgleichrichter	610 01
R5	1	Widerstand, 12 Ω	610 35	C1/C2'	2	Kondensator, 1 μF	926 7 1976 0
R3/R4	2	Potentiometer, 1 kΩ	610 16	K/bl	3	Kabel, blau	610 05
T	1	Transistor	610 31		1	Krokodilklemme	970 7 2146 0
	2	Buchse, 4fach	610 39		1	Prüfspitze	610 2 2974 0
	2	Verbindung	610 07	C2	3	Kondensator, 0,1 μF	926 7 1833 0
	1	Mikrophonlautspr.	608 14	C1'	1	Kondensator, 0,47 μF	926 7 2126 0
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38		1	Schaltdraht	608 2 3102 0
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04	L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA ¹⁾	610 2 3007 0
				K/rt	3	Kabel, rot	610 09
					2	Stecker, 1fach	610 43

x Nicht im Baukasten enthalten

¹⁾ Schutzwiderstand

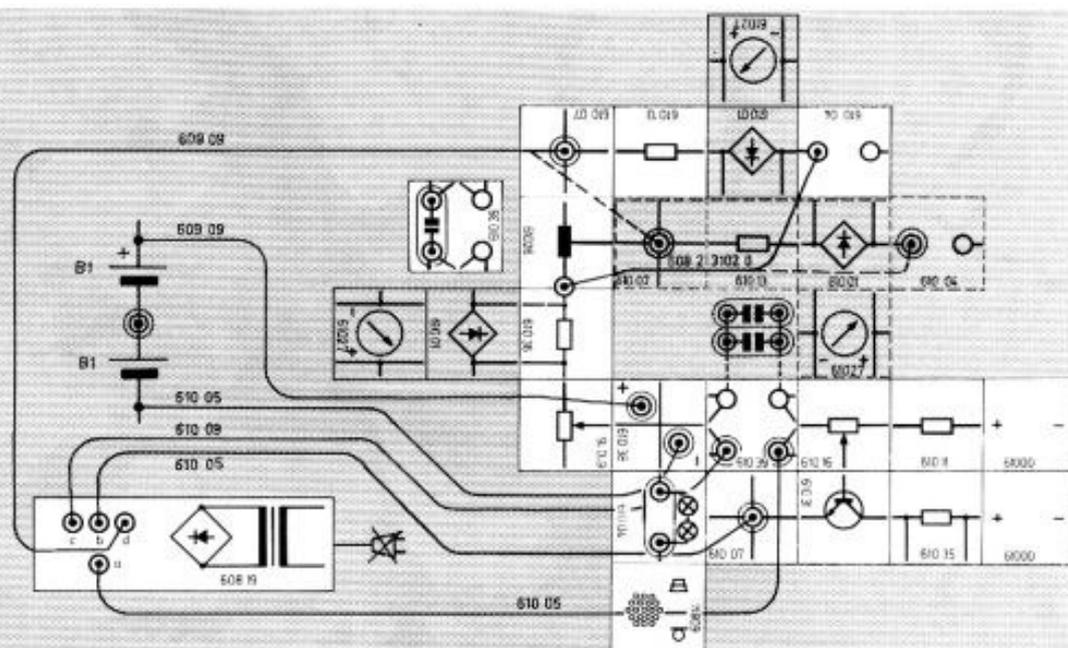


Tabelle 5.7.1

C des Schwingkr. (μF)	I (mA)			f (Hz)	
	L_1	1 H	0,25 H		
	C_1	0,47 μF	1 μF		
	U	1 V	1 V	1 V	
0,1		1,4	1,2	3,4	710
0,2		1,6	1,4	3,5	500
0,4		2,0	1,7	3,6	310
1		3,0	2,2	1,6	220
2,2		1,4	3,8		160
5		0,7	1,5	0,5	180

5.7 R_L und R_C in Reihe (Resonanzkurve)

Mit der Anordnung des vorigen Versuches soll der Scheinwiderstand R_S einer Anordnung, bei der die Induktivität $L_1 = 1 \text{ H}$ bzw. $0,25 \text{ H}$ (Baustein) und ein Kondensator der Kapazität $C_1 = 0,47 \mu\text{F}$ bzw. $C_1 = 1 \mu\text{F}$ in Reihe geschaltet sind, in Abhängigkeit von der Frequenz f untersucht werden. Da mit steigender Frequenz der induktive Widerstand $R_L = \omega L$ wächst und der kapazitive Widerstand $R_C = \frac{1}{\omega C}$ abnimmt, muß für eine bestimmte Frequenz $\omega = 2 \pi f$ $R_C = R_L$ sein. Für diese Frequenz hat

$R_S = \sqrt{R_0 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ ein Minimum. Wenn alle Messungen mit der Spannung $U = 1 \text{ V}$ gemacht werden, hat für diese Frequenz der Strom ein Maximum. Man nennt die Kurve, die sich ergibt, wenn I in Abhängigkeit von f aufgetragen wird, eine Resonanzkurve. Resonanz ist zunächst ein Begriff aus der Akustik. Eine Stimmgabel fängt an zu schwingen und zu tönen, wenn sie mit ihrer Eigenfrequenz von außen, z. B. durch eine zweite Stimmgabel, angeregt wird. Sie ist in Resonanz.

Versuch 40

Man erhält verschiedene Frequenzen f , wenn man z. B. für C im Schwingkreis alle möglichen Kapazitäten zwischen $0,1 \mu\text{F}$ und $10 \mu\text{F}$ einsetzt. Man mißt dann für eine Spannung $U = 1 \text{ V}$ (bzw. $U = 0,5 \text{ V}$) den Strom. Die Spannung $U = 1 \text{ V}$ (bzw. $0,5 \text{ V}$) kann mit dem Potentiometer, das die Verbindung mit dem Schwingkreis herstellt, eingestellt werden. Man erhält die Meßwerte der

Betrachtet man die Spalte 2, so sieht man, daß der Strom I für $C = 1 \mu\text{F}$ mit $3,0 \text{ mA}$ ein Maximum erreicht, d. h. es ist $R_L = R_C$ oder $\omega L = \frac{1}{\omega C}$

und damit $\omega^2 = \frac{1}{L_1 C_1} = \frac{1}{0,5 \mu\text{F} \cdot 1 \text{ H}}$, andererseits ist $\omega^2 = \frac{1}{L C}$, wobei L und C die Werte des Schwingkreises sind. Es ist also $C \cdot L = C_1 L_1$. Da L bisher nicht ermittelt wurde, kann man jetzt

$L = \frac{C_1 L_1}{C}$ ausrechnen. Man erhält

$$L = \frac{0,5 \mu\text{F} \cdot 1 \text{ H}}{1 \mu\text{F}} = 0,5 \text{ H.}$$

Ersetzt man $C_1 = 0,5 \mu\text{F}$ durch $C_2 \approx 1 \mu\text{F}$, so folgt aus der Resonanzbedingung $R_L = R_C$:

$\omega_1^2 = \frac{1}{1 \mu\text{F} \cdot 1 \text{ H}} = \frac{1}{2 \mu\text{F} \cdot 0,5 \text{ H}}$, d. h. für $C = 2 \mu\text{F}$ muß sich ein Strommaximum ergeben. Die Meßergebnisse der Spalte 3 bestätigen diesen Sachverhalt.

Ersetzt man $L_1 = 1 \text{ H}$ durch $L_2 = 0,25 \text{ H}$ (Mittelabgriff), so folgt aus $R_L = R_C$:

$$\omega_2^2 = \frac{1}{1 \mu\text{F} \cdot 0,25 \text{ H}} = \frac{1}{0,5 \mu\text{F} \cdot 0,5 \text{ H}}, \text{ d. h. für}$$

$C \approx 0,5 \mu\text{F}$ muß sich ein Strommaximum ergeben. Auch dies wird durch die Ergebnisse der Spalte 4 bestätigt.

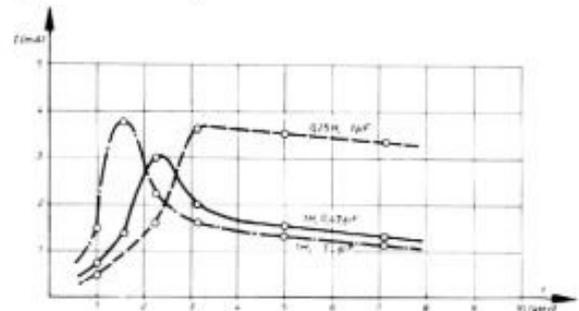
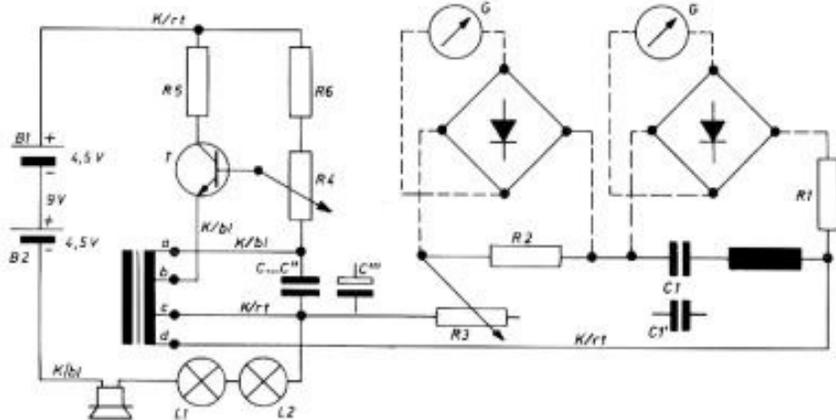


Abb. 5.7.1

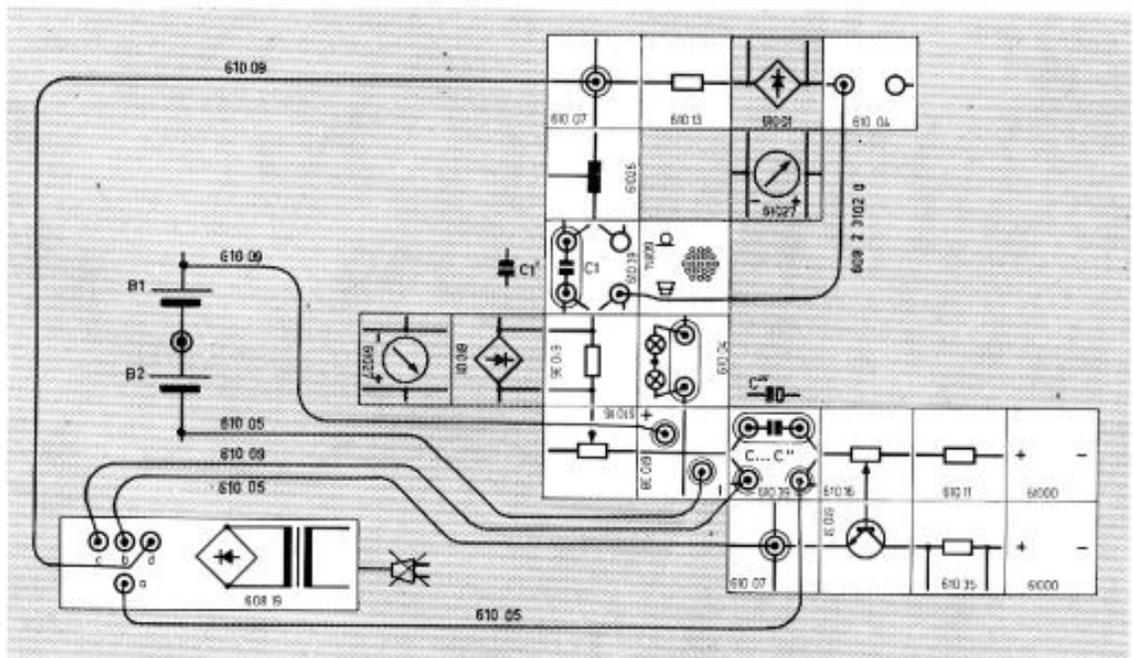
In Abb. 5.7.1 sind die Werte aus Tabelle 5.7.1 in einem Diagramm graphisch dargestellt (Resonanzkurven).



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.	Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x		1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	1	Trafo	608 19		1	Spule, 1 H	610 26
	1	Meßgleichrichter	610 01	R2	1	Widerstand, 133 Ω	610 36
G	1	Instrument	610 27	R1	1	Widerstand, 100 kΩ	610 13
K/bl	3	Kabel, blau	610 05		2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0	C'''	1	Elko, 5 μF	923 7 2323 0
	3	Stecker, 2fach	610 40	C''	1	Kondensator, 2,2 μF	926 7 2252 0
K/rt	3	Kabel, rot	610 09	C	4	Kondensator, 0,1 μF	926 7 1833 0
	2	Verbindung, + -	610 00	C1/C'	2	Kondensator, 1 μF	926 7 1976 0
R6	1	Widerstand, 10 kΩ	610 11	C1'	1	Kondensator, 0,47 μF	926 7 2126 0
R5	1	Widerstand, 12 Ω	610 35		1	Schalt draht	608 2 3102 0
R3/R4	2	Potentiometer, 1 kΩ	610 16		2	Stecker, 1fach	610 43
T	1	Transistor	610 31	L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3070 0
	2	Buchse, 4fach	610 39				
	2	Verbindung	610 07				
	1	Mikrofonlautsprecher	608 14				

x Nicht im Baukasten enthalten

1) Schutzwiderstand



5.8 Gleichspannungswandler

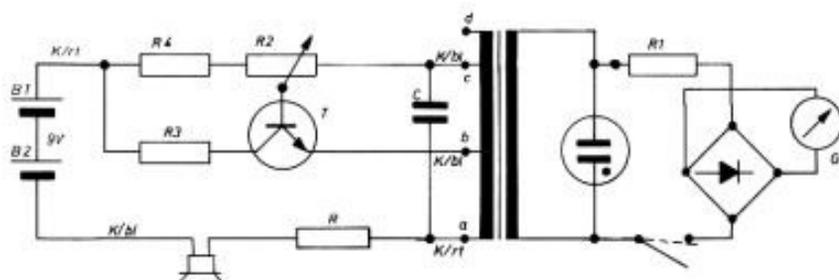
Auf die Bedeutung des Schwingkreises bei Sender- und Empfängeranlagen der drahtlosen Nachrichtenübermittlung soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Als einfaches Beispiel soll hier die Anwendung besprochen werden, die der Schwingkreis bei einem Gleichspannungswandler findet. Ein Gleichspannungswandler soll eine Gleichspannung von wenigen Volt (Batterie) in eine Gleichspannung von mehreren hundert Volt umwandeln. Solche Gleichspannungswandler braucht man zum Beispiel beim Betrieb von tragbaren Zählrohrapparaturen zum Nachweis von radioaktiver Strahlung oder bei Blitzlichtgeräten, bei denen ein Kondensator auf hohe Spannung aufgeladen und über die Blitzlichtlampe plötzlich mit hoher Leistung entladen wird.

Bei einer Wechselspannung löst ein einfacher Transformator oder Wechselspannungswandler diese angesprochene Aufgabe. Bei einer Gleichspannung ist der Vorgang etwas umständlicher. Man erzeugt zunächst mit einer Schwingkreisschaltung eine Wechselspannung von wenigen Volt. Mit einem Transformator von geeignetem Übersetzungsverhältnis wird die Wechselspannung hochtransformiert. Diese hochtransformierte Wechselspannung muß dann noch gleichgerichtet und notfalls geglättet werden.

Versuch 41

In der angegebenen Schaltung wird die Gleichspannung von wenigen Volt in eine Wechselspannung von etwa 100 Volt verwandelt. Auf die noch nötige Gleichrichtung und Glättung, die entsprechend 2.6 erfolgen könnte, wird verzichtet.

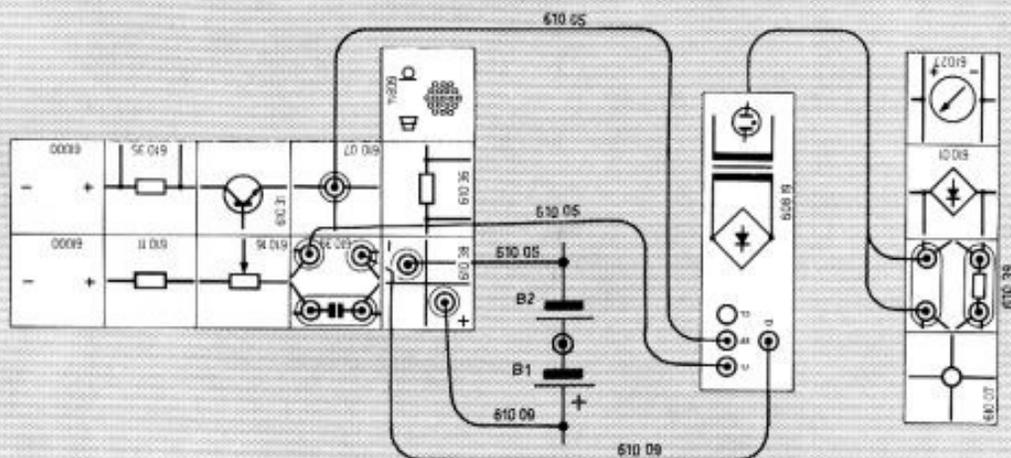
Der Schwingkreis stellt eine 3-Punkt-Schaltung dar. Die Windungen zwischen den Klemmen a und c (207 Windungen) stellen die Induktivität des Schwingkreises dar ($L \approx 0,5 \text{ H}$). Klemme b ist der Mittelabgriff der 3-Punkt-Schaltung (vgl. Versuch 40). In der Primärspule des Transformators (4300 Windungen) entsteht dann eine Spannung, die rund 20mal größer ist als die Wechselspannung der Sekundärspule. Die Größe dieser Spannung wird durch Aufleuchten der Glimmlampe am Trafoblock deutlich, da die Glimmlampe eine Zündspannung von ca. 70 V hat. Die Spannung kann aber auch mit dem Meßinstrument gemessen werden, wenn man einen Vorwiderstand $R_1 = 2 \text{ M}\Omega$ benützt. Bei Vollauschlag liegt am Spannungsteiler mit Meßwerk eine Spannung $U_m = 0,43 \text{ Volt}$ und es fließt der Strom $I_m = 0,11 \text{ mA}$ (vgl. 3.3). Damit ist der Meßbereich bei $2 \text{ M}\Omega$ Vorwiderstand $U = U_m + R_1 \cdot I_m = 0,43 \text{ V} + 220 \text{ V} \approx 220 \text{ V}$ bei einer linearen Skala (vgl. 3.3). Man mißt eine effektive Spannung $U_{\text{eff}} \approx 140 \text{ V}$. Das ergibt einen Scheitelwert $\hat{U} \approx 200 \text{ V}$.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	1	Trafo	608 19
	2	Verbindung	610 07
	2	Buchse, 4fach	610 39
	1	Meßgleichrichter	610 01
G	1	Instrument	610 27
	2	Verbindung, + -	610 00
R4	1	Widerstand, 10 k Ω	610 11
R3	1	Widerstand, 12 Ω	610 35
R2	1	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
T	1	Transistor	610 31
	1	Mikrofonlautsprecher	608 14
	2	Anschlußbuchse, + -	610 38
K/bl	3	Kabel, blau	610 05
K/rt	2	Kabel, rot	610 09
	2	Stecker, 2fach	610 40
R1	1	Widerstand, 2,2 M Ω	930 7 1644 0
C	1	Kondensator, 0,1 μ F	926 7 1833 0
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0
R	1	Widerstand, 133 Ω ¹⁾	610 36

x Nicht im Baukasten enthalten

¹⁾ Schutzwiderstand



6. Impulsformung

6.1 Dioden mit Vorspannung

Wenn eine Spannung während einer kurzen Zeit ansteigt und dann wieder absinkt, spricht man von einem Spannungsstoß oder einem Impuls (Abb. 6.1.1).

Je nach den Gegebenheiten benötigt man Impulse von verschiedenen Formen. Man versucht, die Flankensteilheit, die Breite und die Amplitude des Impulses zu formen. Bei extrem steilen Flanken spricht man von Rechteckimpulsen (Abb. 6.1.2a), bei extrem schmalen Impulsen von Nadelimpulsen (Abb. 6.1.2b).

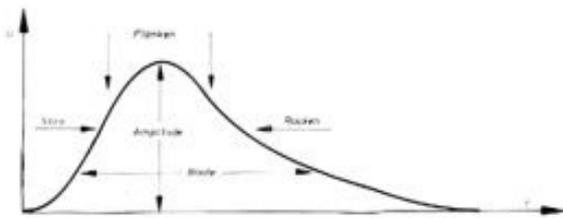


Abb. 6.1.1

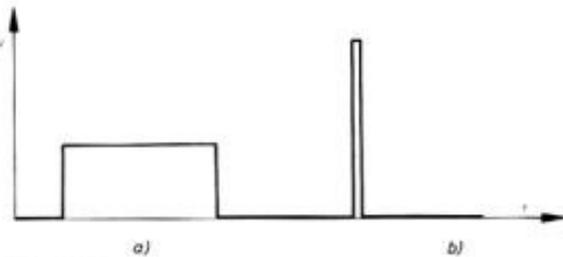


Abb. 6.1.2

Will man solche Impulse beobachten und will man sehen, wie man sie umformen kann, muß man einen Kathodenstrahloszillographen zu Hilfe nehmen. Hier soll nun versucht werden, das Grundsätzliche der Impulsformung bei langsamem Ablauf mit dem Meßinstrument zu verfolgen.

Im nachfolgenden Versuch 42 soll zunächst die Amplitude des Impulses beeinflusst werden. Durch eine regelbare Vorspannung kann die Amplitude kleiner gemacht und schließlich ganz unterdrückt werden. Wenn man zum Beispiel mit einem Geiger-Müller-Zählrohr den Einfall von zweierlei Elementarteilchen registriert, die Impulse verschiedener Amplituden verursachen, so kann man die kleineren Impulse mit der Vorspannung ganz unterdrücken und zählt so nur die Teilchen einer Sorte.

Versuch 42

Wie bei den Versuchen in Abschnitt 1 und 2 wird mit dem einen Potentiometer ein Wechselstrom mit einer Frequenz von etwa 0,5 Hz hergestellt. Da die Diode in den Stromkreis geschaltet ist, zeigt das Meßinstrument nur die positiven Halbwellen an. Reguliert man nun die Vorspannung an dem zweiten Potentiometer oder mit dem Potentiometer des Spannungsteilers, so kann man die Amplitude dieser Halbwellen (Impulse) vergrößern, verkleinern oder gar ganz zum Verschwinden bringen. (Vgl. Abb. 6.1.3.)

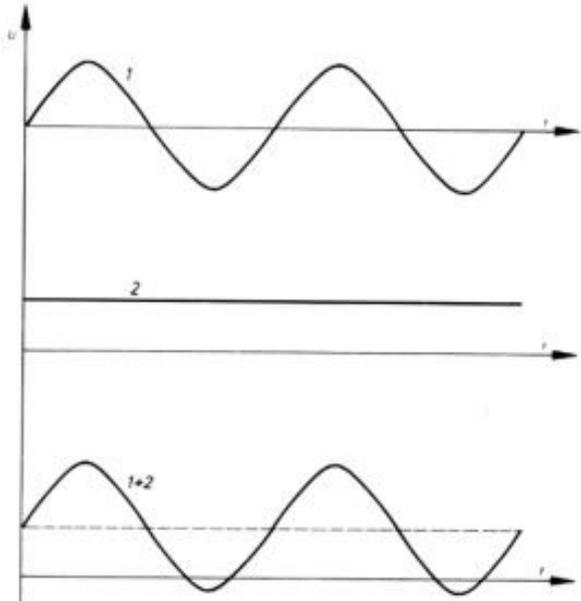


Abb. 6.1.3a ohne Diode

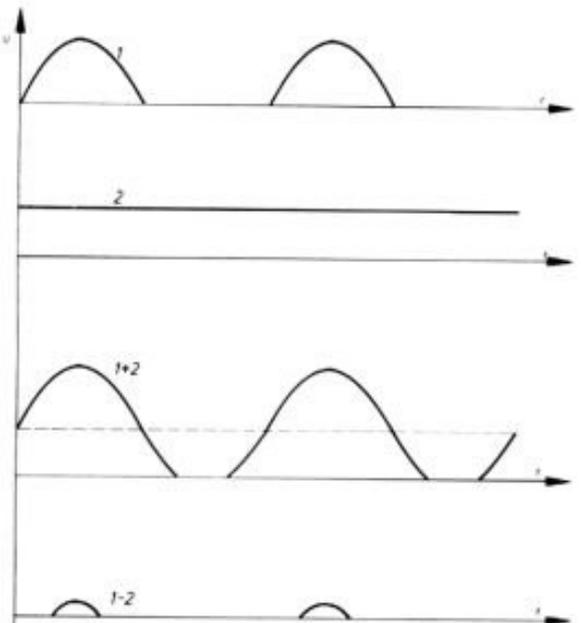
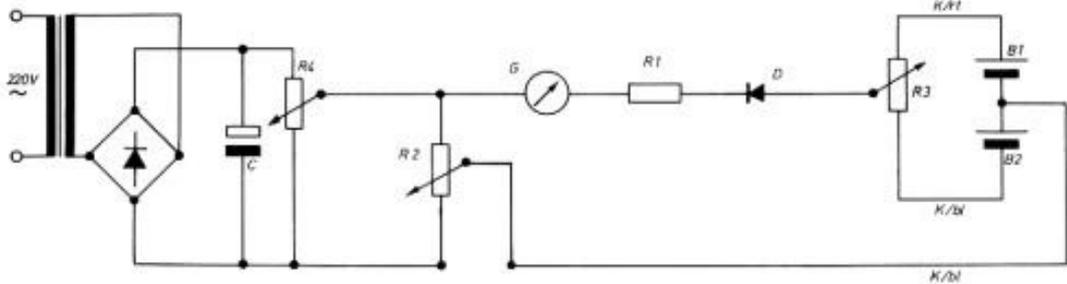
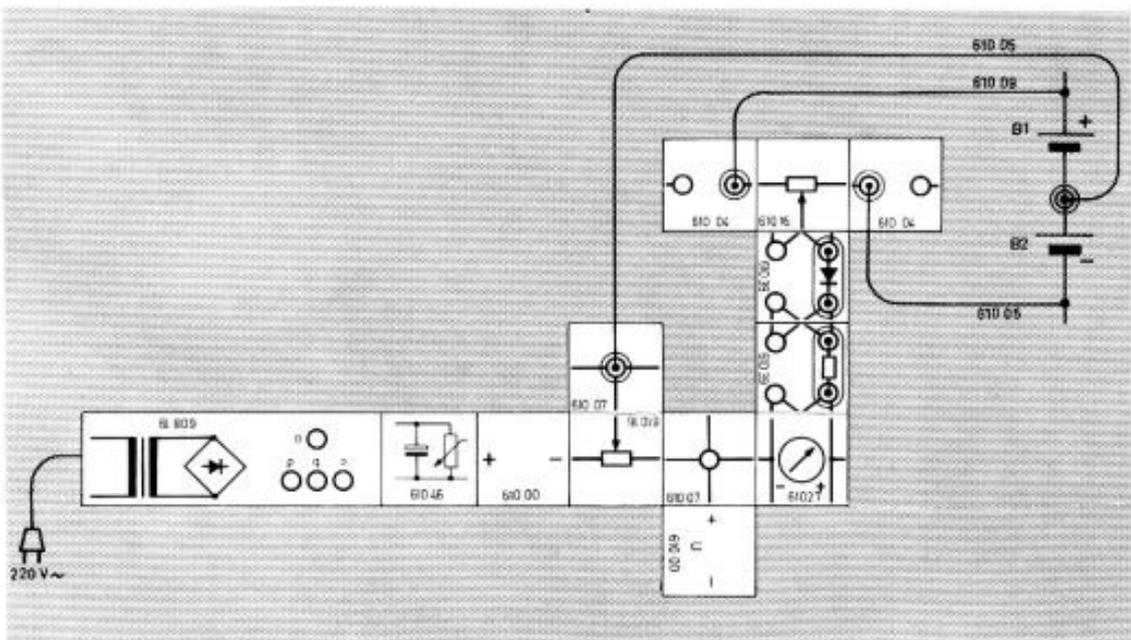


Abb. 6.1.3b mit Diode



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	1	Trafo	608 19
C/R4	1	Spannungsteiler	610 46
	2	Verbindung, + -	610 00
	2	Verbindung	610 07
G	1	Instrument	610 27
	2	Buchse, 4fach	610 39
R2/R3	2	Potentiometer, 1 kΩ	610 16
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	2	Stecker, 2fach	610 40
K/bl	2	Kabel, blau	610 05
K/rt	1	Kabel, rot	610 09
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0
D	1	Diode, BA 130	901 7 2105 0
R1	1	Widerstand, 100 kΩ	930 7 1473 0

x Nicht im Baukasten enthalten



Versuch 43

Wie beim Versuch 42 wird mit dem Potentiometer ein Wechselstrom der Frequenz $f \approx 0,5$ Hz durch entsprechendes Drehen des Potentiometerknopfes erzeugt. In den Stromkreis wird ein $10\text{ k}\Omega$ Widerstand geschaltet und die Spannung an diesem Widerstand mit dem Voltmeter gemessen. Man beobachtet eine Wechselspannung der Frequenz $f \approx 0,5$ Hz; am Meßinstrument kann je nach Polung allerdings immer nur die eine Halbwelle beobachtet werden (Abb. 6.2.1). Schaltet man eine Diode in den Stromkreis, so erhält man pulsierenden Gleichstrom, und das Voltmeter zeigt die positiven Impulse an mit steilem Anstieg und steilem Abstieg (Abb. 6.2.1). Schaltet man nun noch einen Kondensator der Kapazität $C = 100\ \mu\text{F}$ parallel zu dem $10\text{ k}\Omega$ Widerstand, so erhält man Impulse mit steilem Anstieg (wie bisher), aber langsam abfallendem Abstieg (Impulsdehnung) (Abb. 6.2.1).

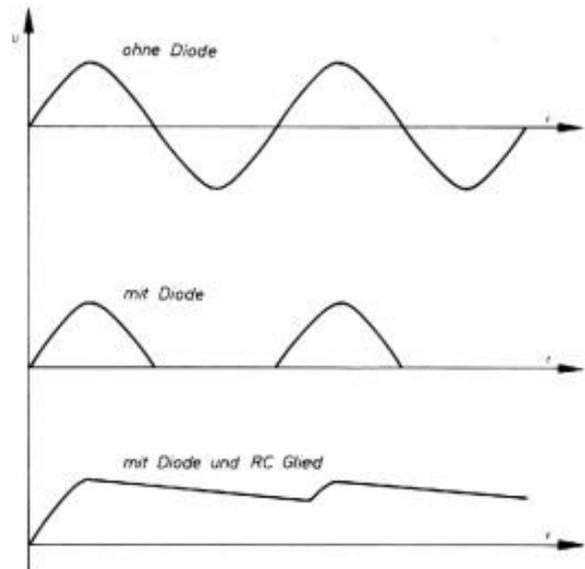


Abb. 6.2.1

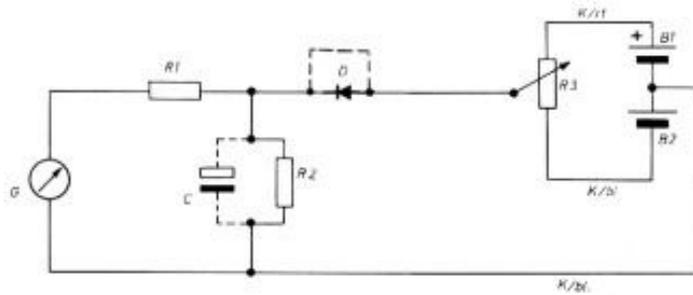
Bei ansteigender positiver Spannung lädt sich der Kondensator über die Diode auf. Bei zurückgehender positiver Spannung und bei Umpolung kann sich der Kondensator nicht über die Diode (Sperr-Richtung) entladen, sondern nur relativ langsam über den $10\text{ k}\Omega$ Widerstand.

Der Abstieg ist um so flacher, je größer das Produkt RC ist.

Über die Entladung eines Kondensators C über den Widerstand R wurde ausführlich (in I, 6.2) berichtet.

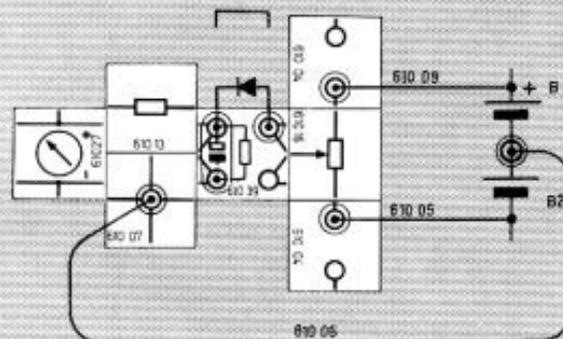
6.2 Impulsdehnung

Bei dem nachfolgenden Versuch soll nicht die Amplitude des Impulses, sondern die rückwärtige Flanke, der Rücken des Impulses, beeinflusst werden, und zwar soll ein flacher Abstieg, eben eine Impulsdehnung, erzielt werden.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
G	1	Instrument	610 27
R1	1	Widerstand, 100 k Ω	610 13
	1	Verbindung	610 07
	1	Buchse, 4fach	610 39
R3	1	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Stecker, 2fach	610 40
K/r1	1	Kabel, rot	610 09
K/bl	2	Kabel, blau	610 05
R2	1	Widerstand, 10 k Ω	930 7 1961 0
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0
D	1	Diode, BA 130	901 7 2105 0
C	1	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0
	1	Kurzschlußbügel	610 2 3006 0

x Nicht im Baukasten enthalten



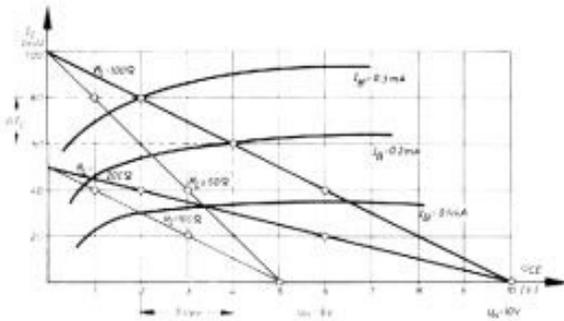


Abb. 7.1.3 (zu den Ausführungen auf Seite 106)

6.3 Rechteckimpulse

Am einfachsten erhält man Rechteckimpulse, wenn man einen Schalter in einem Stromkreis je nach Impulsdauer kurzzeitig schließt und wieder öffnet. Bei sehr kurzen Impulsen versagt aber ein mechanischer Schalter infolge seiner Trägheit. Man kann dann zum Beispiel einen Transistor als Schalter benutzen. Die mitgelieferten n-p-n-Transistoren sind leitend, das heißt sie stellen einen geschlossenen Schalter dar, wenn die Basis positive Spannung gegen den Emitter besitzt. Bei negativer Basis-Emitter-Spannung sperrt der Transistor, das heißt der Transistor entspricht einem geöffneten Schalter.

Wenn der Transistor durch einen ankommenden, nicht rechteckigen Impuls kurzzeitig eine positive Basis-Emitter-Spannung erhält, stellt er einen kurzzeitig geschlossenen Schalter dar, und man erhält dann im Kollektorkreis einen kurzzeitigen Rechteckimpuls. Wenn man diese Impulsumwandlung mit einem Meßinstrument beobachten will, muß der Impuls natürlich langsam genug ablaufen.

Versuch 44

In der angegebenen Schaltung erhält man einen Eingangsimpuls der Abb. 6.3.1, wenn man bei richtiger Polung den Potentiometerknopf aus der Mitte nach rechts dreht und wieder zurück zur Mitte.

Durch diesen Impuls wird die linke Platte des Kondensators, das heißt die Platte, die nicht mit der Basis und der Diode verbunden ist, zunächst positiv aufgeladen. Dabei werden auf die Gegenplatte negative Ladungen gesaugt. Da diese negativen Ladungen über die Diode nicht zufließen können (Sperrichtung), werden sie aus der Basis herausgeholt, diese wird dadurch positiv, es fließt ein Basisstrom, und über Emitter und Basis fließt die negative Ladung auf die Gegenplatte. Mit Einsetzen des Basisstroms wird der Transistor leitend, es fließt ein Kollektorstrom, das heißt der Schalter ist geschlossen. Die Höhe des Kollektorstroms wird durch den in den Kollektorkreis eingebauten Widerstand (Potentiometer) begrenzt.

Nimmt die positive Ladung der linken Kondensatorplatte ab, so fließen die negativen Ladungen ab. Ein Abfluß über Basis-Emitter ist nicht möglich (Sperrichtung). Ein Abfluß der negativen Ladungen kann nur über die Diode erfolgen. Mit dem Aussetzen des Basisstroms wird der Transistor nichtleitend, der Schalter ist wieder geöffnet. Man beobachtet die in Abb. 6.3.1 angegebene Umformung des Impulses.

Die Höhe des Rechteckimpulses hängt von dem Widerstand im Kollektorkreis ab und kann mit dem Potentiometer geregelt werden. Die Höhe hängt nicht ab von der Amplitude des Eingangsimpulses.

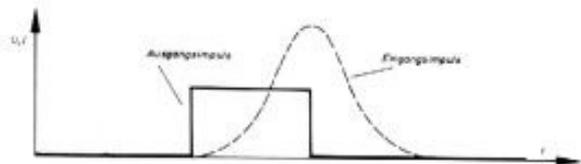


Abb. 6.3.1

Ersetzt man den Impuls der Abb. 6.3.1 durch eine Wechselspannung der Frequenz $f \approx 0,5$, indem man den Potentiometerknopf zwischen linkem und rechtem Anschlag hin- und herdreht, so ergeben sich die Impulse der Abb. 6.3.2.

Die Rechteckimpulse werden im Takt des Wechselstroms angeregt. Die Amplitude der Rechteckimpulse hängt aber nicht von der Amplitude des Wechselstroms ab.

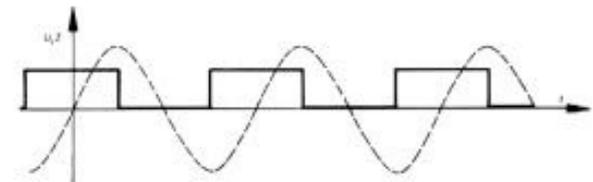
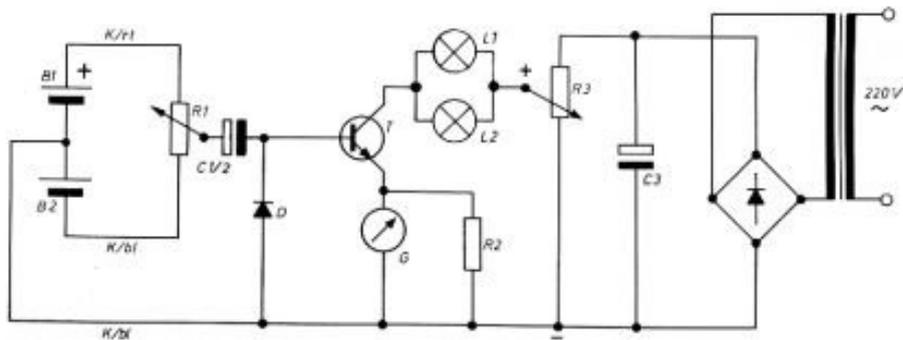


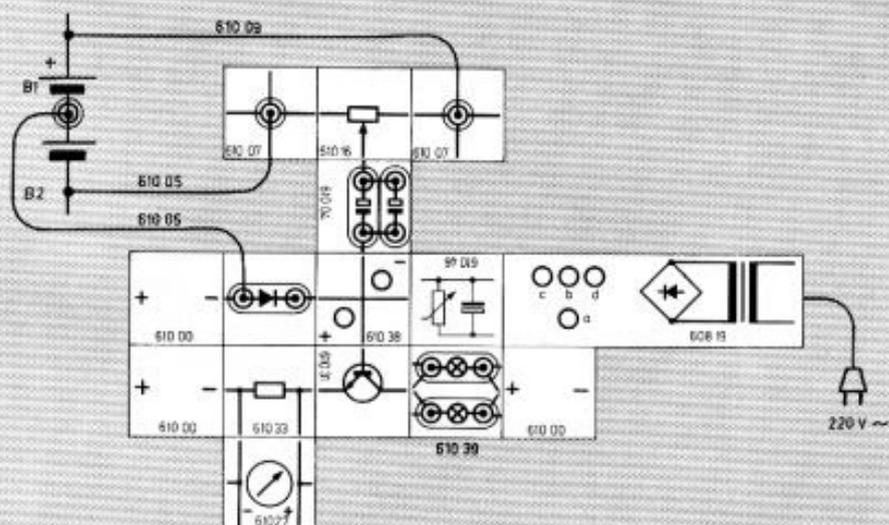
Abb. 6.3.2



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	1	Trafo	608 19
R3/C3	1	Spannungsteiler	610 46
G	1	Instrument	610 27
T	1	Transistor	610 31
R2	1	Widerstand, 1,2 Ω	610 33
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	3	Verbindung, + -	610 00
R1	1	Potentiometer, 1 kΩ	610 16
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	2	Verbindung	610 07
	5	Stecker, 2fach	610 40
K/bl	2	Kabel, blau	610 05
K/rt	1	Kabel, rot	610 09
	1	Krokodilklemme	970 7 2146 0
D	1	Diode, BA 130	901 7 2105 0
C1/2	2	Elko, 100 µF	923 7 2122 0
	1	Buchse, 4fach	610 39
L1/L2	2	Lampe 6 V/50 mA ¹⁾	610 2 3007 0

x Nicht im Baukasten enthalten

¹⁾ Schutzwiderstand



7. Transistor als Verstärker

7.1 Grundprinzip der Verstärkung

Bei der Verstärkung hat man drei Arten zu unterscheiden: Stromverstärkung, Spannungsverstärkung und Leistungsverstärkung.

Bei der Stromverstärkung vergleicht man die Schwankung des zugeführten Stromes ΔI_1 mit der Schwankung des abgehenden Stromes ΔI_2 und schreibt:

$$V_i = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \quad (\text{vgl. I, 10.3})$$

Bei der Spannungsverstärkung bildet man den entsprechenden Quotienten aus ΔU_2 (Schwankung der Ausgangsspannung) und ΔU_1 (Schwankung der Eingangsspannung) und schreibt:

$$V_u = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1}$$

Bei der Leistungsverstärkung bildet man in gleicher Weise den Quotienten aus zugeführter Leistung P_1 und abgenommener Leistung P_2 und schreibt:

$$V_P = \frac{P_2}{P_1}$$

Es gibt die drei in Abb. 7.1.1a, b, c angegebenen Grundschaltungen der Verstärkung:

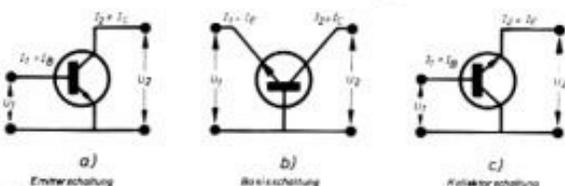


Abb. 7.1.1

Bei der Emitterschaltung ist der Emitter die gemeinsame Elektrode, und alle Spannungen werden auf den Emitter bezogen. Entsprechend ist bei der Basisschaltung die Basis und bei der Kollektorschaltung der Kollektor die gemeinsame Elektrode, auf die alle Spannungen bezogen werden. Die Emitterschaltung, die im folgenden ausschließlich benützt wird, ist für alle Verstärkungsarten brauchbar, während die Kollektorschaltung keine Spannungsverstärkung und die Basisschaltung keine Stromverstärkung ergibt. Bei letzterer ist $I_1 = I_E \approx I_C = I_2$ (keine Stromverstärkung), und bei der Kollektorschaltung hat man einen großen Eingangswiderstand (keine Spannungsverstärkung).

Die Stromverstärkung ist schon in (I, 10.2) besprochen worden. Die Spannungsverstärkung soll bei Emitterschaltung (Abb. 7.1.2) an Hand der Kennlinien der Abb. 7.1.3 (siehe Seite 104) (vgl. I, 10.2) untersucht werden.

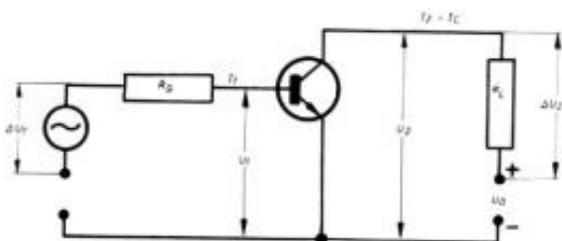


Abb. 7.1.2

Befindet sich im Kollektorkreis der Lastwider-

stand R_L , so entsteht an diesem Widerstand der Spannungsabfall $R_L \cdot I_C$.

Ist U_0 die konstante Batteriespannung, so ist $U_2 = U_{CE} = U_0 - R_L \cdot I_C$. Wenn sich I_C um ΔI_C ändert, ändert sich U_2 um $\Delta U_2 = R_L \cdot \Delta I_C$.

Nimmt man an, daß auf der Eingangsseite der Widerstand der Wechselspannungsquelle (Generator), kurz der Generatorwiderstand R_G , groß ist gegen den Eingangswiderstand des Transistors (Diodenstrecke in Durchlaßrichtung), so ist $\Delta U_1 \approx R_G \cdot \Delta I_1$ ($I_1 = I_B$), und man erhält für die Spannungsverstärkung:

$$(7.1.1) \quad V_U = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} \approx \frac{R_L \Delta I_C}{R_G \Delta I_B} = \frac{R_L}{R_G} \beta$$

Zeichnet man in das I_C, U_{EC} -Diagramm (Abb. 7.1.3) die Widerstandsgeraden für einzelne R_L -Werte und U_0 -Werte ein, so kann man die Verstärkung aus dem Diagramm entnehmen. Die Widerstandsgerade gibt bei gegebenem R_L und U_0 für jeden Wert von I_C die Spannung $U_{EC} = U_0 - I_C \cdot R_L$ an.

In Tabelle 7.1.1 sind einige Meßpunkte der Widerstandsgeraden ausgerechnet für $U_0 = 5 \text{ V}$ bzw. 10 V und für $R_L = 200 \Omega, 100 \Omega$ und 50Ω .

Tabelle 7.1.1

U_0 (V)	R_L (Ω)	I_C (mA)	U_{EC} (V)	U_0 (V)	R_L (Ω)	I_C (mA)	U_{EC} (V)
5	100	0	5	5	50	0	5
		20	3			40	3
		40	1			80	1
10	100	0	10	10	200	0	10
		40	6			20	6
		80	2			40	2

Die Widerstandsgeraden schneiden die Kennlinien. Die Schnittpunkte der Widerstandsgeraden ergeben zu jedem I_B -Wert den entsprechenden I_C -Wert, wenn man durch den Schnittpunkt eine horizontale Gerade legt, und den entsprechenden U_{EC} -Wert, wenn man durch den Schnittpunkt eine Senkrechte legt. Mit 2 Schnittpunkten erhält man im Diagramm 7.1.3 zu jedem ΔI_B die entsprechenden ΔI_C bzw. ΔU_2 . Da $\Delta U_1 = R_G \cdot \Delta I_B$ ist, kann man V_i und V_u angeben.

In Tabelle 7.1.2 sind einige Meßwerte für $U_0 = 10 \text{ V}$ angegeben.

Tabelle 7.1.2

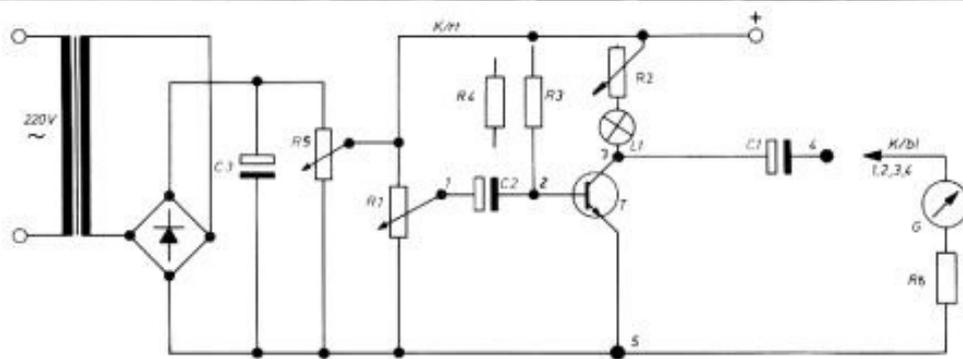
R_G	ΔI_B	ΔI_C	V_i	ΔU_2	ΔU_1	V_U
100Ω	$0,1 \text{ mA}$	20 mA	200	2 V	$0,01$	200

Versuch 45

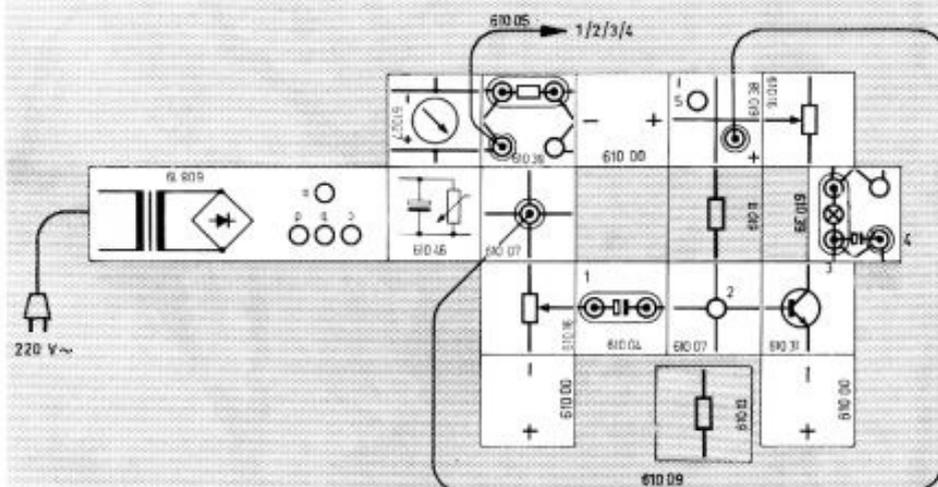
Bei der angegebenen Schaltung stellt man eine Spannung $U_0 \approx 10 \text{ V}$ ein. Prüfen mit Voltmeter (10 V-Bereich)!

Verbindet man die +Klemme des Voltmeters mit der Basis, so kann man ein bestimmtes ΔU_1 durch Drehen des Potentiometers R_1 einstellen. Verbindet man die +Klemme des Voltmeters dann mit dem Kollektor, so mißt man ΔU_2 , das heißt die entsprechende Schwankung von U_{CE} .

Da nur ein Voltmeter zur Verfügung steht und man nur entweder ΔU_1 oder ΔU_2 messen kann, muß man sich die Stellungen des Potentiometerdrehknopfes merken. Den Einfluß des Lastwiderstandes R_L entsprechend Formel (7.1.1) kann man durch Drehen des Knopfes am R_2 -Potentiometer beobachten.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
C3/R5	1	Spannungsteiler	610 46
G	1	Instrument	610 27
R4	1	Widerstand, 100 kΩ	610 13
T	1	Transistor	610 31
R3	1	Widerstand, 10 kΩ	610 11
R1/R2	2	Potentiometer, 1 kΩ	610 16
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	2	Buchse, 4fach	610 39
	1	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Stecker, 1fach	610 43
	3	Stecker, 2fach	610 40
	2	Verbindung	610 07
	3	Verbindung, + -	610 00
K/bl	1	Kabel, blau	610 05
K/rt	1	Kabel, rot	610 09
	1	Prüfspitze	610 2 2974 0
L1	1	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
C1/C2	2	Elko, 100 μF	923 7 2122 0
R6	1	Widerstand, 100 kΩ	930 7 1473 0



7.2 Niederfrequenzverstärkung

Im folgenden Versuch soll nun eine übliche Verstärkungsschaltung aufgebaut werden. ΔU_1 wird als technische Wechselspannung zugeführt. Eingangs- und Ausgangswechselspannung ΔU_1 und ΔU_2 werden mit einem Wechselspannungsvoltmeter gemessen. Durch Vergleich von ΔU_2 und ΔU_1 erhält man V_u .

Man kann aber auch an den Ausgang den Lautsprecherbaustein anschließen und seine Lautstärke vergleichen mit der Lautstärke, die er abgibt, wenn er direkt an die Wechselspannungsquelle angeschlossen wird. Man erhält dann einen Vergleich der Leistungen mit und ohne Transistorverstärker. Für die Leistung gilt: $P = U \cdot I$ (I, 5, 1). Im Ausgang ist daher neben der Spannungsschwankung ΔU_2 auch eine kräftige Stromschwankung ΔI_2 erforderlich, da es auf das Produkt $\Delta U_2 \cdot \Delta I_2$ ankommt.

Für eine maximale Leistungsabgabe muß der Verbraucher (Lautsprecher) an den Transistor angepaßt werden ($R_a = R_i$). Es gilt hier beim Wechselstrom die entsprechende Beziehung wie beim Gleichstrom (I, 5.2).

Da bei der Emitterschaltung Strom- und Spannungsverstärkung gleich günstig liegen (vgl. 7.1), hat man bei dieser Schaltung eine besonders günstige Leistungsverstärkung zu erwarten.

Versuch 46

In der angegebenen Schaltung werden dem Trafoblock an den Klemmen a und b 3 V entnommen. Mit einer Spannungsteilung werden etwa 0,1 bis 0,2 V über einen Ankopplungskondensator als Eingangsspannung dem Transistor zugeführt.

Wenn man einer Elektrode des Transistors eine Wechselspannung zuführen will, benützt man häufig als Kopplungsglied einen Kondensator. Dieser stellt für Wechselstrom einen kleinen

Widerstand dar ($R_C = \frac{1}{\omega C}$) und hält gleichzeitig unerwünschte Gleichströme fern. Das Entsprechende gilt natürlich auch für die Abnahme einer Wechselspannung.

Der Lautsprecher kann deshalb mit einem Kondensator am Ausgang des Transistors angekoppelt werden.

Zur Ermittlung der bei dieser Schaltung auftretenden Spannungsverstärkung mißt man mit dem Wechselspannungsvoltmeter die der Basis zugeführte Wechselspannung $U_1 \sim$ und die am Kollektor abgegebene Wechselspannung $U_2 \sim$. Zu diesem Zweck wird der eine Anschluß des Voltmeters mit dem Minuspol verbunden und der andere Anschluß abwechselnd mit dem Mittelabgriff des Potentiometers bzw. direkt auf der Basis (A) bzw. über den Kopplungskondensator mit dem Kollektor verbunden (B).

Für die Spannungsverstärkung gilt: $V_u = \frac{U_2 \sim}{U_1 \sim}$.

Man erhält bei der angegebenen Schaltung:

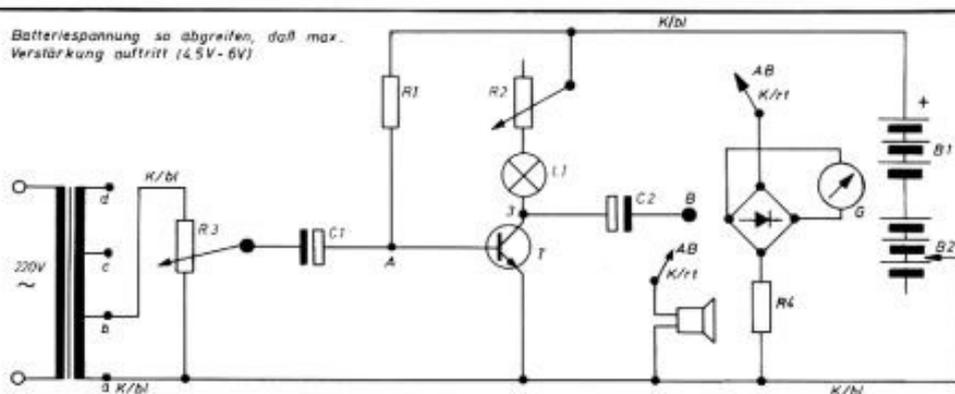
$$V_u \approx \frac{4 \text{ V}}{0,1 \text{ V}} = 40\text{fache Verstärkung.}$$

Die Leistungsverstärkung kann nur qualitativ nach der Lautstärke beurteilt werden, indem man den Lautsprecher ebenfalls wie das Voltmeter mit einem Anschluß mit dem Minuspol und einem zweiten Anschluß mit dem Mittelabgriff des Potentiometers (A) bzw. über den Kopplungskondensator mit dem Kollektor des Transistors verbindet (B). Im ersten Fall ist kaum etwas zu hören, während im zweiten Fall der Lautsprecher kräftig anspricht.

Mißt man die Spannungsverstärkung bei gleichzeitig angeschlossenem Lautsprecher, so geht die Spannungsverstärkung zurück.

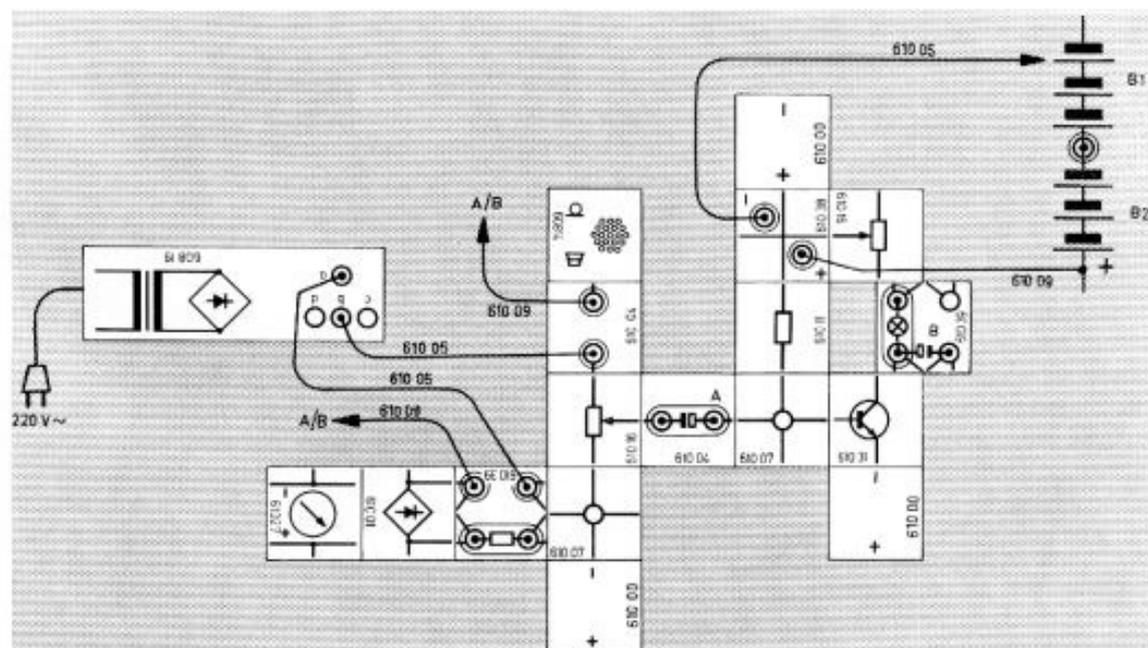
Die eingeschaltete Glühlampe dient der Kontrolle des Kollektorstromes.

Batteriespannung so abgreifen, daß max. Verstärkung auftritt (4,5V-6V)



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
B1/B2	2	Batterie, 4,5 V	x
	1	Trafo	608 19
T	1	Transistor	610 31
G	1	Instrument	610 27
R1	1	Meßgleichrichter	610 01
	1	Widerstand, 10 k Ω	610 11
R2/R3	1	Mikrofonlautsprecher	608 14
	2	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	2	Buchse, 4fach	610 39
	2	Verbindung	610 07
	3	Verbindung, + -	610 00
	2	Krokodilklemme	970 7 2146 0
	1	Stecker, 1fach	610 43
	3	Stecker, 2fach	610 40
K/bl	3	Kabel, blau	610 05
K/r	3	Kabel, rot	610 09
L1	1	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
R4	1	Widerstand, 100 k Ω	930 7 1473 0
C1/C2	2	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0

x Nicht im Baukasten enthalten



7.3 Gleichstromverstärkung

Mit 2 Transistoren kann man auf einfache Weise ganz beachtliche Gleichstromverstärkungen erreichen. Voraussetzung ist allerdings, daß ein Basisstrom überhaupt zustandekommt. Dafür ist aber bei den Transistoren des Baukastens eine Basis-Emitter-Spannung von mindestens 0,4–0,5 Volt erforderlich (I, 10.1). Man kann daher ohne weiteres die Ströme von schwächsten galvanischen Elementen verstärken, wenn nur deren EMK bei 0,5 V liegt. Auch bei der Verstärkung der Ströme von Photodioden und Photoelementen gibt es daher keine Schwierigkeit, da auch hier ausreichende Spannungen zur Verfügung stehen. Dagegen ist eine Verstärkung der Ströme bei Thermoelementen ohne weiteres nicht möglich, da hier die Spannungen bei einigen mV liegen.

Ein einfaches Thermoelement entsteht, wenn man leitende Metalle (z. B. Kupfer und Konstantan) zu einem Kreis zusammenlötet und die beiden Lötstellen auf verschiedene Temperaturen bringt. Bei 100° C Temperaturdifferenz erhält man bei Kupfer und Konstantan eine Thermospannung von etwa 4 mV.

Versuch 47

In der angegebenen Schaltung ist ein sehr schwaches Zn-Cu-Element mit der Basis-Emitter-Diodenstrecke und dem Meßinstrument ohne Shunt (Vollausschlag: 100 μ A) in Reihe geschaltet. Der Kupferstreifen (+) wird mit der Basis des ersten Transistors T 1 verbunden, die Zinkplatte (–) über das Meßinstrument mit dem Emitter von T 1. Berührt man mit dem Kupferstreifen und der Zinkplatte gleichzeitig ein angefeuchtetes Fließpapier, so fließt ein Strom von etwa 3 – 5 μ A. Wenn nun der Kollektorstrom des T 1 einsetzt, entsteht an der Basis des 2. Transistors T 2 eine positive Spannung (Spannungsabfall am 10 k Ω Widerstand). Der nun einsetzende Basisstrom bei T 2 bedingt einen entsprechenden Kollektorstrom bei T 2. Dieser Kollektorstrom wird mit einem regelbaren Widerstand (Potentiometer) begrenzt. Man kann mit diesem Widerstand die Verstärkung einstellen. Das in den Kollektor-Emitter-Kreis geschaltete Amperemeter zeigt bei 5 μ A Eingangsstromstärke etwa 100 mA an. Dies ergibt die Verstärkung

$$B \approx \frac{100 \text{ mA}}{0,005 \text{ mA}} = 20\,000.$$

Mit dem Gleichrichter (Trafo + Spannungsteiler) ist eine Spannung von etwa 9 V einzustellen.

Wenn man das Meßinstrument aus dem Eingangskreis nimmt, um den Ausgangsstrom zu messen, muß die Zinkplatte mit dem Emitter von T 1 direkt verbunden werden. Der Shunt von 1,2 Ω zur Messung des Ausgangsstromes bleibt immer in der Schaltung.

8. Elektronische Schalter

8.1 Schmitt-Trigger mit Potentiometer

Neben den Verstärkerschaltungen spielen vor allem in der Regeltechnik jene Schaltungen eine Rolle, bei denen der Transistor als Schalter arbeitet. Unter Schalterbetrieb eines Transistors versteht man die Tatsache, daß der Transistor einen gewöhnlichen Schalter mit 2 Schaltstellungen vertritt. In eingeschaltetem Zustand soll ein bestimmter vorgegebener Strom fließen, und im ausgeschalteten Zustand soll der Strom vernachlässigbar klein sein. Besonders geeignet für den Schalterbetrieb ist die Emitterschaltung, bei welcher der Transistor mit einem sehr kleinen Basisstrom als Steuerstrom geschaltet werden kann.

Von besonderer Bedeutung sind die sogenannten Kippschaltungen mit 2 Transistoren T 1 und T 2, wobei immer entweder T 1 leitend und T 2 gesperrt oder T 2 leitend und T 1 gesperrt ist. Man kann es nun z. B. so einrichten, daß normal T 1 gesperrt und T 2 leitend ist und daß, sobald die Basis des gesperrten Transistors T 1 genügend positive Spannung erreicht, T 1 leitend wird und T 2 sperrt, daß also die Schaltung bei einer bestimmten Spannung an der Basis von T 1 kippt. Eine solche Schaltung nennt man eine Schmitt-Trigger-Schaltung. „Trigger“ (engl.) bedeutet „Auslöser“.

Versuch 48

In der angegebenen Schaltung wird die Spannung an der Basis von T 1 durch ein Potentiometer (R_1) eingestellt. Der in der Schaltung auftretende regelbare Widerstand zwischen Mittelabgriff des Potentiometers und Basis stellt nur eine Verbindung her. Der Regelknopf wird so eingestellt, daß der Widerstand eingeschaltet ist. Steht zunächst der Regelknopf des Potentiometers R_1 am rechten Anschlag, so hat die Basis negative Spannung gegen den Emitter, da T 2 über die Spannungsteilung (L_1, R_1, R_2) positive Basisspannung erhält, damit leitend ist und über den beiden Transistoren gemeinsamen Emitterwiderstand $R_3 = 133 \Omega$ ein Spannungsabfall auftritt. Daß T 2 leitend ist, ersieht man an dem Leuchten des Glühlämpchens L_2 , das in den Kollektorkreis von T 2 geschaltet ist. Das in den Kollektorkreis von T 1 geschaltete Glühlämpchen

L_1 leuchtet nicht, T 1 ist gesperrt und stellt einen sehr großen Widerstand dar.

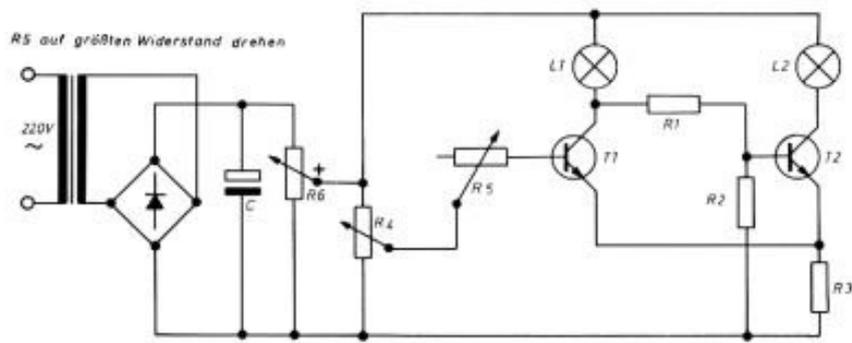
Dreht man nun den Potentiometerknopf von R_1 langsam nach links, so erhöht sich die Spannung an der Basis von T 1. Ist bei einer bestimmten Stellung die Basis-Emitter-Spannung $\approx + 0,5 \text{ V}$ (vgl. I, 10.1), so setzt der Basisstrom ein, der einen verstärkten Kollektorstrom zur Folge hat, d. h. T 1 wird leitend und stellt einen sehr kleinen Widerstand dar. Die Basis von T 2 erhält dann über die Spannungsteilung L_1, T_1 praktisch Emitterspannung. Bei T 2 setzt der Basisstrom aus. T 2 wird nicht leitend. Die Schaltung kippt um. Der gemeinsame Emitterwiderstand R_3 sorgt für ein rasches Umkippen. Wenn beim Einsetzen des Kippvorganges der Emitterstrom in T 2 kleiner wird, wird der Spannungsabfall an R_3 kleiner. Damit wird die Einstellung einer positiven Basis-Emitter-Spannung an T 1 beschleunigt, da ja die Emittierelektrode weniger positive Spannung erhält. T 1 und T 2 erfahren über den gemeinsamen Emitter-Widerstand eine „Rückkopplung“.

Dreht man den Potentiometerknopf weiter nach links, so ändert sich an der Stromstärke in L_1 praktisch nichts mehr. Dreht man den Potentiometerdrehknopf wieder zurück, so bleibt die Stromstärke in L_1 erhalten, bis bei einer bestimmten Stelle der Basisstrom in T 1 aussetzt und T 1 sperrt. T 1 stellt jetzt einen sehr großen Widerstand dar, die Basis von T 2 erhält über die Spannungsteilung L_1, R_1, R_2 wieder positive Spannung. T 2 ist wieder leitend, L_2 leuchtet auf. Die Schaltung ist wieder umgekippt. Bei weiterem Drehen nach rechts ändert sich der Strom in L_2 nicht mehr.

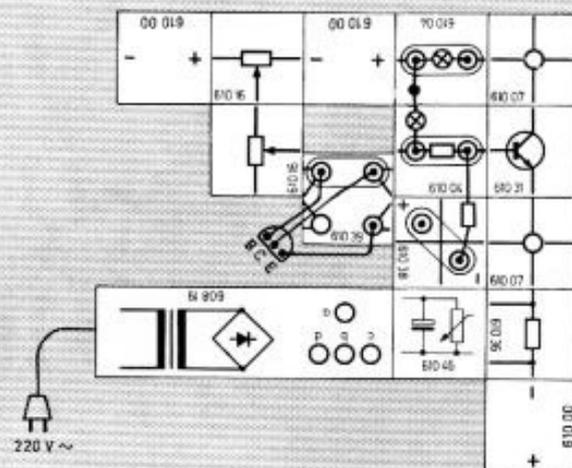
Die Transistoren T 1 und T 2 wirken wie Schalter, die einen vorgegebenen, durch die Widerstände L_1 bzw. L_2 und R_3 in der Höhe begrenzten Strom ein- bzw. ausschalten.

Im allgemeinen ist es erwünscht, daß die Schaltung wieder zurückkippt, sobald die kritische Spannung an der Basis von T 1 wieder unterschritten wird. Bei der vorliegenden Schaltung tritt ein ziemlicher „Ziehbereich“ auf, der darauf zurückzuführen ist, daß die Widerstände im Kollektorkreis Glühlämpchen sind, deren Widerstand relativ klein und außerdem verschieden groß ist, je nachdem, ob die Lämpchen leuchten oder nicht. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes wurde in (I, 4.10) besprochen.

Die Länge der Anschlußdrähte des Glühlämpchens ist meist nicht ausreichend, um das Lämpchen L_1 in den Doppelsteckern festzuklemmen. Man muß dann einen Doppelstecker seitlich mit einem Einzelstecker versehen, um so einen kleineren Abstand der Klemmen zu erreichen.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
C/R6	1	Spannungsteiler	610 46
	3	Verbindung, + -	610 00
R4/R5	2	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	2	Verbindung	610 07
T2	1	Transistor	610 31
	1	Buchse, 4fach	610 39
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
R3	1	Widerstand, 133 Ω	610 36
T1	1	Transistor, kpl.	610 47
	4	Stecker, 2fach	610 40
	2	Stecker, 1fach	610 43
L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
R1/R2	2	Widerstand, 10 k Ω	930 7 1961 0



Versuch 49

a) Zeitgeber

Der Aufbau des Versuches ist der gleiche wie bei Versuch 48, nur das Potentiometer wird ersetzt. Man schaltet zwischen Basis und Minuspol einen Elektrolytkondensator mit $C = 100 \mu\text{F}$ bzw. $200 \mu\text{F}$, zwischen Basis und Pluspol schaltet man den Widerstand $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$ bzw. $10 \text{ k}\Omega$.

Zunächst schließt man mit einem Kabel durch Antippen den Kondensator kurz. B_1 hat negative Spannung und T 1 ist gesperrt. Die Basis von Transistor T 1 wird mit B_1 bezeichnet. Gibt man den +Pol des Elektrolytkondensators frei, so setzt die Aufladung ein, und bei Erreichen der kritischen Spannung kippt die Schaltung um. Man erhält die in Tabelle 8.2.1 zusammengestellten Meßwerte. T bedeutet die Zeit vom Entfernen des Kurzschlußkabels am Kondensator bis zum Umkippen.

Tabelle 8. 2. 1

C (μF)	R_1 ($\text{k}\Omega$)	T (s)
200	5	0,5
200	10	1,0
100	10	0,5

8.2 Schmitt-Trigger als Zeitgeber

Dämmerungsschalter oder Temperaturwächter

In Versuch 48 wurde das Umkippen dadurch erreicht, daß man durch Drehen eines Potentiometers die kritische Spannung an der Basis von T 1 eingestellt hat. Die Einstellung der kritischen Basisspannung kann aber auch erreicht werden, wenn man das Potentiometer durch einen Kondensator ersetzt, der über einen Widerstand aufgeladen wird.

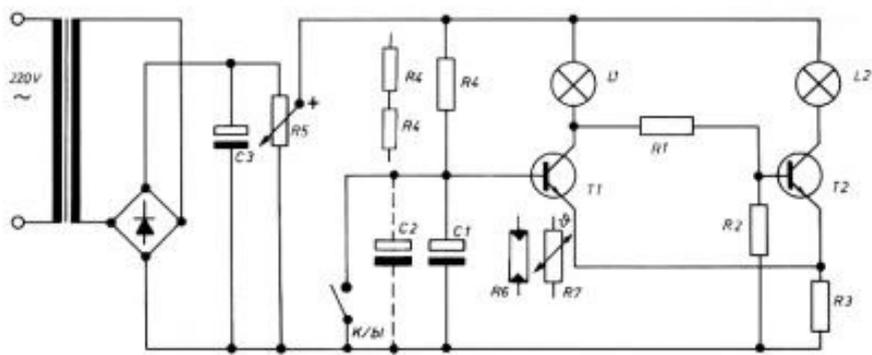
In (I, 6.3) wurde das Laden eines Kondensators ausführlich besprochen. Die Zeit, bis eine bestimmte Spannung erreicht wird, ist proportional zu $R \cdot C$. Durch geeignete Wahl von R und C kann man somit die Zeit, bis das Umkippen eintritt, einregulieren. Man spricht von einem Schmitt-Trigger als Zeitgeber. Außerdem kann das Potentiometer aber auch ersetzt werden durch eine Schaltung nach (I, 10.5) oder (I, 10.7).

b) Dämmerungsschalter (ohne Abb.)

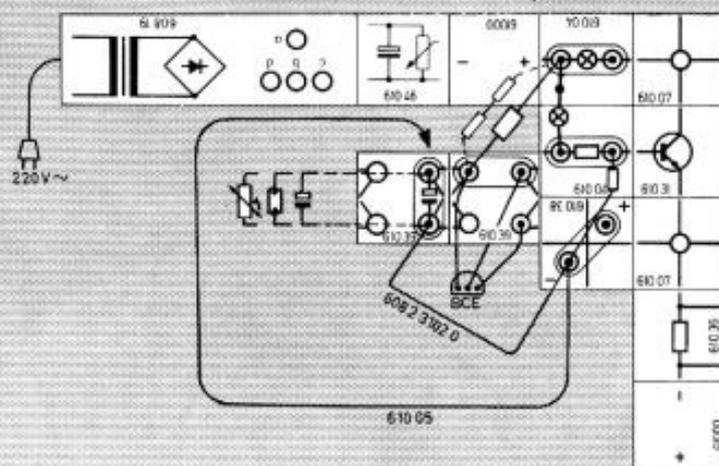
Ersetzt man den Kondensator durch einen Photowiderstand, und wählt man $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$, so ist bei normaler Beleuchtung (Tageslicht) T 1 gesperrt. Bei Abdunkeln wird der Photowiderstand größer und größer. Dadurch steigt die positive Spannung der Basis, und bei einem kritischen Punkt kippt die Schaltung wieder um. Das Kurzschlußkabel wird natürlich nicht benötigt.

c) Temperaturwächter (ohne Abb.)

Man ersetzt den Photowiderstand durch den Heißleiter und wählt $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$. Erwärmt man den Heißleiter mit einem Föhn, so kippt bei einer bestimmten Temperatur die Schaltung um.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
R5/C3	1	Spannungsteiler	610 46
	2	Verbindung, + -	610 00
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	2	Buchse, 4fach	610 39
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
T2	1	Transistor	610 31
	2	Verbindung	610 07
R3	1	Widerstand, 133 Ω	610 36
	5	Stecker, 2fach	610 40
K/bl	1	Kabel, blau	610 05
T1	1	Transistor, kpl.	610 47
L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
R1/2	2	Widerstand, 10 kΩ	930 7 1961 0
C1/2	2	Elko, 100 μF	923 7 2122 0
	1	Schaltdraht	608 2 3102 0
	2	Stecker, 1fach	610 43
R4	2	Widerstand, 5,1 kΩ	930 7 1786 0
R6	1	Fotowiderstand	901 7 2179 0
R7	1	Heißeiter, 60 kΩ	933 7 1943 0



8.3 Astabiler Multivibrator (0,1 Hz) Blinkschaltung

Zu den Kippschaltungen mit 2 Schaltzuständen gehören auch die sogenannten Multivibratoren, wörtlich „Vielfachschwinger“ (multi [lat.] viel, vibrae [lat.] schwingen).

Man unterscheidet die astabilen Multivibratoren, bei denen keiner der beiden Schaltzustände stabil ist, die monostabilen Multivibratoren, bei denen nur einer der beiden Schaltzustände stabil ist, und die bistabilen Multivibratoren, bei denen beide Schaltzustände stabil sind.

Die Multivibratoren spielen bei den digitalen Rechenanlagen (Computern) eine entscheidende Rolle, da dort mit einem zweiwertigen Zahlensystem, in dem es nur die Ziffern 0 und 1 gibt, gearbeitet wird. Die Ziffern 0 und 1 entsprechen gerade den beiden Schaltzuständen. Die astabilen Multivibratoren, die zunächst besprochen werden, spielen bei den digitalen Schaltungen die Rolle des Taktgebers, indem sie in regelmäßigen Abständen Rechteckimpulse von vorgeschriebener Dauer erzeugen. Man kann eine astabile Multivibratorschaltung allerdings auch als einfache Blinkschaltung, z. B. in Kraftfahrzeugen, benutzen.

Versuch 50

Die angegebene Multivibratorschaltung hat große Ähnlichkeit mit einem zweistufigen Verstärker, bei dem der Ausgang der zweiten Stufe mit dem Eingang der ersten Stufe verbunden ist, und es ist sehr wohl möglich, daß die Entdeckung des Multivibrators durch Abraham und Bloch einem Montagefehler zu verdanken ist.

Der Lastwiderstand ist bei den Transistorstrecken eine Glühlampe, die jeweils anzeigt, welche Transistorstrecke leitend ist. Die Kopplung von dem Kollektor des einen Transistors auf die Basis des anderen Transistors erfolgt durch Elektrolytkondensatoren von $100 \mu\text{F}$, bei denen auf die richtige Polung zu achten ist, die + Belegung muß der Basis des jeweiligen Transistors zugewandt sein. Legt man durch Drehen am Potentiometerknopf des Glättungsbausteines eine Span-

nung von 6 – 9 V an, so ist aus der Schaltung nicht abzulesen, welcher der beiden Transistoren T1 und T2 zunächst leitend wird, da die Anordnung vollkommen symmetrisch ist. In der Praxis sind allerdings kleine Unterschiede in den Bauteilen, die sich auswirken. Nimmt man an, die Basis von T2 werde zunächst positiv, so leitet zunächst T2, und die linke Belegung von C_1 erhält praktisch negative Emitterspannung, da der Widerstand des leitenden Transistors T2 klein gegenüber dem Widerstand der Glühlampe L_2 ist. C_1 lädt sich über R_1 auf, wodurch (8.2) die Basis von T1 mehr und mehr positiv wird. Fließt beim Erreichen der kritischen Basisspannung ein Basisstrom und dadurch ein wesentlich verstärkter Kollektorstrom, so lädt sich zunächst die linke Belegung von C_2 negativ auf, treibt die negativen Ladungen in der rechten Belegung weg auf die Basis von T2, die negativ wird und den Transistor T2 sperrt.

Der gesperrte Transistor T2 stellt einen sehr großen Widerstand dar, d. h. er entspricht einem geöffneten Schalter. T1 entspricht einem geschlossenen Schalter. Jetzt lädt sich der Kondensator C_2 auf über R_2 , wobei die rechte Belegung und damit die Basis von T2 positiv wird. Gleichzeitig entlädt sich C_1 über L_2 und R_1 . Wenn nun bei genügend positiver Basisspannung T2 leitend wird, fließen sofort negative Ladungen auf die linke Belegung von C_1 , treiben negative Ladungen von der rechten Belegung auf die Basis von T1, der dadurch wieder gesperrt wird usw.

Durch geeignete Wahl von C_1 und C_2 bzw. R_1 und R_2 kann man die Blinkdauer von L_1 und L_2 beeinflussen, da die Zeit für das Aufladen und Entladen der Kondensatoren proportional zu $C_1 R_1$ bzw. $C_2 R_2$ ist. (I, 6.2).

Man erhält etwa die in Tabelle 8.3.1 zusammengestellten Meßwerte.

Tabelle 8.3.1

$C_1 (\mu\text{F})$	$R_1 (\text{k}\Omega)$	$C_2 (\mu\text{F})$	$R_2 (\text{k}\Omega)$	$T_1 (\text{s})$	$T_2 (\text{s})$
100	10	100	10	0,4	0,4
100	10	200	10	0,4	0,8
200	10	100	10	0,8	0,4
200	20	100	10	1,6	0,4
100	100	100	10	4,0	0,4

T_1 ist die Leuchtdauer von L_1 und T_2 die Leuchtdauer von L_2 . Die Zeiten T_1 und T_2 hängen natürlich auch von der Spannung ab, mit der der Multivibrator betrieben wird. Bei größerer Spannung erfolgt die Aufladung schneller, da ein größerer Ladestrom zur Verfügung steht.

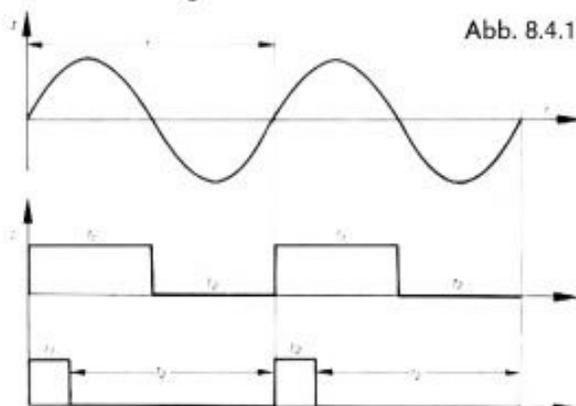
Versuch 51

Man ersetzt in der Schaltung des Versuches 50 die Kondensatoren mit $C = 100 \mu\text{F}$ durch Kondensatoren der Kapazität $C = 0,1 \mu\text{F}$ und schaltet zum Nachweis der Schwingung zwischen den Kollektor des Transistors T1 und den Minuspol den Lautsprecher ein. Die Glühlämpchen L_1 und L_2 lassen vom steten Wechsel nichts mehr erkennen, da eine so hochfrequente Helligkeitsschwankung infolge der physiologischen Nachwirkung des Lichtes im menschlichen Auge als gleichmäßiges Licht wahrgenommen wird. Ersetzt man die Kapazitäten und die Widerstände durch größere bzw. kleinere Werte, so erhält man eine Bestätigung für die Formel:

$$f = \frac{1}{T} \sim \frac{1}{C \cdot R}$$

Dabei wird noch eine weitere Tatsache der Akustik deutlich. Die erzeugten Töne unterscheiden sich nicht nur in der Tonhöhe, sondern auch in der sogenannten Klangfarbe. Die Tonhöhe ist bedingt durch die Frequenz $f = \frac{1}{T}$, die Klangfarbe hängt von der Form der Schwingung ab.

Die Rechteckimpulse des astabilen Multivibrators ergeben eine andere Klangfarbe als ein sinusförmiger Wechselstrom (2.9). Wenn man beim astabilen Multivibrator durch geeignete Wahl der Kapazitäten und Widerstände T_1 und T_2 bzw. T'_1 und T'_2 so bestimmt, daß zwar $T_1 + T_2 = T'_1 + T'_2 = T$ ist, aber T_1 von T'_1 verschieden ist, so erhält man wohl dieselbe Tonhöhe, aber nicht dieselbe Klangfarbe. Die in Abb. 8.4.1 dargestellten Schwingungen haben dieselbe Frequenz und damit dieselbe Tonhöhe, aber verschiedene Klangfarbe.

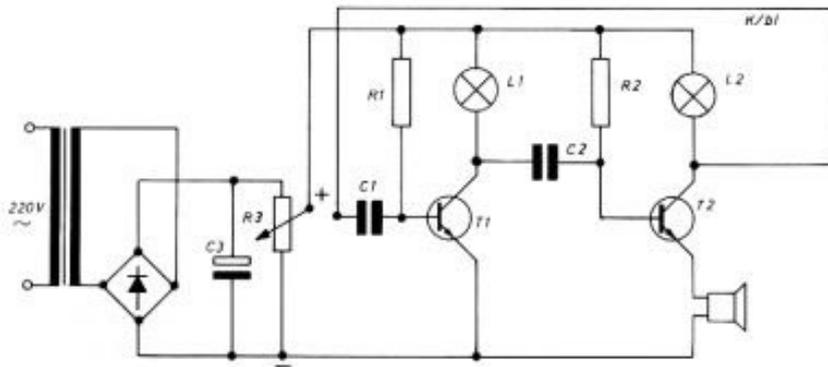


8.4 Astabiler Multivibrator (Tonfrequenz)

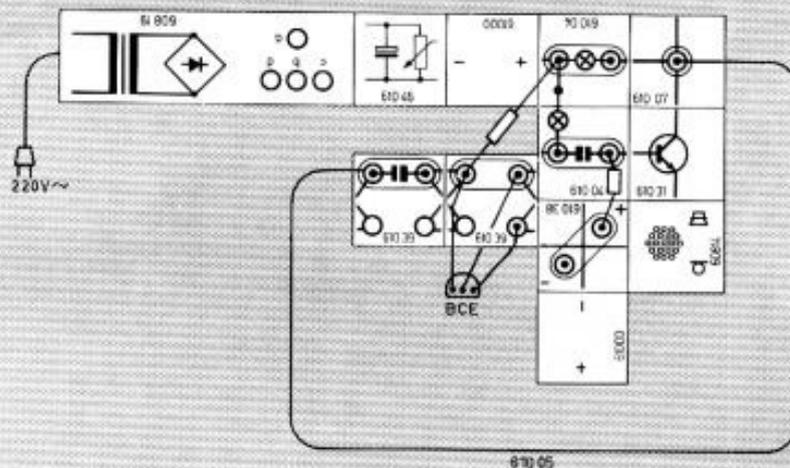
Aus der Tabelle 8.3.1 kann man ersehen, wie die Kapazitäten und die Widerstände zu wählen sind, damit man in den Bereich der Tonfrequenz gelangt. Da $C = 100 \mu\text{F}$ und $R = 10 \text{ k}\Omega$ eine Schwingungszeit $T = T_1 + T_2 \approx 1 \text{ s}$ ergibt, und da $T \sim C \cdot R$ ist, erhält man für $C = 0,1 \mu\text{F}$ und

$$R = 10 \text{ k}\Omega \quad T \approx \frac{1}{1000} \text{ s} \quad \text{und} \quad f = \frac{1}{T} \approx 1000 \text{ Hz.}$$

Neben der Tonhöhe und der Klangfarbe ist für jeden Ton die Lautstärke von Bedeutung, diese hängt natürlich von der Amplitude der Schwingung ab. An dieser Stelle soll jedoch auf den Unterschied zwischen Schallstärke und Lautstärke nicht näher eingegangen werden.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
R3/C3	1	Trafo	608 19
	1	Spannungsteiler	610 46
	2	Verbindung, + -	610 00
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Verbindung	610 07
	1	Mikrofonlautsprecher	608 14
	2	Buchse, 4fach	610 39
T2	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	1	Transistor	610 31
	5	Stecker, 2fach	610 40
K/bl	2	Stecker, 1fach	610 43
	1	Kabel, blau	610 05
L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
C1/C2	2	Kondensator, 0,1 µF	926 7 1833 0
R1/R2	2	Widerstand, 10 kΩ	930 7 1961 0
T1	1	Transistor, kpl.	610 47



tisch Emitterspannung und T1 bleibt gesperrt, da jetzt die Basis von T1 Emitterspannung besitzt. Um nun einen Kippvorgang in Gang zu bringen, muß man einen kurzen positiven Impuls von außen der Basis von T1 zuführen. Diese Zuführung erfolgt über einen Kondensator der Kapazität $C_3 = 1 \mu\text{F}$, dem ein Widerstand von $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ parallelgeschaltet ist. Verbindet man die linke Belegung von C_3 mit dem Pluspol, so wird die Basis von T1 positiv und T1 leitend. Es fließen sofort negative Ladungen auf die linke Belegung von C_2 , welche die negativen Ladungen von der rechten Belegung auf die Basis von T2 treiben. T2 wird gesperrt. Die linke Belegung des Kondensators C_2 ist über den leitenden T1 mit dem Minuspol, die rechte Belegung von C_2 über R_1 mit dem Pluspol verbunden. C_2 lädt sich auf und bewirkt, daß nach einiger Zeit, die prop. zu $C_2 \cdot R_2$ ist, die Basis von T2 wieder positiv und T2 wieder leitend wird. Sobald T2 leitend ist, hat der Kollektor von T2 und damit die Basis von T1 Emitterspannung, d. h. T1 wird gesperrt, selbst wenn die linke Belegung von C_3 noch mit dem Pluspol verbunden ist. Trennt man die linke Belegung von C_3 vom Pluspol, so entlädt sich C_3 über R_3 und R_2 , und bei erneuter Berührung kann die Basis von T1 wieder positive Spannung erhalten und ein kurzzeitiges Umkippen einleiten. Für die Zeit T_1 , in der T1 leitend ist, ergibt sich die in Tabelle 8.5.1 zusammengestellte Abhängigkeit von C_2 und R_1 .

Tabelle 8.5.1

C_2	R_1	T_1
100 μF	10 $\text{k}\Omega$	1 s
200 μF	10 $\text{k}\Omega$	2 s

Die Länge von T_1 ist unabhängig von der Länge und Form des steuernden Impulses (Abb. 8.5.1). U_{st} bedeutet die Spannung des steuernden Impulses, U_{CE} die Kollektorspannung von T1.

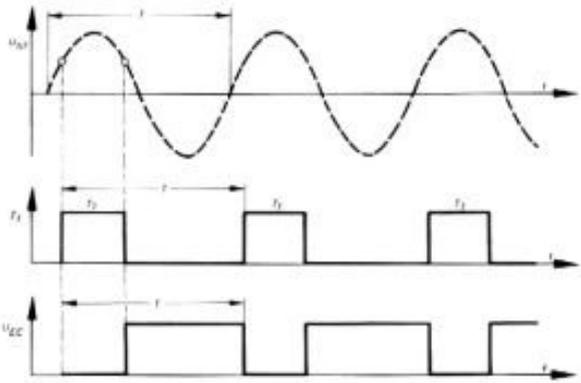


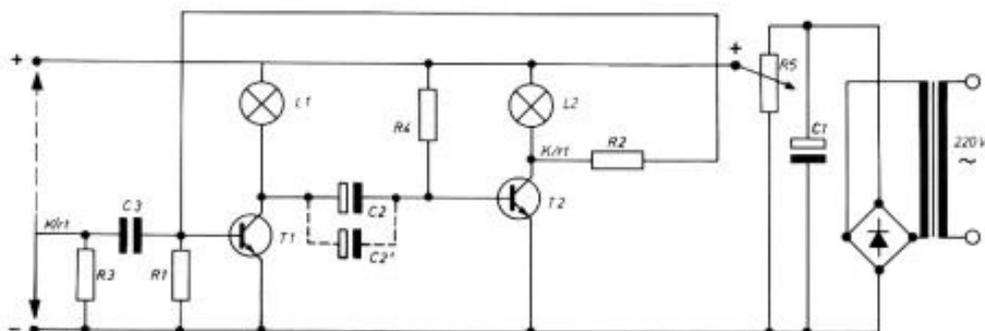
Abb. 8.5.1

8.5 Monostabiler Multivibrator

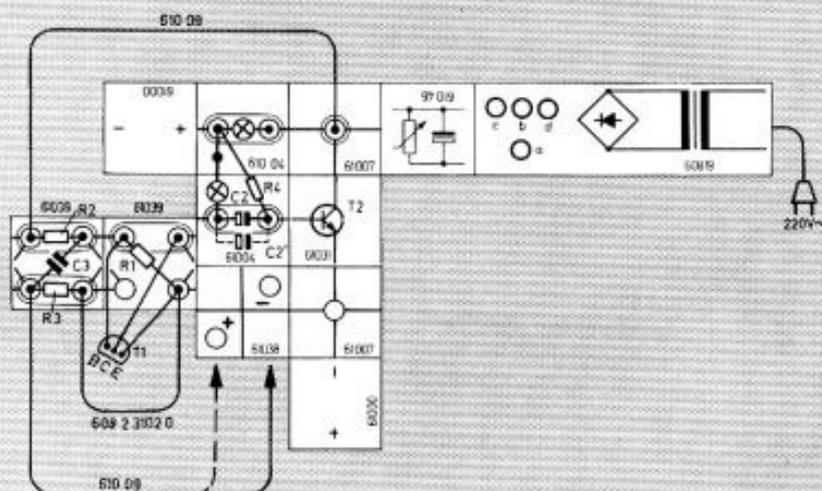
Der monostabile Multivibrator hat nur einen (monos [griech.] = einer) stabilen Schaltzustand; wird er durch einen Impuls aus diesem herausgelöst und in die andere Schaltstellung gebracht, so kippt er nach einer bestimmten Zeit, die durch ein RC-Glied der Schaltung gegeben ist, wieder in den stabilen Zustand zurück.

Versuch 52

Die angegebene Schaltung unterscheidet sich von der Schaltung des astabilen Multivibrators dadurch, daß die Basis von T1 nicht mehr wie die Basis von T2 über einen 10 $\text{k}\Omega$ Widerstand mit dem Pluspol verbunden ist, sondern über eine Spannungsteilung mit $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$ an den Kollektor von T2 angeschlossen ist. Das bedeutet, daß beim Einschalten die Basis von T2 auf jeden Fall eine stärkere positive Spannung erhält als die von T1, d. h. T2 wird leitend, und dann hat der Kollektor von T2 prak-



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
R5/C1	1	Spannungsteiler	610 46
	1	Trafo	608 19
	2	Verbindung, + -	610 00
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	2	Buchse, 4fach	610 39
	2	Verbindung	610 07
T1	1	Transistor, kpl.	610 47
T2	1	Transistor	610 31
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	5	Stecker, 2fach	610 40
	2	Stecker, 1fach	610 43
K/r/t	2	Kabel, rot	610 09
R1	1	Widerstand, 1 k Ω	930 7 1441 0
R2	1	Widerstand, 5,1 k Ω	930 7 1786 0
R3	1	Widerstand, 100 k Ω	930 7 1473 0
R4	1	Widerstand, 10 k Ω	930 7 1961 0
L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
C2/C2'	2	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0
C3	1	Kondensator, 1 μ F	926 7 1976 0
	1	Schaltdraht	608 2 3102 0



8.6 Bistabiler Multivibrator

Beim bistabilen Multivibrator (bis [lat.] = doppelt) sind beide Schaltzustände stabil, und man muß einen geeigneten Impuls zuführen, um den Kippvorgang einzuleiten. Nach dem Umkippen ist der neue Schaltzustand stabil, bis neuerdings ein geeigneter Impuls zugeführt wird.

Der bistabile Multivibrator ist zusammen mit der in 8.7 besprochenen Flip-Flop-Schaltung eines der wichtigsten Bauelemente der Elektronik und hat z. B. große Bedeutung für das elektronische Rechnen (Computer) und für Zählschaltungen als sogenannter Untersetzer.

Versuch 53

Die Schaltung des bistabilen Multivibrators ist ähnlich wie beim astabilen Multivibrator vollkommen symmetrisch und man kann von vornherein nicht sagen, welcher der beiden Transistoren beim Anlegen der Spannung leitend wird. Das hängt von der Unregelmäßigkeit der Bausteine ab. Man dreht den Potentiometerknopf am Glätungsbaustein so lange, bis eines der beiden Glühlämpchen normal leuchtet. Die Basis jedes Transistors ist über eine Spannungsteilung (10 k Ω , 5 k Ω) mit dem Kollektor des anderen Transistors verbunden. Wenn nun zufällig T 2 leitend geworden ist, so hat der Kollektor von T 2 praktisch Emitterspannung und somit die Basis von T 1 erst recht, d. h. T 1 ist gesperrt und bleibt gesperrt, bis entweder der Basis von T 1

ein positiver Impuls oder der Basis von T 2 ein negativer Impuls zugeführt wird.

Diese Impulse erzeugt man am einfachsten durch sehr kurzes Antippen eines Kabels, das mit der Basis von T 1 oder T 2 verbunden ist, am Plus- bzw. Minuspol. Besser ist allerdings die Verwendung eines Koppelkondensators mit der Kapazität $C_1 = 100 \mu\text{F}$, dessen eine Belegung mit der Basis des betreffenden Transistors verbunden und dessen 2. Belegung durch ein Kabel mit dem Pluspol oder dem Minuspol verbunden wird. Wird der Basis eines leitenden Transistors ein positiver Impuls zugeführt, so ändert sich natürlich nichts an seinem Schaltzustand, wird aber der Basis eines leitenden Transistors ein negativer Impuls zugeführt, so wird der Transistor gesperrt und bleibt gesperrt, da im Augenblick der Sperrung sein Kollektor und damit die Basis des anderen Transistors über die Spannungsteilung positive Spannung erhält. Sobald dieser andere Transistor leitend ist, nimmt dessen Kollektor und damit die Basis des ersten Transistors Emitterspannung an und bleibt gesperrt, auch wenn der negative Impuls abgeklungen ist. Es ergeben sich die in der Tabelle 8.6.1 angegebenen Möglichkeiten für das Kippen.

Tabelle 8.6.1

Zustand von T 1	Zustand von T 2	Impuls an der Basis von T ₁	Impuls an der Basis von T ₂	Resultat
leitend	gesperrt	pos. Imp.	—	—
leitend	gesperrt	neg. Imp.	—	umkippen
leitend	gesperrt	—	pos. Imp.	umkippen
leitend	gesperrt	—	neg. Imp.	—
gesperrt	leitend	pos. Imp.	—	umkippen
gesperrt	leitend	neg. Imp.	—	—
gesperrt	leitend	—	pos. Imp.	—
gesperrt	leitend	—	neg. Imp.	umkippen

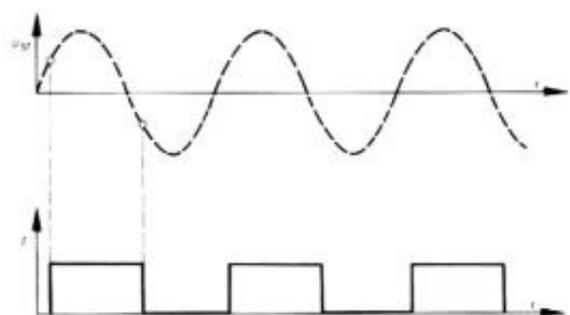
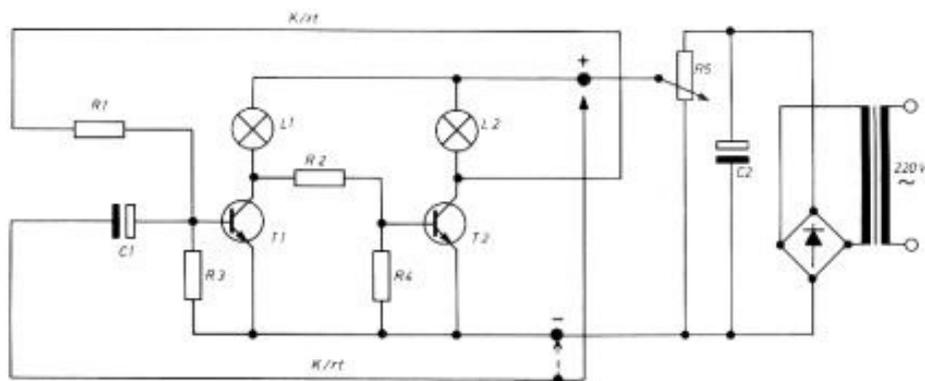
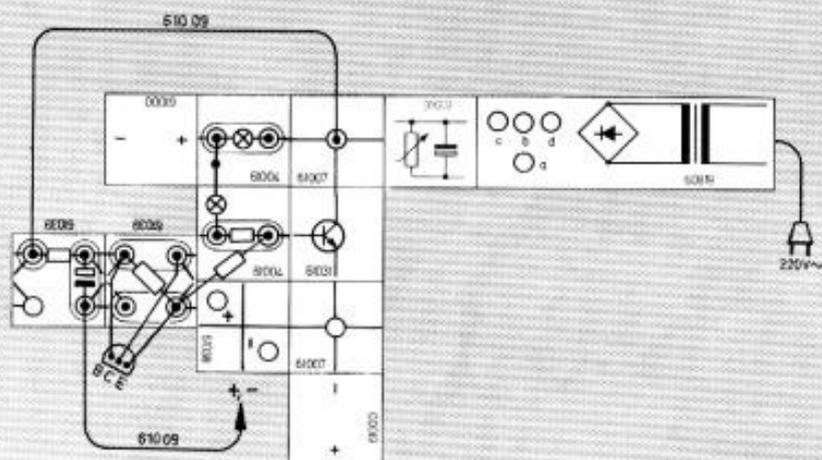


Abb. 8.6.1

In Abb. 8.6.1 sind die Verhältnisse skizziert, wenn der Basis eines Transistors T eine gewöhnliche Wechselspannung zugeführt wird.



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
R5/C2	1	Spannungsteiler	610 46
	2	Verbindung, + -	610 00
	2	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	2	Verbindung	610 07
T2	1	Transistor	610 31
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
	2	Buchse, 4fach	610 39
	5	Stecker, 2fach	610 40
	2	Stecker	610 43
K/rt	2	Kabel, rot	610 09
T1	1	Transistor, kpl.	610 47
C1	1	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0
R3/R4	2	Widerstand, 5,1 k Ω	930 7 1786 0
R1/R2	2	Widerstand, 10 k Ω	930 7 1961 0
L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0



8.7 Flip-Flop

Die Flip-Flop-Schaltung ist eine kleine Abwandlung der Schaltung des bistabilen Multivibrators. Sie unterscheidet sich in der Ansteuerung. Beim bistabilen Multivibrator mußte man, um ein Umkippen der Schaltung zu erreichen, jeweils der Basis des leitenden Transistors einen negativen Impuls zuführen. Ein negativer Impuls am gesperrten Transistor blieb ohne Einfluß. Bei der Flip-Flop-Schaltung soll nun **ein** negativer Impuls, der gemeinsam B_1 und B_2 zugeführt wird, jedesmal ein Umkippen der Schaltung herbeiführen. B_1 bzw. B_2 ist die Basis vom Transistor T_1 bzw. T_2 . Beim bistabilen Multivibrator spricht man von einer unsymmetrischen Ansteuerung und bei der Flip-Flop-Schaltung von einer symmetrischen Ansteuerung.

Versuch 54

Der Aufbau der Flip-Flop-Schaltung entspricht weitgehend der Schaltung in Versuch 53. Um eine symmetrische Ansteuerung zu erreichen, kann man nun nicht einfach die zu B_1 und B_2 führenden Kabel aus Versuch 53 zusammenfassen und gemeinsam an den Minuspol führen. Da bei einer Verbindung der Kabelenden eine direkte galvanische Verbindung von B_1 zu B_2 hergestellt wird und somit beide Punkte immer gemeinsame Spannung hätten. Man muß vielmehr zwischen Verbindungsstelle und Basis jeweils eine Diode so einbauen, daß nur negative Spannungen zu B_1 und B_2 gelangen können. Da die Dioden auf der Verbindungsstrecke B_1 B_2 einander entgegengerichtet sind, ist B_1 und B_2 entkoppelt. Wie bei Versuch 53 führt man die Verbindungsstelle der beiden Kabel nicht direkt an den Minuspol, sondern besser über einen Ankopplungskondensator von $1 \mu\text{F}$.

Bei der symmetrischen Ansteuerung der Flip-Flop-Schaltung wird es notwendig, parallel zu den Widerständen $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ die Kopplungskondensatoren $C_1 = 100 \mu\text{F}$ und $C_2 = 100 \mu\text{F}$ zu schalten.

Die Kopplungskondensatoren wären auch bei der Schaltung mit unsymmetrischer Ansteuerung

nützlich, sind aber nicht unbedingt erforderlich. Sie beschleunigen wegen des geringen Wechselstromwiderstands den Kippvorgang. Die symmetrische Ansteuerung ist aber nur mit den Kondensatoren möglich. Beide Transistoren sind nämlich im ersten Augenblick nach Anlegen der negativen Spannung gesperrt. Das ganze System ist in einem symmetrischen und instabilen Zustand, und das System hat keinen Grund, eher in die eine als in die andere Richtung zu kippen, wenn nicht die Koppelkondensatoren den vorausgegangenen Zustand in eindeutiger Weise gespeichert hätten. Wenn z. B. T_1 leitend und T_2 gesperrt ist, hat K_2 (Kollektor des Transistors T_2) eine höhere positive Spannung als K_1 (Kollektor des Transistors T_1). C_1 ist damit auf größere Spannung aufgeladen als C_2 . Sie ist etwa gleich dem Spannungsabfall an L_1 . Wenn nun im Augenblick des negativen Steuerimpulses beide Transistoren gesperrt sind, entscheidet die Kondensatorladung über die Kipprichtung. C_1 ergibt an der Basis B_1 eine negative Spannung, d. h. T_1 bleibt gesperrt und T_2 wird leitend.

In Abb. 8.7.1 werden die Verhältnisse skizziert, wenn gewöhnliche Wechselspannung als Steuerungsspannung zugeführt wird.

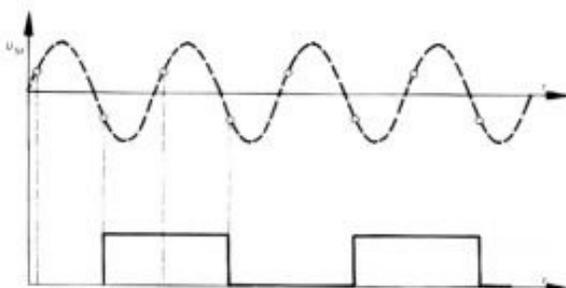


Abb. 8.7.1

In Abb. 8.7.2 wird eine Untersetzung dargestellt, wobei mehrere Flip-Flops hintereinandergeschaltet werden. Der Schaltimpuls eines Flip-Flops ist dann Steuerimpuls für das nachfolgende Flip-Flop.

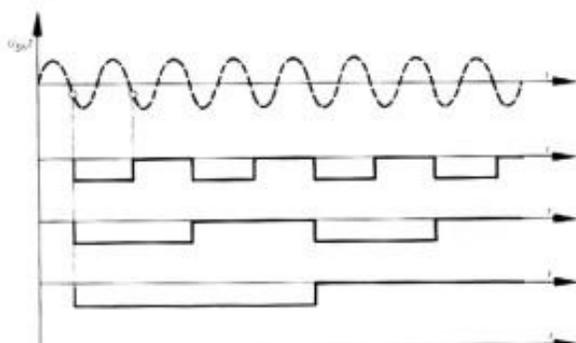
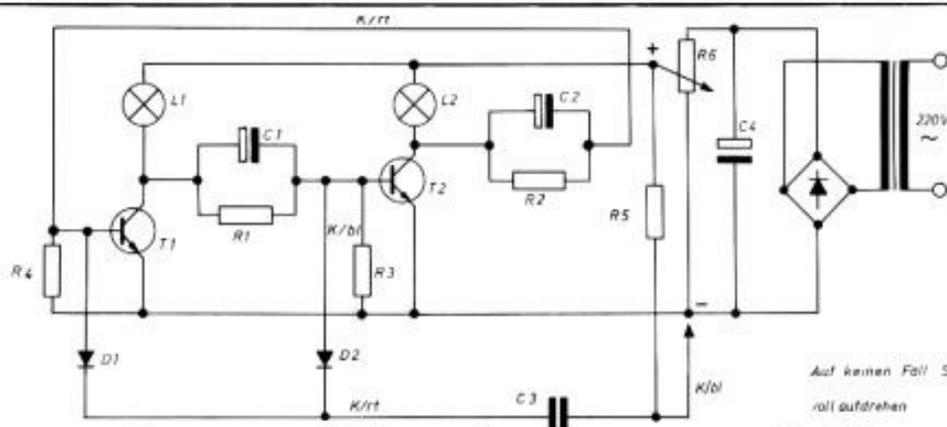
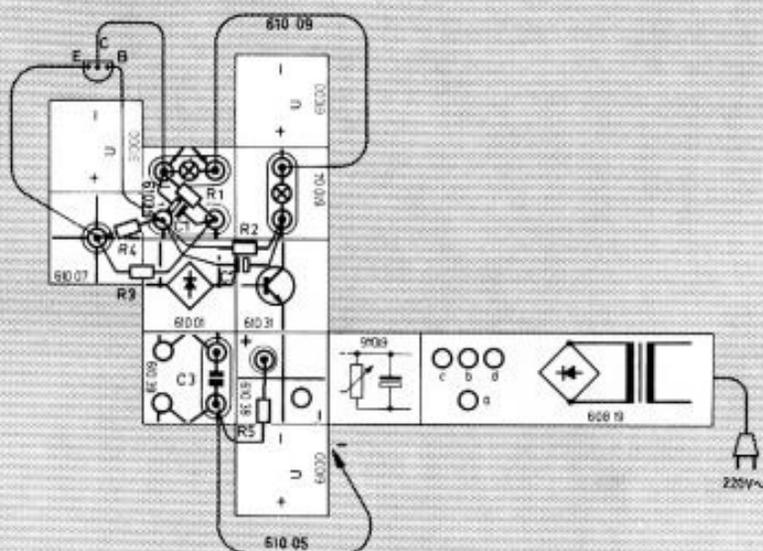


Abb. 8.7.2



Pos.	Stückz.	Benennung	Best.-Nr.
	1	Trafo	608 19
R6/C4	1	Spannungsteiler	610 46
	3	Verbindung, + -	610 00
	1	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
	1	Verbindung	610 07
	2	Buchse, 4fach	610 39
T2	1	Transistor	610 31
	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
D1/D2	1	Meßgleichrichter	610 01
	4	Stecker, 2fach	610 40
	2	Stecker, 1fach	610 43
K/bl	1	Kabel, blau	610 05
K/rt	1	Kabel, rot	610 09
T1	1	Transistor, kpl.	610 47
L1/L2	2	Lampe, 6 V/50 mA	610 2 3007 0
C1/C2	2	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0
R1/R2	2	Widerstand, 10 k Ω	930 7 1961 0
R3/R4	2	Widerstand, 5,1 k Ω	930 7 1786 0
R5	1	Widerstand, 100 k Ω	930 7 1473 0
C3	1	Kondensator, 1 μ F	926 7 1976 0



9. Übersicht über die wichtigsten im Lehrbuch I und II vorkommenden physikalischen Größen und Maßeinheiten.

Physikalische Größe	Symbol Formelzeichen	Definitionsgleichung Zusammenhang	Einheit	Lehrbuch I oder II vgl. Seite
Länge	s, l, r, d		m (Meter)	
Fläche	A	$A = l^2$	m ²	
Volumen	V	$V = l^3$	m ³	
Zeit (Periode)	t T		s (Sekunde)	(II, 1.1) S. 8
Frequenz	f	$f = \frac{1}{T}$	$\frac{1}{s}$ = Hz (Hertz)	(II, 1.1) S. 8
Kreisfrequenz	ω	$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$	$\frac{1}{s}$	(II, 1.1) S. 8
Geschwindigkeit	v	$v = \frac{s}{t}$	m/s	(II, 5.0) S. 82/83
Masse	m		kg (Kilogramm)	(II, 5.0) S. 82/83
Kraft	F	$m \frac{\Delta v}{\Delta t}$	N (Newton)	(II, 5.0) S. 82/83
Arbeit	W	$W = F \cdot s$	Nm	(II, 5.0) S. 82/83
Leistung	P	$P = \frac{W}{t}$	$\frac{Nm}{s}$	(II, 5.0) S. 82/83
Celsiustemperatur	ϑ		°C (Grad Celsius)	
absolute Temperatur	T	$T = \vartheta + 273$	°K (Grad Kelvin)	
el. Stromstärke	I		A (Ampere)	(I, 3.1) S. 18
Scheitelwert des Stromes	\hat{I}		A	(II, 1.1) S. 8
Eff. Wert des Stromes	I_{eff}	$I_{eff} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$ *)	A	(II, 1.2) S. 10 (II, 1.4) S. 14/15
Gleichstromwert	I_{-}		A	(II, 1.2) S. 10
Galv. Mittelwert	\bar{I}	$\bar{I} = 0,64 \cdot \hat{I}$ *)	A	(II, 1.4) S. 14
Spannung	U		V (Volt)	(I, 3.3) S. 22
Scheitelwert der Spannung	\hat{U}		V	(II, 1.3) S. 12
Eff. Wert der Spannung	U_{eff}	$U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$ *)	V	(II, 1.3) S. 12 (II, 1.4) S. 14/15
Galv. Mittelwert d. Spannung	\bar{U}	$\bar{U} = 0,64 \hat{U}$ *)	V	(II, 1.4) S. 14/15
el. Ladung	Q	$Q = I \cdot t$	As = C (Coulomb)	(I, 3.2) S. 20
el. Leistung	P	$P = U \cdot I$	VA = W (Watt)	(I, 5.1) S. 60
el. Arbeit	W	$W = P \cdot t$	Ws	(I, 5.1) S. 60
Widerstand	R	$R = \frac{U}{I}$	$\frac{V}{A} = \Omega$ (Ohm)	(I, 4.1) S. 24
Ohmscher Widerstand	R_o		Ω	(II, 4.9) S. 72
ind. Widerstand	R_L	$R_L = \omega L$	Ω	(II, 4.4) S. 62
kap. Widerstand	R_C	$R_C = \frac{1}{\omega C}$	Ω	(II, 4.5) S. 64
Scheinwiderstand	R_s	$R_s = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$ $= \sqrt{R_o^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$	Ω	(II, 4.9) S. 72
Kapazität	C	$C = \frac{Q}{U}$	$\frac{C}{V} = F$ (Farad)	(I, 6.1) S. 64
Induktivität	L	$L = \frac{U \Delta t}{\Delta I}$	$\frac{Vs}{A} = H$ (Henry)	(II, 4.0) S. 53
magn. Feldstärke	H	$H = \frac{I \cdot w}{l}$	$\frac{A}{m}$	(II, 4.0) S. 51
magn. Fluß	Φ	$U_{ind} = w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$	Vs = W (Weber)	(II, 4.0) S. 51
magn. Kraftflußdichte	B	$B = \frac{\Phi}{A}$	$\frac{Vs}{m^2} = T$ (Tesla)	(II, 4.0) S. 51
Lichtstärke	I		cd (Candela)	(I, 8.2) S. 82
Beleuchtungsstärke	E	$E = \frac{I}{r^2}$	$\frac{cd}{m^2} = lx$ (Lux)	(I, 8.2) S. 82

*) Sinusförmiger Strom- bzw. Spannungsverlauf vorausgesetzt.

10. Erklärung zum BIPOL-Kontaktsystem

Die A-Ebene (oben) beinhaltet die Signalleitungen und ist identisch mit der Bedruckung des Bausteines. Die B-Ebene (unten) enthält die Stromversorgung, welche in Verbindung mit den Lehrbaukästen 612 02 und 612 03 sowie den Experimentierbausteinen benötigt wird.

Durch die 2-fache Kontaktierung der wesentlichen Verbindungen wird die Kontaktsicherheit um ein Vielfaches erhöht.

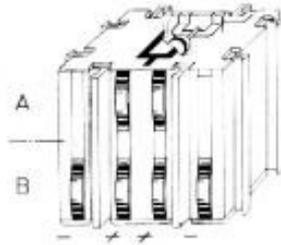
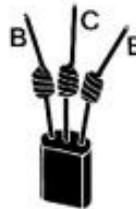


Abbildung 10.1

Bitte beachten:

Transistoren und Dioden sind schnell beschädigt, ein richtiger Anschluß ist deshalb wichtig! Siehe hierzu untenstehende Zeichnungen!



B = Basis
C = Collektor
E = Emitter

Transistor 2 N 3704
Best.-Nr. 610 47



K = Kathode
in
Pfeilrichtung

Diode BA 130
Best.-Nr. 901 7 2105 0

Bemerkung zum Blockschaltbild und Schaltbild

Im Blockschaltbild erscheinen all die Bausteine gerastert (wie der Untergrund), die bei ein und derselben Versuchsanordnung nicht dauernd an der gleichen Stelle bleiben, die also entweder ausgetauscht werden (z. B. Vorwiderstände bei Voltmetern oder Shunts bei Amperemetern) oder die nacheinander an zwei verschiedenen Stellen

eingebaut werden (das Meßinstrument oft zusammen mit dem Meßgleichrichter wird z. B. vielfach einmal als Voltmeter und dann als Amperemeter eingesetzt).

Im Schaltbild erscheinen die Symbole, die gerastert gezeichneten Bausteinen entsprechen, durch gestrichelt gezeichnete Verbindungen angeschlossen.

In den Blockschaltbildern benützte Symbole



Stecker, 1fach



Buchse
(Prüfspitze
Krokodilklemme)



Buchse mit
Stecker, 1fach



Buchse mit
isoliertem Stecker¹⁾



Buchsen mit Stecker
2fach

¹⁾ Beim Trafo ist der äußere Ring, der die Isolierung des Steckers andeutet, aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen.

Verzeichnis geeigneter Fachbücher

C. C. Buchners Verlag, Bamberg
Roth und Treu, Physik, Oberstufe, Elektrizitätslehre

Dümmler Verlag, Bonn
Blatzheim, Allgemeine Elektrotechnik
Höfling, Lehrbuch der Physik, Oberstufe

Franzis Verlag, München
Georg Rose, Formelsammlung für den Radiopraktiker
Telefunkenfachbuch, Der Transistor
Kurt Leucht, Die elektr. Grundlagen der Radiotechnik
Prof. Dr. Wilhelm Hasel, Allgemeine Elektrotechnik
und Elektronik für naturwissenschaftliche und technische Berufe

Verlag Handwerk und Technik, Hamburg
Röthke, Elektrotechnik für technische Berufe

Gebr. Jänecke Verlag, Hannover
G. Rose, Grundlagen für Elektroberufe

Ernst Klett Verlag, Stuttgart
Grimsehl, Physik II, Teilband Elektrizitätslehre

Phillips Fachbücher
Lehrbriefe, Band I und II
Julander, Leitfaden der Rundfunktechnik, Band I und II
Holm, Fernsehtechnik ohne Mathematik
Kerkhofs, Einführung in die Gleich- und Wechselstromtechnik

Otto Salle Verlag, Frankfurt und Hamburg
Fock-Weber, Lehrbuch der Physik II

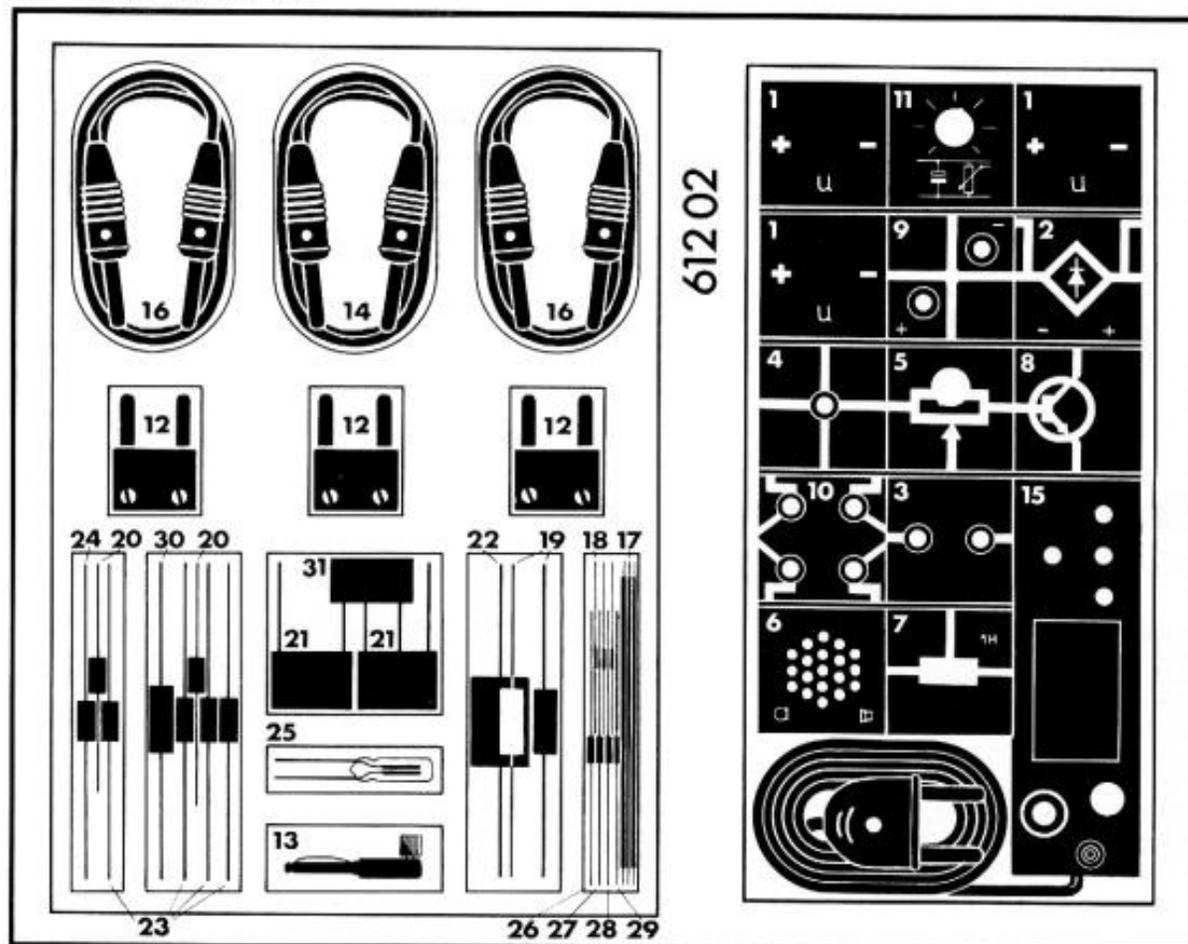
Jakob Schneider Verlag, Berlin 42
Fritz Berghold, Die große Elektro-Fibel

Schröderverlag, Darmstadt
Dorn, Physik, Oberstufe

Friedr. Vieweg und Sohn Verlag, Braunschweig
Roth-Kruschwitz, Grundlagen der Elektrotechnik
Brennecke-Schuster, Physik Oberstufe

Westermann Verlag
Leunig, Elektrotechnik für die Praxis, Band I

11. Verpackungsübersicht



Inhaltsübersicht des BIPOL-Lehrbaukastens 612 02

Im Lehrbaukasten 612 02 enthaltene Teile

Lfd. Nr.	Stückzahl	Benennung	Nummer
1	3	Verbindung, + -	610 00
2	1	Meßgleichrichter	610 01
3	1	Anschlußbuchse, 2fach	610 04
4	1	Verbindung	610 07
5	1	Potentiometer, 1 k Ω	610 16
6	1	Mikrofonlautsprecher	608 14
7	1	Spule, 1H	610 26
8	1	Transistor	610 31
9	1	Anschlußbuchse, + -	610 38
10	1	Buchse, 4fach	610 39
11	1	Spannungsteiler	610 46
12	3	Stecker, 2fach	610 40
13	1	Stecker, 1fach	610 43
14	1	Verbindungskabel, blau	610 05
15	1	Netztransformator	608 19
16	2	Verbindungskabel, rot	610 09
17	3	Schaltdraht	608 2 3102 0
18	3	Diode, BA 130	901 7 2105 0
19	2	Elko, 100 μ F	923 7 2122 0
20	2	Elko, 10 μ F	923 7 2134 0
21	2	Kondensator, 1 μ F	926 7 1976 0
22	1	Kondensator, 2,2 μ F	926 7 2252 0
23	4	Kondensator, 0,1 μ F	926 7 1833 0
24	1	Kondensator, 0,047 μ F (47 nF)	926 7 1831 0
25	1	Glimmlampe	972 7 2140 0
26	1	Widerstand, 2,2 M Ω	930 7 1644 0
27	1	Widerstand, 5,1 k Ω	930 7 1786 0
28	1	Widerstand, 1 k Ω	930 7 1441 0
29	1	Widerstand, 10 k Ω	930 7 1961 0
30	1	Elko, 5 μ F	923 7 2323 0
31	1	Kondensator, 0,47 μ F	926 7 2126 0

rot/rot/grün
grün/braun/rot
braun/schwarz/rot
braun/schwarz/orange

BIPOL



R+E Hopt KG 721 Rottweil w-Germany

