

OSZ— Wechselspannungen und aperiodische Vorgänge (Oszilloskop I)

P2 — Praktikum

22. Juni 2018

Ziele

Bei diesem Versuch liegt der Schwerpunkt auf dem Kennenlernen der Funktionsvielfalt eines Oszilloskops. Dabei kann die Wirkungsweise nahezu aller Bedienelemente an einfachen Messschaltungen systematisch studiert werden. Neben Basisbedienelementen werden auch komplexere Funktionen, wie die digitale Speicherfunktion des Oszilloskops, genutzt. Das Oszilloskop wird in diesem Versuch vor allem verwendet, um grundlegende physikalische Aspekte von Wechselspannungen zu untersuchen. Es dient aber auch der quantitativen Analyse eines aperiodischen Vorgangs.

Teilversuche

1. Basisbedienelemente des Oszilloskops

In diesem Teilversuch werden Grundfunktionen eines Oszilloskops behandelt, die eine Darstellung einer zeitlich periodischen Spannung ermöglichen.

2. Messen einer Amplitude

Ein wichtiges Charakteristikum einer sinusförmigen Wechselspannung ist ihre Amplitude. Deren Ausmessen wird mit dem Oszilloskop vorgenommen.

3. Messen einer Phasendifferenz

Betrachtet man mit dem Oszilloskop zwei gleichfrequente Wechselspannungen, kann die Phasendifferenz untersucht werden.

4. Betrachten des Auf- und Entladevorgangs eines Kondensators

In diesem Teilversuch wird ein Kondensator mittels Anregung durch einen Funktionsgenerator periodisch auf- und entladen. Die periodischen Lade- und Entladekurven können mit dem Oszilloskop untersucht werden.

5. Quantitative Registrierung der Entladekurve eines Kondensators

Mithilfe der digitalen Speicherfunktion eines Oszilloskops wird ein einmaliger Entladevorgang eines Kondensators aufgezeichnet und anschließend quantitativ untersucht.

Inhaltsverzeichnis

1	Physikalische Grundlagen	3
1.1	Das Elektronenstrahloszilloskop	3
1.2	Wechselspannungen	5
1.3	Bemerkung zum Erdpotenzial	9
1.4	Wirkungsweise eines Phasenschiebers	9
1.5	Auf- und Entladen eines Kondensators	10
2	Technische Grundlagen	14
2.1	Oszilloskop	14
2.2	Funktionengenerator	14
2.3	Frequenzzähler	17
2.4	Messen von aperiodischen Vorgängen	17
2.5	Aufbau von Schaltungen	18
3	Versuchsdurchführung	20
3.1	Teilversuch 1: Basisbedienelemente des Oszilloskops	20
3.2	Teilversuch 2: Messen einer Amplitude	21
3.3	Teilversuch 3: Messen einer Phasendifferenz	22
3.4	Teilversuch 4: Betrachten des Auf- und Entladevorgangs eines Kondensators	24
3.5	Teilversuch 5: Quantitative Registrierung der Entladekurve eines Kondensators	25
4	Auswertung	27
4.1	Teilversuch 1: Basisbedienelemente des Oszilloskops	27
4.2	Teilversuch 2: Messen einer Amplitude	27
4.3	Teilversuch 3: Messen einer Phasendifferenz	27
4.4	Teilversuch 4: Betrachten des Auf- und Entladevorgangs eines Kondensators	27
4.5	Teilversuch 5: Quantitative Registrierung der Entladekurve eines Kondensators	27

1 Physikalische Grundlagen

1.1 Das Elektronenstrahloszilloskop

Zur Registrierung des zeitlichen Verlaufs von rasch ablaufenden Vorgängen sind mechanische Geräte wie XY-Schreiber zu träge. Im Elektronenstrahloszilloskop werden über die Änderung von elektrischen Feldern frei bewegliche Elektronen abgelenkt. Wegen der sehr kleinen Masse des Elektrons ($9,1 \cdot 10^{-31}$ kg) erfolgt die Ablenkung praktisch verzögerungsfrei.

Bildröhre mit Bildschirm

In Abbildung 1 ist die Bildröhre eines klassischen Elektronenstrahloszilloskops schematisch dargestellt. Ihr Glaskolben ist evakuiert.

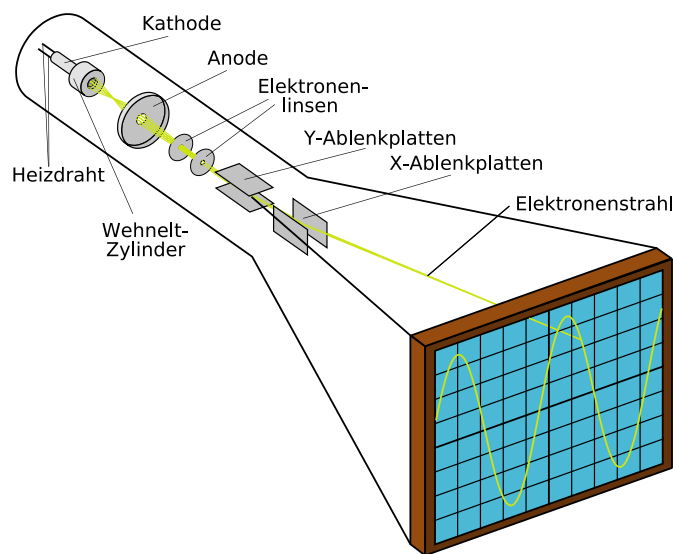


Abbildung 1: Bildröhre eines Elektronenstrahloszilloskops

Die Elektronen treten aus einer geheizten Kathode aus und werden durch den ihr vorgeschalteten Wehnelt-Zylinder so fokussiert, dass sie alle durch das Loch in der Anode gelangen. Als Elektronenlinsen wirkende Lochblenden bündeln die von der Anode wegfliegenden Elektronen zu einem feinen Strahl.

Der Elektronenstrahl durchläuft zwei zueinander senkrechte Plattenpaare. Die an sie angelegten Spannungen erzeugen elektrische Felder, welche die Elektronen in zwei zueinander senkrechte Richtungen quer zur Strahlrichtung ablenken.

Der Strahl trifft schließlich auf den Bildschirm. Dieser besteht aus einer nahezu ebenen Fläche im Inneren des Glaskolbens, welche mit einer dünnen Leuchtschicht bedeckt ist. Im Auftreffpunkt der Elektronen wird der Leuchtstoff von diesen angeregt, so dass dort ein heller Lichtfleck erscheint.

Darstellung von zeitlich veränderlichen Spannungen

Der Bildschirm ist mit einem Koordinatensystem versehen, dessen Achsen x (waagrecht) und y (senkrecht) den Ablenkrichtungen des Strahls entsprechen. Das Ablenkensystem ist so konstruiert, dass der Abstand des Leuchtpunkts zum Koordinatennullpunkt proportional zur elektrischen Potentialdifferenz an dem die Ablenkung bewirkenden Plattenpaar ist. Ein Oszilloskop ist somit ein Messinstrument für elektrische Spannungen. Alle zu messenden Größen (z. B. elektrischer Strom, Temperatur, Lichtintensität, Magnetfeldstärke) müssen vorher in elektrische Spannungen umgewandelt werden.

Zeitablenkung

Da das Oszilloskop vorwiegend zur Registrierung schnell ablaufender Vorgänge verwendet wird, ist die unabhängige Variable x meistens die Zeit t . Für die entsprechende Strahlablenkung wird eine zur Zeit proportionale Spannung benötigt, welche z. B. durch Aufladen eines Kondensators mit konstanter Stromstärke erzeugt werden kann.

Die Zeitablenkspannung bewegt den Leuchtpunkt mit konstanter Geschwindigkeit in waagerechter Richtung über den Bildschirm. Eine gleichzeitig an die y -Ablenkung gelegte zeitabhängige Spannung $U(t)$ wird als Kurve geschrieben.

Das Bild dieser Kurve verschwindet jedoch bei nicht nachleuchtendem Bildschirm sofort wieder. Es lässt sich aber ein stehendes Bild erzeugen, wenn die zu registrierende Funktion periodisch ist. Die Zeitablenkspannung wird dafür ebenfalls periodisch gemacht, indem sie jedes Mal, wenn der Leuchtpunkt in x -Richtung den rechten Rand des Bildschirms erreicht, sehr schnell auf den Ausgangswert zurückgesetzt wird, von dem aus sie dann von neuem linear ansteigt („Sägezahn“). Stimmt nun ihre Periodenlänge mit der Länge einer ganzen Zahl von Perioden von $U(t)$ überein, so werden diese immer wieder durchlaufen, was das Auge als stehendes Bild wahrnimmt.

Der Trigger

In der Praxis lässt sich eine solche Synchronisierung wegen der immer vorhandenen Frequenzschwankungen nur sehr unvollkommen verwirklichen. Zur Erzeugung eines stehenden Bildes von $U(t)$ muss der Anstieg der Zeitablenkspannung immer exakt an derselben Stelle einer Periode von $U(t)$ beginnen. Um dies zu erreichen, schaltet eine elektronische Zusatzeinrichtung, der Trigger, die Zeitablenkung individuell für jeden einsetzenden Durchlauf im richtigen Moment ein. Der Trigger „erkennt“ diesen Zeitpunkt daran, dass $U(t)$ dort eine bestimmte Größe (Triggerschwelle) bei einem bestimmten Vorzeichen der Steigung $\frac{dU}{dt}$ erreicht. Beides kann durch Einstellung am Oszilloskop vorgegeben werden.

Kanäle

Das im Versuch verwendete Oszilloskop besitzt zwei Eingangskanäle, über die zwei Strahlspuren unabhängig voneinander gesteuert werden können. Damit ist es möglich, zwei Funktionen gleichzeitig auf dem Bildschirm darzustellen und sie so unmittelbar miteinander zu vergleichen.

1.2 Wechselspannungen

Definition

Eine Wechselspannung hat in der Praxis oft einen sinusförmigen Verlauf (harmonische Schwingung). Sie kann z. B. durch folgende Funktion beschrieben werden:

$$\tilde{U}(t) = \hat{U} \cos \omega t \quad (1)$$

\hat{U} = Amplitude von $\tilde{U}(t)$, Kreisfrequenz $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ mit T = Periodendauer und f = Frequenz

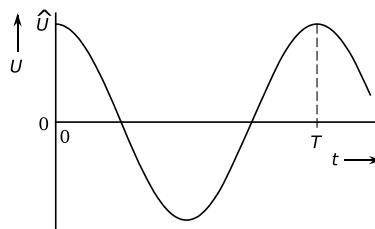


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf einer sinusförmigen Wechselspannung: \hat{U} = Amplitude, d. h. Maximalwert, T = Periodendauer. Die Frequenz f ist gleich dem Kehrwert $1/T$ der Periodendauer T .

Registrierung von Wechselspannungen mit dem Oszilloskop

Mit dem Oszilloskop kann die in Abbildung 2 dargestellte Kurve beobachtet werden, woraus sich insbesondere die Amplitude \hat{U} und die Periodenlänge T ermitteln lässt. Die Frequenz ergibt sich als Kehrwert der Periodenlänge.

Der Effektivwert

Mit den üblichen Voltmetern wird im Wechselspannungsbereich bei einer sinusförmigen Wechselspannung im Gegensatz zum Oszilloskop ein zeitlich konstanter Spannungswert angezeigt. Dabei handelt es sich aber nicht um die Amplitude sondern um den sogenannte Effektivwert der Wechselspannung. Er ist definiert als der Wert, den eine Gleichspannung

haben müsste, um an einem (ohmschen) Widerstand während einer Periode die gleiche elektrische Leistung umzusetzen:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \frac{U^2(t)}{R} dt \stackrel{!}{=} \frac{U_{\text{eff}}^2}{R}$$

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\langle U^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U(t)^2 dt} \quad (2)$$

Der Effektivwert ist also der quadratische Mittelwert. Im technischen Bereich ist auch die Bezeichnung RMS (Root Mean Square - Wurzel des Mittelwertes der Quadrate) üblich. Speziell für eine sinusförmige Wechselspannung gemäß (1) ergibt die folgende Rechnung, dass der Effektivwert proportional zur Amplitude ist:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\hat{U} \cos \omega t)^2 dt} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

Phasenverschiebung zwischen zwei Wechselspannungen

Zwei Wechselspannungen U_1 und U_2 mit gleicher Frequenz und gleicher Amplitude müssen nicht identisch sein. Sie können unterschiedliche Phasen haben:

$$U_1 = \hat{U} \cos(\omega t - \varphi_1)$$

$$U_2 = \hat{U} \cos(\omega t - \varphi_2)$$

Betrachtet man nur eine sinusförmige Wechselspannung kann man durch geeignete Wahl des Zeitnullpunkts die Phase so wählen, dass sie verschwindet. Anders sieht es aus, wenn man zwei sinusförmige Wechselspannungen betrachtet, dann ist für $\varphi_1 \neq \varphi_2$, unabhängig von der Wahl des Zeitnullpunkts, mindestens eine Phase ungleich Null. Die Phasendifferenz $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ ist konstant und unabhängig von der Wahl des Zeitnullpunkts.

Eine Phasendifferenz zwischen zwei sinusförmigen Wechselspannungen kann in eine zeitliche Verschiebung umgerechnet werden (siehe auch Abbildung 3):

$$\hat{U} \cos(\omega t - \Delta\varphi) = \hat{U} \cos(\omega(t - \Delta t))$$

wobei $\Delta\varphi = \omega\Delta t$. Mit $\omega = 2\pi/T$ folgt:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} = 360^\circ \frac{\Delta t}{T}$$

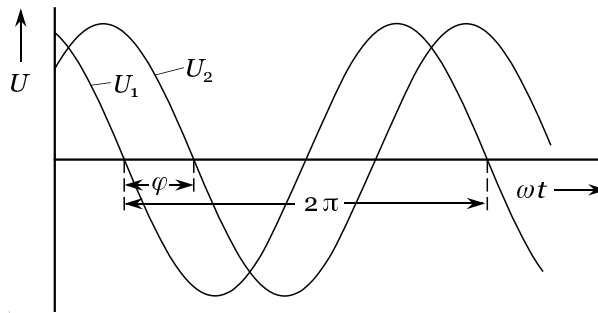


Abbildung 3: Zwei Wechselspannungen mit Phasenverschiebung

Lissajous-Ellipse

Bei vielen Oszilloskopen ist es möglich, die zeitliche Steuerung der x -Ablenkung abzuschalten und stattdessen eine weitere Spannung anzuschließen. D. h. sowohl die x als auch die y -Koordinate des Lichtpunkts können durch eine äußere Spannung gesteuert werden. So ist es z. B. möglich zwei um φ phasenverschobene sinusförmige Wechselspannungen anzuschließen. Durch die senkrechte Überlagerung der beiden phasenverschobenen Schwingungen $x = \hat{x} \cos \omega t$ und $y = \hat{y} \cos(\omega t - \varphi)$ ergibt sich eine sogenannte *Lissajous-Ellipse* (siehe Abbildung 4). Ihre Form hängt mit der Phasendifferenz der beiden Schwingungen zusammen.

Im Spezialfall $\varphi = 0$ erhält man eine von links unten nach rechts oben verlaufende Gerade (entartete Ellipse). Ihre Endpunkte haben die Koordinaten \hat{x} , \hat{y} bzw. $-\hat{x}$, $-\hat{y}$, wobei \hat{x} die Amplitude in x -Richtung und \hat{y} die in y -Richtung ist. Das achsenparallele Rechteck, dessen eine Diagonale diese Gerade bildet, tangiert alle Ellipsen, die sich bei Variation von φ ergeben (siehe Abbildung 4).

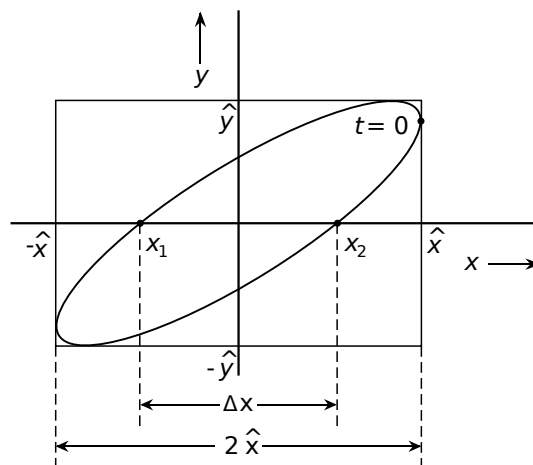


Abbildung 4: Lissajous-Ellipse: Diese Lissajous-Ellipse entsteht durch senkrechte Überlagerung zweier sinusförmiger Wechselspannungen gleicher Frequenz mit Phasenverschiebung.

Lässt man φ von null ausgehend bis 90° anwachsen, „bläht“ sich die aus der Geraden entste-

1 Physikalische Grundlagen

hende Ellipse immer mehr auf, wobei ihr Berührungspunkt mit der in Abbildung 4 rechten senkrechten Rechteckseite ($t = 0$) von deren oberen Ecke auf die x -Achse wandert. Für $\varphi = 90^\circ$ ist jede der beiden Halbachsen jeweils parallel zu einer der Koordinatenachsen. Speziell ergibt sich in diesem Fall ein Kreis, wenn die Amplituden \hat{x} und \hat{y} gleich sind. Bei weiterer Vergrößerung von φ wandert der Berührungspunkt in die rechte untere Ecke des Rechtecks, wobei sich die Ellipse für $\varphi = 180^\circ$ zu einer von links oben nach rechts unten verlaufenden Gerade zusammenzieht. Der eben beschriebene Vorgang spielt sich in genau der gleichen Weise ab, wenn φ ausgehend von 0° bis -180° verändert wird.

Aus dem Schirmbild der Ellipse kann eine Beziehung zur Bestimmung der Phasenverschiebung φ hergeleitet werden. Für die Koordinaten des Leuchtpunkts gilt:

$$x = \hat{x} \cos \omega t$$

$$y = \hat{y} \cos(\omega t - \varphi)$$

Die Positionen der Schnittpunkte der Ellipse mit der x -Achse lassen sich am Oszilloskop gut ablesen. Für sie ist $y = 0$:

$$\cos(\omega t - \varphi) = 0$$

Daraus folgt:

$$\omega t = \varphi \pm 90^\circ$$

Diese Werte werden in die Gleichung für x eingesetzt:

$$x_{1,2} = \hat{x} \cos(\varphi \pm 90^\circ) = \mp \hat{x} \sin \varphi$$

Der Abstand der Schnittpunkte ist also:

$$\Delta x = x_2 - x_1 = 2\hat{x} \sin \varphi$$

Am Oszilloskop abgelesen wird allerdings nur der Betrag $|\Delta x|$. Damit ist φ gegeben durch:

$$\sin \varphi = \pm \frac{|\Delta x|}{2\hat{x}} \quad (3)$$

Zu jedem Messwert $|\Delta x|/(2\hat{x})$ gibt es nach (3) im Intervall von -180° bis 180° vier mögliche Werte von φ . Je zwei davon unterscheiden sich nur durch das Vorzeichen.

Wegen

$$\cos(\omega t - \varphi) = \cos(-\omega t + \varphi)$$

ergibt sich bei Vorzeichenwechsel von φ die gleiche Ellipse, die aber entsprechend der Zeitumkehr von $+t$ nach $-t$ im entgegengesetzten Sinn durchlaufen wird. Die Ellipse wird mit anwachsender Zeit für $\varphi > 0$ entgegen dem Uhrzeigersinn und für $\varphi < 0$ im Uhrzeigersinn durchlaufen. Welches Vorzeichen das richtige ist, kann aus dem Schirmbild der Ellipse nicht ermittelt werden, da bei hohen Frequenzen der Umlaufsinn nicht zu erkennen ist. Daher muss das Vorzeichen von φ mit einer anderen Methode (z. B. durch Verwendung zweier Kanäle) bestimmt werden. Dagegen lässt sich aus der Neigung der Ellipse nach oben rechts oder oben links entscheiden, ob der Betrag von φ zwischen 0° bis 90° oder zwischen 90° bis 180° liegt.

1.3 Bemerkung zum Erdpotenzial

Mit einem Oszilloskop-Eingang werden stets elektrische Spannungen (Potentialdifferenzen) gemessen. Jeder Kanal des Oszilloskops hat deshalb zwei Anschlüsse. Zu beachten ist, dass bei fast allen erhältlichen Oszilloskopen einer dieser Anschlüsse, mit der Erde des Stromnetzes verbunden ist (meist durch das entsprechende Symbol gekennzeichnet). Um eine elektrische Spannung in einer Schaltung zu messen, müssen beide Leitungen des Messkabels angeschlossen werden. Dadurch wird zwangsläufig eine Stelle der Schaltung auf Erdpotential gelegt. Sollte in einer elektrischen Schaltung bereits aus anderen Gründen ein Punkt mit dem Erdpotenzial verbunden sein, kann es zu (unerwünschten) Kurzschlüssen kommen. Dies ist beim praktischen Umgang mit einem Oszilloskop stets zu beachten! Außerdem besitzen dadurch *beide* Kanäle, die Erde als denselben Bezugspunkt! Es ist also nicht ohne weiteres möglich zwei beliebige Spannungen in einer Schaltung zu messen.

Hier im Versuch gilt in Schaltskizzen die Verabredung, dass die mit der Erde verbundenen Anschlüsse an die Stelle der Schaltung gelegt werden sollen, die in der Schaltskizze durch das große Erdsymbol gekennzeichnet ist. Der nicht geerdete Anschluss eines Kanals wird mit der Stelle des interessierenden Potentials verbunden. Aus Gründen der Abschirmung ist der erdführende Anschluss i. d. R. als Drahtgeflecht um die potentialführende Leitung gewickelt. Diese Tatsache wird durch die Erdsymbolik mit dem kleinen Kreis in der Schaltskizze angedeutet (siehe z. B.: Abbildung 5).

1.4 Wirkungsweise eines Phasenschiebers

Zum Erlernen der Phasenmessung wird in Teilversuch 3 eine Schaltung verwendet, mit der sich die Phasenverschiebung einer Wechselspannung gegenüber einer anderen Wechselspannung zwischen 0° bis 180° verändern lässt. Die elektrische Schaltung dieses sogenannten Phasenschiebers ist in Abbildung 5 dargestellt.

Hinweis: Das Verständnis der Funktionsweise des Phasenschiebers ist für diesen Versuch nicht notwendig. Daher ist dieser Abschnitt für interessierte Studierende gedacht. Dazu grundlegende Kenntnisse über die benötigten Schaltelemente und deren komplexen Widerstände sollten Sie aus der Vorlesung kennen. Sie finden sie aber auch im Theorieteil des Versuchs VPO.

Schaltung

An den Eingang der Schaltung wird die Wechselspannung \tilde{U}_0 angelegt. Der Strom \tilde{I}_{RR} , der durch die beiden gleichen ohmschen Widerstände R fließt, ist mit \tilde{U}_0 in Phase, ebenso die an ihnen abfallenden Spannungen \tilde{U}_R . Wenn diese an den Enden der Serienschaltung der Widerstände R abgegriffen und gegen die Erde in der Mitte gemessen werden, so sind sie um 180° gegeneinander phasenverschoben.

1 Physikalische Grundlagen

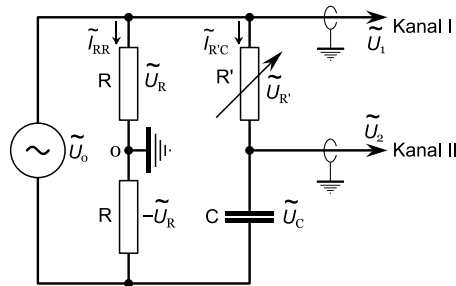


Abbildung 5: Phasenschieberschaltung

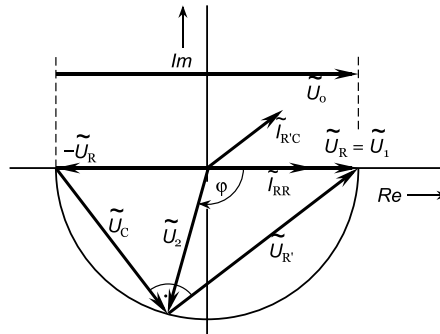


Abbildung 6: Zeigerdiagramm der Spannungen und Ströme eines Phasenschiebers

Zeigerdiagramm

In der komplexen Ebene (siehe Abbildung 6) zeigen \tilde{U}_R und $-\tilde{U}_R$ in die positive bzw. negative Richtung der reellen Achse. In der Serienschaltung aus R' und C ist $\tilde{U}_{R'}$ mit $\tilde{I}_{R'C}$ in Phase, während \tilde{U}_C gegenüber $\tilde{I}_{R'C}$ um 90° phasenverschoben ist. Die Phasenverschiebung zwischen \tilde{U}_C und $\tilde{U}_{R'}$ beträgt also 90° , d. h. die beiden Zeiger müssen aufeinander senkrecht stehen. Daher liegt die eine Ecke des Dreiecks aus \tilde{U}_C , $\tilde{U}_{R'}$ und \tilde{U}_0 mit dem rechten Winkel auf dem Kreis des Thales über \tilde{U}_0 .

Man kann nun eine Spannung \tilde{U}_2 im „Brückenweig“ zwischen dem Erdpunkt und dem Verbindungspunkt von R' und C abgreifen, der im Diagramm einem Zeiger entspricht, welcher den Nullpunkt mit dem auf dem Halbkreis laufenden Punkt verbindet. Die Phasenverschiebung φ zwischen dieser Spannung \tilde{U}_2 und $\tilde{U}_1 = \tilde{U}_R$ lässt sich durch Veränderung von R' (Potentiometer) zwischen null und 180° variieren, wobei φ positiv gerechnet wird, wenn \tilde{U}_2 zeitlich später als \tilde{U}_1 erscheint. Die Amplituden beider Spannungen haben stets den gleichen Wert $\tilde{U}_0/2$.

1.5 Auf- und Entladen eines Kondensators

Aufladevorgang

Ein Kondensator der Kapazität C werde über einen Widerstand R an eine Rechteckspannung gelegt (siehe Abbildung 7). Ab dem Zeitpunkt $t = 0$ fließt durch den Widerstand ein Strom $I(t)$,

1 Physikalische Grundlagen

der den Kondensator auflädt. Die Spannung $U_C(t)$ am Ausgang wächst dadurch von 0 bis zum Maximalwert U_0 an.

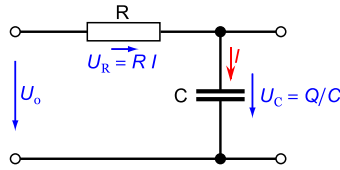


Abbildung 7: Schaltung zum Aufladen eines Kondensators über einen Widerstand

Nach dem 2. Kirchhoffschen Satz (Maschenregel) ist die Summe aus der Spannung $U_R = R I$ am Widerstand und der Spannung $U_C = Q/C$ am Kondensator gleich der Quellenspannung U_0 :

$$R I + U_C = U_0 \quad (4)$$

Durch Einsetzen des Stromes $I = \frac{dQ}{dt}$ mit $Q = C U_C$ erhält man für die Spannung U_C die lineare Differentialgleichung erster Ordnung:

$$\frac{dU_C}{dt} = -\frac{1}{RC}(U_C - U_0) \quad (5)$$

Aufgrund der Tatsache, dass die Differentiation von $U_C - U_0$ dasselbe ergibt wie die von U_C , kann (5) in eine homogene Differentialgleichung überführt werden:

$$\frac{d(U_C - U_0)}{dt} = -\frac{1}{RC}(U_C - U_0)$$

Diese Lösung wird z. B. durch Trennung der Variablen gelöst:

$$\frac{d(U_C - U_0)}{U_C - U_0} = -\frac{dt}{RC} \quad (6)$$

Beide Seiten von (6) lassen sich nach der jeweiligen Variablen integrieren. Die Integrationsgrenzen auf der rechten Seite seien die Zeiten 0 und t , ihnen entsprechen auf der linken Seite die Spannungen $-U_0$ und $U_C - U_0$:

$$\int_{-U_0}^{U_C - U_0} \frac{d(U_C - U_0)}{U_C - U_0} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt'$$

Die Integration ergibt:

$$\ln \left[\frac{U_C - U_0}{-U_0} \right] = -\frac{t}{RC}$$

Durch Umformung erhält man schließlich:

$$U_C = U_0 \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{RC} \right) \right] \quad (7)$$

Der Verlauf dieser Funktion ist in Abbildung 8 dargestellt:

1 Physikalische Grundlagen

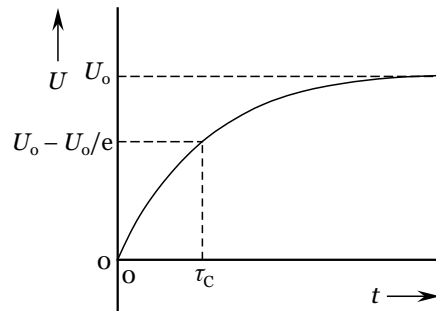


Abbildung 8: Ansteigen der Kondensatorspannung bei Aufladen über einen Widerstand

Entladevorgang

Zum Entladen des auf die Spannung U_0 aufgeladenen Kondensators werden in der Schaltung von Abbildung 7 die Spannungsquelle entfernt und der Eingang der Schaltung kurzgeschlossen (siehe Abbildung 9):

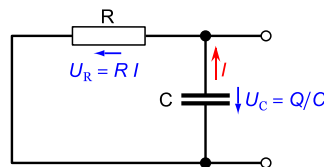


Abbildung 9: Schaltung zum Entladen eines Kondensators über einen Widerstand

Aus (4) wird dann:

$$RI + U_C = 0$$

Der Lösungsweg verläuft analog zu dem für (4), das Endergebnis ist:

$$U_C = U_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad (8)$$

Es ist eine gute Übung diese Rechnung selbst durchführen. Die sich so ergebende abfallende Exponentialfunktion ist in Abbildung 10 dargestellt:

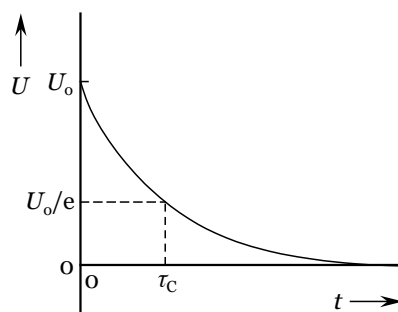


Abbildung 10: Absinken der Kondensatorspannung bei Entladen über einen Widerstand

Relaxationszeit

Die in Abbildung 8 und Abbildung 10 angegebene Zeit τ_C ist diejenige Zeit, nach der bei einem exponentiell ablaufenden Abklingvorgang die betrachtete Größe auf den „e-ten“ Teil (ca. 37 %) der Differenz zwischen Anfangs- und Endwert abgeklungen ist. Diese Zeit charakterisiert, wie schnell oder langsam ein solcher Vorgang abläuft bzw. sich ein System „erholt“, und wird daher Relaxationszeit genannt.

Sowohl für das Aufladen als auch das Entladen eines Kondensators gilt nach (7) und (8):

$$\tau_C = RC$$

2 Technische Grundlagen

2.1 Oszilloskop

Die Frontansicht eines Oszilloskops sehen Sie in Abbildung 11.

Eingangskopplungen

Im Idealfall sollte der Messvorgang mit Oszilloskop die zu untersuchende Schaltung nicht beeinflussen. In der Praxis lassen sich aber Kapazitäten im Eingang des Oszilloskops nicht vermeiden, zu ihrer Entladung dient der dem Eingang parallel geschaltete Widerstand. Er begrenzt allerdings den Eingangswiderstand des Oszilloskops nach oben.

In der Einstellung „DC“ wird die zu messende Spannung direkt an den Eingangssignalverstärker des Oszilloskops gelegt. Wenn die Abtrennung einer überlagerten Gleichspannung erwünscht ist, kann durch Wechsel in die Einstellung „AC“ intern ein Kondensator vorgeschaltet werden (siehe Abbildung 12).

Tastköpfe

Um den Eingangswiderstand zu erhöhen und das Oszilloskop vor zu hohen Spannungen zu schützen, kann zwischen einem Eingang und der Schaltung ein Tastkopf (siehe Abbildung 13) eingefügt werden. Er enthält als wesentliches Element einen hohen Widerstand, der dem Eingang vorgeschaltet wird. Die dadurch herabgesetzte Empfindlichkeit muss in Kauf genommen werden.

Der Tastkopf bildet zusammen mit Widerstand und Kapazität des Eingangs einen komplexen Spannungsteiler. Dieser kann mithilfe des variablen Kondensators auf ein bestimmtes Spannungsverhältnis eingestellt werden, das („erstaunlicherweise“) in einem großen Frequenzbereich unabhängig von der Frequenz ist. Die zusätzliche Kapazität C_{Ltg} kommt durch die koaxiale Anordnung der Leiter im Messkabel zu Stande (siehe Abbildung 14).

2.2 Funktionengenerator

Ein Funktionengenerator kann verschiedene Formen von Wechselspannungen erzeugen. Die Frontansicht eines Funktionengenerators, wie er im Versuch verwendet wird, sehen Sie in Abbildung 15. Bei diesem Modell kann zwischen einer Sinus- und Rechteckspannung gewählt werden. Eine Taste aus dem Feld **FREQ. RANGE** legt den Frequenzbereich fest. Die Frequenz selbst wird mit dem großen Drehknopf eingestellt. Die Amplitude der Wechselspannung ist mit dem betreffenden Drehknopf zu verändern. Der Drehschalter **ATTENUATOR** (Abschwächer) gestattet eine Verkleinerung der Maximalamplitude. Da in diesem Versuch die Amplitude so groß wie möglich sein soll, ist er auf 0 dB¹ zu stellen. Von den beiden Ausgangsbuchsen

¹Die Angabe dB wird in einem anderen Versuch ausführlich diskutiert. Hier ist nur wichtig, 0 dB einzustellen. Ihr Betreuer kann Ihnen auf Wunsch auch schon hier nähere Informationen geben.

2 Technische Grundlagen

Digitalbereich: Einschalten erfolgt durch langes Drücken der Taste rechts neben "STOR. ON". Zur Speicherung eines Einzelvorgangs ist "SINGLE" lang zu drücken.

Auf dem Bildschirm erscheinen zwei Leuchtspuren, die unabhängig voneinander gesteuert werden können. Bei niedrigen Frequenzen springt der Strahl in schnellem Wechsel von einer Spur auf die andere (Einstellung CHP). Bei hohen Frequenzen werden die Spuren abwechselnd durchlaufen (Einstellung ALT).

Drehen des Knopfes "INTENS" im Uhrzeigersinn erhöht die Bildhelligkeit, mit dem Knopf "FOCUS" wird die Schärfe der geschriebenen Linien eingestellt. Achtung: Sehr hohe Bildhelligkeit kann die Elektronenstrahlröhre beschädigen, vor allem bei stehenden oder sich nur langsam bewegenden Bildern.

Drücken von "AUTO SET" passt die Einstellungen an das vorhandene Eingangssignal an.

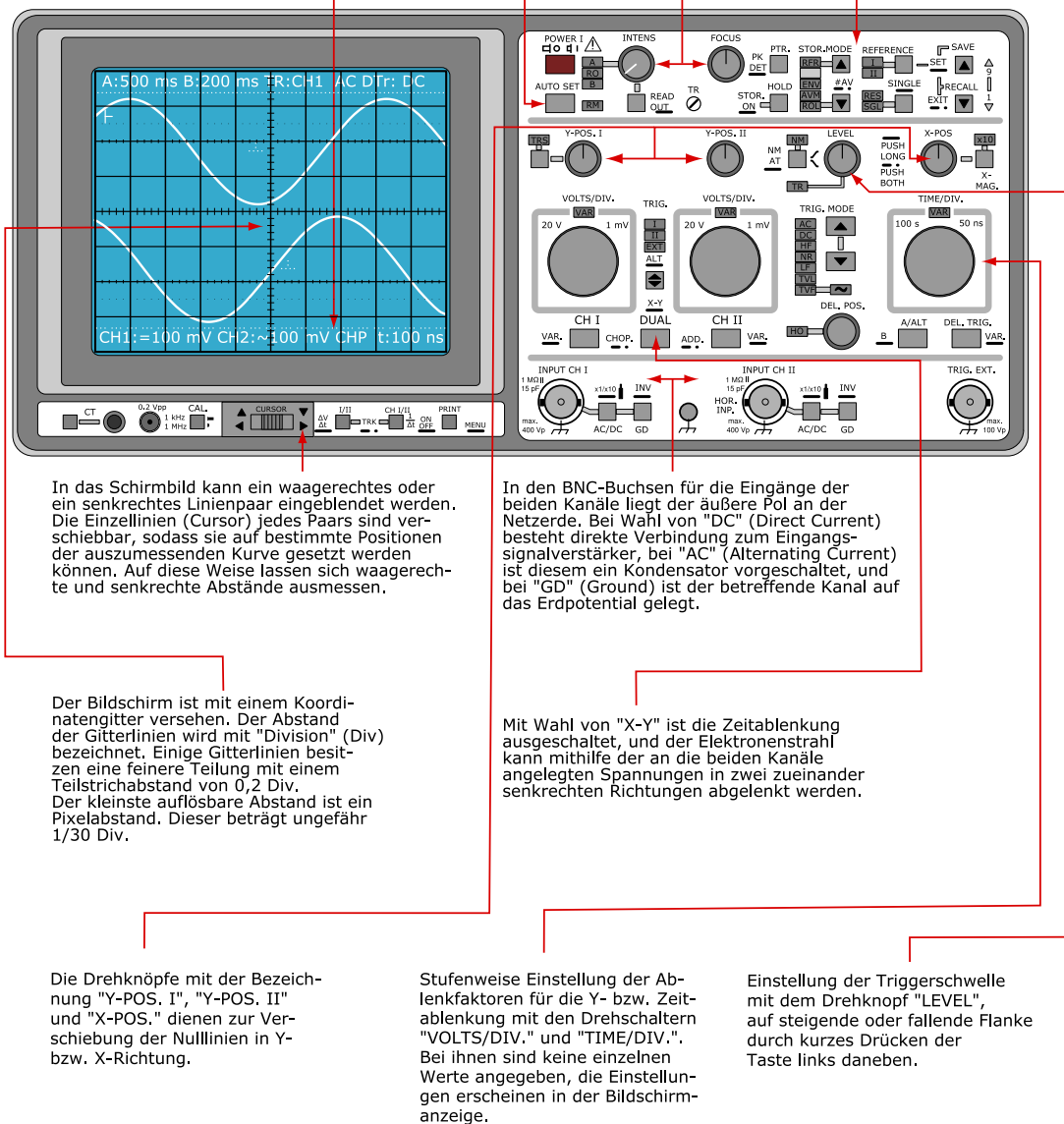


Abbildung 11: Frontansicht des Oszilloskops

2 Technische Grundlagen

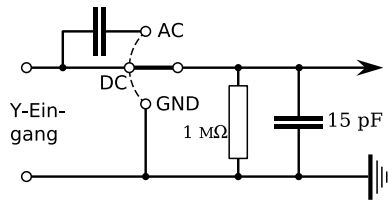


Abbildung 12: Ersatzschaltung für die Eingangskopplung eines Oszilloskops



Abbildung 13: Tastkopf mit Anschlusskabel

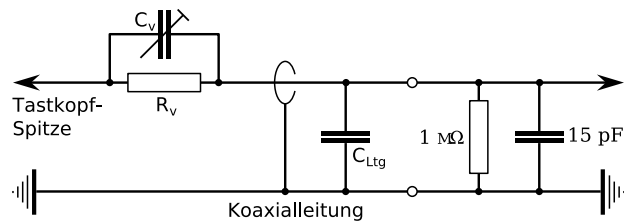


Abbildung 14: Ersatzschaltung für einen Tastkopf (linker Teil) am Oszilloskopeingang (rechter Teil, für Eingangskopplung DC)

ist die Linke für den Anschluss an einen Frequenzzähler vorgesehen (siehe Abschnitt 2.3). Die abschirmenden Pole des Frequenzgenerators sind mit dem Erdpotenzial des Stromnetzes verbunden.

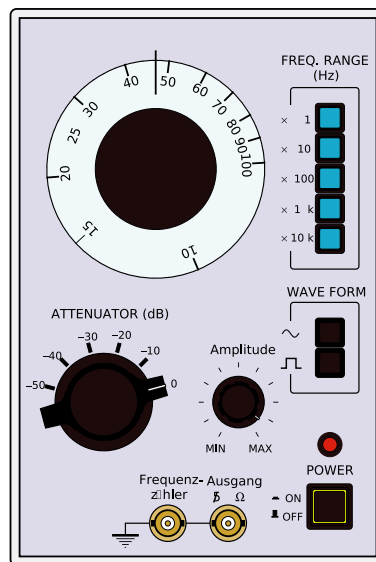


Abbildung 15: Frontansicht eines Funktionengenerators

2.3 Frequenzzähler

Ein Frequenzzähler zählt fortgesetzt in einem Zeitintervall Schwingungen und zeigt das Ergebnis, die Frequenz, in Schwingungen pro Sekunde (Hertz) an. In Abbildung 16 ist die Frontansicht abgebildet.

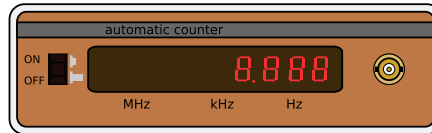


Abbildung 16: Elektronischer Frequenzzähler

2.4 Messen von aperiodischen Vorgängen

Die Entladekurve eines Kondensators hat theoretisch bis $+\infty$ einen streng monotonen Verlauf, ist also aperiodisch. Periodizität ist jedoch ein Kriterium, damit das Signal durch den Trigger dauerhaft dargestellt werden kann.

Es gibt nun zwei Möglichkeiten mit einem Oszilloskop aperiodische Vorgänge darzustellen:

Anregung mit großer Periode

Eine Methode, besteht darin, aperiodische Vorgänge künstlich periodisch zu machen. Das geht nur, wenn man nicht den gesamten Definitionsbereich der Funktion, sondern nur ein endliches Intervall untersuchen muss. Das Durchlaufen dieses Teils der Funktion wird mittels Anregung durch einen Funktionengenerator periodisch wiederholt und ergibt so auf dem Bildschirm ein stehendes Bild. Wichtig bei dieser Methode ist, dass die Periode der Anregung groß gegenüber der Relaxationszeit ist ($T \gg \tau$). Das heißt, dass in dem Fall des sich entladenen Kondensators dieser annähernd vollständig entladen kann, bevor er erneut aufgeladen wird. So wird gewährleistet, dass der Kondensator jeweils auf die gleiche Spannung aufgeladen wird.

Digitales Speichern

Eine andere Möglichkeit ist, den aperiodischen Vorgang zu speichern. Ein digitales Speicheroszilloskop ist dazu in der Lage. Die zunächst analog registrierte Funktion wird in kurzen Zeitschritten abgetastet und die diesen Punkten zugeordneten Funktionswerte mit einem Analog-Digital-Wandler digitalisiert (siehe Abbildung 17).

Nach Abspeicherung stehen sie zum Abrufen oder zur Darstellung auf dem Bildschirm beliebig lange zur Verfügung.

Die Güte der Messwerterfassung hängt unter anderem mit der Größe der Abtastrate zusammen. Diese reicht bei den hier verwendeten Oszilloskopen bis zu $2 \cdot 10^8$ Abtastungen

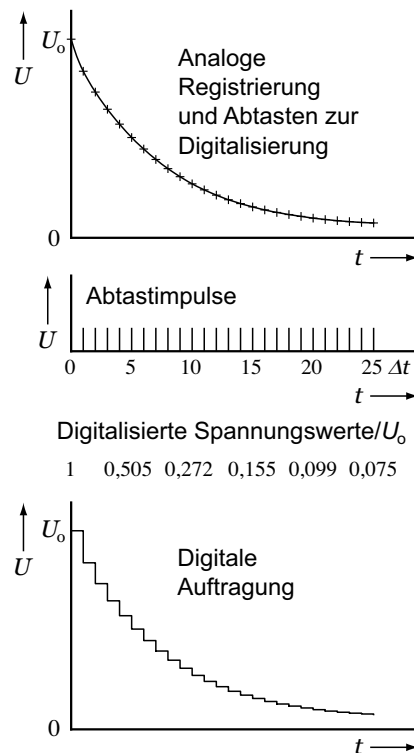


Abbildung 17: Digitalisierung einer analog aufgenommenen Kurve

pro Sekunde. Damit können auch sehr schnell ablaufende Vorgänge erfasst werden. (Die digitalisierten Messwerte können außerdem über eine Schnittstelle und ein Interface an einen Rechner übertragen werden.) Besonderer Vorteil der Methode des digitalen Speicherns ist die Möglichkeit Vorgänge, die prinzipiell nicht wiederholbar sind, festzuhalten.

2.5 Aufbau von Schaltungen

Rastersteckplatte

Die Schaltungen werden auf einer Rastersteckplatte aufgebaut.

Abschirmgehäuse

Die Rastersteckplatte ist in einen Blechkasten gesetzt. Dieser bildet mit einem Deckel das Abschirmgehäuse. Es soll verhindern, dass elektromagnetische Störfelder² in die Schaltung eindringen und die zu messenden Signale beeinträchtigen.

Zum Anschluss von Funktionengenerator und Oszilloskop sind außen BNC-Buchsen angebracht. Im Inneren werden Verbindungen durch Kabel mit Büschelstecker hergestellt.

²im Praktikum z. B. die vom Sender Ismaning ausgestrahlte Mittelwelle 801 kHz des Bayerischen Rundfunks

Hinweis zu den Oszilloskopanschlüssen

In den Schaltbildern wird nur der spannungsführende Anschluss der Oszilloskopeingänge gezeichnet. Der geerdete Anschluss ist an die mit dem Erdsymbol bezeichnete Stelle der Schaltung zu legen.

Hinweis zur Farbkonvention von Kabeln

In der Praxis hat sich eine Farbkonvention für die Verwendung von Kabeln als sinnvoll erwiesen. Nach dieser wird die Masse mit schwarzen Kabeln verbunden. Damit ist es insbesondere auch für Ihren Betreuer leichter, Fehler im Aufbau der Schaltung zu finden.

3 Versuchsdurchführung

Dieser Versuch bietet Ihnen die Möglichkeit, sich eingehend mit dem Oszilloskop als komplexes Messgerät zu beschäftigen. Der Schwerpunkt liegt im Kennenlernen der einzelnen Bedienelemente und ihrer Funktionen. Ihr Lernziel soll es sein, das Oszilloskop als Messgerät beherrschen zu können. Dazu werden Schritt für Schritt die Bedienelemente auf dem Oszilloskop behandelt.

Vorbemerkung

Die meisten der Tasten sind mit mehreren Funktionen belegt.

- Kurzes Drücken wählt die Funktion, die unmittelbar über oder auf der Taste steht.
- Langes Drücken aktiviert die Funktion, die neben der Taste über einem langen waagerechten Strich steht.
- Gleichzeitiges Drücken zweier Tasten schaltet die Funktion, welche sich zwischen den Tasten über zwei kurzen Strichen befindet, ein.

3.1 Teilversuch 1: Basisbedienelemente des Oszilloskops

Inhalt

Das Ziel dieses Teilversuchs ist es, sich mit denjenigen Knöpfen und Funktionen des Oszilloskop vertraut zu machen, die das Anzeigen (und deren Variation) eines periodischen Verlaufes ermöglichen. Zentrale Punkte sind hier die Ablenkfaktoren und die Triggereinstellungen.

Aufbau der Versuchsanordnung

Verbinden Sie nun die Geräte (Funktionengenerator, Oszilloskop und Frequenzzähler) miteinander.

Darstellen einer Wechselspannung

Stellen Sie am Funktionengenerator eine beliebige Frequenz zwischen 1 kHz bis 10 kHz ein.

Wählen Sie sich nun eine angenehme Helligkeit und Schärfe (Bedienelemente siehe Abbildung 18).

Drücken von **AUTO SET** passt die Einstellungen der Positionseinstellungen und Ablenkfaktoren automatisch an das vorhandene Eingangssignal an. Dies ist nur für periodische Signale sinnvoll möglich. Bei nichtperiodischen Signalen müssen Sie die Fähigkeit besitzen,

3 Versuchsdurchführung

die notwendigen Einstellungen manuell vornehmen zu können. Wenn versehentlich die digitale Speicherungsfunktion aktiviert wurde, wird dies durch kurzes Drücken der Taste neben **STOR. ON** rückgängig gemacht.

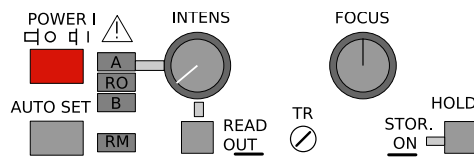


Abbildung 18: Bedienelemente des Oszilloskops: Strahleinstellung

Testen Sie nun die Positionseinstellungen und Ablenkfaktoren für x - und y -Ablenkung (Bedienelemente siehe Abbildung 19), sodass Sie deren Bedienung in der Auswertung beschreiben können.



Abbildung 19: Bedienelemente des Oszilloskops: Drehschalter zum Verändern der Ablenkfaktoren für y - und Zeitablenkung

Nun sollen Sie die Einstellungsmöglichkeiten für den Trigger kennenlernen (siehe Abbildung 20). Wählen Sie dazu den manuellen Modus (NM = Normalmodus).

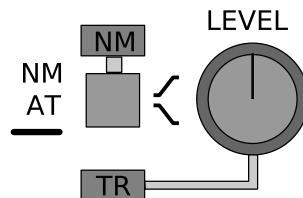


Abbildung 20: Einstellungsmöglichkeiten für den Trigger: auf ansteigende oder absteigende Flanke, Höhe der Triggerschwelle. „NM“ bedeutet Normalmodus

Machen Sie sich mit der Wirkungsweise (ansteigende Flanke, fallende Flanke, Level) ebenfalls so vertraut, dass Sie den Trigger in der Auswertung erklären können.

3.2 Teilversuch 2: Messen einer Amplitude

Inhalt

Bei dieser Aufgabe lernen Sie, die Cursors zu benutzen. Mit deren Hilfe ist es möglich, eine Amplitude sehr genau auszumessen. Siehe auch Abbildung 21.

3 Versuchsdurchführung

Ein Paar von Cursorlinien (waagrecht oder senkrecht) erscheint durch langes Drücken der Taste unter **CH I/II**. Der durchgehend punktierte Cursor kann bewegt werden, der unterbrochen punktierte ist fixiert. Die Bewegung erfolgt durch den Tastschalter unter **CURSOR**, der ähnlich wie ein Joystick wirkt. Zum Wechsel zwischen „fixiert“ und „nicht fixiert“ drücken Sie die Taste unter **I/II** kurz. Rechts unten wird die Spannungsdifferenz angezeigt. Langes Drücken von **I/II** bewirkt einen Wechsel zwischen waagerechten und senkrechten Cursorlinien.

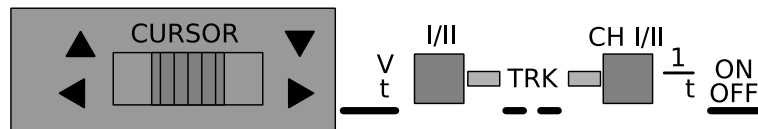


Abbildung 21: Einstellmöglichkeiten für die Cursorlinien

Aufbau

Der in Teilversuch 1 benutzte Aufbau wird beibehalten.

Durchführung

Prüfen Sie anhand der im Praktikumsraum ausliegenden technischen Daten aus der Anleitung des Multimeters, für welche Frequenzen dieses geeignet ist, und wählen Sie dann eine geeignete Frequenz. Begründen Sie Ihre Wahl und stellen Sie diese Frequenz am Funktionsgenerator ein.

Nutzen Sie die waagerechten Cursorlinien, um die Amplitude auszumessen (immer zwischen Minima und Maxima messen und den Wert durch 2 dividieren), und vergleichen Sie die Amplitude mit dem Effektivwert, den Ihnen das Multimeter liefert.

Tipp: Bei eingeschalteten Cursors werden durch Drücken der **AUTOSET**-Taste die Cursorlinien in die ungefähr gewünschte Position gesetzt. Und zwar für die Kurve, für die der Trigger eingestellt ist. Die genaue Einstellung wird anschließend so vorgenommen, dass die Cursorlinie die Kurve im Extrempunkt schneidet (nicht nur berührt)!

3.3 Teilversuch 3: Messen einer Phasendifferenz

Inhalt

Die mit einem Phasenschieber erzeugte Phasendifferenz zweier gleichfrequenter Wechselspannungen soll bestimmt werden.

Aufbau

Hierfür muss die in Abbildung 22 dargestellte Schaltung auf die Rastersteckplatte aufgebaut werden.

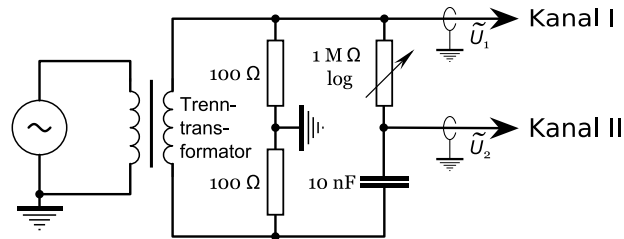


Abbildung 22: Schaltung des Phasenschiebers. *Erklärung zur Erdsymbolik: siehe Abschnitt 1.4*

Durch Drehen am Potentiometer werden die Spannungen \tilde{U}_1 und \tilde{U}_2 von 0° bis (fast) 180° gegeneinander phasenverschoben (180° durch Herausziehen des Potentiometers).

Das Einfügen des Trenntransformators ist notwendig, sonst würden Teile der Schaltung durch die Netzerde kurzgeschlossen werden.

Durchführung

Mit senkrechten Cursorlinien kann die Periodendauer der Sinusschwingung ausgemessen werden. Durch kurzes Drücken von **CH I/II** wird diese in die Frequenz umgerechnet.

Wie im Theorieteil beschrieben wurde, ist die Bestimmung der Phasendifferenz mit der Sinus-Darstellung und der Lissajous-Ellipse möglich.

a) im *t-y*-Modus (Sinus-Darstellung)

- Stellen Sie fest, welches Vorzeichen die Phasenverschiebung zwischen Kanal I und Kanal II hat. Was heißt das für die zeitliche Verschiebung?
- Mit der Funktion „**ADD**“ kann die Interferenz zweier überlagerter Wellen simuliert werden. Betrachten Sie die Interferenz in Abhängigkeit der Phasenverschiebung und notieren Sie Ihre Beobachtungen.
- Stellen Sie eine Phasenverschiebung $\varphi \notin \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ\}$ ein und messen Sie die für die Phasenverschiebung notwendigen Werte.

b) im *x-y*-Modus (Lissajous-Ellipse)

- Behalten Sie die eingestellte Phasenverschiebung bei, und messen Sie diese mittels der Lissajous-Ellipse.
- Betrachten und beschreiben Sie nun die Form der Lissajous-Ellipse bei Änderung der Phasenverschiebung.

3 Versuchsdurchführung

- Beobachten Sie auch hier den Einfluss einer veränderten Lage der beiden Teilschwingungen bezüglich ihrer Nulllage auf die Messung. Wie wirkt sich diese auf die Ablesbarkeit der zu messenden Größe Δx aus?

Zusatz: Audiogerät (z. B. mp3-Player)

Sie haben hier die Möglichkeit, sich die Ausgangssignale eines Audiogerätes anzusehen.

Benutzen Sie dazu den einzelnen Klinkenstecker mit abgeschraubtem Plastikschutz und die Tastköpfe, um die Spannungssignale des rechten und linken Kanals vom Audiogerät an das Oszilloskop zu liefern. Betrachten Sie beide Kanäle sowohl im „ t - y “-Modus wie auch im „ x - y “-Modus.

Um sich die Musiksignale gleichzeitig anhören zu können, verwenden Sie den „2 auf 1“-Klinkensteckeradapter und die Kopfhörer.

3.4 Teilversuch 4: Betrachten des Auf- und Entladevorgangs eines Kondensators

Inhalt

In diesem Teilversuch werden die Kurven für Auf- und Entladung eines Kondensators mit Hilfe des Funktionengenerators periodisch dargestellt.

Aufbau der Schaltung

Siehe Abbildung 23

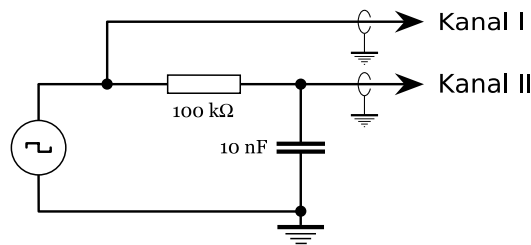


Abbildung 23: Schaltung zur Darstellung des Auf- und Entladevorgangs bei einem Kondensator

Durchführung

- Wählen Sie die hierfür nötige Spannungsform und stellen Sie die Frequenz auf etwa 60 Hz.

3 Versuchsdurchführung

- Nehmen Sie am Oszilloskop sämtliche Einstellungen so vor, dass Sie einen vollständigen Auf- und Entladevorgang des Kondensators auf dem Schirm sehen können. Betrachten Sie beide Kanäle.
- Widerstand $100\text{ k}\Omega$ durch Potentiometer $1\text{ M}\Omega$ log ersetzen, an diesem drehen und Veränderung der Kurven feststellen. Dasselbe für Verdopplung der Kapazität durch Parallelschalten eines zweiten (gleichen) Kondensators. Machen Sie sich Notizen, die für eine Erklärung in der Auswertung notwendig sind.

3.5 Teilversuch 5: Quantitative Registrierung der Entladekurve eines Kondensators

Inhalt

Nun wird ein einmalig ablaufender Entladevorgang mit dem Oszilloskop digital gespeichert, um aus dem Kurvenverlauf die Relaxationszeit zu bestimmen.

Aufbau der Schaltung

Verwenden Sie für den Spannungsabgriff über dem $1\text{ M}\Omega$ -Widerstand einen Tastkopf.

Die Schaltung sehen sie in Abbildung 24.

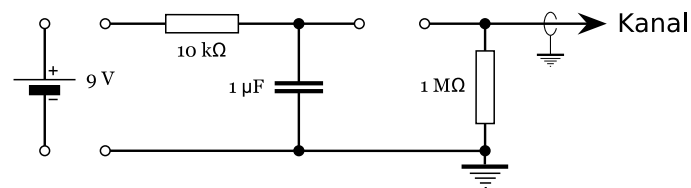


Abbildung 24: Schaltung zur Entladung eines Kondensators über einen Widerstand

Durchführung

- Überlegen Sie sich, welche Einstellung bzgl. Nullpunkt, Zeit-Ablenkung und Trigger Sie vornehmen müssen. (Welche Spannung fällt ab? Welche Relaxationszeit vermuten Sie? Dabei soll der volle Bildbereich des Oszilloskops ausgenutzt werden. Welche Triggereinstellung benötigen Sie, damit auch der Beginn der Entladung noch auf dem Oszilloskop sichtbar bleibt.) Falls die Kurve später nicht nach Ihren Wünschen dargestellt wird, ändern Sie die Einstellung entsprechend und wiederholen die Messung.
- Aktivieren Sie die digitale Speicherfunktion des Oszilloskops (**STOR. ON**). Damit wird das Oszilloskop von Echtzeit auf Speicherbetrieb umgeschaltet.
- Laden Sie den Kondensator über den $10\text{ k}\Omega$ -Widerstand mit dem 9V-Akku, und entladen Sie ihn über den $1\text{ M}\Omega$ -Widerstand. Beobachten Sie das Wandern des Leuchtpunkts auf dem Bildschirm.

3 Versuchsdurchführung

- Aktivieren Sie SINGLE (**SGL**). Hiermit wird die Zeitablenkung nur einmal durchlaufen. Mit RESET (**RES**) löschen Sie den Speicher und das Oszilloskop wartet mit dem Start der Messung bis die Triggerschwelle durchlaufen wird.
- Führen Sie erneut die Entladung durch. Die Entladekurve sollte nun am Bildschirm dauerhaft angezeigt werden.
- Zeigen Sie Ihrem Betreuer die auf dem Oszilloskop angezeigte Kurve!
- Messen Sie den zeitlichen Verlauf der Entladekurve:

Nehmen Sie etwa 10 t - y -Wertepaare auf. Bedienen Sie sich dabei der Raster-Linien, Cursors und Positions-Einstellungen. Vermeiden Sie Messwerte im unteren Bereich der Kurve, bei denen die Messfehler zu groß werden.

- Notieren Sie die am Tastkopf gewählte Einstellung (1x, 10x).
- Notieren Sie die Herstellerangaben für Widerstand und Kapazität und ihre Toleranzen.

4 Auswertung

4.1 Teilversuch 1: Basisbedienelemente des Oszilloskops

Beschreiben Sie kurz in eigenen Worten die Basisbedienelemente Positionseinstellungen und Ablenkfaktoren eines Oszilloskops.

Erklären Sie die Funktions- und Wirkungsweise des Triggers in wenigen Sätzen.

4.2 Teilversuch 2: Messen einer Amplitude

Vergleichen Sie die am Oszilloskop abgelesene Amplitude mit dem Spannungswert, den Sie mit dem Multimeter gemessen haben.

4.3 Teilversuch 3: Messen einer Phasendifferenz

Berechnen Sie aus Ihren Messwerten die Phasendifferenzen der beiden angewendeten Methoden und vergleichen Sie die Ergebnisse.

4.4 Teilversuch 4: Betrachten des Auf- und Entladevorgangs eines Kondensators

Erklären Sie jeweils inklusive physikalischer Begründung den Einfluss der Veränderung des Widerstandes und der Verdopplung der Kapazität auf die Kurve.

4.5 Teilversuch 5: Quantitative Registrierung der Entladekurve eines Kondensators

- Tragen Sie die natürlichen Logarithmen der Ordinatenwerte gegen die Zeit auf.
- Legen Sie die optimale Gerade durch die Messpunkte, bestimmen Sie deren Steigung wie immer inklusive Fehler. Zur Bestimmung des Fehlerstreifens, insbesondere wo er breit und wo er schmal ist, kann es hilfreich sein, zu Ihren Messwerten die Unsicherheiten $\Delta \ln(U/V)$ zu berechnen.
- Berechnen Sie aus der Steigung die Relaxationszeit τ_C . Deren Unsicherheit ist aus dem Fehler der Steigung zu ermitteln.
- Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Produkt RC aus den Herstellerangaben.