

E 18 Messung mit dem Oszilloskop

1. Aufgabenstellung

- 1.1 Für eine BRAUN'sche Röhre ist die Ablenkempfindlichkeit des Elektronenstrahls im elektrischen und magnetischen Feld zu bestimmen.
- 1.2 Messen Sie mit einem Zweistrahloszilloskop bei verschiedenen Frequenzen die Gesamtspannung und die Teilspannung an einer RC-Reihenschaltung.
- 1.3 Nehmen Sie die Kennlinien passiver Zweipole oszillografisch auf.
- 1.4 Bestimmen Sie eine unbekannte Frequenz einer Wechselspannung durch Messung der Periodendauer sowie durch Frequenzvergleich (LISSAJOUS-Figuren).

2. Theoretische Grundlagen

Stichworte zur Vorbereitung:

Elektronenstrahlröhre, Ablenkung von Elektronenstrahlen im elektrischen oder magnetischen Feld, Wechselspannungsgrößen, Ablenkempfindlichkeit, Phasenverschiebung, LISSAJOUS-Figuren, Kennlinien passiver Bauelemente (Diode, ZENER-Diode, Varistor)

Literatur:

- | | |
|--------------|--|
| W. Ilberg, | Physikalisches Praktikum, Kapitel 3.3. und 4.4., |
| M. Krötzsch | B. G. Teubner Verlag 1994 |
| J. Czech | Oszillografen-Messtechnik, Grundlagen und Anwendung
moderner Elektronenstrahl-Oszillografen,
Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik GmbH, Berlin-Borsig-
walde 1959/1965 |
| H.-W. Fricke | Das Arbeiten mit Elektronenstrahloszilloskopen,
Hüthig Verlag Heidelberg 1976 |

2.1 Bewegung der Elektronen im magnetischen und elektrischen Feld

2.1.1 Im homogenen elektrischen Feld eines Plattenkondensators

Treten die Elektronen parallel zu den Feldlinien in das Feld, ändert sich nur der Betrag der Geschwindigkeit, nicht die Richtung. Die gleichmäßige Beschleunigung läßt sich folgendermaßen berechnen.

$$a = \frac{e}{m} \frac{U}{d} \quad (1)$$

Dabei bedeuten e die Elementarladung und m die Elektronenmasse.

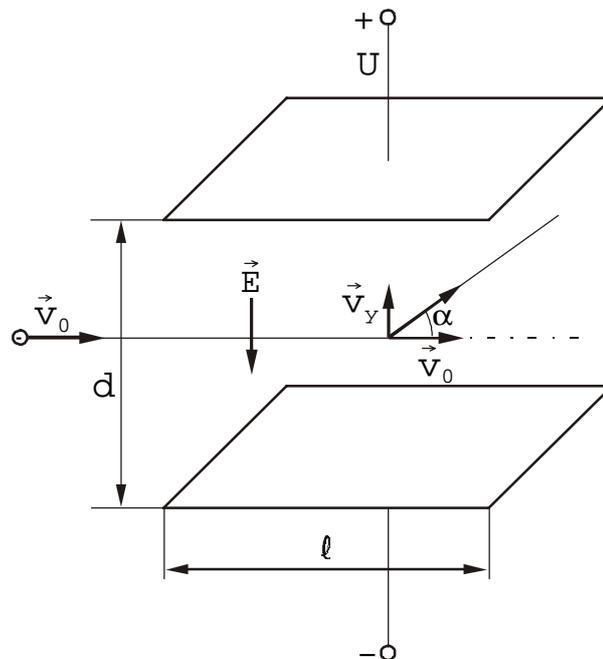


Abb. 1: Ablenkung der Elektronen im Plattenkondensator

In einem Ablenkkondensator werden die Elektronen senkrecht zu den Feldlinien mit einer Geschwindigkeit v_0 eingeschossen. Die Flugbahn kann durch eine Parabel beschrieben werden. In der Zeit, die ein Elektron benötigt um die Kondensatorplatten zu durchfliegen, wirkt das elektrische Feld auf die Geschwindigkeit v_y des Elektrons, d.h. senkrecht zur eigentlichen Flugbahn beschleunigend:

$$v_y = at = \frac{e}{m} E \frac{\ell}{v_0} . \quad (2)$$

Die Flugrichtung hat sich daher um den Winkel α geändert. Der Winkel lässt sich aus den Geschwindigkeiten v_0 und v_y berechnen Gl. (3).

$$\tan \alpha = \frac{v_y}{v_0} = \frac{e}{m} E \frac{\ell}{v_0^2} \quad (3)$$

2.1.2 Im homogenen Magnetfeld

Wenn ein geladenes Teilchen durch ein Magnetfeld fliegt, erfährt es eine Kraft $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$, die LORENZ-Kraft.

Bewegen sich die Elektronen parallel zu den \vec{B} -Feldlinien, wird keine Kraft auf sie ausgeübt, d.h. sie ändern weder Geschwindigkeit noch Richtung. Die ausgeübte Kraft wirkt maximal, wenn die Elektronen sich senkrecht zu den \vec{B} -Feldlinien bewegen und es vereinfacht sich die Formel zu $|\vec{F}| = e |\vec{v}| \cdot |\vec{B}|$. Eine zur Bewegungsrichtung senkrechte Kraft kann keine Arbeit leisten, deshalb bewegt sich das Elektron mit einem gleichmäßigem Geschwindigkeitsbetrag und einer Beschleunigung, die immer senkrecht zur Bahn erfolgt. Die LORENZ-Kraft als Zentripetalkraft hält sich mit der Zentrifugalkraft im Gleichgewicht, das Elektron beschreibt eine Kreisbahn. Diese Kreisbahn hat den Radius

$$r = \frac{mv}{eB} . \quad (4)$$

Die Ablenkung für ein Magnetfeld, in dem der Elektronenstrahl nur einen kleinen Kreisbogen im Feld zurücklegt, lässt sich wie folgt berechnen: In einem Kreissegment gilt $\alpha = s/r$, für $r \gg \ell$ lässt sich $s = \ell$ setzen. Aus Abb.2 ist zu erkennen, dass der Ablenkwinkel für das magnetische Feld

$$\alpha \approx \frac{\ell}{r} \quad (5)$$

ist. Verwendet man nun die Gl. (4) ergibt sich, dass $\alpha \sim B$ ist.

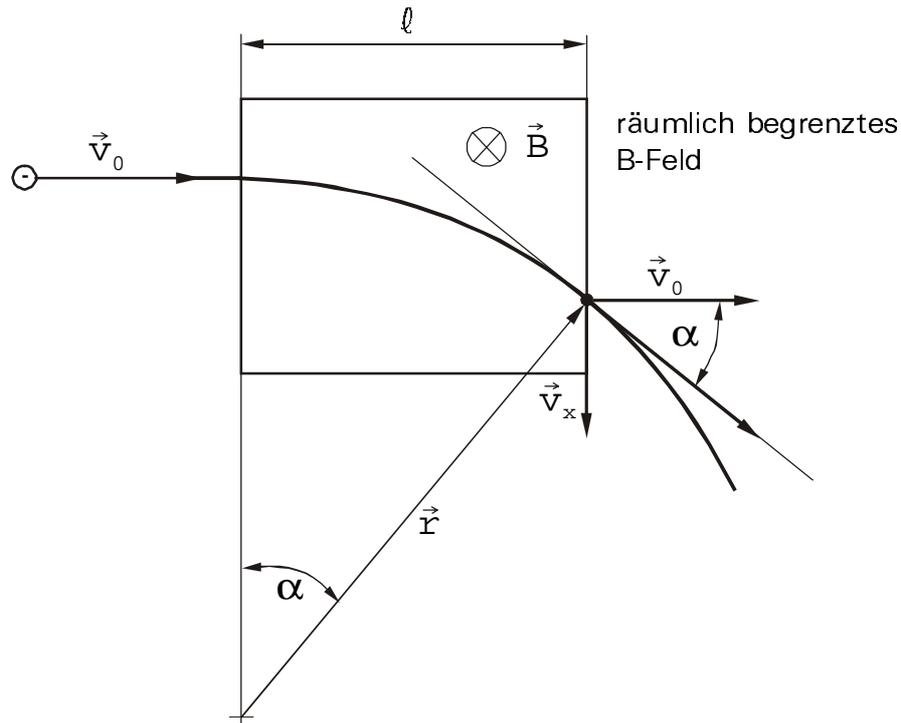


Abb. 2: Bewegung des Elektronenstrahls im räumlich begrenzten Magnetfeld

2.2 Der funktionale Aufbau des Oszilloskops

Bei der Prüfung von Wechselspannungen und bei der Fehlersuche in elektronischen Schaltungen ist das Oszilloskop ein unentbehrliches Messgerät. Es lassen sich Schwingungsvorgänge (bis in den MHz-Bereich) jeder Art in ihrer Form und auch in bestimmten Zeitabschnitten an jeder beliebigen Stelle in einer Schaltung sichtbar machen. Der Vorteil dieser Messung ist die geringe Belastung des Messobjektes aufgrund des hohen Eingangswiderstand ($\approx 1 \text{ M}\Omega$). Mit dem Oszilloskop lassen sich nur Spannungen direkt messen. Alle anderen Größen wie z. B. Strommessungen, müssen auf eine Spannungsmessung zurückgeführt werden.

2.2.1 Die Elektronenstrahlröhre

Die Elektronenstrahlröhre (Abb. 1) ist nach langjähriger Entwicklungsarbeit aus der BRAUN'schen Röhre (Katodenstrahlröhre) hervorgegangen. Sie wird für die Erzeugung, Ablenkung und Sichtbarmachung des Elektronenstrahles benötigt. Die aus der indirekt geheizten Katode (K) austretenden Glühelctronen werden durch eine positive Hochspannung zur Anode (A1) hin beschleunigt. Die Katode (K) wird

von dem WEHNELT-Zylinder (W) umgeben. Er hat gegenüber der Katode ein negatives Potential; mit der Höhe dieses Potentials wird der Strahlstrom und damit die Helligkeit (Intensität) des Schirmbildes geregelt. Das sich räumlich an den WEHNELT-Zylinder anschließende Anodensystem (A1) dient auch zur Strahlfokussierung (Fokussierungsanode).

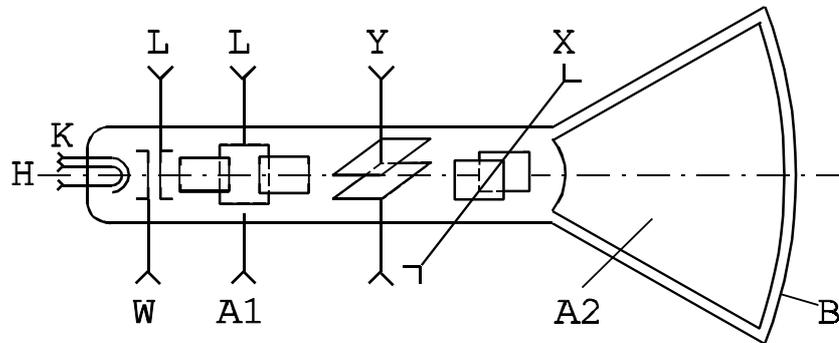


Abb. 3 : Aufbau einer Elektronenstrahlröhre, schematisch

- | | | |
|---------------|-------------------------------|-----------------------|
| H - Heizfaden | X - waagerechte Ablenkung | L - elektrische Linse |
| A1 - Anode | Y - senkrechte Ablenkung | B - Leuchtschirm |
| K - Katode | A2 - Nachbeschleunigungsanode | W - WEHNELT-Zylinder |

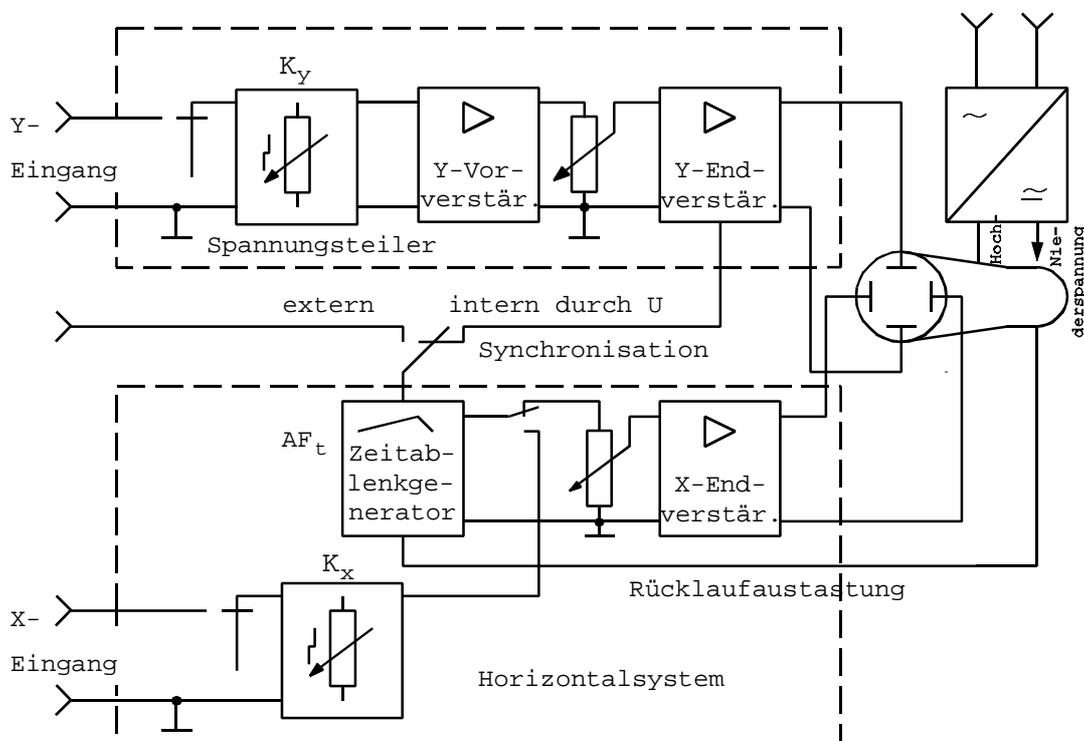


Abb. 4 : Der funktionelle Aufbau eines Oszilloskops

Durch die besondere Form des elektrischen Feldes ist eine Bündelung des Elektronenstrahles möglich. Die Veränderung der Spannung zwischen Katode und Fokussieranode verändert die Brennweite der elektronenoptischen Anordnung. Es kann damit erreicht werden, dass der Elektronenstrahl auf dem Leuchtschirm einen Leuchtfleck mit kleinem Durchmesser erzeugt.

2.2.2 Ablenkplatten und Messverstärker

Räumlich hinter der Fokussiereinrichtung angeordnet, befinden sich die Ablenkplatten für die horizontale und vertikale Ablenkung des Elektronenstrahles. Die folgenden Ausführungen für die Y-Platten gelten analog für die X-Platten. Die angelegte Messspannung wird durch den eingebauten Messverstärker den Y-Platten zugeführt, so dass sich zwischen den Y-Platten ein dem Messsignal proportionales elektrisches Feld aufbaut. Die damit verbundene Beeinflussung der Elektronen bewirkt die am Leuchtschirm registrierbare vertikale Ablenkung des Elektronenstrahles. Sie ist für nicht zu große Spannungen proportional zur angelegten Spannung. Die Auslenkung in Y-Richtung lässt sich aus den Spannungen und den geometrischen Abmessungen der Röhre (Abb. 5) wie folgt berechnen

$$y = \frac{\ell L}{2 d U_a} \cdot U_y \quad (6)$$

Die Konstante $\frac{\ell L}{2 d U_a}$ wird als Ablenkempfindlichkeit (k_y) bezeichnet.

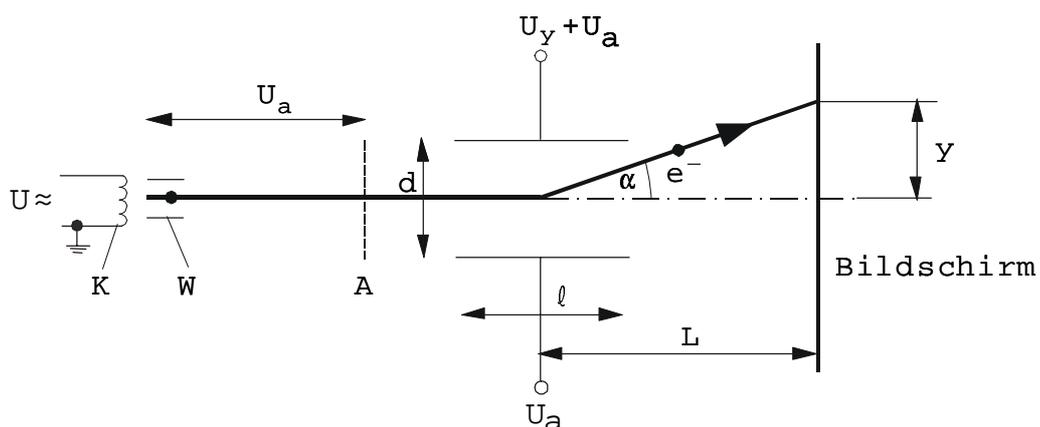


Abb. 5 : Ablenkung eines Elektronenstrahles im Plattenkondensator

Den Kehrwert $A_y = 1 / k_y$ der Ablenkempfindlichkeit nennt man Ablenkfaktor.

Am Oszilloskop lässt sich der Ablenkfaktor durch einen Stufenschalter einstellen. Benutzt man eine harmonische Wechselspannung zur Kalibrierung des Oszilloskopes als hochohmigen Spannungsmesser, dann gilt

$$y = k_y \cdot U = k_y \cdot U_0 \sin \omega t ,$$

wobei sich U_0 aus dem Effektivwert $U_0 = \sqrt{2} U_{eff}$ berechnen lässt.

2.2.3 Die interne Zeitablenkung

Zur Darstellung zeitabhängiger Vorgänge kann der X-Eingang auf die interne Zeitablenkung umgeschaltet werden. In ihr wird eine zeitproportionale Spannung (Sägezahnspannung) mit einer wählbaren Anstiegsgeschwindigkeit erzeugt. Der Auftreffpunkt des Elektronenstrahles wird dadurch periodisch mit konstanter Geschwindigkeit von links nach rechts geführt. Der Rücklauf erfolgt viel schneller und wird durch eine stärkere negative Spannung am WEHNELT-Zylinder dunkelgetastet.

2.2.4 Die Triggereinrichtung

Eine weitere wichtige Funktionseinheit ist die Triggerstufe. Sie unterstützt bzw. ermöglicht es, stehende Bilder von periodischen bzw. gleichartigen, aber aperiodisch auftretenden Vorgängen auf dem Bildschirm als stehendes Signal darzustellen. Im Normal- oder Automatikbetrieb folgen die Sägezahnimpulse einander automatisch. Davon zu unterscheiden ist der sogenannte Trigger-Betrieb. Hier wird jeweils der nächste Sägezahnanstieg durch einen Triggerimpuls ausgelöst. Bei Intern-Betrieb wird der Triggerimpuls durch das Messsignal selbst erzeugt. Bei Extern-Betrieb muß von außen ein Synchronsignal angelegt werden. Mit Umschaltern und Reglern kann der Triggerimpuls von der positiven oder negativen Flanke des Signals bei unterschiedlich hohen Schwellspannungen abgeleitet werden.

2.3 Messtechnische Grundlagen

In der Elektrotechnik bezieht man sich bei Spannungsangaben auf den Effektivwert U_{eff} . In der Oszilloskopie wird jedoch für Signalgrößen und Spannungen der Wert U^{SS} (Spitze-Spitze-Wert), der den wirklichen Potentialunterschied zwischen dem positivsten und negativsten Punkt (siehe Abb. 6) einer Sinusspannung entspricht, verwendet. U_{eff} berechnet sich aus U^{SS} wie folgt:

$$U_{eff} = \frac{U^{SS}}{2 \cdot \sqrt{2}} \quad .$$

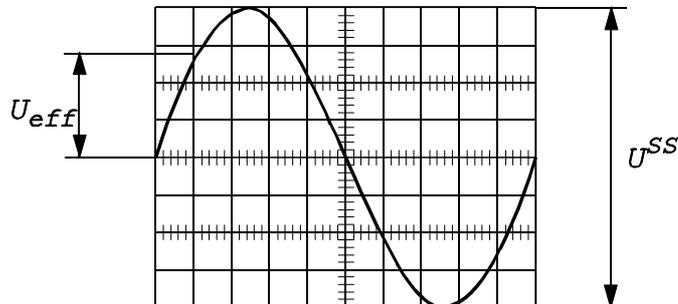
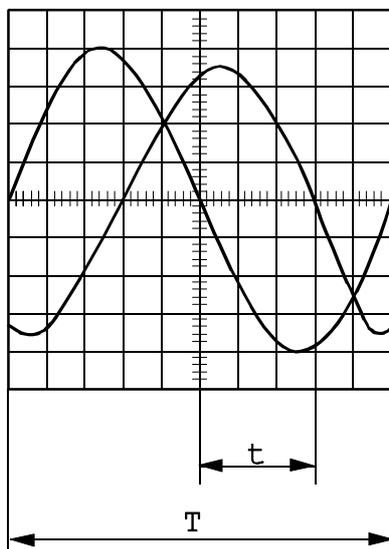


Abb. 6 : Spannungswerte an einer Sinuskurve

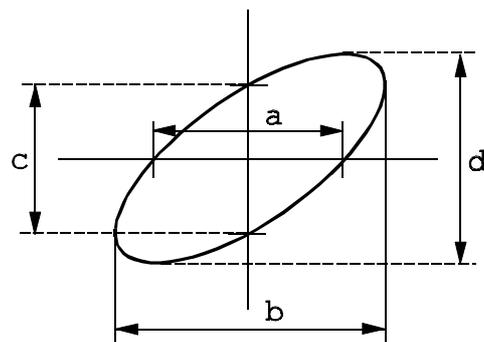
Die Phasenverschiebung φ zwischen zwei Spannungen der gleichen Frequenz lässt sich im Zweikanalbetrieb direkt ablesen

$$\varphi = \frac{t}{T} 360^\circ \quad ,$$

dabei ist T die Periodendauer und t der Abstand zwischen den Nulldurchgängen beider Spannungen (Abb. 7a).



a) Zweikanalbetrieb



b) Phasenellipse

Abb. 7 : Phasenverschiebung

Eine andere Methode ist die Auswertung der Phasenellipse. Hier werden im XY-Betrieb die zu vergleichenden Spannungen gleicher Frequenz an den X- bzw. Y-Eingang des Oszilloskops angeschlossen. Aus der entstehenden Phasenellipse (Abb. 5b) lässt sich die Phasenverschiebung wie folgt berechnen:

$$\varphi = \arcsin \frac{a}{b} = \arcsin \frac{c}{d} . \quad (2)$$

3. Versuchsdurchführung

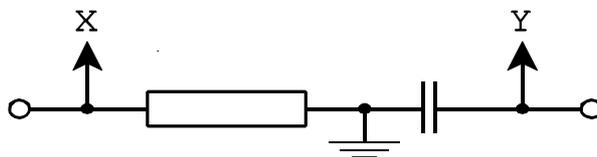
3.1 Bauen Sie eine Schaltung zur Bestimmung der Ablenkempfindlichkeit einer BRAUN'schen Röhre entsprechend den Angaben am Versuchsplatz auf. Messen Sie die Ablenkung des Strahls bei verschiedenen Spannungen. Berechnen Sie aus den Messwerten und den gegebenen Röhrendaten ($d = 11 \text{ mm}$, $L = 125 \text{ mm}$, $\ell = 21 \text{ mm}$) die Ablenkempfindlichkeit. Führen Sie eine Größtfehlerberechnung durch.

3.2 Messen Sie die Ablenkung des Elektronenstrahls in Abhängigkeit von der magnetischen Induktion B . Die magnetische Induktion am Ort des Elektronenstrahls kann mit folgender empirischen Gleichung

$$B [\text{mT}] = 0,45 \cdot I [\text{A}]$$

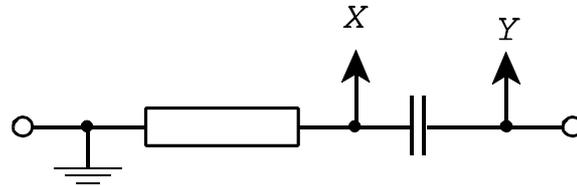
aus dem Spulenstrom I ermittelt werden. Stellen Sie die Messergebnisse in einem Diagramm dar und ermitteln Sie die Ablenkempfindlichkeit.

3.3 Legen Sie an eine RC-Reihenschaltung eine Wechselspannung $U_{\text{eff}} = 10 \text{ V}$ an. Messen Sie die angelegte Spannung U^{SS} und die Spannungsabfälle U_R^{SS} und U_C^{SS} bei 3 verschiedenen Frequenzen mit dem Oszilloskop. Verwenden Sie dafür folgende Schaltung:

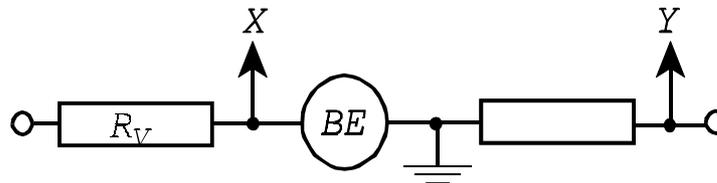


3.4 Bestimmen Sie die Frequenz f_G , bei der U_R^{SS} und U_C^{SS} den gleichen Wert haben.

- 3.5 Messen Sie dann bei f_G die Phasenverschiebung φ zwischen Strom und Spannung für das gegebene RC-Glied. Messen Sie die Phasenverschiebung auch im XY-Betrieb. Vergleichen Sie beide Ergebnisse. Nutzen Sie dafür folgende Schaltung:



- 3.6 Nehmen Sie die Kennlinien verschiedener gegebener passiver Bauelemente auf. Skizzieren Sie die Kennlinien und ermitteln Sie die jeweilige Sperrspannungen.



- 3.7 Bestimmen Sie für drei frei gewählte Skalenwerte eines Frequenzgenerators die Frequenz der anliegenden Wechselspannung
- durch Messung der Periodendauer
 - durch Auswertung von LISSAJOUS-Figuren.

4. Kontrollfragen

- 4.1 Welche Kraft übt das elektrische Feld auf eine Ladung aus? Leiten Sie die Formel für den Ablenkwinkel eines Elektrons im elektrischen Feld eines Plattenkondensators (siehe Abb. 3) $\tan \alpha = \frac{\ell U_y}{2 d U_a}$ her.
- 4.2 Welche Kraft wirkt auf Elektronen im Magnetfeld? Berechnen Sie den Radius der Bahn, wenn $B = 0,5 \text{ mT}$ und das Elektron mit 350 V beschleunigt wurde. Wie groß darf ℓ in diesem Fall sein, damit die Näherung $\alpha \approx \frac{\ell}{r}$ noch gültig ist.

- 4.3 Erläutern Sie das Entstehen freier Elektronen durch Glühemission. Was besagt die RICHARDSON-Gleichung?
- 4.4 Wie lässt sich eine Strommessung mit dem Oszilloskop realisieren? Wie können I-U-Kennlinien von passiven Bauelementen mit dem Oszilloskop dargestellt werden?
- 4.5 Skizzieren und erläutern Sie die I-U-Kennlinien eines Varistors, eines Thermistors und einer ZENER-Diode.
- 4.6 Erläutern Sie das Entstehen von LISSAJOUS-Figuren. Wie lässt sich der Phasenwinkel damit ermitteln?