

Versuch 8 A: Hochpass, Tiefpass, Verstärker
8 B: Signalverformung an RC-Gliedern

Physikalische Grundbegriffe

- Wechselstrom, Wechselspannung
- Ohmscher Widerstand, Kondensator, Spule
- Wechselstromkreise, Vierpol

meßtechnische Grundlagen:

- Oszillograph

weiterführende Literatur:

- W.Seibt, Physik f. Mediziner, 3.Aufl. p. 266-286
- W.Hellenthal, Physik für Mediziner und Biologen, 6.Aufl. p. 187-198
- V.Harms, Physik für Mediziner und Pharmazeuten, 14 Aufl. p. 140-151,

Erläuterung der wichtigsten Physikalischen Begriffe

- **Zeitabhängige elektrische Größen: Wechselstrom, Wechselspannung**

Als Wechselstrom bezeichnet man einen Strom, der seine Richtung (Vorzeichen der Stromrichtung) und seine Stärke periodisch ändert. Analoges gilt für die Wechselspannung. Zeitlich periodische Vorgänge werden ganz allgemein als Schwingungen bezeichnet. Wir haben es also beim Wechselstrom mit "elektrischen Schwingungen" zu tun. Die Grundbegriffe der Schwingungslehre wurden bei Versuch 3 dargestellt. Es ist erforderlich und wird vorausgesetzt, dass dieses Kapitel vorher durchgearbeitet wurde.

- **Sinusförmige Wechselspannung**

Bei einer Sinusspannung verläuft die zeitliche Änderung der Spannung nach einer Sinus- oder Cosinusfunktion (Abb.8.1).

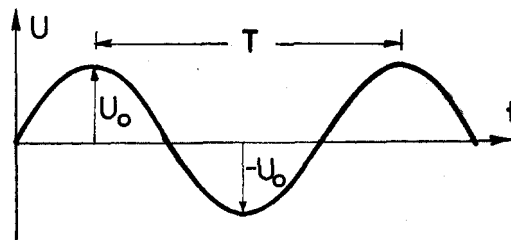


Abb. 8.1: Mathematische Darstellung einer sinusförmigen Wechselspannung.

Die mathematische Darstellung für den Spannungsverlauf lautet:

$$U = U_0 \cdot \sin 2\pi \nu t = U_0 \cdot \sin \omega t \quad (8.1)$$

ν ist die **Frequenz**, $\omega = 2\pi\nu$ die **Kreisfrequenz** der Wechselspannung. Der maximale Wert U_0 (Amplitude) heißt **Scheitelspannung**. Für einen Sinusstrom gilt analog:

$$\mathbf{I = I_0 \cdot \sin \omega t}$$

Voltmeter und Amperemeter zeigen nicht die Scheitelwerte, sondern die **Effektivwerte** an.

Für sie gilt:

$$\mathbf{U_{\text{eff}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \quad ; \quad I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}} \quad (8.2.)$$

Die Effektivwerte sind aus dem Mittelwert der Wechselstromleistung abgeleitet. Sie sind so festgelegt, dass ein sinusförmiger Wechselstrom mit dem Scheitelwert I_0 in einem ohmschen Widerstand in gleichen Zeiten die gleiche Wärme erzeugt wie ein Gleichstrom von der Stärke $I_0 / \sqrt{2}$.

Der vom Elektrizitätswerk gelieferte Wechselstrom ("technischer Wechselstrom") hat die Frequenz $\nu = 50$ Hz (Netzfrequenz). Der Effektivwert der Netzspannung beträgt 220 V, der Scheitelwert U also $220 \cdot \sqrt{2}$ V = 311 V.

Neben Sinusspannungen spielen in der Elektronik noch andere Spannungsformen, wie Rechteck-, Dreieck- und Kippspannungen eine Rolle. In den Abb. 8.2a bis 8.2d sind einige Spannungsformen dargestellt.

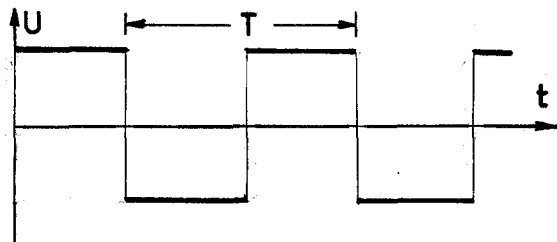


Abb. 8.2 a: Rechteckspannung

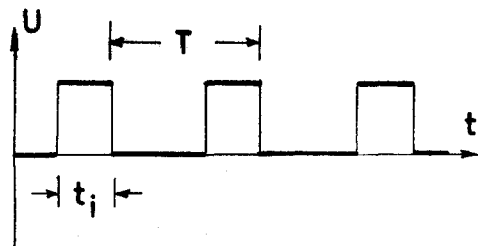


Abb. 8.2. b:
Rechteckimpulse mit Impulsdauer t_i

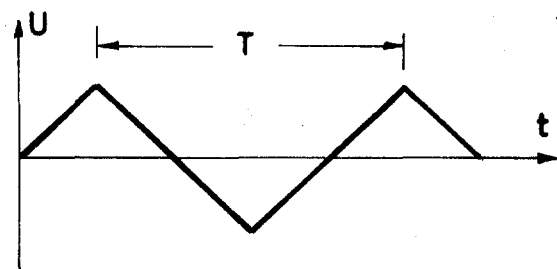


Abb. 8.2 c: Dreieckspannung

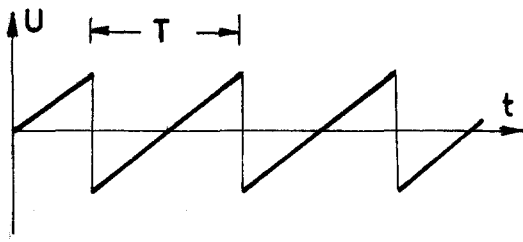


Abb. 8.2. d:
Sägezahn- oder Kippspannung

Elektrische Spannungen beliebiger Form können durch Überlagerung von Sinusspannungen verschiedener Frequenzen und Scheitelwerte erzeugt werden. Umgekehrt ist die Zerlegung einer beliebigen Wechselspannung in eine Summe von harmonischen (sinusförmigen) Teilspannungen verschiedener Frequenzen und Scheitelwerte möglich (Fourier-Analyse, siehe auch Versuch 3).

- **Ohmscher Leiter im Wechselstromkreis**

Legt man an einen ohmschen Leiter mit dem Widerstand R eine Wechselspannung $U(t) = U_0 \cdot \sin \omega t$ an, so gilt für den Strom $I(t)$:

$$I(t) = \frac{U(t)}{R} = \frac{U_0}{R} \cdot \sin \omega t$$

Da für einen ohmschen Leiter der Widerstand R konstant ist, kann man auch schreiben:

$$I(t) = I_0 \cdot \sin \omega t, \quad \text{mit} \quad I_0 = U_0 / R$$

I_0 ist dabei der Scheitelwert des Stromes.

Strom **und** Spannung verlaufen bei einem ohmschen Widerstand also nach derselben Zeitfunktion. Man kann auch sagen, dass bei einem **ohmschen Widerstand Strom und Spannung in Phase** sind.

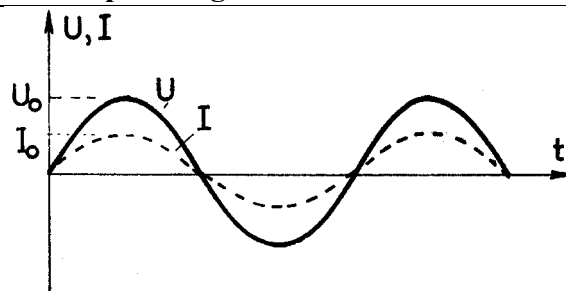


Abb. 8.3: Phasenbeziehung von Strom und Spannung in einem Stromkreis mit ohmschem Widerstand.

Unabhängig von etwaigen Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung definiert man als **Wechselstromwiderstand Z** eines Leiters:

$$Z = \frac{U_0}{I_0} \quad \text{bzw.} \quad Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} \quad (8.3)$$

Nach dieser Definition ist der Wechselstromwiderstand Z_R für einen ohmschen Widerstand gleich R :

$$Z_R = R \quad (8.4)$$

Wechselstromwiderstand und Gleichstromwiderstand sind beim ohmschen Leiter gleich groß. Z_R hängt somit nicht von der Frequenz ab.

Es gibt jedoch elektrische Leitelemente, deren Widerstände für Wechsel- und für Gleichstrom verschieden sind. Dazu gehören Kondensator und Spule.

- **Kondensator**

Kondensatoren sind metallische Körper, die elektrische Ladung aufnehmen (speichern) und auch wieder abgeben können. Die Bauformen von Kondensatoren sind sehr mannigfaltig. Die einfachste Bauart liegt beim Plattenkondensator vor (Abb.8.4). Er besteht aus zwei Metallplatten mit der Fläche A , die sich im Abstand d parallel zueinander gegenüberstehen.

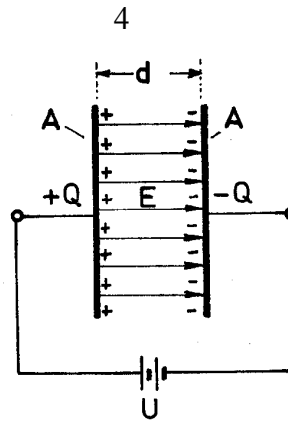


Abb. 8.4: Zur Definition des Kondensators.

Schließt man an einen gegebenen Kondensator eine Gleichspannungsquelle (Batterie) der Spannung U an, so fließt eine Ladungsmenge Q auf die Platten, die proportional zu U ist. Als **Kapazität C** eines Kondensators definiert man den Quotienten aus Ladung und Spannung.

Definition der Kapazität C :

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

SI-Einheit für C : $1 \text{ As/V} = 1 \text{ F (Farad)}$.

Zahlenmäßig stellt C die Ladung dar, die der Kondensator bei 1 V Spannung aufnehmen kann. Die Ladung Q , die ein Kondensator aufnehmen kann, ist das Produkt von C und U :

$$Q = C \cdot U \quad (8.5a)$$

Die Kapazität C eines Kondensators hängt von dessen geometrischer Beschaffenheit und vom Medium zwischen den Platten ab. Für den Plattenkondensator gilt, falls Vakuum zwischen

den Platten ist:

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (8.6)$$

A = Plattenfläche; d = Plattenabstand; ϵ_0 ist die **elektrische Feldkonstante** oder Influenzkonstante. Ihr Wert beträgt: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$.

Die Ladungen auf den Platten erzeugen ein **homogenes elektrisches Feld** zwischen den Platten. In den Randzonen der Platten ist das Feld inhomogen. Für den homogenen Teil der Feldstärke gilt:

$$E = \frac{U}{d} \quad (8.7)$$

Bringt man zwischen die Platten eines Kondensators ein nichtleitendes Material (ein **Dielektrikum**), so stellt man fest, dass nun der Kondensator bei gleicher Spannung mehr Ladung aufnimmt. Seine Kapazität ist somit größer geworden. Der Faktor, um den die Kapazität des Kondensators mit Dielektrikum zugenommen hat, heißt **Dielektrizitätszahl** ϵ_r . Ist C die Kapazität ohne Dielektrikum, C' die Kapazität mit Dielektrikum, so ist:

$$C' = \epsilon_r \cdot C \quad \text{oder} \quad \epsilon_r = \frac{C'}{C} \quad (8.8)$$

Das Produkt $\epsilon_r \cdot \epsilon_0$ wird **Dielektrizitätskonstante (kurz: DK)** genannt.

Definitionsgemäß ist für Vakuum $\epsilon_r = 1,000$; für Luft ist $\epsilon_r \approx 1$; für alle festen und flüssigen Dielektrika ist $\epsilon_r > 1$. Eine besonders hohe Dielektrizitätszahl haben Wasser und Blut (etwa 80). Gl.8.6 lautet dann allgemeiner:

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (8.9)$$

Der Grund für die Erhöhung der Kapazität eines Kondensators durch ein Dielektrikum liegt in der Polarisierbarkeit der Materie (Orientierungs- und Verschiebungspolarisation, siehe Lehrbücher der Physik).

In einem geladenen Kondensator ist elektrische Energie gespeichert. Sie berechnet sich nach

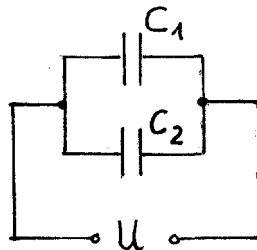
der Formel:

$$W = \frac{1}{2} C U^2$$

Mit C = Kapazität; U = Spannung.

- **Kombination von Kondensatoren**

a) **Parallelschaltung**



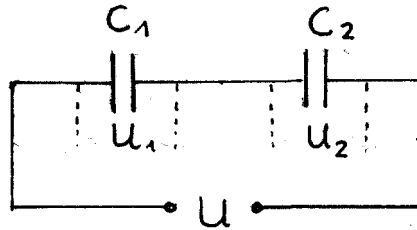
Bei der Parallelschaltung verschiedener Kondensatoren mit den Kapazitäten C_1, C_2, \dots liegt an allen Kondensatoren dieselbe Spannung $U = U_1 = U_2 = \dots$

Die aufgenommenen Ladungsmengen Q_1, Q_2, \dots sind unterschiedlich. Für die Gesamtladung Q gilt: $Q = Q_1 + Q_2 + \dots$ bzw. nach Gl.8.5a: $C U = C_1 U_1 + C_2 U_2 + \dots$

Wegen $U = U_1 = U_2 = \dots$ ist also:

$$C = C_1 + C_2 + \dots \quad (8.10)$$

Bei einer Parallelschaltung addieren sich also die Kapazitäten zur Gesamtkapazität.

b) Serienschaltung

Bei der Serien- oder Reihenschaltung verschiedener Kondensatoren nehmen alle Kondensatoren unabhängig von ihrer Kapazität die gleiche Ladungsmenge auf. Auch die von der Spannungsquelle gelieferte Gesamtladung Q ist gleich der Einzelladungen:

$$Q = Q_1 = Q_2 = \dots$$

Die Spannungen U_1, U_2, \dots an den einzelnen Kondensatoren sind verschieden. Für die Gesamtspannung U gilt:

$$U = U_1 + U_2 + \dots \quad \text{bzw.} \quad \frac{Q}{C} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \dots$$

Wegen $Q = Q_1 = Q_2 = \dots$ ist also:

$$\boxed{\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots} \quad (8.11)$$

Der Reziprokwert der Gesamtkapazität ist gleich der Summe der Reziprokwerte der Einzelkapazitäten.

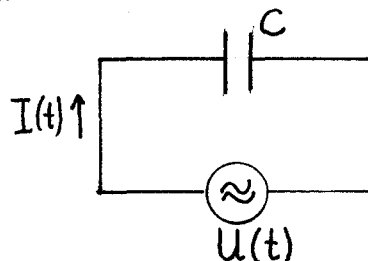
- Kondensator im Wechselstromkreis

Legt man an einen Kondensator eine Wechselspannung an, so wird der Kondensator entsprechend der wechselnden Polarität der Spannungsquelle ständig im Rhythmus der Frequenz "umgeladen". In der Zuleitung zum Kondensator strömt also elektrische Ladung hin und her, d.h. es fließt ein **Wechselstrom**.

Strom und Spannung sind am Kondensator **nicht in Phase**, sondern um eine viertel Periode (oder 90°) gegeneinander verschoben.

Dies lässt sich aus der folgenden Überlegung herleiten:

Eine Sinusspannung $U(t) = U_0 \cdot \sin \omega t$ werde an einen Kondensator der Kapazität C angeschlossen (siehe Schaltbild).



Die Zuleitungen sollen vernachlässigbaren Widerstand haben. Gesucht ist nun der Strom $I(t)$, der in der Zuleitung fließt. Nach Gl. 8.5a gilt: $Q = CU$, bzw. bei zeitabhängigen Größen: $Q(t) = CU(t)$. Differenziert man diese Gleichung nach der Zeit, so erhält man:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = C \cdot \frac{dU(t)}{dt}$$

oder mit $\frac{dQ(t)}{dt} = I(t)$ (s. Gl. 6.7):

$$I(t) = C \frac{dU(t)}{dt} = C \cdot \omega \cdot U_0 \cos \omega t = I_0 \cos \omega t \quad \text{mit } I_0 = \omega \cdot C \cdot U_0.$$

Während also die Spannung nach einer Sinusfunktion verläuft, ändert sich der Strom zeitlich nach einer Cosinusfunktion: Strom und Spannung sind am Kondensator um 90° phasenverschoben. Der **Strom eilt der Spannung um 90° voraus** (Abb. 8.5).

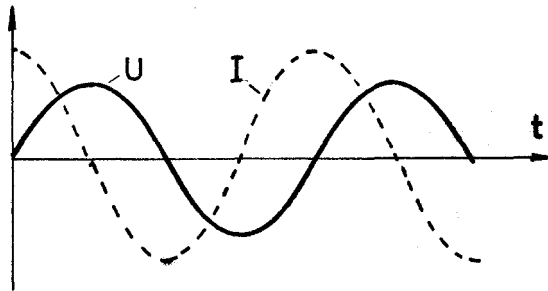


Abb. 8.5: Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung am Kondensator
Der Strom ist um so größer, je größer die Frequenz und je größer die Kapazität ist, wie aus obiger Gleichung hervorgeht.

• Kapazitiver Widerstand

Gemäß der Wechselstromwiderstandsdefinition $Z = U_0 / I_0$ (s. Gl.8.3) ergibt sich nun aus der oben abgeleiteten Beziehung $I_0 = \omega \cdot C \cdot U_0$ für den Wechselstromwiderstand Z_C eines

Kondensators:

$$\boxed{Z_C = \frac{1}{\omega C}} \quad (8.12)$$

Z_C heißt **kapazitiver Widerstand**.

Der Wechselstromwiderstand eines Kondensators ist also frequenzabhängig. Z_C nimmt mit steigender Frequenz ab. Im Grenzfalle $\omega \rightarrow \infty$ wird $Z_C \rightarrow 0$ (Kurzschluss), für $\omega \rightarrow 0$ (d.h. für Gleichstrom) geht $Z_C \rightarrow \infty$.



Abb. 8.6.: Verlauf des kapazitiven Widerstandes Z_C als Funktion der Frequenz ω .

Man bezeichnet Wechselstromwiderstände auch als **Scheinwiderstände**. Ein rein kapazitiver

oder rein induktiver (s. unten) Widerstand werden als **Blindwiderstand**, ein rein ohmscher Widerstand als **Wirkwiderstand** bezeichnet. Die in einem Wechselstromkreis verbrauchte Leistung berechnet sich nach der Formel $P = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi$, wenn φ die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ist. Man sieht, dass beim Kondensator keine Leistung verbraucht wird, da $\varphi = 90^\circ$ ist. Daher der Name Blindwiderstand.

Als **induktiven Widerstand** bezeichnet man den Wechselstromwiderstand einer Spule. Ein gestreckter Draht besitzt für Gleich- und für Wechselstrom denselben Widerstand. Wickelt man den Draht zur Spule, so ist der Gleichstromwiderstand unverändert, der Wechselstromwiderstand jedoch ist erhöht und von der Frequenz abhängig. Es zeigt sich, dass der induktive Widerstand Z_L proportional zur Frequenz ist:

Definition des induktiven Widerstandes Z_L :

$$Z_L = \omega L \quad (8.13)$$

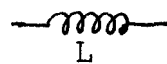
Die Größe L heißt **Induktivität**.
SI-Einheit von L: 1 H (Henry); 1 H = 1 Ω s

L hängt von der Geometrie der Spule ab. Für eine gerade Spule gilt: $L = \mu_0 n^2 \frac{A}{l}$
 μ_0 = magnetische Feldkonstante; n = Windungszahl; A = Spulenquerschnitt; l = Spulenlänge.

Symbol für eine Induktivität:



oder



Aufgrund der Eigenschaft, hohe Frequenzen nicht gut "durchzulassen" (hoher Widerstand!), wird die Spule auch als Drossel bezeichnet.

• **Wechselstromkreis mit ohmschem und kapazitivem Widerstand**

Ein ohmscher Widerstand R und ein Kondensator mit der Kapazität C werden in Reihe geschaltet und an eine Wechselspannungsquelle U(t) angeschlossen (Abb. 8.7). Durch R und C fließt dann ein Wechselstrom I(t).

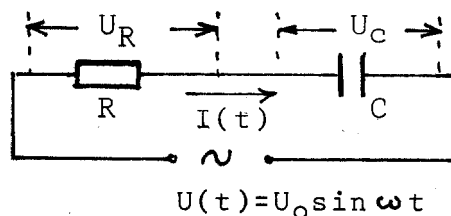


Abb. 8.7: Stromkreis mit den Bauelementen R und C.

Der Gesamtwiderstand Z dieser Serienschaltung aus R und C kann nicht mehr aus der algebraischen Summe der Einzelwiderstände von R und $1/\omega C$ berechnet werden, da die Spannung $U_C(t)$ am Kondensator und $U_R(t)$ am Widerstand **nicht in Phase** sind. $U_C(t)$ eilt

$U_R(t)$ um 90° nach, da $U_C(t)$ gegenüber $I(t)$ um 90° nacheilt (s. Abb. 8.5) und $U_R(t)$ mit $I(t)$ in Phase ist (s. Abb. 8.3). Es gilt zwar $U(t) = U_R(t) + U_C(t)$, dies gilt jedoch **nicht für** die Summe $U_0 = U_{0R} + U_{0C}$ der Scheitelwerte bzw. Effektivwerte!

Die Berechnung des Gesamtwiderstandes bei der Kombination von Wechselstromwiderständen gestaltet sich mathematisch aufwendiger als bei rein ohmschen Widerständen und wird hier nicht erläutert.

Das Ergebnis für eine Serienschaltung aus R und C (auch als RC-Glied bezeichnet) lautet:

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

Zwischen der Spannung $U(t)$ und dem im Kreis fließenden Strom $I(t)$ besteht bei Scheinwiderständen immer eine Phasenverschiebung. Für die obige Serienschaltung aus R und C gilt für die Berechnung des Phasenwinkels φ die Beziehung:

$$\tan \varphi = -\frac{1}{\omega\mathbf{C}\mathbf{R}}$$

• Der Vierpol

Aus den bisherigen Betrachtungen über das Verhalten von Widerständen, Kondensatoren und Induktivitäten gegenüber Wechselstrom geht hervor, dass bei der Kombination dieser passiven Schaltelemente R, C und L untereinander **frequenzabhängige Scheinwiderstände** entstehen. Die an diesen Elementen auftretenden Spannungen sind dann ebenfalls frequenzabhängig. Da in allen elektronischen Geräten Widerstände, Kondensatoren und Induktivitäten vorhanden sind, hängen die Eigenschaften solcher Geräte im allgemeinen von der Frequenz der elektrischen Signale ab, die in den Geräten "verarbeitet" (z.B. verstärkt oder weitergeleitet) werden. Man spricht in diesem Zusammenhang generell von der "Übertragung" elektrischer Impulse.

Um die Übertragungseigenschaften als Funktion der Frequenz zu untersuchen, betrachten wir das Gerät einfach als "Vierpol" und untersuchen das Ausgangsverhalten als Funktion der Eingangsgrößen.

Ein Vierpol ist ein Netzwerk mit zwei Eingangsklemmen (Eingangspole) und zwei Ausgangsklemmen.

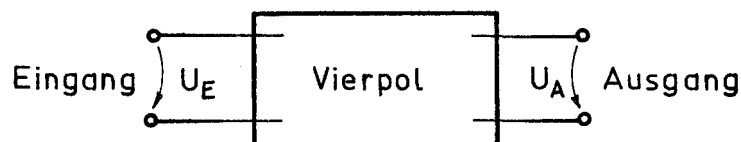


Abb. 8.4: Definition eines Vierpolelements.

Die Kenntnis elektronischer Einzelheiten des Vierpols ist dabei nicht erforderlich. Wichtige Vierpole sind z.B. Verstärker, Doppelleitungen, Siebschaltungen.

- **Übertragungsverhältnis, Frequenzgang**

Ist U_{0E} die Amplitude der frequenzabhängigen Eingangsspannung, U_{0A} die der Ausgangsspannung, so bezeichnet man das Verhältnis U_{0A}/U_{0E} das **Übertragungsverhältnis**. Es ist in der Regel eine Funktion der Frequenz. Trägt man in einem Diagramm das Übertragungsverhältnis als Funktion der Frequenz auf, so erhält man den Frequenzgang des Vierpols. Das Übertragungsverhältnis U_{0A}/U_{0E} wird oft durch das **Pegelmaß** in Dezibel (dB) ausgedrückt. Der Pegel in dB wird berechnet nach der Formel:

$$P_e = 20 \cdot \log \frac{U_{0A}}{U_{0E}} \quad (\text{dB}) \quad (\text{siehe Versuch 3})$$

Beim Durchgang elektrischer Signale durch Vierpole kann es auch zur Verformung und Verzerrung der Signale kommen. Um aus dem Ausgangssignal Schlussfolgerungen über Größe und Form des Eingangssignals ziehen zu können, müssen die Übertragungseigenschaften des Vierpols bekannt sein und beachtet werden.

- **Das RC-Glied als Hoch- und Tiefpass**

Der Frequenzgang eines Vierpols, bestehend aus einem RC-Glied, soll ermittelt werden. Eine Serienschaltung aus R und C kann in zwei verschiedenen Weisen als Vierpol geschaltet werden. Abb.8.9a zeigt die eine, Abb.8.9b die andere Möglichkeit. In beiden Fällen ist die Eingangs Spannung U_{0E} die an R und C auftretende Gesamtspannung.

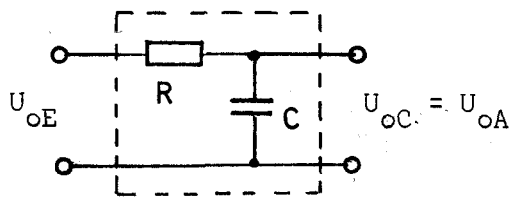


Abb.8.9a: RC-Glied als Tiefpass

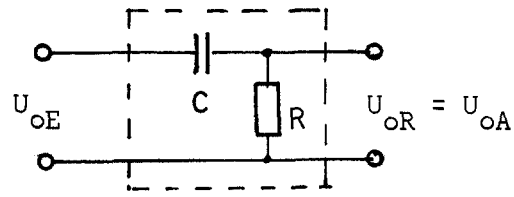


Abb.8.9b: RC-Glied als Hochpass

Bei der **Schaltung der Abb.8.9a** ist die Ausgangsspannung U_{0A} gleich der Spannung U_{0C} am Kondensator. Da der kapazitive Widerstand mit zunehmender Frequenz abnimmt, nimmt bei konstanter Eingangsspannung U_{0E} , auch die Spannung U_{0C} ab, d.h. die Ausgangsspannung U_{0A} und damit das Übertragungsverhältnis nimmt mit zunehmender Frequenz ab. Der genaue Verlauf von U_{0A}/U_{0E} lässt sich mit dem Spannungsteilergesetz ermitteln:

$$\frac{U_{0A}}{U_{0E}} = \frac{Z_c}{Z} = \frac{1/\omega C}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} \quad (8.15)$$

Abb.8.10a zeigt qualitativ den Verlauf des Übertragungsverhältnisses als Funktion der Frequenz (= Frequenzgang). Man sieht, dass für kleine Frequenzen das Übertragungsverhältnis nahezu 1 ist und für größere Frequenzen abnimmt. Kleine Frequenzen werden also nahezu ungeschwächt "durchgelassen", höhere unterdrückt. Man spricht daher bei der Schaltung der Abb.8.9a von einem **Tiefpass**.

Bei der Schaltung der Abb.8.9b ist die Spannung U_{0R} am Widerstand als Ausgangsspannung gewählt. Es gilt $U_{0A} = U_{0R}$ und:

$$\frac{U_{0A}}{U_{0E}} = \frac{Z_R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega CR}\right)^2}} \quad (8.16)$$

Dieser Verlauf ist qualitativ in Abb.8.10b dargestellt. Für kleine Frequenzen geht U_{0A}/U_{0E} gegen Null, für hohe Frequenzen gegen 1. Da bei dieser Schaltung nur hohe Frequenzen gut "durchgelassen" werden, spricht man von einem **Hochpass**.

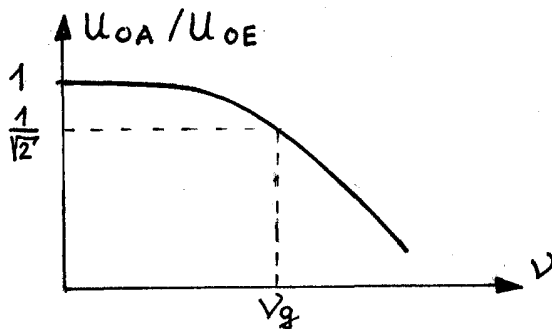


Abb. 8.10a: Frequenzgang des Tiefpasses

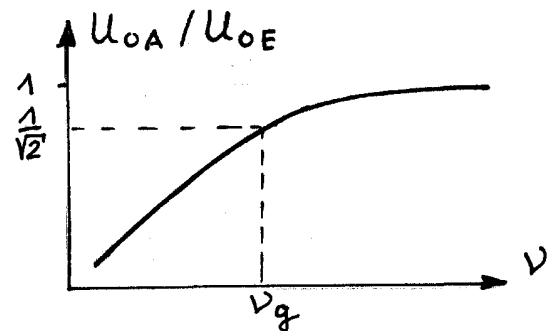


Abb. 8.10b: Frequenzgang des Hochpasses

Als **obere Grenzfrequenz** ν_g für den Tiefpass wird (willkürlich) die Frequenz angegeben, bei der das Übertragungsverhältnis

$$\frac{U_{0A}}{U_{0E}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ ist.}$$

Für die **untere Grenzfrequenz** ν_g des Hochpasses gilt ebenfalls

$$\frac{U_{0A}}{U_{0E}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Für den Tief- als auch für den Hochpass ergibt sich nach den Gln. 8.15 und 8.16 die gleiche Grenzfrequenz, nämlich:

$$\boxed{\nu_g = \frac{1}{2\pi RC}} \quad (8.17)$$

Die beiden Kurven würden sich also in einem Diagramm bei der Grenzfrequenz schneiden. Die Grenzfrequenz soll ausdrücken, bis bzw. ab welcher Frequenz beim Tief- bzw. Hochpass das Übertragungsverhalten als noch "gut" anzusehen ist. Besteht das Eingangssignal aus einem Gemisch von Wechselspannungen verschiedener Frequenzen, so werden beim Tiefpass nur die tiefen Frequenzen "gut" durchgelassen, während die hohen gesperrt, d.h. herausgefiltert werden. Beim Hochpass liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt. Vierpolnetzwerke mit frequenzabhängiger Dämpfung oder Verstärkung werden wegen dieser Eigenschaft als **Filter** bezeichnet.

Neben Hochpass und Tiefpass sind der **Bandpass** und die **Bandsperr**e noch zwei weitere wichtige Filtertypen, deren Frequenzgänge in der Abb.8.11a und Abb.8.11b dargestellt sind.

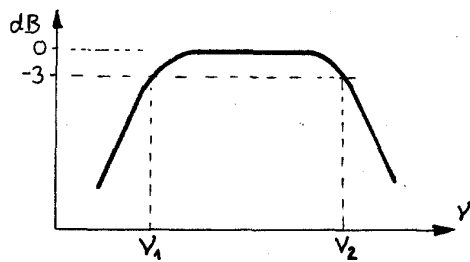


Abb. 8.11 a

Frequenzgang des Bandpasses
 $\nu_2 - \nu_1 =$ durchgelassenes Frequenzband

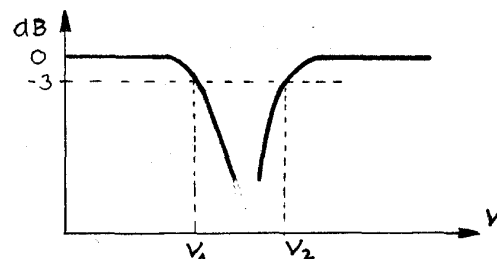


Abb. 8.11 b

Frequenzgang des Bandpasses
 $\nu_2 - \nu_1 =$ gesperrtes Frequenzband

• Signalverformung beim RC-Glied

Wie schon bemerkt, können elektrische Signale beim Durchgang durch Vierpole verzerrt werden. Als Beispiel soll hier die Verzerrung von Rechteckspannungen bei einem RC-Glied als Tiefpass untersucht werden.

Gesucht ist also der zeitliche Verlauf der Spannung $U(t)$ am Kondensator eines RC-Gliedes, wenn man eine Rechteckspannung an den Eingang des RC-Vierpols legt. Eine Rechteckspannung (Abb.8.2 a) kann man sich entstanden denken durch periodisches Ein- und Abschalten einer Gleichspannung (Batterie). Abb.8.12 zeigt die entsprechende RC-Schaltung. Mittels des Schalter S kann über die Kontaktstellung 1 eine Batteriespannung U_E an den Eingang gelegt werden. Beim Umschalten auf Kontakt 2 wird die Batterie weggeschaltet und gleichzeitig der Eingang kurzgeschlossen.

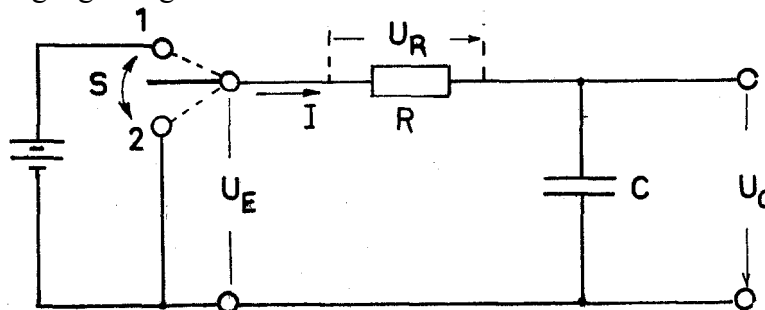


Abb. 8.12: Schaltung eines RC-Gliedes.

• Der Einschaltvorgang (Aufladung des Kondensators)

Legt man zum Zeitpunkt $t=0$ den Schalter S auf Kontakt 1, so steigt die Eingangsspannung sprunghaft von Null auf U_E . Es fließt nun Ladung aus der Batterie über R auf den Kondensator, so dass dieser sich mit der Zeit auflädt. Durch die Ladung $Q(t)$ wird am Kondensator eine der Ladung proportionale Spannung $U(t)$ hervorgerufen, die also von Null beginnend, mit der Zeit ansteigt, und zwar höchstens bis zum Wert U_E , falls der Kontakt streng genommen unendlich lange geschlossen bleibt. Die mathematische Behandlung des Problems zeigt, dass $U_C(t)$ nach einer **Sättigungsfunktion** ansteigt.

Eine Sättigungsfunktion ist eine Funktion, die stetig ansteigt und **asymptotisch** einem Endwert (= Sättigungswert) zustrebt. Dieser wird also erst für $t \rightarrow \infty$ erreicht. Für den Spannungsanstieg am Kondensator ergibt sich folgende Formel:

$$\boxed{U_C(t) = U_E \cdot (1 - e^{-t/RC})} \quad (8.20)$$

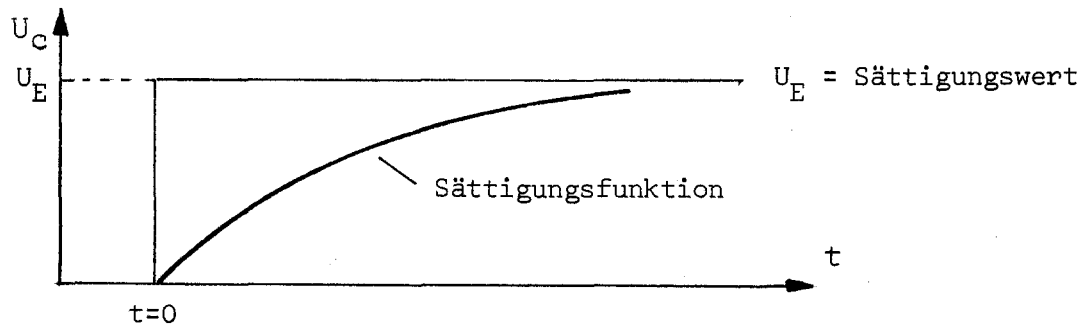


Abb.8.13: Graphische Darstellung des Aufladungsvorgangs gemäß Gleichung (8.20).

Der Spannungsanstieg am Kondensator verläuft umso langsamer, je größer R und je größer C ist. Während die Ladung auf dem Kondensator, wie die Spannung, nach einer Sättigungsfunktion ansteigt, verläuft der Strom $I(t)$ in der Zuleitung nach einer abnehmenden **Exponentialfunktion**:

$$\boxed{I(t) = I_0 \cdot e^{-t/RC} \quad \text{mit} \quad I_0 = \frac{U_E}{R}}$$

Eine Zusammenstellung der Vorgänge am RC-Glied finden Sie am Ende dieses Kapitels!

Anmerkung: Auf die mathematische Herleitung der obigen Gleichungen wurde verzichtet, da die hierfür erforderlichen Kenntnisse, wie Lösungsmethoden für Differentialgleichungen, beim Leser nicht vorhanden sind.

- **Der Ausschaltvorgang** (Entladung des Kondensators)

Der Kondensator in der Schaltung der Abb.8.12 sei auf den Sättigungswert U_E (= Batteriespannung) aufgeladen. Der Schalter S wird jetzt zu einem Zeitpunkt $t=0$ vom Kontakt 1 auf den Kontakt 2 gelegt. Damit ist die Batterie weggeschaltet und gleichzeitig der RC-Kreis geschlossen, so dass sich der Kondensator über den Widerstand R zu entladen beginnt. Mit der abnehmenden Ladung nimmt auch die Spannung U am Kondensator ab. Die mathematische Herleitung ergibt, dass die Spannung am Kondensator bei Entladung nach einer Exponentialfunktion abnimmt:

$$\boxed{U_C(t) = U_E \cdot e^{-t/RC}} \quad (8.21)$$

Der Verlauf dieser Funktion ist am Ende des Kapitels rechts unter a) dargestellt. Die Spannung U_E ist dort mit U_0 bezeichnet. Die übrigen Vorgänge, wie Ladungsabnahme, Spannungsverlauf an R und Stromverlauf sind unter b, c und d beschrieben.

- **Die Zeitkonstante**

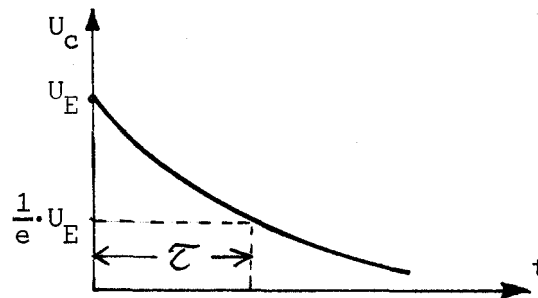
In den Gleichungen für die Auf- und Entladung des Kondensators tritt immer das **Produkt RC** auf. Es ist von der Dimension einer Zeit und heißt **Zeitkonstante τ** .

$$\tau = R \cdot C \quad (8.22)$$

Setzt man diese Zeit $t = RC$ z.B. in die Gl.8.21 ein, so erhält man:

$$U_C(t = \tau) = U_E \cdot e^{-1} = \frac{U_E}{e} \quad (e = 2,718\dots).$$

τ ist also die Zeit, in der die Spannung am Kondensator **vom Momentanwert auf den e-ten Teil**, d.h. auf rund 37 % absinkt. Bei der Aufladung ist τ die Zeit, in der die Spannung auf rund 63 % des Sättigungswertes steigt.



Nach einer Zeit $t = 5\tau$ z.B. ist die Spannung $U_C(t)$ bei der Entladung auf 0,67 % des Anfangswertes gesunken. Bei der Aufladung werden in derselben Zeit 99,33 % des Endwertes erreicht. Abb.8.14 zeigt den Spannungsverlauf am Kondensator, wenn man die Eingangsspannung am RC-Glied periodisch ein- und abschaltet und die Einschaltzeit t_e groß gegen τ ist. Die Kondensatorspannung erreicht dabei, praktisch die volle Batteriespannung (Sättigungswert). Ist auch die Abschaltdauer t_a groß gegen τ , so erreicht U_C praktisch den Wert Null, der Kondensator wird vollständig entladen.

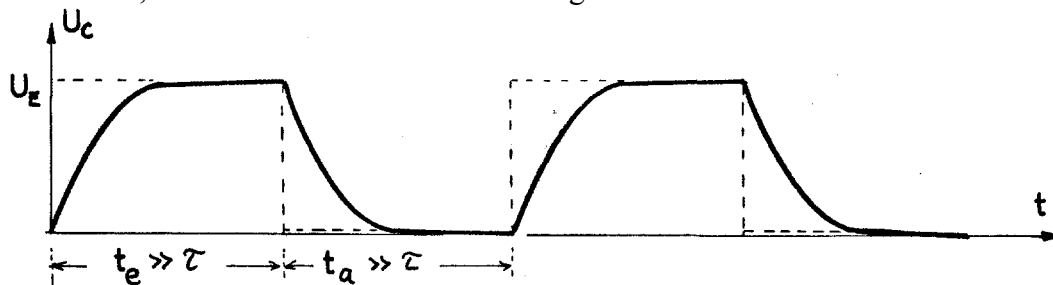


Abb. 8.14: Spannungsverlauf am Kondensator beim periodischen Ein- und Ausschalten.

Bei kleiner werdenden Werten für t_e und t_a erreicht U_C nicht mehr den Sättigungswert und nicht mehr den Nullwert. Abb.8.15 zeigt für einen solchen Fall den Verlauf der Kondensatorspannung.

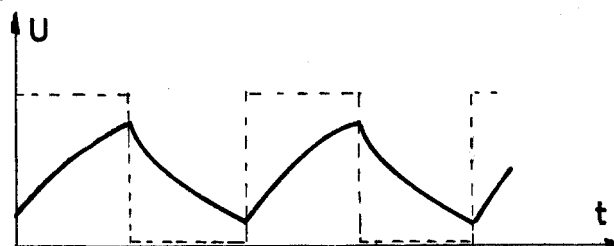


Abb. 8.15: Darstellung wie Abb. 8.14 jedoch für kürzere Ein- und Ausschaltzeiten.

Ersetzt man die Batterie mit Schalter nun durch eine Spannungsquelle, die eine Rechteckspannung liefert (= Rechteckgenerator), so liegt für die ursprüngliche Problemstellung (nämlich, wie wird ein Rechtecksignal, wenn es über ein RC-Glied läuft, verformt) somit die Lösung vor. Abb.8.16 zeigt nochmals die Impulsverzerrung einer Rechteckspannung am Ausgang eines Tiefpasses für drei verschiedene Frequenzen (die Zeitachsen haben verschiedene Einheiten!).

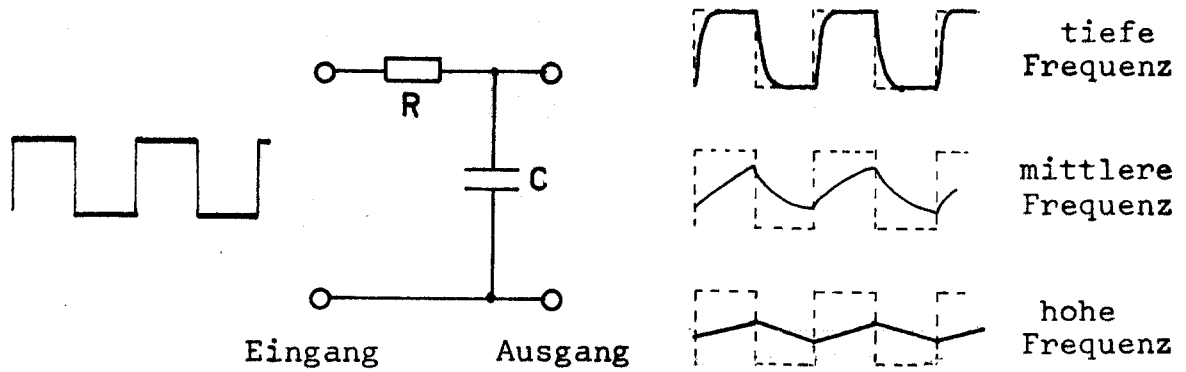
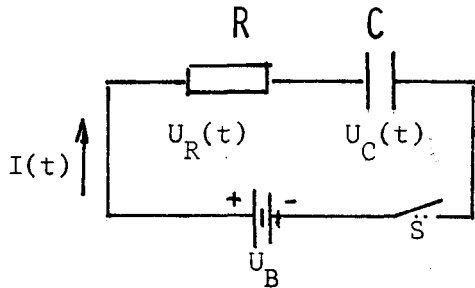


Abb. 8.16: Signalverarbeitung einer Rechteckspannung durch einen Tiefpass.

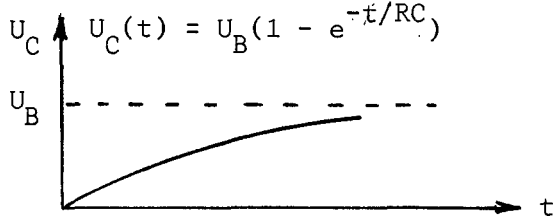
• Zusammenstellung der Vorgänge am RC-Glied

**Aufladung
eines Kondensators über
einen Widerstand**

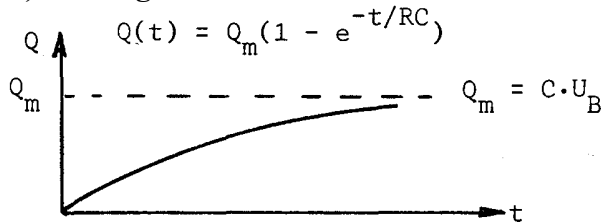


C wird mit Batterie Spannung U_B geladen. Lade-Vorgang beginnt bei $t=0$.

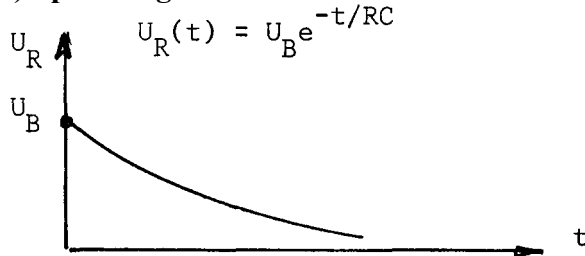
a) Spannungsverlauf am Kondensator



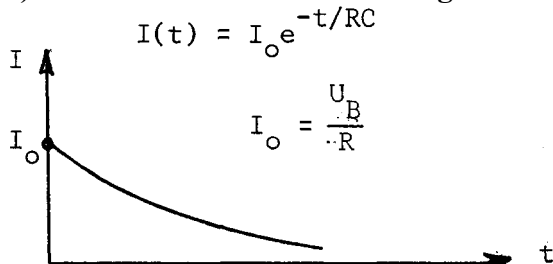
b) Ladungsverlauf am Kondensator



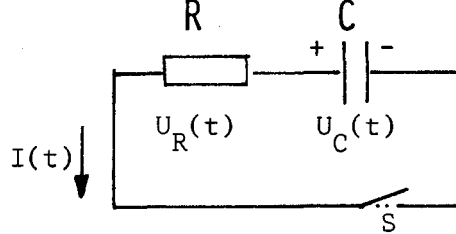
c) Spannungsverlauf am Widerstand



d) Stromverlauf in der Zuleitung

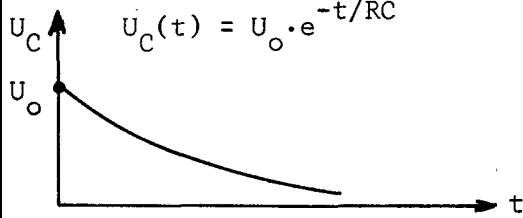


**Entladung
eines Kondensators über
einen Widerstand**

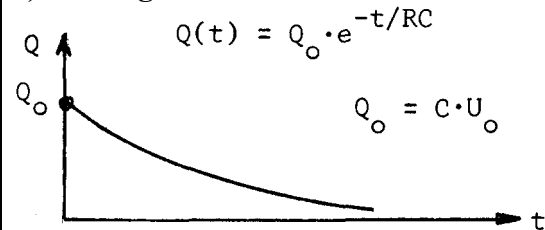


Ein auf die Spannung U_0 aufgeladener Kondensator wird über R entladen. Entladevorgang beginnt bei $t=0$.

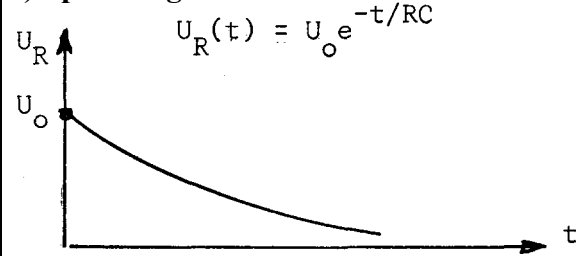
a) Spannungsverlauf am Kondensator



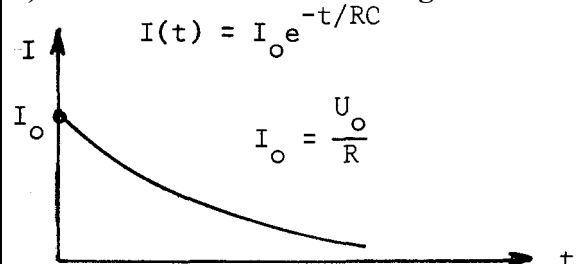
b) Ladungsverlauf am Kondensator



c) Spannungsverlauf am Widerstand



d) Stromverlauf in der Leitung



• Der Elektronenstrahloszillograph

Zur Darstellung und zur Frequenzmessung schnell veränderlicher elektrischer Signale sowie zur Spannungsmessung eignet sich besonders der **Elektronenstrahloszillograph**. Der wichtigste Bestandteil des Oszillographen ist neben dem Y-Verstärker (Vertikalverstärker), dem X-Verstärker (Horizontalverstärker), dem Zeitablenkgenerator (Sägezahngenerator) und dem Synchronisier- und Triggerverstärker die **Elektronenstrahlröhre** (auch Kathodenstrahlröhre genannt). Aufbau und Funktion der Röhre seien kurz erläutert.

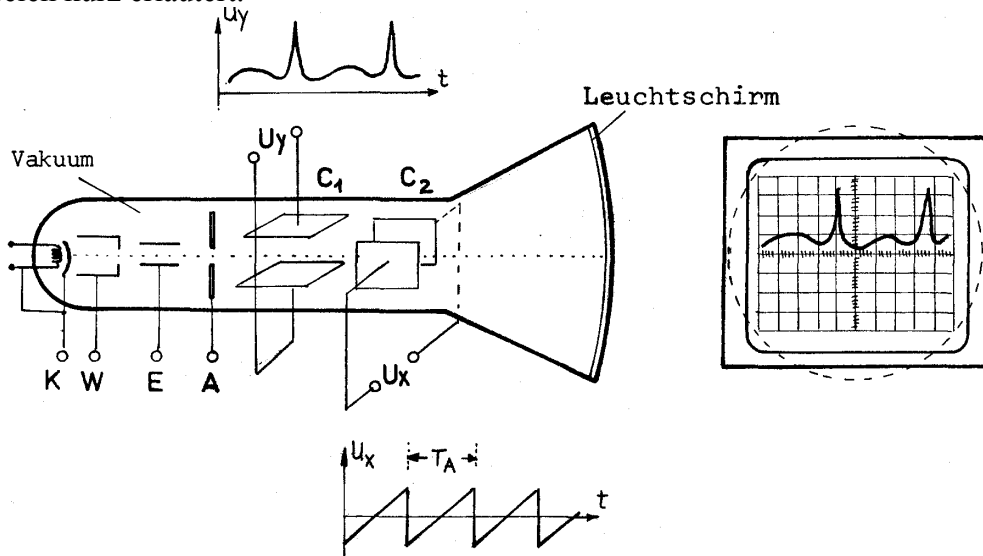


Abb. 8.17.

Abb.8.17 zeigt schematisch den Querschnitt einer Elektronenstrahlröhre. In einem evakuierten Glaskolben befinden sich eine Glühkathode K (Emission von Elektronen), ein Wehnelt-Zylinder W (zur Helligkeitsregelung), eine Elektronenlinse E (zur Fokussierung des Strahls), eine Anode A (zur Beschleunigung der Elektronen), ein Plattenpaar C_1 , (Ablenkkondensator zur Vertikalablenkung des Elektronenstrahls), ein Plattenpaar C_2 (zur Horizontalablenkung des Strahls). Die Innenseite der Frontscheibe ist als Leuchtschirm ausgebildet.

Liegt an den Plattenpaaren C_1 und C_2 keine Spannung an, so trifft der von der Kathode ausgehende Elektronenstrahl unabgelenkt auf die Mitte des Leuchtschirms. Legt man an das Plattenpaar C_2 eine Sägezahnspannung an, so entsteht zwischen den Platten ein elektrisches Feld, dessen Stärke sich ebenfalls sägezahnförmig ändert, so dass der Elektronenstrahl mit gleichförmiger Geschwindigkeit in horizontaler Richtung von links nach rechts über den Leuchtschirm „gefahren“ wird. Ist der Strahl am rechten Bildrand angekommen, so „springt“ er nach links zurück (in einer sehr kurzen Zeitdauer) und läuft erneut nach rechts usw. Die Geschwindigkeit bzw. Ablenkzeit T (siehe Abb.8.17) für den Strahl kann in diskreten Stufen eingestellt werden. Am Einstellknopf für die Horizontalablenkung ist jedoch nicht T_A , sondern T_A pro Einteilungseinheit der Leuchtschirmskala, z.B. 5 ms/div oder 5 ms/cm, angegeben.

Wird auch an das Plattenpaar C_1 , (Y-Eingang des Oszillographen) eine zeitabhängige Spannung angelegt, so wird der Strahl gleichzeitig auch in vertikaler Richtung proportional zur Größe des Eingangssignals abgelenkt. Die Empfindlichkeit des Y-Verstärkers kann ebenfalls in Schritten variiert werden (angegeben in V/div oder V/cm), so daß mit dem Oszillographen auch die Höhe der Spannung des Eingangssignals gemessen werden kann.

Der Oszilloskop kann auch als X-Y-Schreiber betrieben werden. Dazu wird die Horizontalablenkung ausgeschaltet (es liegt dann keine Sägezahnspannung an dem Plattenpaar C_2). Ein zweites Signal kann nun auf den X-Eingang des Oszilloskops gegeben werden. Auf dem Schirm können so funktionale Zusammenhänge $Y(X)$ dargestellt werden.

• Der Zweikanaloszilloskop

Ein Zweikanaloszilloskop besitzt zwei gleichwertige Y-Verstärker mit zwei Eingangsbuchsen Y_I und Y_{II} . Obwohl nur eine Elektronenquelle (Kathode), d.h. nur ein Elektronenstrahl zur Verfügung steht, kann man jetzt trotzdem zwei verschiedene Spannungsverläufe gleichzeitig auf dem Schirm darstellen (bei gleicher Zeitablenkung), wenn man die Verstärker I und II in ständigem Wechsel an das vertikal ablenkende Plattenpaar C_1 schaltet. Dies kann auf zwei verschiedene Weisen geschehen:

1. Betriebsart (mit „Alt“ bezeichnet):

Die beiden Y-Verstärker werden durch einen elektronischen Schalter alternierend jeweils für eine volle Ablenkperiode T_A an das Plattenpaar C_1 geschaltet. Die Signale 1 und 2 werden also nacheinander aufgezeichnet.

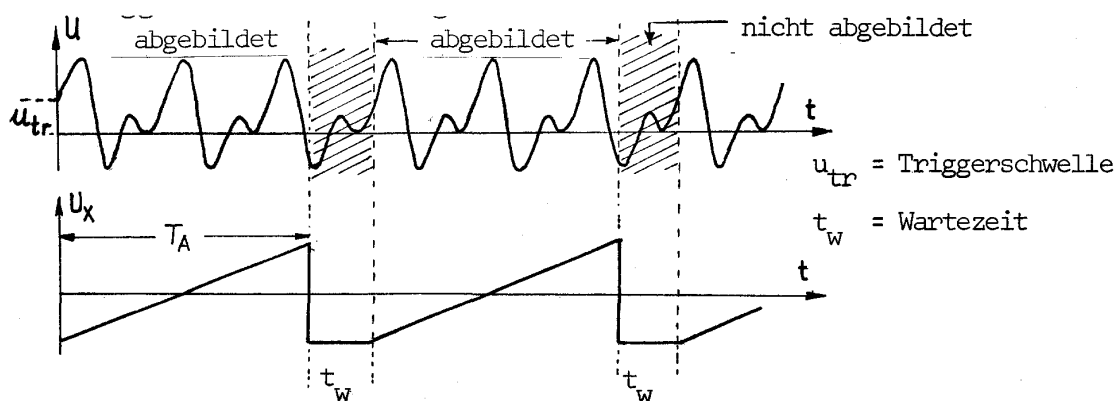
2. Betriebsart (mit „Chop“ bezeichnet):

Die Umschaltung der Y-Verstärker erfolgt hier mit sehr hoher Frequenz (Chopperfrequenz z.B. 800 kHz), so daß innerhalb einer Ablenkperiode T_A die beiden Signale gleichzeitig erscheinen.

Schaltet man beim Zweikanaloszilloskop die Zeitablenkung aus (Taste „Hor. ext.“), so wird automatisch der Verstärker II als X-Verstärker wirksam (X-Y-Betrieb).

• Triggerung

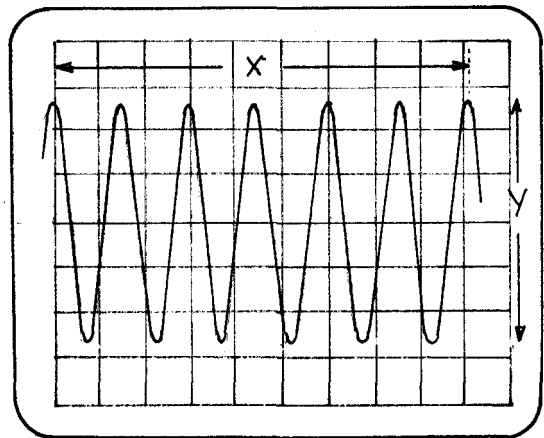
Damit bei der Aufzeichnung periodischer Vorgänge auf dem Schirm ein stehendes Bild entsteht, müsste die Ablenkzeit T_A des Elektronenstrahls (= Periodendauer des Sägezahns) ein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer des zu registrierenden Vorgangs sein. Diese Forderung ist bei fest einstellbaren Ablenkzeiten T_A (diskrete Stufen) für beliebige Periodendauern des zu messenden Signals im allgemeinen nicht realisierbar. Um trotzdem ein stehendes Bild zu bekommen, wird der Start des Sägezahnimpulses durch das Messsignal selbst über den Triggerverstärker gesteuert, und zwar in der Weise, dass der Sägezahnimpuls dann ausgelöst wird, wenn das Messsignal einen bestimmten einstellbaren Wert (Triggerschwelle) erreicht hat. Nach Ablauf einer Ablenkdauer T_A „wartet“ dann der Elektronenstrahl, bis die Eingangsspannung wieder die Triggerschwelle erreicht hat, um erneut das Eingangssignal aufzuschreiben. Neben dieser internen Triggerung ist auch eine externe Triggerung möglich, indem durch eine von außen zugeführte Spannung der Triggerverstärker ausgelöst wird.



• **Frequenz- und Spannungsmessung mit dem Oszillographen**

Mit dem Oszillographen können Zeiten bzw. Frequenzen und Spannungswerte gemessen werden. Auf dem Oszillographenschirm sei das Bild einer sinusförmigen Wechselspannung.

- a) **Zur Bestimmung der Frequenz** ermittelt man zunächst die Periodendauer T der Wechselspannung. T ist die Zeit, die der Elektronenstrahl benötigt, um in horizontaler Richtung von z.B. einem Maximum zum nächsten zu laufen. Die Zeit, die der Strahl für 1 cm (= 1 Kästchen auf dem Schirm) benötigt, ist am **Time-Base-Schalter** in Einheiten time/cm abzulesen. Auf der auf der nächsten Seite abgebildeten Frontansicht eines Oszillographen steht der Time-Base-Schalter auf dem Wert 20 ms/cm. Ist x der Abstand von n Perioden und B der eingestellte Time-Base-Wert, so ist:



$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{n}{x \cdot B}$$

- b) **Zur Bestimmung des Spannungswertes**, etwa des Scheitelwertes der dargestellten Sinus Spannung ermittle man den Wert $y/2$ in cm bzw. Einheiten der Schirmeinteilung und multipliziere diesen Wert mit dem aus der Schalterstellung am **Ampl.** (= Amplifier = Eingangsverstärker) ersichtlichen Wert in V/cm. In der Abbildung steht der Schalter auf 0,2 V/cm.

Nehmen wir an, x sei in der obigen Abbildung gleich 9,1 cm und $y = 5,3$ cm, so wäre:

$$\nu = \frac{6}{9,1 \cdot 20 \cdot 10^{-3}} \text{ Hz} \approx 33 \text{ Hz}$$

und

$$U_0 = 2,65 \cdot 0,2 \text{ V} = 0,53 \text{ V}.$$


Was man unbedingt wissen sollte:

- Was wechselt bei einem Wechselstrom?
- Welche Spannungsformen kennen Sie?
- Was versteht man unter den Effektivwerten für Spannung und Stromstärke, wie lassen sie sich berechnen?
- Was speichert ein Kondensator und wie ist seine Kapazität definiert?
- Wie verändert ein eingebrachtes Dielektrikum die Kapazität eines Kondensators? Durch was ist dieser Effekt begründet?
- Wie berechnet sich die Gesamtkapazität von Kondensatoren bei Reihen- und Parallelschaltung?
- Was versteht man unter Induktivität und induktivem Widerstand?
- Welche mathematische Funktion beschreibt den Verlauf der Spannung beim Aufladen und Entladen eines Kondensators?
- Welche Zeitdauer wird durch die Zeitkonstante beschrieben?
- Wie funktioniert ein Elektronenstrahloszillograph?

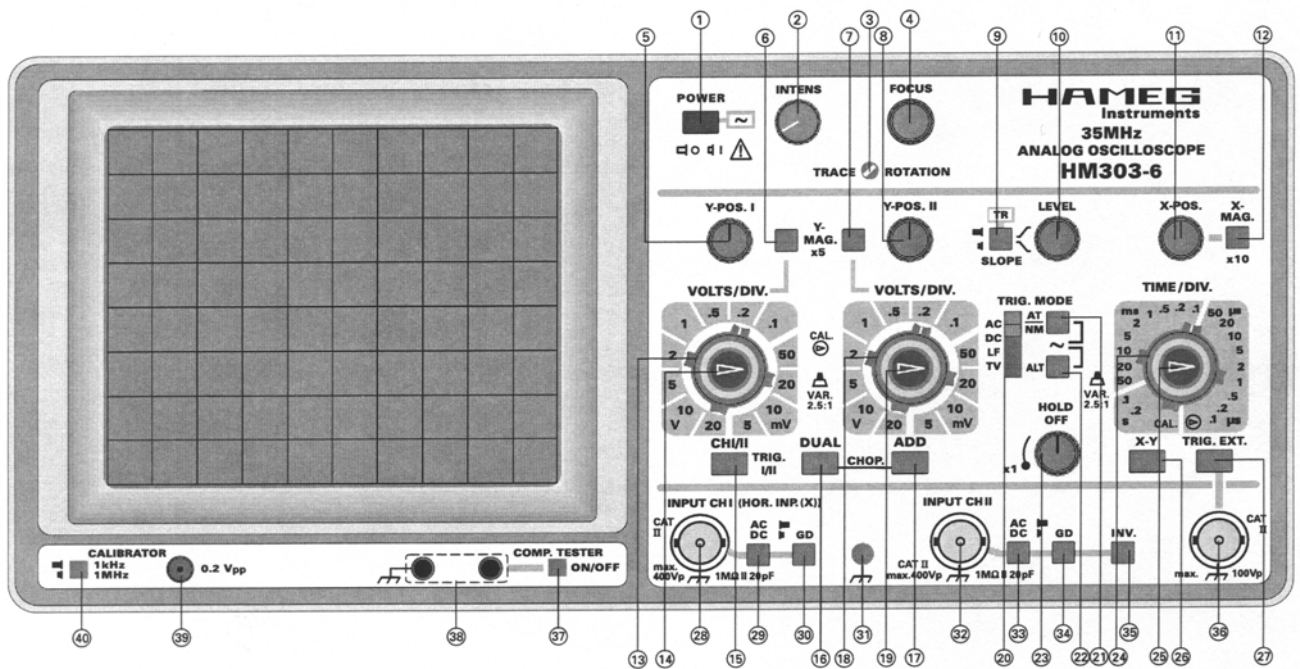
Bedienungselemente HM303-6 (Kurzbeschreibung - Frontbild)

Element	Funktion
① POWER (Taste + LED-Anzeige)	Netz Ein/Aus; Leuchtdiode zeigt Betriebszustand an.
② INTENS (Drehknopf)	Helligkeitseinstellung für den Kathodenstrahl
③ TRACE ROTATION Trimpotentiometer (Einstellung mit Schraubenzieher)	Trace Rotation (Strahldrehung). Dient zur Kompensation des Erdmagnetfeldes. Der horizontale Strahl wird damit parallel zum Raster gestellt
④ FOCUS (Drehknopf)	Schärfereinstellung für den Kathodenstrahl.
⑤ Y-POS. I (Drehknopf)	Einstellung der vertikalen Position des Strahles für Kanal I. Im XY-Betrieb außer Funktion.
⑥ Y-MAG.x5 (Drucktaste)	Erhöht die Y-Verstärkung von Kanal I um den Faktor 5. (Maximal 1mV/cm).
⑦ Y-MAG.x5 (Drucktaste)	Erhöht die Y-Verstärkung von Kanal II um den Faktor 5. (Maximal 1mV/cm).
⑧ Y-POS. II (Drehknopf)	Einstellung der vertikalen Position des Strahles für Kanal II.
⑨ SLOPE ↗ ↘ (Drucktaste)	Wahl der Triggerflanke. Taste nicht gedrückt: ansteigend, Taste gedrückt: fallend.
TR (LED-Anzeige)	Anzeige leuchtet, wenn Zeitbasis getriggert wird.
⑩ LEVEL (Drehknopf)	Triggerpegel-Einstellung
⑪ X-POS. (Drehknopf)	Strahlverschiebung in horizontaler Richtung
⑫ X-MAG. x10 (Drucktaste)	Dehnung der X-Achse um den Faktor 10. Max. Auflösung 10ns/div. Im XY-Betrieb außer Funktion.
⑬ VOLTS/DIV. (12stufig. Drehschalter)	Eingangsteiler für Kanal I. Bestimmt die Y-Ablenkkoeffizienten in 1-2-5 Schritten und gibt den Umrechnungsfaktor an (V/div, mV/div).
⑭ VAR. (Drehknopf)	Feineinstellung der Y-Amplitude (Kanal I). Vermindert die Verstärkung max. um den Faktor 2,5. Kalibrierung am Rechtsanschlag (Pfeil nach rechts zeigend).
⑮ CH I/II-TRIG. I/II (Drucktaste)	Keine Taste gedrückt: Kanal I-Betrieb und Triggerung von Kanal I. Taste gedrückt: Kanal II-Betrieb und Triggerung von Kanal II. (Triggerumschaltung bei DUAL-Betr.).

Element	Funktion
⑯ DUAL (Drucktaste)	Taste nicht gedrückt: Einkanalbetrieb. Taste DUAL gedrückt: Zweikanalbetrieb mit alternierender Umschaltung.
CHOP.	DUAL und ADD gedrückt: Zweikanalbetrieb mit Chopper-Umschaltung.
⑰ ADD (Drucktaste)	ADD allein gedrückt: Algebr. Addition. In Kombination mit INV. Taste: Differenzbetrieb.
⑱ VOLTS/DIV. (12stufig. Drehschalter)	Eingangsteiler für Kanal II. Bestimmt die Y-Ablenkkoeffizienten in 1-2-5 Schritten und gibt den Umrechnungsfaktor an (V/div, mV/div).
⑲ VAR. (Drehknopf)	Feineinstellung der Y-Amplitude (Kanal II). Vermindert die Verstärkung max. um den Faktor 2,5. Kalibrierung am Rechtsanschlag (Pfeil nach rechts zeigend).
⑳ TRIG. MODE (Schiebeschalter) AC-DC-LF-TV	Wahl der Triggerankopplung: AC: 10Hz–100MHz. DC: 0–100MHz. LF: 0–1,5kHz. TV: Triggerung für Bild und Zeile.
㉑ AT/NM (Drucktaste)	Taste nicht gedrückt: Zeitlinie auch ohne Signal sichtbar, Triggerung autom. Taste gedrückt: Zeitlinie nur mit Signal, Normaltriggerung mit LEVEL
~	AT/NM und ALT gedrückt: Triggerung mit Netzfrequenz, dabei Normaltriggerung.
㉒ ALT (Drucktaste)	Die Triggerung wird im alternierenden DUAL-Betrieb abwechselnd von Kanal I und II ausgelöst.
㉓ HOLD OFF (Drehknopf)	Verlängerung der Holdoff-Zeit zwischen den Ablenkperioden. Grundstellung = Linksanschlag.
㉔ TIME/DIV. (20stufiger Drehschalter)	Bestimmt Zeitkoeffizienten (Zeitablenkgeschwindigkeit) der Zeitbasis von 0.2s/cm bis 0.1µs/cm.
㉕ Variable Zeitbasiseinstellung (Drehknopf)	Feineinstellung der Zeitbasis. Vermindert Zeitablenkgeschwindigkeit max. 2,5fach (Linksanschlag). Cal.-Stellung am Rechtsanschlag (Pfeil nach rechts).
㉖ XY (Drucktaste)	Umschaltung auf XY-Betrieb. Zuführung der horiz. Ablenkspannung über den Eingang von Kanal I. Achtung! Bei fehlender Ablenkung Einbrenn Gefahr.
㉗ TRIG. EXT. (Drucktaste)	Umschaltung auf externe Triggerung. Signalzuführung über BNC-Buchse TRIG. EXT.

Element	Funktion
⑳ INPUT CH I (BNC-Buchse)	Signaleingang Kanal I und Eingang für Horizontalablenkung im XY-Betrieb. Eingangsimpedanz $1M\Omega // 20pF$.
㉑ AC-DC (Drucktaste)	Taste für die Eingangssignalankopplung von Kanal I. Taste gedrückt: direkte Ankopplung; Taste nicht gedrückt: Ankopplung über einen Kondensator.
㉒ GD (Drucktaste)	GD-Taste gedrückt: Eingang vom Signal getrennt, Verstärker an Masse geschaltet.
㉓  (4mm Buchse)	Meßbezugspotentialanschluß, galvanisch mit Netzschutzleiter verbunden.
㉔ INPUT CH II (BNC-Buchse)	Signaleingang Kanal II. Eingangsimpedanz $1M\Omega // 20pF$.
㉕ AC-DC (Drucktasten)	Tasten für die Eingangssignalankopplung von Kanal II. Taste gedrückt: direkte Ankopplung; Taste nicht gedrückt: Ankopplung über einen Kondensator.

Element	Funktion
㉖ GD (Drucktaste)	GD-Taste gedrückt: Eingang vom Signal getrennt, Verstärker an Masse geschaltet.
㉗ INV. (Drucktaste)	Invertierung von Kanal II. In Verbindung mit gedrückter ADD-Taste = Differenzdarstellung.
㉘ TRIG. EXT. (BNC-Buchse)	Eingang für externes Triggersignal. Taste TRIG. EXT. gedrückt.
㉙ COMP. TESTER (Drucktaste)	Einschaltung des Component-Testers; ON = ein, OFF = aus.
㉚ COMP. TESTER (4mm Buchsen)	Anschluß der Testkabel für den Component-Tester. Linke Buchse galvanisch mit Netzschutzleiter verbunden.
㉛ 0.2Vpp (Buchse)	Ausgang des Rechteck-Kalibrators 0,2Vss.
㉜ CALIBRATOR 1kHz / 1MHz (Drucktaste)	Frequenz des Kalibrator-Ausgangs. Taste nicht gedrückt: ca. 1kHz, Taste gedrückt: ca. 1MHz.



Frontansicht des im Versuch eingesetzten Zweistrahl-Oszilloskops

Übungsaufgaben:

Ü 8.1

Wie lautet die mathematische Darstellung für sinusförmige Wechselspannung?

Ü 8.2

An einem ohmschen Widerstand liegt Sinusspannung. Wie lautet die Formel für die im Widerstand erzeugte Leistung als Funktion der Zeit? Stellen Sie diese Funktion $P(t)$ als Funktion der Zeit grafisch dar.

Ü 8.3

In einem Widerstand von 800Ω wird durch Wechselspannung eine Leistung von 60 W erzeugt. Welchen Scheitelwert hat die angelegte Wechselspannung?

Ü 8.4

Skizzieren Sie den Verlauf einer Kippspannung.

Ü 8.5

Was versteht man unter dem Wechselstromwiderstand?

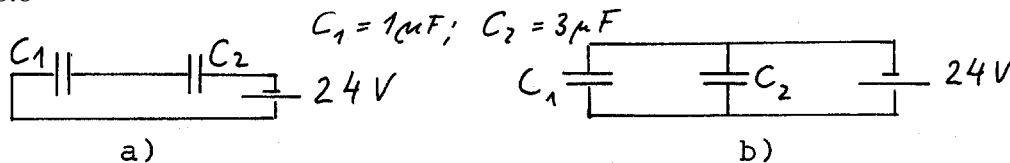
Ü 8.6

Zwischen die Platten eines geladenen und von der Batterie getrennten Kondensators wird eine Kunststoffplatte geschoben. Welche der Größen Q , C , U ändern sich dabei in welcher Weise?

Ü 8.7

Der Plattenabstand eines geladenen und von der Batterie getrennten Kondensators werde vergrößert. Skizzieren Sie die Spannung am Kondensator als Funktion des Abstandes der Platten.

Ü 8.8



Berechnen Sie für die beiden Schaltungen jeweils die Ladungen Q_1 und Q_2 der Kondensatoren mit den Kapazitäten C_1 und C_2 , sowie die Spannungen U_1 und U_2 an den Kondensatoren.

Welche Ladungsmenge wird in beiden Fällen der Batterie entnommen?

Ü 8.9

Was ist ein Dielektrikum? Wie ist die Dielektrizitätszahl definiert? Welche Einheit hat sie?

Ü 8.10

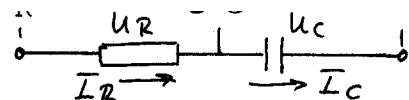
An einem Kondensator liegt die Spannung $U(t) = U \cos \omega t$. Nach welcher Funktion verläuft der Strom $I(t)$ in der Zuleitung?

Ü 8.11

Stellen Sie a) den Wechselstromwiderstand und b) die Kapazität eines Kondensators als Funktion der Frequenz grafisch dar.

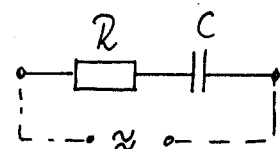
Ü 8.12

Welche Phasenverschiebung (Vor- oder Nacheilung) besteht zwischen U_R und U_C , zwischen I_R und I_C und zwischen U_C und I_R in der gegebenen Schaltung?



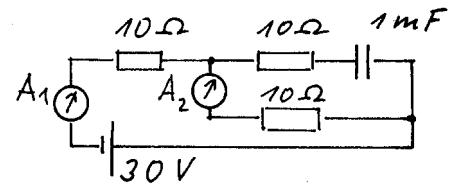
Ü 8.13

Skizzieren Sie qualitativ den Verlauf des Scheinwiderstandes des nebenstehenden RC-Gliedes als Funktion der Frequenz.



Ü 8.14

Welche Ströme zeigen die Amperemeter A_1 und A_2 an?



Ü 8.15

- Ein Kondensator wird über einen Widerstand mit einer Batterie aufgeladen. Fertigen Sie ein Schaltbild an. Skizzieren Sie den Verlauf des Ladestromes als Funktion der Zeit und geben Sie die entsprechende Formel für $I(t)$ an,
- Nach welcher Funktion nimmt dabei die Ladung am Kondensator zeitlich zu (mit Skizze)?

Ü 8.16

Wie ist die Kapazität eines Kondensators definiert?

Ü 8.17

Skizzieren Sie die Schaltungen von Hoch- und Tiefpass mit den entsprechenden Frequenzgängen.

Ü 8.18

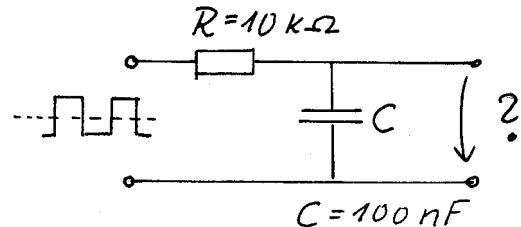
Welche Eigenschaften haben Bandpass und Bandsperre?

Ü 8.19

Wie groß ist die Pegelabsenkung (in dB) der Spannung am Ausgang eines Tiefpasses bei der Grenzfrequenz? Wie groß ist die Pegelabsenkung beim Übertragungsverhältnis 1 und 0,1?

Ü 8.20

Skizzieren Sie Form und Verlauf der Ausgangsspannung für die nebenstehende Schaltung, wenn als Eingangsspannung eine Rechteckspannung der Frequenz 10 kHz vorliegt.



Ü 8.21

Was bedeutet "Triggern"?

Ü 8.22

Welche Funktion haben Wehnelt-Zylinder, Elektronenlinse, Kathode und Anode in der Oszillografenröhre?

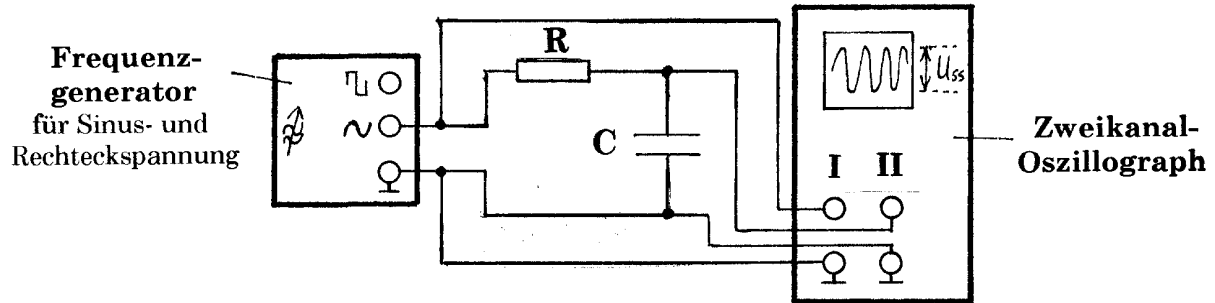
Ü 8.23

Sinusspannung der Frequenz 5 kHz soll so auf dem Oszillografenschirm dargestellt werden, dass der Abstand zweier Maxima 1 cm beträgt. Welcher Time-Base-Wert muß gewählt werden?

Versuch 8: Hochpaß, Tiefpaß, Verstärker, Signalverformung

• **Aufgabenstellung und Versuchsdurchführung**

1. Bauen Sie folgende Schaltung (Tiefpaß) auf:



2. Messen Sie den Frequenzgang eines Tiefpasses mit Sinusspannung, indem Sie die Übertragungsverhältnisse U_{ssA}/U_{ssE} für die in der Wertetabelle angegebenen Frequenzen bestimmen. Die Werte U_{ssE} (= Spannung von Spitze zu Spitze am Eingang) und U_{ssA} (A = Ausgang) werden mit dem Oszillographen bestimmt. Wählen Sie (am Frequenzgenerator) $U_{ssE} = 4,0 \text{ V}$ (Schalter für Vertikalverstärkung am Kanal I auf 1 V/cm stellen). Vertikalverstärkung am Kanal II so variieren, daß immer eine Signalhöhe von mindestens 2 cm entsteht!

Wertetabelle

		ν (kHz)	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10	20	50	100
Tiefpaß	$U_{ssE} = 4,0 \text{ V}$	U_{ssA} / V										
		U_{ssA}/U_{ssE}										
Hochpaß	$U_{ssE} = 4,0 \text{ V}$	U_{ssA} / V										
		U_{ssA}/U_{ssE}										

3. Bauen Sie einen Hochpaß auf und messen Sie wie unter Punkt 2 dessen Frequenzgang.
4. Tragen Sie in einem Diagramm doppeltlogarithmisch (Papier wird gestellt) die Übertragungsverhältnisse U_{ssA}/U_{ssE} für den Tief- und Hochpaß gegen die Frequenz auf. Eichen Sie die Ordinate auch in dB (S. Seite 8/10 oben).
Bestimmen Sie nun aus dem Diagramm die Grenzfrequenz und berechnen Sie daraus die Zeitkonstante für das RC-Glied in μs !
5. Nehmen Sie die Kennlinie eines Niederfrequenz-Verstärkers (NF-Verstärker) bei 1000 Hz auf und bestimmen Sie daraus die Spannungsverstärkung V und die Pegelanhebung P_e in dB für den linearen Bereich. Die Kennlinie erhält man, wenn man die Ausgangsspannung U_A des Verstärkers als Funktion der Eingangsspannung U_E bei konstanter Frequenz aufträgt (linearer Maßstab).
Als Eingangsspannungen wähle man die in der Wertetabelle angegebenen Werte:

Wertetabelle:

U_E / V	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
U_A / V						

6. Untersuchen Sie die Signalform am Ausgang eines Tiefpasses für rechteckförmige Eingangsspannung mit den Frequenzen 0,5 kHz, 5,0 kHz und 50 kHz.

Bereiten Sie zu diesem Zweck zu Hause das unten abgebildete Diagramm auf Millimeterpapier (DIN A4) im Maßstab 1:1 vor. Kalibrieren Sie die Zeitachse (Abszisse) in $t/\mu\text{s}$, die Ordinate in Volt. Zeichnen Sie in das Diagramm quantitativ die Signalform ein, die sich auf dem Schirm des Oszillografen bei den drei genannten Frequenzen ergibt.

