

<b>R-C-KREISE</b>	<b>NP</b>
-------------------	-----------

*R* ist die Abkürzung (Symbol) für den elektrischen Widerstand und *C* für die Kapazität eines Kondensators; R-C-Kreise sind Kombinationen aus Widerständen und Kondensatoren, die ein für viele physikalische Vorgänge charakteristisches exponentielles Abklingverhalten zeigen.

Ein Kondensator besteht aus zwei voneinander isolierten, elektrisch leitenden Platten (Plattenkondensator; im Allgemeinen ist die Geometrie komplizierter, z.B. kann man leitfähige Folien, durch Isolierfolien getrennt, umeinander wickeln). Einerseits können elektrische Ladungen auf den Platten gebunden werden, so dass ein Kondensator als Speicher für elektrische Ladung fungiert. Andererseits ist durch die isolierende Schicht eine elektrische Trennung zwischen den beiden Platten gegeben, mit der eine indirekte Kopplung in elektrischen Kreisen hergestellt werden kann, bei der Signale (Wechselspannungen, Impulse) übertragen, aber Gleichstromanteile abgetrennt werden können (AC-Kopplung; "galvanische" Trennung).

Kondensatoren spielen eine große Rolle in technischen und biologischen Impulsschaltkreisen zur Informationsverarbeitung (Mess- und Regeltechnik; Reizleitung). Durch die Pufferwirkung des Kondensators kann die Form von Impulsen beeinflusst, und durch die galvanische Trennung unerwünschte Gleichspannungsanteile von Signalen abgetrennt werden.

Eine Zellmembran mit geringer Leitfähigkeit als Grenzschicht zwischen gut leitenden elektrolytischen Flüssigkeiten stellt eine elektrische Parallelschaltung eines Widerstandes (Membranwiderstand) und eines Kondensators (Membrankapazität) dar. Aus der Anwendung entsprechender physikalischer Modellvorstellungen kann ein Verständnis der physiologischen Vorgänge und Messtechniken zur Untersuchung von Zelleigenschaften und interzellulären Vorgängen gewonnen werden.

**Aufgaben**

1. (Vorversuch Bauteil-Daten) Messung des Widerstandes *R* und der Kapazität *C* der verwendeten Bauteile mit einem Multimeter.

2. (Abklingkurve) Beobachtung der Lade- bzw. Entladestromkurve in einem R-C-Kreis. Bestimmung der Zeitkonstanten des Kreises und Berechnung der Kapazität *C* des Kondensators bei bekanntem Widerstand *R*.
3. (Wechselstromwiderstand) Messung des Wechselstromwiderstandes *Z* eines Kondensators in Abhängigkeit von der Frequenz *f* der angelegten Wechselspannung. Grafische Darstellung des Ergebnisses (*Z* über *T* = 1/*f*). Vergleich mit dem theoretisch erwarteten Verlauf und Berechnung der Kapazität des Kondensators.
4. (Hoch-/Tiefpass) Messung und grafische Darstellung der Durchlasskurven (Ausgangsspannung über Frequenz) eines Hochpasses und eines Tiefpasses. Bestimmung der Kapazität des Kondensators aus der Schnittstelle der beiden Kurven (Übernahmefrequenz).

In der Zusammenfassung sind die Ergebnisse für die Kapazität aus den drei Messungen zu vergleichen!

**Physikalische Grundlagen**

**Kondensator**

Ein Kondensator ist ein Speicher für elektrische Ladung. Die in einem Kondensator befindliche Ladung *Q* (*Q* auf der einen Platte und  $-Q$  auf der anderen) ist proportional zur "Größe" des Kondensators (Kapazität *C*) und zur Spannung *U* (die Kapazität *C* ist definiert als Verhältnis von Ladung zu Spannung):

$$(1) \quad Q = C U \quad \left( \text{bzw. Def : } C = \frac{Q}{U} \right).$$

Die Einheit der Kapazität ist:

$$(2) \quad [C] = 1 \frac{A s}{V} = 1 \text{ F (Farad)}.$$

Der Strom *I* ist die zeitliche Änderung der Ladung. Damit gilt nach (1):

$$(3) \quad I_C = \frac{dQ_C}{dt} = C \frac{dU_C}{dt} \quad \text{bzw.} \quad U_C = \frac{1}{C} \int I_C dt.$$

Beim Laden eines Kondensators baut sich nach (3) die Spannung *U<sub>C</sub>* als Gegenspannung zur äußeren Spannung (Generatorspannung) auf. Sind beide dem Betrag nach gleich, entsteht ein Gleichgewichtszustand, bei dem der Strom zum Erliegen kommt.

**R-C-Kreis;**

**Entladestrom in Abhängigkeit von der Zeit**

Ein (geladener) Kondensator der Kapazität *C* wird mit einem Widerstand *R* zu einem geschlossenen Stromkreis (Masche) zusammengeschaltet (Abb. 1).

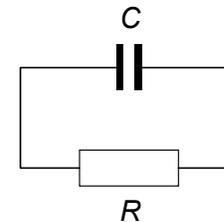


Abb. 1 R-C-Kreis

Die Spannung am Kondensator (*U<sub>C</sub>*) ergibt sich aus (3), die Spannung an *R* aus der Definition des Widerstandes *R* = *U*/*I*:

$$(4) \quad U_R = R I_R.$$

Nach der Maschenregel muss die Summe aller Spannungen im Kreis verschwinden ( $\Sigma U = 0$ ), d.h.:

$$(5) \quad U_C + U_R = \frac{1}{C} \int I dt + R I = 0 \quad (I = I_C = I_R).$$

Durch die Ableitung nach der Zeit erhält man eine Differentialgleichung für den Strom als Funktion der Zeit:

$$(6) \quad \frac{1}{C} I + R \frac{dI}{dt} = 0 \quad \text{oder} \quad \frac{dI}{dt} + \frac{1}{RC} I = 0.$$

Als Lösung dieser Differentialgleichung wird die Funktion *I* = *I*(*t*) gesucht, deren Ableitung nach der Zeit (dividiert durch einen Faktor 1/*RC*) gleich der Funktion selbst ist. Diese Bedingung erfüllt die e-Funktion:

$$(7) \quad I(t) = I_0 e^{-\frac{1}{RC}t},$$

(wovon man sich durch Einsetzen überzeugen kann).

Beim Entladen entwickelt sich ein exponentiell mit der Zeit abklingender Strom (ebenso beim Aufladen). Das Produkt  $RC$  im Exponenten von (7) bestimmt quantitativ die Abnahme des Stromes und wird als *Zeitkonstante* bezeichnet.

### Wechselstromwiderstand eines Kondensators

Entsprechend der Widerstandsdefinition wird als Wechselstromwiderstand  $Z$  (*Impedanz*) das Verhältnis der *Amplituden* von Spannung und Strom definiert (das messtechnisch gleich dem Verhältnis der Effektivwerte ist; siehe vorhergehender Versuch *Gleichstrom/Wechselstrom*):

$$(8) \quad Z = \frac{U_0}{I_0} = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}.$$

Für eine Wechselspannung  $U_C = U_0 \cos \omega t$  am Kondensator kann durch Ableitung nach  $t$  gemäß (3) der Strom berechnet werden.:

$$(9) \quad I_C = C \frac{dU_C}{dt} = -\omega C U_0 \sin \omega t = \omega C U_0 \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Für den Wechselstromwiderstand des Kondensators ergibt sich als Verhältnis der Amplituden nach (8):

$$(10) \quad Z = \frac{1}{\omega C}.$$

Ursache des Widerstandes ist die sich aufbauende Gegenspannung am Kondensator. Die dabei umgesetzte Energie bleibt jedoch als elektrische Feldenergie im Kondensator gespeichert und wird während der Entladephase an den Kreis zurückgegeben. Ein (idealer) Kondensator setzt dem Strom einen Widerstand entgegen, der ohne Energieabgabe nach außen bleibt und deshalb als *Blindwiderstand* bezeichnet wird.

### Frequenzabhängiger Spannungsteiler (Hochpass und Tiefpass)

Wegen der Frequenzabhängigkeit des Wechselstromwiderstandes von Kondensatoren (und von Spulen) können mit diesen Bauteilen sogenannte *Filter* gebaut werden, die aus einem Wechselspannungsspektrum bestimmte Frequenzbereiche herausziehen. Solche Filter werden oft benötigt, um in elektrischen Mess- und Steuerkreisen die interessierenden Signale auszuwählen und Störsignale mit anderen Frequenzen abzutrennen. Ein einfaches Beispiel ist die Reihenschaltung eines Kondensators mit einem Widerstand als Spannungsteiler (Abb. 2):

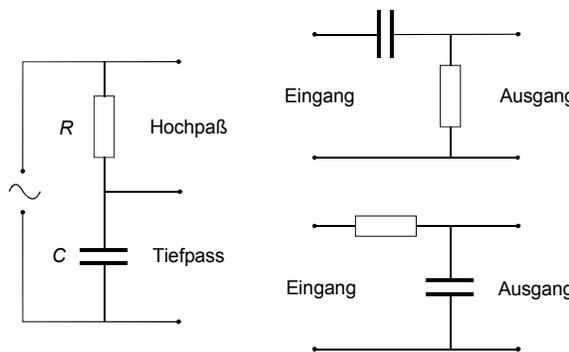


Abb. 2 Hoch- und Tiefpass-Spannungsteilerschaltung

Eine Teilspannung ist proportional dem Teilwiderstand, über dem sie abgegriffen wird (siehe vorausgehender Versuch *Gleichstrom/Wechselstrom*). Für tiefe Frequenzen ist der Widerstand des Kondensators groß, so dass hier der Hauptanteil der Eingangsspannung abfällt. Der Abgriff über dem Kondensator stellt einen *Tiefpass* dar. Für hohe Frequenzen ist umgekehrt der Widerstand des Kondensators klein und der des Widerstandes vergleichsweise groß, so dass der Abgriff über dem Widerstand als *Hochpass* wirkt.

### Oszilloskop (Elektronenstrahloszilloskop)

Das Oszilloskop ist ein wichtiges Instrument zur Beobachtung und Messung von zeitabhängigen, schnellen, wiederkehrenden elektrischen Signalen. Der vorlie-

gende Versuch hat als ergänzendes Ziel die Einführung in dieses Gerät.

Kernstück eines Oszilloskops ist eine Elektronenstrahlröhre mit einem Elektronenstrahl als praktisch trägheitslosem "Zeiger". Zur Auslenkung des Elektronenstrahls wird die zu untersuchende Spannung an die Platten eines Ablenkkondensators innerhalb der Röhre gelegt, wobei die Elektronen durch die Kraft  $F = Q E$  im elektrischen Feld des Kondensators abgelenkt werden.

Oszilloskope besitzen zwei Ablensysteme für die X- und für die Y-Richtung (Abb. 3). Zur Untersuchung von Spannung-Zeit-Verläufen wird das Signal über einen Eingangsverstärker an das Y-Ablensystem gegeben. Zur Erzeugung einer Zeitachse besitzt das Oszilloskop eine *Zeitbasis*, die periodisch eine mit konstanter Geschwindigkeit anwachsende Spannung erzeugt (Sägezahnspannung). Diese Spannung wird an das X-Ablensystem gelegt, wodurch der Strahl mit konstanter Geschwindigkeit über den Bildschirm läuft. Geschieht dies hinreichend schnell, so entsteht durch die Trägheit der Leuchtschicht des Bildschirms und des Auges eine durchgehende Linie. Ein *Trigger-Netzwerk* sorgt dafür, dass die Zeitbasis immer in dem Moment "angestoßen" wird, in dem das Signal am Y-Eingang erscheint und damit Signal und Zeitbasis synchronisiert werden. Für ein wiederkehrendes Signal erhält man auf diese Weise ein stehendes Bild auf dem Bildschirm des Oszilloskops.

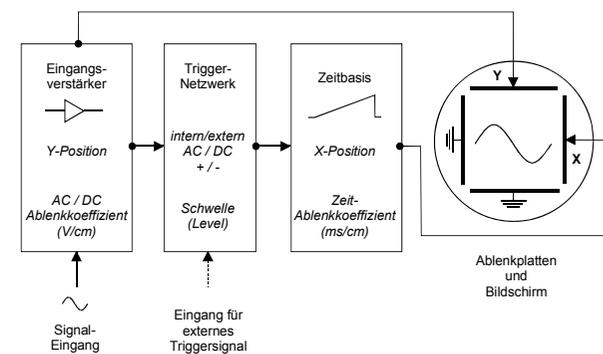


Abb. 3 Prinzipschaltbild eines Oszilloskops

## Elementare Funktions- und Bedienelemente von Oszilloskopen

### Bildschirm

- *INTENS.* und *FOCUS*: Regler zur Einstellung von Helligkeit und Schärfe des Bildpunktes (Achtung: eine zu große Helligkeit reduziert die Schärfe des Bildes).
- *cm-Netz (DIV.)* über dem Bildschirm zur quantitativen Ablesung der Messwerte.

### Eingang (Eingangsverstärker)

- *Y-POS.*: Drehknopf zur Einstellung der horizontalen Lage des Bildes (oben/unten).
- *VOLTS/DIV.*: Drehschalter zur Einstellung der Eingangsempfindlichkeit (*X-*, *Y-* Ablenkoeffizienten).
- *VAR.*: Drehknopf zur kontinuierlichen Einstellung der Eingangsempfindlichkeit. **Achtung:** Die Kalibrierung *VOLT./DIV* gilt nur dann, wenn *VAR.* am rechten Anschlag steht (Rastposition).
- *DC-AC-GD*: Kopplungsschalter; *DC* (direct current) = direkte, gleichstrommäßige Kopplung; *AC* (alternating current) = kapazitive, "galvanisch" getrennte Kopplung, bei der Gleichspannungsanteile unterdrückt werden; *GD* zur Einstellung des Nullpunktes (Nulllinie).
- *VERT. MODE*: Schalter zur Wahl der Eingangsbetriebsart (Grundeinstellung: Alle Taster gelöst.)

### Zeitbasis

- *X-POS.*: Drehknopf zur Einstellung der vertikalen Lage (rechts/links).
- *TIME/DIV.*: Drehschalter zur Einstellung des Maßstabes der Zeitachse (Zeit-Ablenkoeffizient).
- *VAR.*: Drehknopf zur kontinuierlichen Einstellung der Zeitablenkung. **Achtung:** Die Kalibrierung *TIME./DIV* gilt nur dann, wenn *VAR.* am rechten Anschlag steht (Rastposition).

## Trigger-Netzwerk

- *TRIG.*: Schalter zur Einstellung der Triggerart (*DC / AC / HF* = High- / *LF* = Low-Frequency /  $\sim$  = Netz-synchronisation /  $\pm$  = Steigung der Triggerflanke).
- *EXT.*: Externe Triggerung durch ein zusätzliches Synchronisations-Signal an der *TRIG.INP.*-Buchse.
- *AT/NORM. – LEVEL*: Schalter für automatische bzw. manuelle Triggerung. Drehknopf für Ansprechschwelle bei manueller Triggerung.

## Versuchsdurchführung

### Steckbrett und Geräteanschlüsse

Zum Aufbau der Schaltungen ist eine Experimentier-Steckplatine (Steckbrett) vorhanden. Eine belegte Buchse des Steckbretts ist mit allen benachbarten Buchsen verbunden.

Bei den Geräteanschlüssen ist zu berücksichtigen, dass die Masse-Pole der Geräte über die Erdleitung intern miteinander verbunden sind!

### Zu Aufgabe 1 (Bauteiledaten):

Zur späteren Auswertung und zum Vergleich werden zunächst die Daten der verwendeten Bauteile (Kondensator und 18-k $\Omega$ -Widerstand mit der *Kennzeichnung RCK*) mit zwei Digital-Multimetern gemessen. Dabei ist für die Widerstandsmessung das *METRAHIT 12S* und für die Kapazitätsmessung das *VOLTCRAFT 4090* zu verwenden.

### Zu Aufgabe 2 (Abklingkurve):

Der Lade- und Entladevorgang in einem *R-C*-Kreis wird periodisch durch Anlegen einer Rechteckspannung durchgeführt (Funktionsgenerator), so dass der Strom-Zeit-Verlauf als *stehendes Bild* auf einem Oszilloskop sichtbar gemacht werden kann. Die Frequenz soll etwa 50 Hz betragen um ein flimmerfreies Bild zu erzeugen. Die Schaltung entspricht Abb. 4, wobei Einstellungshinweise für die Geräte im Platzskript angegeben sind.

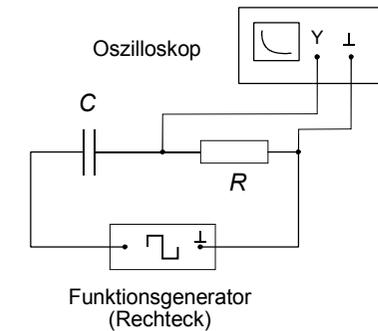


Abb. 4 Schaltung zur Aufnahme der Abklingkurve

**Achtung:** Zur kalibrierten Anzeige muss der innere Drehknopf der *Zeitablenkung* am rechten Anschlag stehen (cal)!

Die mit dem Oszilloskop über dem Widerstand *R* beobachtete Spannung ist dem Strom proportional ( $I = U/R$ ) und somit ein Maß für den Strom. Zur Auswertung wird der Spannungs-Zeit-Verlauf punktweise vom Bildschirm abgenommen, protokolliert und zur Auswertung einfach-logarithmisch dargestellt. Aus der Steigung der erwarteten Geraden kann die *Zeitkonstante RC* (Kehrwert der Steigung) und bei gegebenem *R* die Kapazität *C* des Kondensators berechnet werden.

Bei Interesse kann zusätzlich der Stromverlauf bei einem kleineren Widerstand (10 k $\Omega$ ) und der Spannungsverlauf am Kondensator bei sehr großem Widerstand (1 M $\Omega$ ) beobachtet werden. Man vergleiche die Kurven mit dem Verlauf der angelegten Rechteck-Eingangsspannung (Differenzier- bzw. Integrierschaltung).

### Zu Aufgabe 3 (Wechselstromwiderstand):

Die Widerstandsbestimmung erfolgt durch Strom-Spannungsmessungen nach (8). Als Spannungsquelle wird wieder der Funktionsgenerator benutzt, jedoch jetzt mit sinusförmigem Spannungsverlauf ( $\sim$ ). Die Frequenz wird am Funktionsgenerator direkt angezeigt. Die Spannung am Kondensator wird mit einem Analogvoltmeter (*GRUNDIG-Millivoltmeter*) und der Strom mit einem Digitalmultimeter (*VOLTCRAFT HC-5050DB*) gemessen. Die Spannung soll zusätzlich mit dem Oszilloskop beobachtet werden.

Die Frequenzabhängigkeit des Wechselstromwiderstandes soll im Frequenzintervall von 500 Hz bis 5000 Hz aufgenommen werden (bei höheren Frequenzen wird der Wechselstromwiderstand des Kondensators zu gering, so dass die Spannung am Funktionsgenerator abfällt). Man wähle eine sinnvolle Abstufung der Messpunkte mit etwa zehn äquidistanten Punkten für die Periodendauer  $T$  (siehe Abb. 5). Zur Auswertung wird der Wechselstromwiderstand  $Z$  über  $T = 1/f$  entsprechend Abb. 5 grafisch dargestellt. ( $T$ -Achse nach links, um den mit wachsender Frequenz abnehmenden Widerstand zu veranschaulichen). Aus der Steigung der erwarteten Geraden kann die Kapazität des Kondensators berechnet werden.

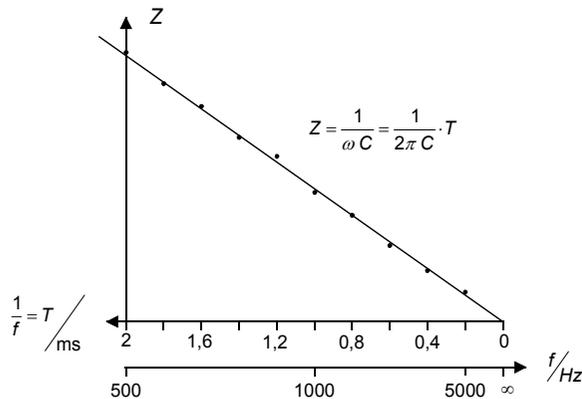


Abb. 5: Zur Frequenzabhängigkeit und Bestimmung des Wechselstromwiderstandes

#### Zu Aufgabe 4 (Hoch-/Tiefpass):

Ein Hoch-/Tiefpass wird wieder aus dem Kondensator und dem 18-k $\Omega$ -Widerstand geschaltet (Schaltung wie zu Aufgabe 2). Mit den zwei vorhandenen Messgeräten (*GRUNDIG*, *VOLTCRAFT*) werden die Spannungen  $U_R$  am Widerstand (Hochpass) und  $U_C$  am Kondensator (Tiefpass) in Abhängigkeit von der Frequenz im Bereich von 50 bis 500 Hz gemessen. Zur Auswertung werden  $U_R$  und  $U_C$  in Abhängigkeit von  $f$  in einem gemeinsamen Diagramm grafisch dargestellt. Aus der Frequenz des Schnittpunktes (*Übergangsfrequenz*) kann die Kapazität  $C$  des Kondensators berechnet werden, da dort wegen  $U_R = U_C$  auch der Widerstand  $R$  und der Wechsel-

stromwiderstand des Kondensators  $1/\omega C$  gleich sein müssen.

In der Zusammenfassung sind die Ergebnisse für die Kapazität  $C$  des Kondensators aus den drei Messungen und aus der Direktbestimmung mit dem Multimeter zu vergleichen.