

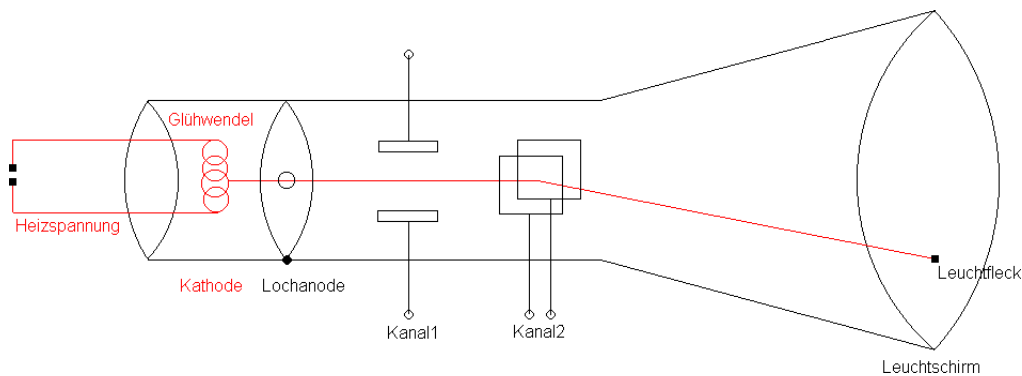
Versuch: P1-32

Elektronenstrahl-Oszilloskop

- Vorbereitung -

Vorbemerkung

Ein Oszilloskop ist ein Messgerät zur Darstellung des zeitlichen Verlaufs einer Spannung. Analoge Oszilloskope sind nach dem Prinzip der Braun'schen Röhre gebaut: An einer Glühkathode treten aufgrund des glühelektrischen Effekts Elektronen aus. Diese werden von der (positiv geladenen) Lochanode angezogen und damit beschleunigt. Nur die Elektronen, die auf das Loch treffen, fliegen weiter - dies führt zu einer Fokussierung des Elektronenstrahls. An zwei um 90° gedrehten Ablenkplattenpaaren werden die darzustellenden Spannungen („Kanal 1“ und „Kanal „2“) angelegt. Die Elektronen (Ladung $q = e$) fliegen durch das elektrische Feld \vec{E} dieser Kondensatoren und erfahren die elektrische Kraft $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$, die eine Richtungsänderung verursacht. Wie in der Skizze verdeutlicht, trifft der so abgelenkte Elektronenstrahl auf den Leuchtschirm und erzeugt einen sichtbaren Leuchtfleck, dessen Koordinaten von den Spannungen an den Ablenkplatten abhängen.



Inhaltsverzeichnis

1	Stehendes Bild	3
1.1	Synchronisation	3
1.2	Interne Triggerung	4
1.3	Externe Triggerung	4
1.4	Einstellungen	4
2	Zweikanalbetrieb	5
2.1	Si-Dioden-Einweggleichrichter	5
2.2	RC-Differenzglied	6
2.3	RC-Integrierglied	6
2.4	RC-Phasenschieber	7
3	Addition und Subtraktion zweier Signale	8
4	X-Y-Darstellungen	8
4.1	Lissajous-Figuren	8
4.2	Kennlinien	9
4.2.1	Zener-Diode (Z-Diode)	9
4.2.2	Kondensator	10
4.2.3	Reihenschaltung aus Kondensator und Widerstand	10
4.3	Resonanzverhalten eines Parallelschwingkreises	11
5	Frequenzmodulierte Schwingung	11
6	Speichereinheit des Oszilloskops	12

1 Stehendes Bild

Als erste Aufgabe soll mit dem Oszilloskop eine periodische Spannung (in y-Richtung) dargestellt werden. Legt man diese Spannung an die entsprechenden Ablenkplatten, so erscheint auf dem Leuchtschirm ein senkrechter Strich, was natürlich nicht sehr befriedigend ist. Deshalb muss auch an das andere Ablenkplattenpaar eine Spannung angelegt werden: hierfür eignet sich besonders eine Sägezahnspannung, da sie folgendes bewirkt:

- Der Strahl überquert den Schirm von links nach rechts
- Ist der Leuchtpunkt am rechten Rand angekommen, so springt er wieder nach links und wird neu gezeichnet

Entspricht die Frequenz der zu untersuchenden Spannung genau der Frequenz der Sägezahnspannung, so erscheint eine Periode auf dem Schirm. Aber auch für ganzzahlige Vielfache ergibt sich ein stehendes Bild, nur dass eben entsprechend mehr Perioden abgebildet werden. Da es oft sehr hilfreich sein kann, eine solche Sägezahnspannung auf die x-Ablenkung zu legen, kann das Oszilloskop diese selbst erzeugen - und zwar mit regelbarer Frequenz, damit die Sägezahnspannung so eingestellt werden kann, dass das Bild nicht „weiterwandert“. Außerdem verfügen Oszilloskope über die Möglichkeit, die Eingangsspannung mit geeigneten Proportionalitätsfaktoren zu skalieren, damit das Bild gut auf den Leuchtschirm passt.



Bedienfeld zur Triggerung

1.1 Synchronisation

Zunächst wollen wir die passende Frequenz für die Sägezahnspannung von Hand einstellen („triggern“). Dazu nehmen wir folgende Einstellungen vor (nachdem wir die Schaltung ordnungsgemäß aufgebaut haben):

1. Taste AT/NORM nicht gedrückt (automatische Triggerung ausgeschaltet)
2. EXT gedrückt, dann sucht der Oszillograph ein Signal an der Buchse TRIG. INP, an der aber in diesem Fall nichts angeschlossen sein sollte - denn jetzt lässt sich...
3. Per TIME/DIV-Regler (ändert die Sägezahn-Frequenz) die Synchronisation vornehmen. Zuerst wird das Bild mittels Grobeinstellung deutlich verlangsamt und dann mit dem Feinregler ganz zum Stehen gebracht.

1.2 Interne Triggerung

Es wird sich zeigen, dass die Einstellung eines stehenden Bildes per Hand nicht so einfach ist und viel Geduld braucht - deshalb bietet das Oszilloskop die Möglichkeit, diese Aufgabe für uns zu übernehmen. Dafür gibt es zwei Modi (jetzt EXT nicht gedrückt!):

- AT (AuTomatische Triggerung): Das Gerät wählt den Nulldurchgang der zu untersuchenden Spannung als Triggerpunkt, d.h. es stellt anhand der Zeitdifferenz zwischen zwei Nulldurchgängen die Frequenz der Sägezahnspannung passend ein
- NORMale Triggerung: Mit dem LEVEL-Drehregler lässt sich eine bestimmte Spannung des Eingangssignals auswählen (zwischen deren Minimum und Maximum). Wird diese Schwellenspannung erreicht, beginnt das Oszilloskop mit der Aufzeichnung des Bildes.

1.3 Externe Triggerung

Per BNC-Buchse TRIG. INP wird von außen eine Spannung zur Triggerung angelegt. Das Signal an diesem Eingang löst jetzt die Sägezahnimpulse aus, wobei mit dem Regler LEVEL die Feineinstellung vorgenommen werden kann. Zur groben Abstimmung dient der Triggerkopplungsschalter, der folgende Einstellmöglichkeiten besitzt:

- AC für Wechselspannungen von 10 Hz bis 10 MHz
- DC für Gleichspannungen von 0 bis 10 MHz
- HF für hochfrequente Signale von 1,5 kHz bis 40 MHz
- LF für niederfrequente Signale von 0 bis 1 kHz
- \sim für eine Triggerkopplung mit der Netzfrequenz

1.4 Einstellungen

Neben den oben erwähnten Einstellmöglichkeiten kann die Darstellung mit folgenden Reglern und Schaltern beeinflusst werden:

- +/- ist der Polaritätsschalter, mit dem ausgewählt wird, ob die positive (zunehmende) oder die negative (abnehmende) Triggerflanke den Startimpuls geben soll
- HOLDOFF verlängert die Wartezeit zwischen den Ablenkperioden, so dass mehrere Amplituden gleichzeitig dargestellt werden
- DC/AC/GD beeinflusst das Eingangssignal:
 - DC schließt das Signal direkt an
 - AC filtert die Gleichspannungsanteile der Eingangsspannung heraus, angezeigt wird nur der Wechselspannungsanteil
 - GD legt einen Kanal auf Masse (Eingangssignal wird auf 0V gesetzt), so dass der Nullabgleich vorgenommen werden kann
- INVERT spiegelt das Eingangssignal an der x-Achse
- TV synchronisiert den Zeitbasisgenerator mit Zeilen- und Spaltenfrequenzen eines Fernsehgeräts (für unsere Versuche unwichtig)

2 Zweikanalbetrieb

Das Oszilloskop ist dazu in der Lage, zwei Signale (Kanäle CH I und CH II) über der gleichen Zeitskala darzustellen. Doch ist das bei einem Einstrahlröhrensystem wie dem Oszilloskop überhaupt möglich? Ja, denn ein elektronischer Umschalter sorgt dafür, dass die Signale abwechselnd auf die y-Ablenkplatten gelegt werden. Dies geschieht so schnell, dass das Auge die beiden nacheinander gezeichneten Linien als „gleichzeitig gezeichnet“ erscheinen lässt. Die jeweilige Nulllinie kann mit Y POS für jeden Kanal getrennt kalibriert werden - der Umschalter AC/DC muss allerdings bei beiden Eingangssignalen gleich eingestellt sein. Weiter Tasten:

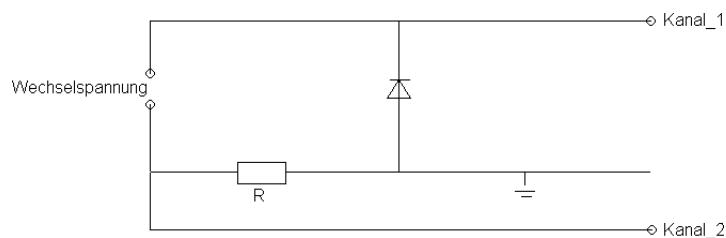
- DUAL erzwingt die gemeinsame Verarbeitung der Eingangsspannungen
- CHOPPED hilft bei Signalen < 1 kHz, das Signal trotzdem als geschlossenen Kurvenzug darzustellen
- ALTERNATE zeichnet die Kurven nacheinander auf der gesamten Periode der Sägezahnspannung, was bei niedrigen Frequenzen allerdings zu einem starken Flackern führt
- ADD addiert die beiden Signale (keine getrennte Darstellung mehr)
- TRIG I/II wählt den Kanal aus, der für die Triggung verwendet werden soll



Bedienfeld für die beiden Kanäle

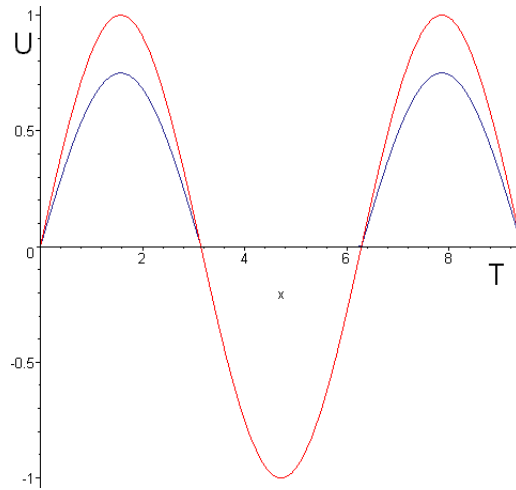
2.1 Si-Dioden-Einweggleichrichter

Das Si-Dioden-Element lässt den Strom nur in eine Richtung durch. Legt man eine Wechselspannung an, so erwarten wir, dass der negative Spannungsanteil nicht durchkommt und deshalb auf dem Oszilloskop-Bild abgeschnitten ist. Um nun die sinusförmige Ausgangs-Wechselspannung und die gleichgerichtete Spannung gleichzeitig anzuzeigen, muss das Oszilloskop wie folgt angeschlossen werden:



Si-Dioden-Einweggleichrichter

Wir erwarten folgendes Bild auf dem Oszilloskop: die ursprüngliche Wechselspannung und eine pulsierende Gleichspannung mit durch den Lastwiderstand verringerter Amplitude.



Erwartetes Oszilloskop-Bild für Si-Dioden-Einweggleichrichter

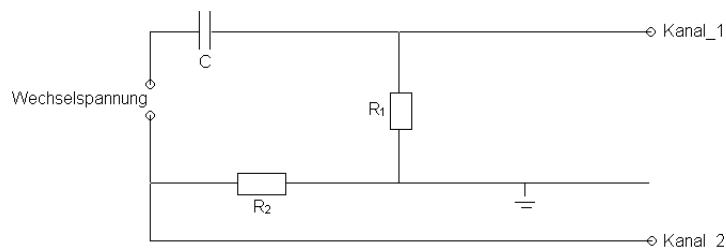
Anschließend soll vor die Diode ein Ladekondensator geschaltet werden, der zu einer Phasenverschiebung zwischen den beiden Kurven führen sollte.

2.2 RC-Differenzierglied

Ein RC-Differenzierglied besteht, wie der Name schon sagt, aus einer Reihenschaltung eines Kondensators mit einem Ohm'schen Widerstand. In diesem Versuch soll eine Dreiecksspannung angelegt und die Spannungsverläufe am Widerstand und an der Spannungsquelle für die folgenden Fälle dargestellt werden:

- $T \ll RC$
- $T \approx RC$
- $T \gg RC$

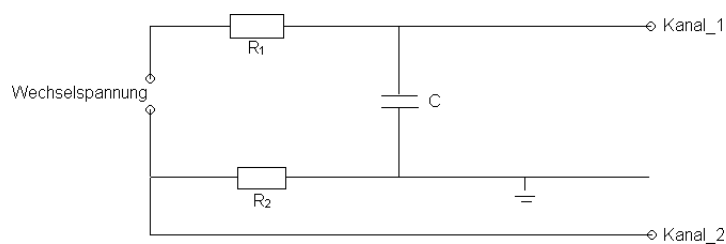
Experimentell soll die Frage geklärt werden, für welchen Fall das RC-Glied tatsächlich „differenziert“!



Schaltung RC-Differenzierglied

2.3 RC-Integrierglied

Der Aufbau entspricht dem aus Teilaufgabe 2.2, nur dass diesmal das Eingangssignal und die Spannung über dem Kondensator abgegriffen werden müssen. Wie in 2.2 soll jetzt für verschiedene Relationen zwischen T und RC untersucht werden, inwieweit das RC-Glied eine Rechteckspannung integriert.



Schaltung RC-Integrierglied

2.4 RC-Phasenschieber

An das RC-Glied ($R = 1 \text{ k}\Omega$ und $C = 0,47 \text{ }\mu\text{F}$) wird eine sinusförmige Wechselspannung angelegt, also für die Eingangsspannung:

$$U(t) = U_0 \cos(\omega t) = U_R + U_C = R \cdot I + \frac{Q}{C} \quad (1)$$

Mit Hilfe des Wechselstrom-Gesamtwiderstands $Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}$ lautet die Maximalstromstärke:

$$I_0 = \frac{U_0}{Z} = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}} \quad (2)$$

Am Widerstand fällt damit folgende Spannung ab:

$$U_R = I \cdot R = \frac{U_0 \cdot R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}} \quad (3)$$

Mit der Voraussetzung $U_0 = 2 \cdot U_R$ kann man die Frequenz errechnen:

$$U_R = \frac{2 \cdot U_R \cdot R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}} \quad (4)$$

$$\Rightarrow R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2} = 4R^2 \quad (5)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{(\omega C)^2} = 3R^2 \quad (6)$$

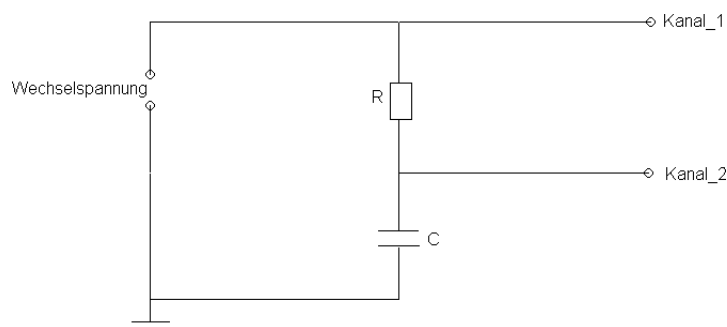
$$\Rightarrow \omega^2 = \frac{1}{3R^2 C^2} \quad (7)$$

$$\Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{3}RC} \quad (8)$$

$$\Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = 195,5 \text{ Hz} \quad (9)$$

Wie aus dem Zeigerdiagramm herleitbar ergibt sich eine Phasenverschiebung von

$$\varphi = \arctan\left(-\frac{\frac{1}{\omega C}}{R}\right) = -60^\circ \quad (10)$$



Schaltung RC-Phasenschieber

3 Addition und Subtraktion zweier Signale

Jetzt sollen die zwei Eingangsspannungen mit Hilfe der Taste ADD im DUAL-Modus addiert werden. Dabei dürfen die INVERT-Schalter beider Kanäle nicht gedrückt sein! Zum Subtrahieren wird nämlich auch ADD verwendet, aber einer der beiden Kanäle mit INVERT invertiert - schließlich ist die Subtraktion die Addition des Inversen. Zwei unabhängige Generatoren liefern die Spannungen für diesen Versuch, der für die beiden Bedingungen „verschiedene und gleiche Amplitude“ durchgeführt werden soll. Versuchsreihe:

1. Gleiche Frequenz (Synchronisation der Generatoren)
2. Leicht verschiedene Frequenz
3. Stark verschiedene Frequenz

Für gleiche Frequenzen erwarten wir eine saubere Überlagerung, bei kleinen Abweichung ist mit einer Schwebung zu rechnen. Für stark unterschiedliche Frequenzen ergibt sich ein unperiodisches Oszillographenbild.

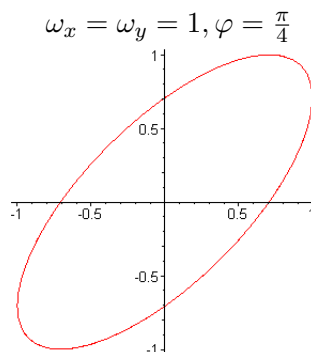
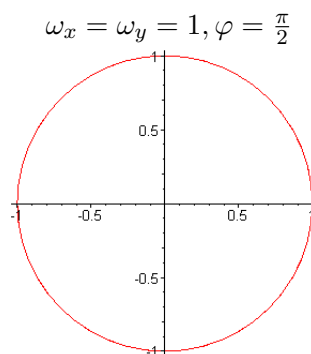
4 X-Y-Darstellungen

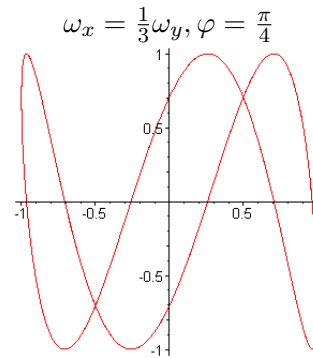
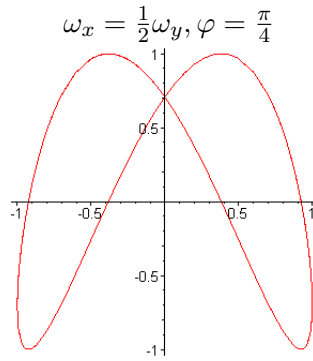
Jetzt soll auf der x-Achse nicht mehr die Zeit (generiert durch die Sägezahnspannung) aufgetragen werden, sondern eine beliebige Spannung des zweiten Kanals CH II. Kanal 1 wird also über Kanal 2 aufgetragen, Ergebnis ist eine $(x(t), y(t))$ -Darstellung. Geschlossene Kurven ergeben sich, wenn der Quotient der Frequenzen beider Signale rational ist (für zwei Sinus- bzw. Cosinuskurven):

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} \in \mathbb{Q} \tag{11}$$

4.1 Lissajous-Figuren

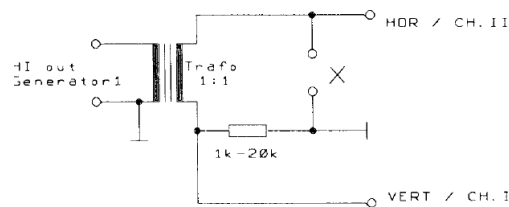
Kurven der Parameterdarstellung $x(t) = a \cdot \sin(\omega_x t)$ und $y(t) = a \cdot \sin(\omega_y t + \varphi)$ heißen Lissajous-Figuren. Für den Spezialfall $\varphi = 90^\circ$ und $\omega_x = \omega_y$ ergibt sich ein Kreis. In den folgen Maple-Grafiken ist immer $a = 1$.





4.2 Kennlinien

Ein Oszillograph kann nur Spannungen darstellen. Um den Stromverlauf zu bekommen muss man den Spannungsabfall über einem Lastwiderstand R messen und die Spannung mit der Formel $I = \frac{U}{R}$ entsprechend skalieren. Der Aufbau der Apparatur zur Aufnahme der Kennlinien erfolgt nach „Schaltskizze 1“ auf dem Aufgabenblatt:



Schaltskizze 1

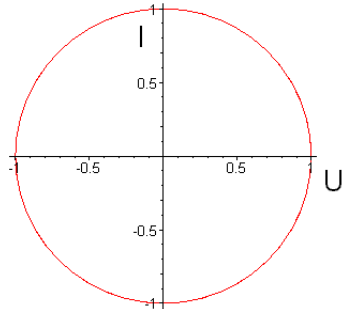
4.2.1 Zener-Diode (Z-Diode)

Die Kennlinie einer Z-Diode (also der sie durchfließende Strom aufgetragen über der angelegten Spannung) soll gemessen werden. Eine Z-Diode leitet schon bei sehr geringen Spannungen, sofern sie in Durchlaßrichtung geschaltet ist. In Sperrichtung werden sehr hohe Spannungen (sog. Durchschlagsspannungen) benötigt, um einen Strom fließen zu lassen. Wenn allerdings die Durchschlagsspannung überschritten ist, fließen sehr hohe Ströme!

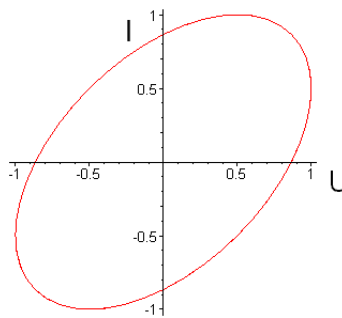
Der Zener-Effekt lässt sich folgendermaßen erklären: Das elektrische Feld, bewirkt durch die angelegte Spannung, löst Valenzelektronen aus. Dies führt dazu, dass der Sperrbereich nicht mehr frei von beweglichen Ladungsträgern ist. Diese freien Elektronen werden bei der Zener-Diode ab $5,5V$ so stark beschleunigt, dass durch Stöße mit anderen Atomen weitere Valenzelektronen herausgelöst werden, was die Stromstärke erheblich ansteigen lässt (ähnlich einer Kettenreaktion).

4.2.2 Kondensator

Ein idealer Kondensator (ohne Lastwiderstand) führt zu einer Phasenverschiebung von $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Die Kennlinie müsste dann, wie in 4.1 erläutert, einen Kreis ergeben. Mit dem in der Realität immer vorhanden Lastwiderstand erscheint auf dem Oszillographen allerdings eine Ellipse.



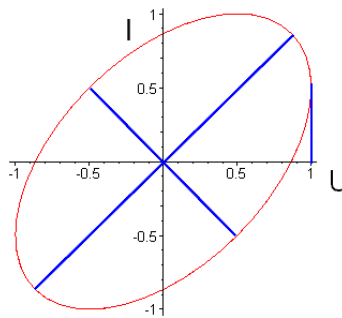
Kennlinie eines idealen Kondensators



Kennlinie eines realen Kondensators

4.2.3 Reihenschaltung aus Kondensator und Widerstand

Die Kennlinie ist hier wieder eine Ellipse, da eine realer Kondensator ja als Reihenschaltung aus Kondensator und Ohm'schem Widerstand betrachtet werden kann.



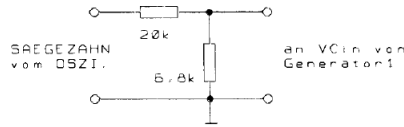
Kennlinie einer Reihenschaltung aus Kondensator und Widerstand

Der Quotient der beiden Halbachsen a und b der Ellipse ergibt die Phasenverschiebung mit folgender Beziehung:

$$\sin \varphi = \frac{a}{b} \quad (12)$$

4.3 Resonanzverhalten eines Parallelschwingkreises

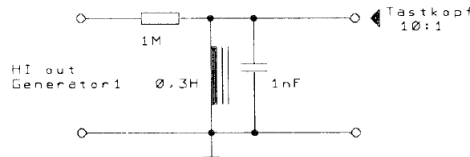
Ein Parallelschwingkreis ist eine Parallelschaltung von Spule und Kondensator. Mittels WOBBLING wird die x-Achse des Oszilloskops zur Frequenzachse: die Sägezahn-Ablenkspannung wird nämlich dazu benutzt, um die Frequenz des HF-Generators, sprich die Ausgangsfrequenz, periodisch zu verändern. Im Endeffekt ergibt sich also ein Oszilloskopbild, auf dem die Spannung im Resonanzkreis (die am Resonanzpunkt ihr Maximum hat) über der Frequenz des Generators aufgetragen ist. Nach Schaltskizze 2 des Aufgabenblattes wird das WOBBELN realisiert:



Schalt skizze 2

Der Schwingkreis wird nach Schaltskizze 3 aufgebaut und anschließend dessen Verhalten beim Durchlaufen der Frequenzen untersucht. Die Resonanzfrequenz ω_0 errechnet sich durch:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (13)$$



Schalt skizze 3

5 Frequenzmodulierte Schwingung

Eine frequenzmodulierte Schwingung lässt sich durch folgende Formel beschreiben:

$$u(t) = u_0 \cdot \sin(\varphi(t)) = u_0 \cdot \sin \left(\Omega_0 \cdot t + \frac{\Delta\omega}{\omega} \cdot \sin(\omega t) + \varphi_0 \right) \quad (14)$$

Die Variablen und Konstanten bedeuten:

- u_0 : Amplitude der Trägerwelle
- Ω_0 : Kreisfrequenz der Trägerwelle
- ω : Modulationskreisfrequenz
- $\frac{\omega}{2\pi}$: Modulationsfrequenz, in deren Rhythmus sich die Trägerfrequenz ändert
- $\frac{\Delta\omega}{2\pi}$: Frequenzhub (größte Abweichung von der mittleren Frequenz)

Um den Frequenzhub zu ermitteln, stellt man einige Perioden des Eingangssignals auf dem Oszilloskop dar (mit AUTO-Triggerung). Die variierende Frequenz des Signals führt dazu, dass die nacheinander dargestellten Kurven auseinander laufen und der Kurvenzug nach rechts immer unschärfer wird. Mit der Bestimmung der Anzahl n der Perioden, nach der die Breite der Unschärfe 0,5 Perioden beträgt (also eine maximale Abweichung von $\frac{1}{4}$ Periode) lässt sich der Frequenzhub ausrechnen:

- Der Frequenzhub ist also der $\frac{4}{n}$ -te Teil der mittleren Frequenz $\Delta\omega = \frac{1}{4n} \bar{f}$
- Die Momentankreisfrequenz beträgt $\Omega(t) = \frac{\partial f}{\partial t} = \Omega_0 + \Delta\omega \cos(\omega t)$

Daraus folgt:

$$\Omega_{max} = \Omega_0 + \Delta\omega \quad (15)$$

$$\Omega_{min} = \Omega_0 - \Delta\omega \quad (16)$$

Mit (15) und (16) ergibt sich also $\Delta\Omega = 2\Delta\omega$. Damit lässt sich ein Zusammenhang zwischen Frequenzhub und Periodendauer herleiten:

$$\frac{2\pi}{T_{min}} - \frac{2\pi}{T_{max}} = 2\Delta\omega \quad (17)$$

$$\Rightarrow \Delta\omega = \pi \left(\frac{1}{T_{min}} - \frac{1}{T_{max}} \right) \quad (18)$$

6 Speichereinheit des Oszilloskops

Der Spannungsverlauf beim Entladen eines Kondensators soll bei diesem Versuch mit Hilfe des im Oszillographen integrierten Speichers aufgezeichnet werden. Die Funktion für die Spannung lautet:

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (19)$$

Aufgelöst nach R ergibt sich für den Widerstand:

$$R = \frac{-t}{C \ln \left(\frac{U(t)}{U_0} \right)} \quad (20)$$

Anhand einiger aus der Kurve abgelesener Wertepaare $(U(t), t)$ sollen mit Formel (20) die Eingangswiderstände von Oszilloskop und Tastkopf gemessen werden. Anschließend erfolgt der Vergleich mit den Herstellerangaben.

Die Bedienung der Speichereinheit des Oszillographen erfolgt mit den Tasten:

- STOR: Umschaltung zwischen Echtzeit- und Speicherbetrieb (mit Kontroll-LED)
- SINGLE: Ermöglicht die Aufzeichnung einer nichtperiodischen Einzelzeitablenkung
- RESET: Stellt die Speicherzeitbasis in Bereitschaftsstellung für eine Einzelablenkung
- HOLD I/II: Speicherung der Signale an Kanal I und II.
- DOT J (Dot join): Per Interpolation wird eine gespeicherte Punktfolge durch leuchtende Striche verbunden