

Oszilloskop und Funktionsgenerator

Stichworte:

Anode, Kathode, Kathodenstrahlröhre, Elektronenablenkung, Ablenkplatten, Trigger, AC/DC-Kopplung, Gleichspannung, Wechselspannung, Frequenz, Kreisfrequenz, Periode, Amplitude, Phase, Phasendifferenz, Scheitel- und Effektivwert von Wechselspannungen, LISSAJOUS-Figuren, harmonische Schwingung.

Messprogramm

Darstellung von Signalen eines Funktionsgenerators, Trigger-Level und Trigger-Flanke, zeitlicher Verlauf der Lichtintensität einer Glüh- und einer Leuchtstofflampe, Scheitel- und Effektivwert der Netzspannung, Untersuchung eines gedämpften periodischen Spannungssignals, Dauer eines Lichtblitzes, Frequenzstabilität eines Stroboskops, LISSAJOUS-Figuren.

Literatur:

- /1/ WALCHER, W.: „Praktikum der Physik“, Teubner Studienbücher Physik, Teubner-Verlag, Stuttgart
- /2/ EICHLER, H. J., KRONFELDT, H.-D., SAHM, J.: „Das Neue Physikalische Grundpraktikum“, Springer-Verlag, Berlin u. a.
- /3/ GERTHSEN, C. u.a.: „Physik“, Springer-Verlag, Berlin u. a.

1 Einleitung

Das Oszilloskop zählt zu den wichtigen Messinstrumenten in der experimentellen Physik. Mit ihm ist es möglich, den Verlauf einer elektrischen Spannung U_y als Funktion der Zeit t oder als Funktion einer Spannung U_x in „Echtzeit“ („real-time“) zu beobachten und quantitativ zu vermessen. Der zeitliche Verlauf aller physikalischen Größen, die mit einem geeigneten Sensor (Messwertaufnehmer, Messgrößenaufnehmer) in eine elektrische Spannung umgewandelt werden können¹, ist mit einem Oszilloskop darstellbar. Hinsichtlich der Amplitude und Frequenz der messbaren Signale bestehen nur wenige Einschränkungen: Ist man bereit, genügend viel Geld auszugeben, so lässt sich mit ziemlicher Sicherheit ein Oszilloskop finden, das den gestellten Anforderungen gewachsen ist.

Auch im Grundpraktikum ist das Oszilloskop ein häufig eingesetztes Messgerät. In einigen Versuchen ist es wesentlicher Bestandteil des Versuchsaufbaus und liefert die quantitativen Daten, die für die Versuchsauswertung benötigt werden. In anderen Versuchen dient es der qualitativen Kontrolle, ob eine Schaltung richtig aufgebaut wurde und funktionstüchtig ist, ob ein Sensor das richtige Signal liefert usw. Um die Versuche im Praktikum erfolgreich durchführen zu können, ist daher eine gründliche Kenntnis des Oszilloskops unabdingbar.

Bis vor einigen Jahren waren vielfach noch Elektronenstrahl-Oszilloskope im Einsatz. Heute sind diese Geräte überwiegend durch Digital-Speicher-Oszilloskope verdrängt worden. Auch in diesem Versuch und im Praktikum generell wird mit Digital-Speicher-Oszilloskopen gearbeitet. Dennoch wird im Theorieteil zunächst kurz das Prinzip des Elektronenstrahl-Oszilloskops dargestellt, da sich einige grundlegende Funktionsprinzipien von Oszilloskopen damit einfach und anschaulich erklären lassen.

2 Theorie

2.1 Elektronenstrahl-Oszilloskop

Abb. 1 zeigt den schematischen Aufbau einer Oszilloskopröhre; die realen Bauformen der einzelnen Komponenten sind erheblich komplexer (Abb. 2). Die auf Massepotenzial (0 V) liegende *Kathode* K wird über eine Heizwendel indirekt so weit aufgeheizt (Heizspannung U_H), dass es zur Glühemission von Elektronen kommt. Im Abstand d_A von der Kathode befindet sich die in der Mitte durchbohrte *Anode* A. Zwischen K und A wird eine positive Hochspannung U_A in der Größenordnung von 1000 V angelegt. Dadurch entsteht zwischen K und A ein elektrisches Feld E_A vom Betrag

$$(1) \quad E_A = \frac{U_A}{d_A},$$

¹ Einzelheiten dazu werden im Versuch „Sensoren für Kraft, Druck, ...“ behandelt.

durch das auf die Elektronen mit der Ladung e eine Kraft \mathbf{F}_A vom Betrag

$$(2) \quad F_A = e E_A$$

ausgeübt wird. Diese Kraft beschleunigt die Elektronen in Richtung Anode. Nach Durchtritt durch das Loch in der Anode treffen die Elektronen auf den *Leuchtschirm* L, wo sie beim Auftreffen abgebremst werden und den Phosphor des Schirms zur Fluoreszenz anregen. Dadurch entsteht ein sichtbarer Leuchtfleck, dessen Größe mit Hilfe der Spannung U_F an der *Fokussiereinheit* F minimiert werden kann.

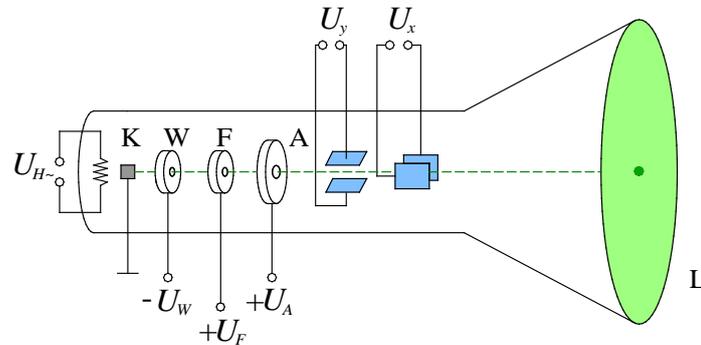


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer Elektronenstrahl-Oszilloskopröhre. Bezeichnungen siehe Text. Die strichpunktiierte grüne Linie gibt schematisch die Bahn der Elektronen im Fall $U_X = U_Y = 0$ an.



Abb. 2: Foto des hinteren Endes einer Elektronenstrahl-Oszilloskopröhre. Es zeigt die komplexe Struktur der Elektroden zur Formung und Steuerung des Elektronenstrahls. Am Ende der Röhre und rechts am Röhrenmantel sind die Anschlusskontakte für die verschiedenen Elektroden zu erkennen.

Mithilfe einer negativen Spannung U_W zwischen K und dem WEHNELT-Zylinder W kann die Intensität des Leuchtpunktes variiert werden. Das durch U_W hervorgerufene elektrische Feld \mathbf{E}_W ist zum Feld \mathbf{E}_A entgegen gerichtet und bremst die Elektronen. Nur Elektronen ausreichender kinetischer Energie können die Anode erreichen.

Die *X- und Y-Ablenkplatten* (blau in Abb. 1) bilden paarweise je einen Plattenkondensator und dienen zur horizontalen und vertikalen Ablenkung des Elektronenstrahls. Wird an die *Y-Ablenkplatten* die Ablenkspannung U_Y angelegt, so entsteht zwischen den Platten bei einem Plattenabstand d_Y ein elektrisches Feld \mathbf{E}_Y vom Betrag

$$(3) \quad E_Y = \frac{U_Y}{d_Y},$$

durch das auf die Elektronen während ihres Durchflugs eine Kraft \mathbf{F}_Y vom Betrag

$$(4) \quad F_Y = e E_Y = e \frac{U_Y}{d_Y}$$

ausgeübt wird. Je nach Vorzeichen und Höhe der Spannung U_Y werden die Elektronen deshalb mehr oder weniger stark nach oben oder unten abgelenkt und erreichen den Leuchtschirm in vertikaler Richtung an

einer anderen Stelle. Analoge Überlegungen gelten für die X-Ablenkplatten, mit denen eine Ablenkung der Elektronen in horizontaler Richtung erreicht werden kann.

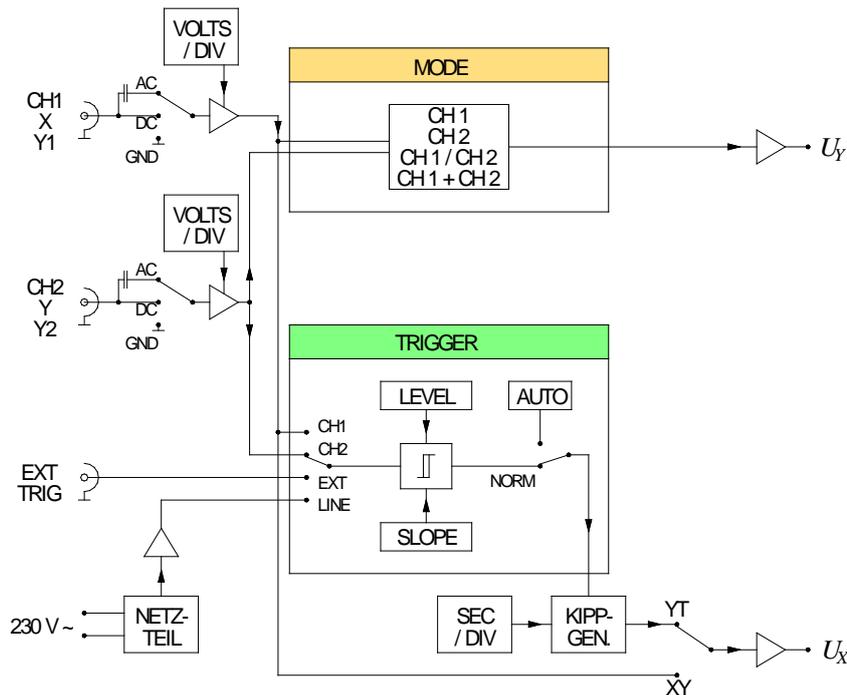


Abb. 3: Blockschaltbild der wichtigsten Funktionseinheiten eines Oszilloskops. Bezeichnungen siehe Text und Abb. 4.

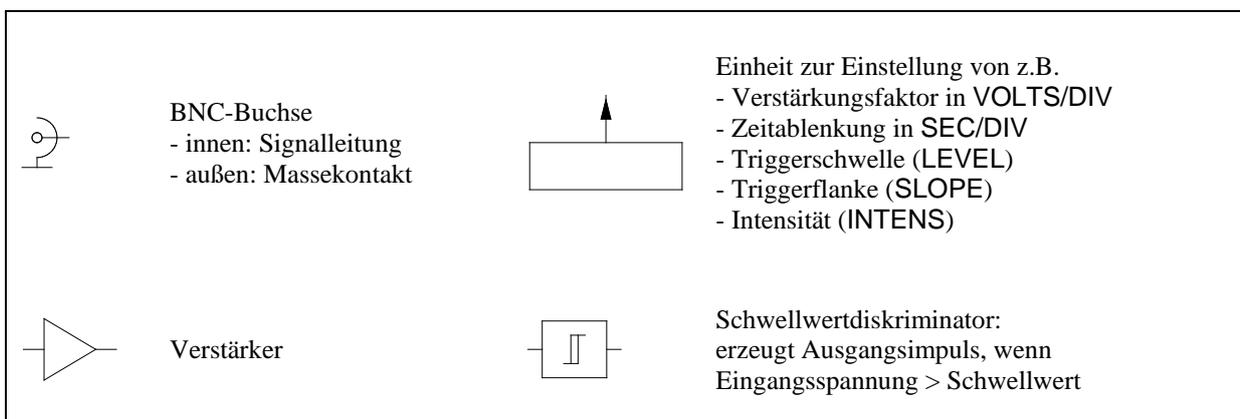


Abb. 4: Erklärung von Blockschaltbild-Elementen.

Abb. 3 zeigt in einem Blockschaltbild die wichtigsten (*nicht alle!*) Funktionseinheiten für die Ansteuerung der einzelnen Elemente der Oszilloskopöhre. In Abb. 4 wird die Funktion der Blockschaltbild-Elemente erklärt. Abb. 5 zeigt die Frontansicht der Steuereinheiten eines typischen Elektronenstrahl-Oszilloskops. Bei dem mit Abb. 3 und Abb. 5 beschriebenen Gerät handelt es sich um ein so genanntes *2-Kanal-Oszilloskop* mit zwei Signaleingängen. Die Eingänge sind als BNC-Buchsen ausgelegt und heißen Kanal 1 (Channel 1; häufig bezeichnet mit CH1² oder X oder Y1) und Kanal 2 (CH2 oder Y oder Y2). Zusätzlich gibt es einen BNC-Eingang für ein externes Triggersignal (EXT INPUT oder EXT TRIG). In der Stellung DC³ des Kanal-Eingangsschalters gelangt das jeweilige Eingangssignal direkt auf einen Eingangsverstärker, in der Schalterstellung AC⁴ nur sein Wechselspannungsanteil⁵. In der Stellung GND (Ground) wird der Eingang auf Massepotenzial gelegt.

² In der Schriftart ARIAL gesetzte Bezeichnungen entsprechen den Beschriftungen auf der Frontplatte des Oszilloskops.

³ DC: *direct current* (Gleichstrom); hier ist mit „DC“ Gleichspannungskopplung gemeint.

⁴ AC: *alternating current* (Wechselstrom); hier ist mit „AC“ Wechselspannungskopplung gemeint.

⁵ Einzelheiten zu Gleich- und Wechselspannungssignalen siehe Kapitel „Zum Aufbau elektrischer Schaltungen...“ dieses Skriptes.

Mit dem Drehschalter VOLTS/DIV wird der Verstärkungsfaktor des Eingangsverstärkers variiert und festgelegt, wie viel Volt (VOLTS) des Eingangssignals zu einer Elektronenstrahlableitung von einer Längeneinheit (einer DIVision, meistens 1 cm) auf dem Oszilloskopbildschirm führen. Die VOLTS/DIV-Einstellung bestimmt also die vertikale *Größe* eines Signals auf dem Oszilloskopbildschirm. Die horizontale und die vertikale *Lage* des Oszilloskopbildes wird dagegen über die POSITION-Potentiometer verändert, über die eine positive oder negative Gleichspannung variabler Größe zu den Ablenkspannungen U_Y und U_X hinzu addiert wird.

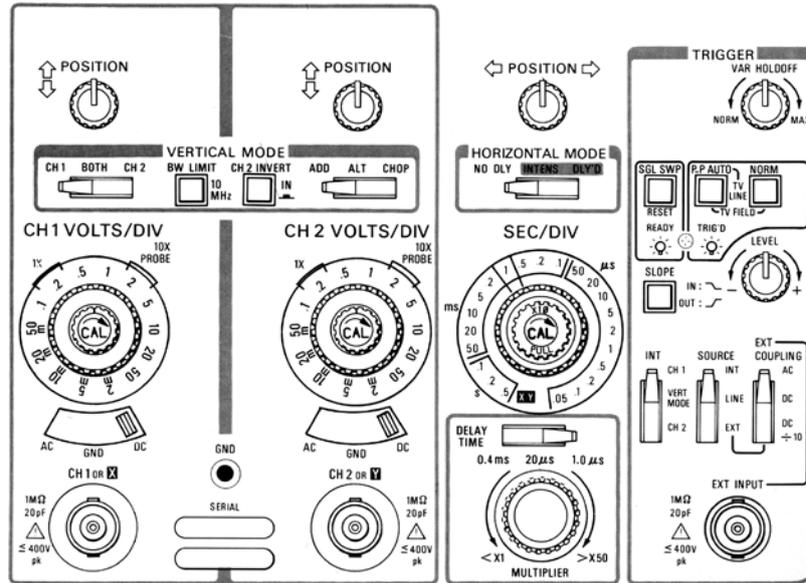


Abb. 5: Frontansicht der Steuereinheiten des Elektronenstrahl-Oszilloskops TEKTRONIX 2213A (Quelle: TEKTRONIX-Manual).

2.1.1 XY- und YT-Betrieb

Das Oszilloskop kann je nach Einstellung der Funktionsgruppe MODE in verschiedenen Modi arbeiten:

- Im XY-Betrieb wird der Signalverlauf $U_Y(U_X)$ dargestellt. Hierzu gelangt das Signal vom Eingang CH1 (X) über einen Eingangsverstärker als Spannung U_X an die X-Ablenkplatten und das Signal vom Eingang CH2 (Y) über einen Eingangsverstärker als Spannung U_Y an die Y-Ablenkplatten.
- Im YT-Betrieb werden Signale als Funktion der Zeit t dargestellt: $U_{y1}(t)$, $U_{y2}(t)$ oder $U_{y1}(t) + U_{y2}(t)$. Hierzu gelangen die Signale von CH1 bzw. von CH2 nach Verstärkung an die Y-Ablenkplatten. Ein Kippgenerator erzeugt eine Sägezahnspannung mit der Periodendauer t_d , die als Ablenkspannung U_X für eine periodisch sich wiederholende horizontale Ablenkung des Elektronenstrahls sorgt (s. Abb. 6). Der Kippgenerator mit zugehörigen Komponenten (u.a. SEC/DIV-Schalter) wird auch als *Zeitbasis* oder *Time-Base* bezeichnet.
- Mit dem Zeitablenkschalter (SEC/DIV) wird im YT-Betrieb festgelegt, welche Zeit t_e der Elektronenstrahl benötigt, um auf dem Oszilloskopschirm in horizontaler Richtung eine Strecke von einer Längeneinheit (1 DIV) zurückzulegen. Bei einer Bildschirmbreite von m DIVISIONS gilt $t_d = m t_e$.

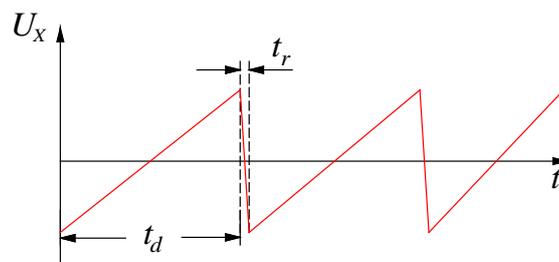


Abb. 6: Sägezahnspannung des Kippgenerators. Während der Zeit t_d läuft der Elektronenstrahl mit gleichmäßiger Geschwindigkeit von links nach rechts, während der Zeit t_r läuft er von rechts nach links an den Bildanfang zurück. Durch Verringerung von U_w wird erreicht, dass der Strahl während des Rücklaufs nicht auf den Leuchtschirm gelangt.

2.1.2 Synchronisierung (Triggerung)

Um auf dem Oszilloskopschirm ein periodisches Signal $U_y(t)$ mit der Periodendauer T als stehendes Bild darzustellen, muss $U_y(t)$ mit der horizontalen Ablenkspannung $U_x(t)$ synchronisiert werden. Dieser Vorgang der Synchronisation heißt *Triggerung*. Sie wird über die Funktionseinheit **Trigger** gesteuert. Abb. 7 demonstriert die Triggerung anhand eines Beispiels für den Fall $T \geq t_d + t_r$. Der Kippgenerator erzeugt die nächste Periode von $U_x(t)$ erst dann, wenn die Eingangsspannung $U_y(t)$ gleich der Schwellenspannung U_L (TRIGGER LEVEL) ist und die Steigung (SLOPE) von $U_y(t)$ das am Trigger-Schalter **SLOPE** eingestellte Vorzeichen hat („+“ in dem in Abb. 7 dargestellten Fall). Nur wenn beide Bedingungen erfüllt sind wird *getriggert*, d. h. der Elektronenstrahl läuft einmal von links nach rechts über den Oszilloskopschirm und wartet anschließend am linken Rand auf das nächste Triggerereignis.

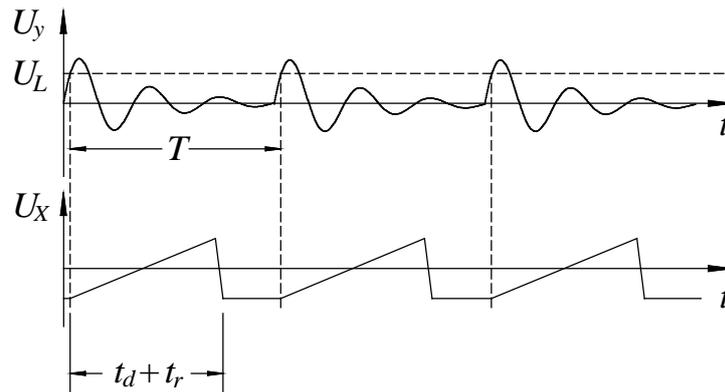


Abb. 7: Signaltriggerung. Oben Eingangssignal $U_y(t)$, unten Signal $U_x(t)$ des Kippgenerators. U_L : Trigger-Level.

Mit den Elementen der Funktionseinheit **TRIGGER** wird eingestellt, ob das Oszilloskop im oben beschriebenen **NORM**- oder im **AUTO**-Triggermodus betrieben werden soll:

- Im **NORM**-Modus kann eingestellt werden, auf welches Signal getriggert (synchronisiert) werden soll. Möglich sind die **INT**erne Triggerung auf ein an **CH1** oder **CH2** anliegendes Signal, auf ein **EXT**ernes Signal, das dem Oszilloskop über die **EXT INPUT / TRIG**-Buchse zugeführt wird oder auf die Netzspannung (**LINE**).
- Im **AUTO**-Modus findet eine Triggerung wie im **NORM**-Modus statt, falls das Eingangssignal die Triggerbedingung erfüllt; andernfalls wird die nächste Periode der Sägezahnspannung auch ohne Triggerung erzeugt. In dieser Betriebsart kann der Elektronenstrahl auch dann sichtbar gemacht werden, wenn der Kanal-Eingangsschalter auf **GND** steht. In diesem Fall ist $U_y(t) = 0$, sodass die Triggerbedingung ($U_y > U_L$) für das Loslaufen des Elektronenstrahls gar nicht erfüllt werden kann.

Frage 1:

- Was bedeutet es für die Triggerung des Oszilloskops, wenn die **TRIGGER**-Wahlschalter auf
 - a) **NORM**, **EXT**, „-“,
 - b) **NORM**, **CH1**, „+“
 stehen?

Frage 2:

- Auf dem Oszilloskopschirm mögen zwei sinusförmige Spannungsverläufe $U_{y1}(t)$ und $U_{y2}(t)$ zu sehen sein. Wie lassen sich die Periodendauern T , die Frequenzen f und die Kreisfrequenzen ω der Signale ermitteln? Wie lautet der formelmäßige Zusammenhang zwischen diesen Größen? Wie lassen sich die Amplituden $U_{y1,0}$ und $U_{y2,0}$ der Spannungssignale bestimmen?

Frage 3:

- Angenommen, die Signale $U_{y1}(t)$ und $U_{y2}(t)$ haben die gleichen Frequenzen, sind jedoch seitlich gegeneinander versetzt, d. h. phasenverschoben. Wie lässt sich dann der Betrag der Phasenverschiebung φ (in Grad) der beiden Signale ermitteln (Formel)?

2.2 Digital-Speicher-Oszilloskop

2.2.1 Grundlagen

Ein Digital-Speicher-Oszilloskop (kurz: Digital-Oszilloskop) ist im Grunde nichts anderes als ein Computer, der neben den üblichen Einheiten wie CPU, internem / externen Speicher, Bussystem und Software folgende spezielle Komponenten enthält:

- Ein Bedienfeld mit Drehknöpfen (z.B. SCALE, LEVEL,...) und Tasten (z.B. CH1/2 MENU, TRIGGER MENU, CURSOR,...), s. Abb. 9, über die die Steuerung der Software erfolgt (statt über Tastatur und Maus).
- Eine Einheit zur Erfassung und Digitalisierung von Spannungssignalen, die an die BNC-Buchsen CH1, CH2 und EXTR TRIG angelegt werden.
- Einen LCD-Bildschirm zur Anzeige der erfassten Signale, zur Ausgabe von Messwerten und Einstellungsparametern sowie zur Darstellung der Menüs zur Gerätesteuerung (s. Abb. 10, Abb. 11, Abb. 12).

Die analogen Eingangssignale werden mit einem *Analog/Digital-Wandler* (A/D-Wandler) in digitale Signale umgewandelt. Details dieses Wandlungsprozesses werden in einem separaten Versuch „*Datenerfassung und -verarbeitung mit dem PC...*“ behandelt. Deshalb werden im Folgenden nur einige Grundbegriffe erläutert.

Die Umwandlung *analog* → *digital* geschieht nicht kontinuierlich, sondern nur zu diskreten, periodisch angeordneten Zeitpunkten, den so genannten *Abtastpunkten* (*sampling points*, Abb. 8). Die Häufigkeit, mit der ein Signal abgetastet wird, ist durch die *Abtastrate* oder *Abtastfrequenz* f_a vorgegeben, ihr Kehrwert ist das *Abtastintervall* T_a . Je höher f_a , je kleiner also T_a , desto präziser kann der zeitliche Verlauf eines Eingangssignals dargestellt werden. Bei den im Praktikum eingesetzten Geräten beträgt f_a maximal 1 GHz. Die höchstmögliche Abtastfrequenz f_a bestimmt nach dem *Abtasttheorem*⁶ gleichzeitig die maximale Frequenz f_s eines harmonischen Eingangssignals, die mit einem Digital-Oszilloskop noch erfasst werden kann. Für eine korrekte Signalerfassung muss die Bedingung

$$(5) \quad f_a > 2 f_s$$

erfüllt sein, andernfalls treten Fehler auf (*Aliasing*).

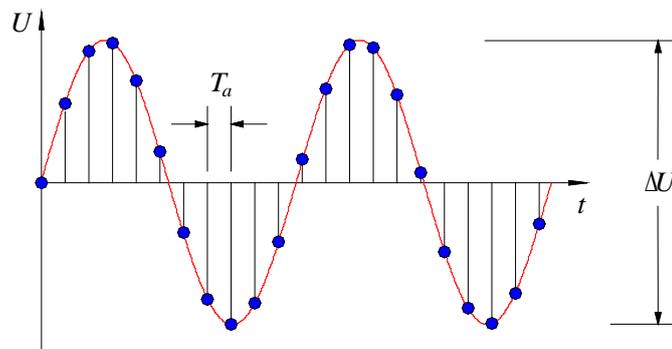


Abb. 8: Abtastung eines Sinussignals (rot). Die Abtastpunkte (blau) haben den zeitlichen Abstand $T_a = 1/f_a$ voneinander. ΔU gibt die maximale Spannungsdifferenz im dargestellten Signal an.

Um den Spannungswert an einem Abtastpunkt möglichst genau bestimmen zu können, benötigt man einen A/D-Wandler mit möglichst großer *Auflösung*, die durch die Zahl n der verfügbaren Bits gegeben ist. n Bits erlauben eine relative Genauigkeit für Spannungsmessungen von $1/2^n$. Bei den im Praktikum eingesetzten Typen ist $n = 8$, es können also $2^8 = 256$ unterschiedliche Spannungswerte erfasst werden. Dazu zwei Beispiele:

- Bei einer Verstärkereinstellung am SCALE Drehschalter (in anderen Modellen auch VOLTS/DIV-Drehschalter) von 1 V/DIV und 8 Divisions in vertikaler Richtung können Eingangssignale mit maximalen Spannungsunterschieden von $\Delta U = 1 \text{ V/DIV} \times 8 \text{ DIV} = 8 \text{ V}$ dargestellt werden. Einzelne

⁶ Weitere Details zum Abtasttheorem und zum Aliasing werden im späteren Versuch „*Fourieranalyse*“ behandelt.

Spannungswerte können dann mit einer Genauigkeit (Auflösung) von $8 \text{ V} / 2^8 \approx 30 \text{ mV}$ gemessen werden. Spannungsunterschiede im Eingangssignal, die kleiner als ca. 30 mV sind, können demnach nicht *aufgelöst* werden.

- Bei einer Verstärkereinstellung am SCALE-Drehesalter (VOLTS/DIV Drehesalter) von 20 mV/DIV und 8 Divisions können Eingangssignale mit maximalen Spannungsunterschieden von $\Delta U = 20 \text{ mV/DIV} \times 8 \text{ DIV} = 160 \text{ mV}$ dargestellt werden. Die Auflösung bei der Messung einzelner Spannungswerte beträgt dann $160 \text{ mV} / 2^8 \approx 0,63 \text{ mV}$.

Frage 4:

- Mit welcher Genauigkeit kann eine sinusförmige Wechselspannung mit einer Amplitude von $U_0 = 2 \text{ V}$ und einer Frequenz von $f = 50 \text{ Hz}$ bei einer VOLTS/DIV Einstellung von 2 V/DIV gemessen werden?
- Mit welcher VOLTS/DIV Einstellung lässt sich, ausgehend von der sinusförmigen Wechselspannung aus a), die Genauigkeit um den Faktor 4 verbessern?

Für Messungen mit möglichst hoher Auflösung ist es deshalb wichtig, die Eingangssignale über die richtige Einstellung am SCALE-Drehesalter immer so weit zu verstärken, dass sie sich in vertikaler Richtung annähernd über den gesamten Bildschirm erstrecken.

Eine weitere Größe, die die Güte eines Digital-Oszilloskops bestimmt, ist die maximale Zahl N von Abtastwerten, die gespeichert werden können. Bei den im Praktikum eingesetzten Geräten ist $N = 2.500$. Die Darstellung der Messwerte erfolgt auf einem 7 Zoll ($800 \times 480 \text{ Pixel}$) großen WVGA-TFT Farbdisplay.

Die *Speicherung* geschieht bei einem Digital-Oszilloskop kontinuierlich. Im Speicher stehen *immer* die letzten N Abtastwerte des Signals zur Verfügung. Die *Darstellung* der Signale geschieht jedoch nur dann, wenn eine Triggerung erfolgte. Die kontinuierliche Signalspeicherung hat den Vorteil, dass auch Signalanteile vor dem Triggerzeitpunkt dargestellt werden können (*Vortriggerung*, englisch *pre-triggering*). So ist in der Grundeinstellung des Oszilloskops der Zeitpunkt, zu dem die Triggerung ausgelöst wurde, in der horizontalen Bildmitte zu finden (s. Abb. 10). Mit Hilfe des HORIZONTAL POSITION-Knopfes kann dieser Zeitpunkt nach links und rechts verschoben werden.



Abb. 9: Frontansicht des Digital Oszilloskops TEKTRONIX TBS 1102B EDU.

Als alternative Oszilloskope werden im Grundpraktikum die TEKTRONIX Modelle TDS 1012B, TDS 1012 und TDS 2012C verwendet. Alle Modelle verfügen über die Möglichkeit der Datenspeicherung auf einer SD-Karte bzw. einem USB-Speicherstick.

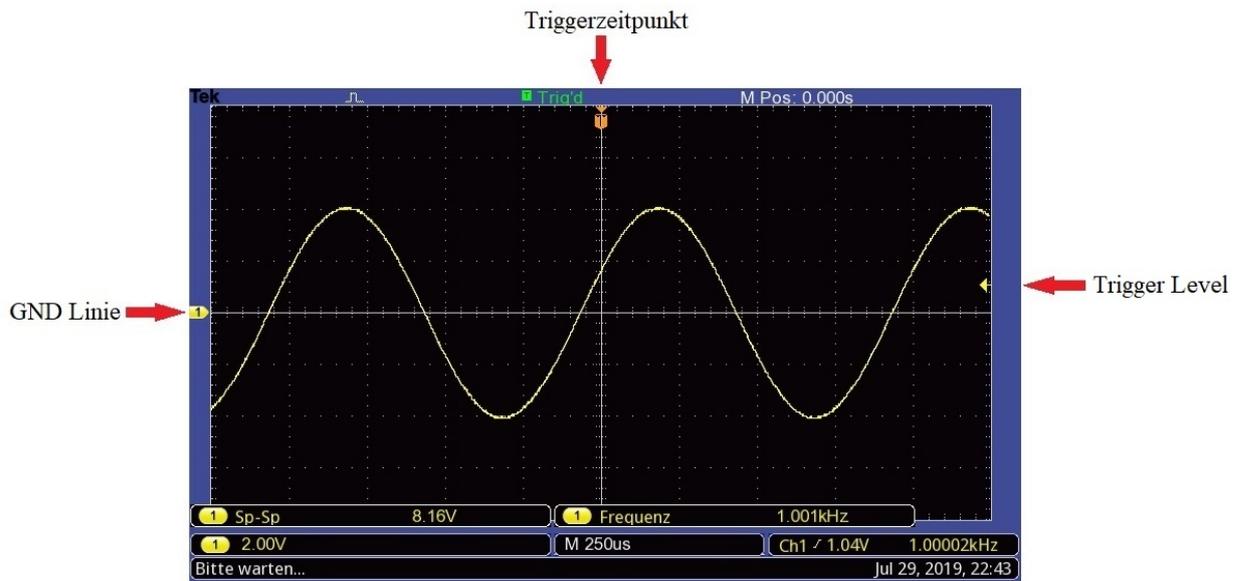


Abb. 10: Bildschirmfoto des Digital-Speicher-Oszilloskops TEKTRONIX TBS 1102B -EDU, mit dem eine sinusförmige Wechselspannung an CH1 gemessen wird. Durch Aktivierung der Funktion MEASURE (MESSUNG) werden am unteren Bildrand der Spitze-Spitze-Wert U_{SS} der Spannung (8,16 V) sowie ihre Frequenz (1,001 kHz) ausgegeben. Unten wird die Einstellung der Parameter VOLTS/DIV (CH1 2,00V) und SEC/DIV (M 250 μ s) sowie die Höhe des TRIGGER LEVELs ($\sqrt{\quad}$ 1,04 V) angezeigt. Das Zeichen $\sqrt{\quad}$ bedeutet Triggerung auf einen Signalabschnitt mit positiver Steigung (SLOPE). Der nach unten zeigende Pfeil am oberen Bildrand markiert den Triggerzeitpunkt, der nach links zeigende Pfeil am rechten Bildrand den TRIGGER LEVEL und der nach rechts zeigende Pfeil am linken Bildrand mit der Ziffer 1 die Lage der 0 V-Linie (GND) von CH1.

2.2.2 Menüsteuerung

Viele Funktionen des Digital-Oszilloskops werden über Menüs gesteuert. Nach der Betätigung einer Taste wie 1 MENU (CH 1 MENU), MEASURE (MESSUNG), ACQUIRE (ERFASSUNG), DISPLAY usw. erscheint in der rechten Spalte des Bildschirms ein Menü mit fünf untereinander angeordneten Feldern. Abb. 11 zeigt als Beispiel das Menü nach Betätigung der Taste CH1 MENU. Die Einträge in den einzelnen Feldern lassen sich durch Betätigung der rechts neben den Feldern liegenden Tasten verändern. So führt beispielsweise eine mehrmalige Betätigung der Taste neben dem Feld Kopplung zur Änderung der Signalkopplung: DC \rightarrow AC \rightarrow GND \rightarrow DC \rightarrow AC \rightarrow GND \rightarrow ... Weitere Menüs sind in Abb. 12 dargestellt.

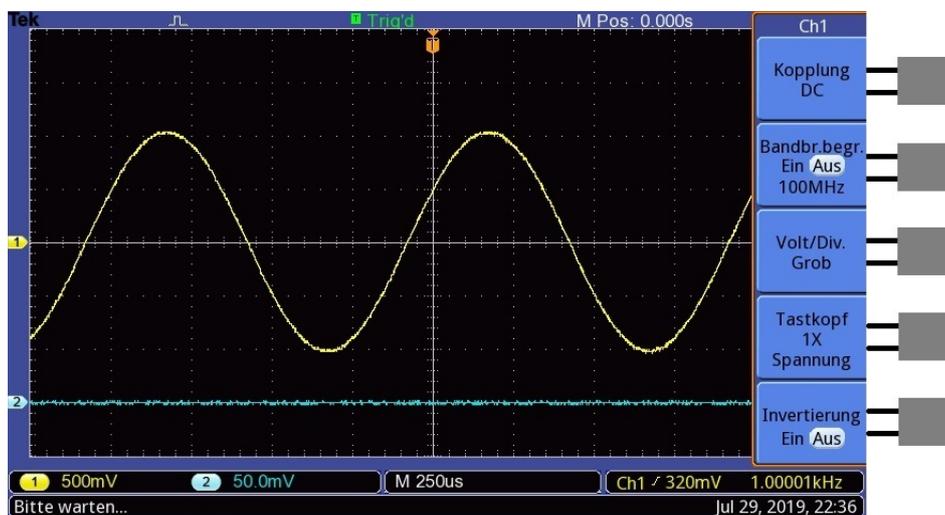


Abb. 11: Menü auf dem Bildschirm (rechte Spalte) nach Betätigung der Taste CH1 MENU. Rechts daneben die Tasten zur Änderung der Menüauswahl in den einzelnen Feldern.

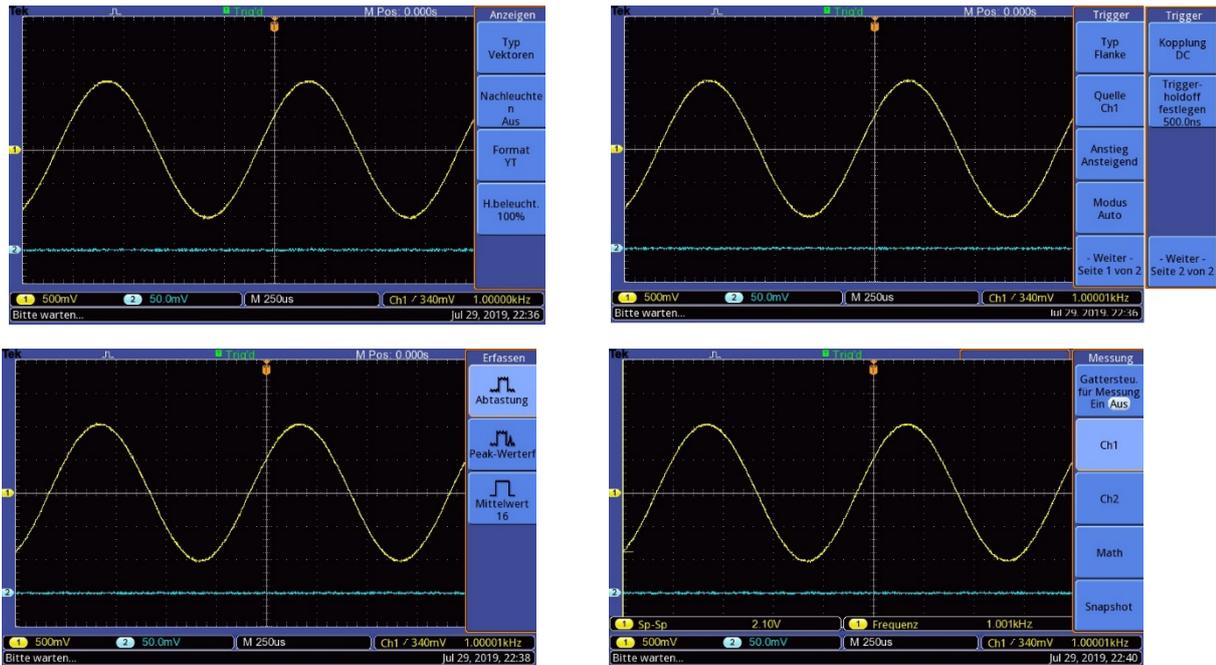


Abb. 12: Menüs nach Betätigung unterschiedlicher Funktionstasten. Von links nach rechts und von oben nach unten sind dargestellt: Menü UTILITY → ANZEIGEN (u.a. Umschaltung zwischen YT- und XY-Betrieb), Menü TRIGGER, Menü ACQUIRE (ERFASSEN) und Menü MEASURE (MESSUNG).

2.2.3 Quantitative Messungen

Ein großer Vorteil von Digital-Oszilloskopen gegenüber analogen Geräten besteht in der Möglichkeit, die gespeicherten Daten geräteintern verrechnen zu können. So können auf einfache Weise Signalmittelwerte, Spitzenwerte von Signalen, Zeit- und Amplitudendifferenzen, Periodendauern, Signalfrequenzen usw. gemessen werden.

Zur Messung von Parametern *periodischer* Signale (Periode, Frequenz, Amplitude usw.) eignet sich das Menü MEASURE (MESSUNG). Die Ergebnisausgabe erfolgt jeweils am unteren Rand der Anzeige. Abb.10 und Abb.11 zeigen Beispiele.

Nichtperiodische Signale oder einzelne Spannungs- und Zeitwerte lassen sich mithilfe des CURSOR-Menüs messen (Abb. 13). Mit zwei horizontalen Cursors (*Spannungscursor*) lassen sich Spannungswerte und Spannungsdifferenzen bestimmen, mit zwei vertikalen Cursors (*Zeitcursor*) Zeitwerte und Zeitdifferenzen. Die Cursor lassen sich mit Hilfe des MULTIPURPOSE-Drehknopfes (MULTIFUNKTIONSDrehknopf) verschieben.⁷ Die zu den Cursorpositionen gehörenden Messwerte werden jeweils in Anzeigefeldern am rechten Bildrand ausgegeben.

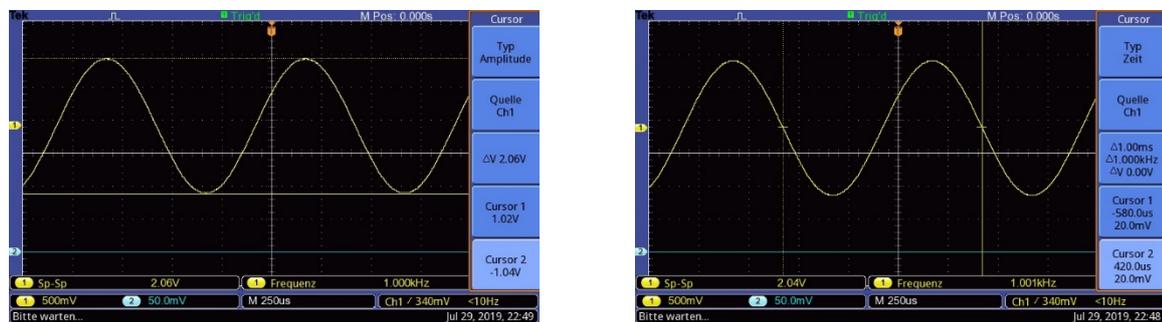


Abb. 13: CURSOR-Menüs. Links: zwei Spannungscursor (Typ Amplitude), die die Maxima (CURSOR 1, 1,02 V) und die Minima (CURSOR 2, -1,04 V) des Signals an CH1 markieren. ΔV zeigt die Spannungsdifferenz beider Cursorwerte an (2,06 V). Rechts: zwei Zeitcursor (Typ Zeit), die den Beginn (CURSOR 1, -580,0 μ s) und das Ende (CURSOR 2, 420 μ s) einer Periode des Signals an CH1 markieren. Δt zeigt die Zeitdifferenz beider Cursorwerte an (1.00 ms).

⁷ Bei dem Oszilloskop Typ TDS 1012 erfolgt die Cursor Verschiebung über die POSITION-Knöpfe und bei den Oszilloskop Typen TDS 1012B / 2012C mit einem separaten Drehknopf.

2.2.4 Speicherung von einmaligen Signalen

Ein weiterer Vorteil von Digital-Oszilloskopen gegenüber analogen Geräten besteht in der Möglichkeit, einmalige Signale erfassen und speichern zu können. Ein Beispiel für solche Signale sind Spannungsimpulse, die eine Fotodiode nach Bestrahlung mit einem kurzen Lichtblitz ausgibt. Über das TRIGGER-Menü kann man die Bedingungen einstellen (LEVEL (PEGEL), ANSTIEG (FLANKE),...) unter denen eine einmalige Signalaufzeichnung erfolgen soll. Durch Betätigung der Taste SINGLE wird das Oszilloskop anschließend in eine Wartestellung versetzt (Anzeige READY in oberer Menüzeile). Erfüllt das Eingangssignal *danach* die Triggerbedingungen, erfolgt die Aufzeichnung. Aufgrund der Pre-Triggerung (s. Kap. 2.2.1) ist dann auch der Signalverlauf direkt vor dem Auslösen des Triggerereignisses sichtbar.

3 Versuchsdurchführung

Zubehör:

Digital-Oszilloskop TEKTRONIX TBS 1102B – EDU (Alternativ: TDS 1012 / 1012B / 2012C / TBS 1102B), 2 Funktionsgeneratoren (TOELLNER 7401 und AGILENT 33120A / 33220A), Signalformer, Stroboskop, Blitzgerät (METZ 44 AF-1), Fotodetektor (Si-Fotoelement SIEMENS BPY64P), Glühlampe und Leuchtstofflampe in lichtdichtem Kasten, hochohmiger Spannungsteiler 100:1 zur Teilung der Netzspannung.

Hinweise:

Einzelheiten zum Betrieb der zur Verfügung stehenden Geräte, insbesondere der Oszilloskope, müssen bei Bedarf in den bereitliegenden Gerätehandbüchern nachgelesen werden. Das Erlernen des Umgangs mit Handbüchern (auch englischsprachigen) gehört mit zu den Lernzielen im Praktikum!

Die Versuche werden mit dem Funktionsgenerator (FG) TOELLNER 7401 durchgeführt. Der Funktionsgenerator AGILENT 33120A / 33220A kommt nur im Versuch 3.10 zum Einsatz.

Manchmal kann es hilfreich sein, die AUTOSET-Taste am Oszilloskop zu betätigen. Das Gerät analysiert dann das Eingangssignal und stellt es mit daraus abgeleiteten Einstellungen dar.

3.1 Erzeugung eines Punktes

In der Mitte des Bildschirms soll ein ruhender Punkt erzeugt werden. Dazu muss das Oszilloskop auf XY-Betrieb (Menü UTILITY → ANZEIGEN)⁸ eingestellt werden. Durch welche Bedienungselemente lässt sich die vertikale und horizontale Lage des Punktes verändern?

3.2 Erzeugung eines vertikalen Striches

Im XY-Betrieb soll in der Mitte des Bildschirms ein vertikaler Strich mit einer Länge von 6 DIVisions erzeugt werden. Dazu muss ein geeignetes Signal aus dem Funktionsgenerator (Buchse OUTPUT) an den Y-Kanal gelegt werden. Durch welche Bedienungselemente des Oszilloskops und des Funktionsgenerators lassen sich die Länge und die Lage des Striches beeinflussen? (Alle Möglichkeiten ausprobieren!)

3.3 Ausgangssignale eines Funktionsgenerators

Im YT-Betrieb sollen nacheinander die verschiedenen Ausgangssignale (Sinus-, Dreieck-, Rechtecksignal) des Funktionsgenerators an CH1 dargestellt werden. Variieren Sie die Frequenz, die Amplitude und den Gleichspannungsanteil (DC-OFFSET) am FG und beobachten Sie die zugehörigen Signaländerungen auf dem Oszilloskop. Um Änderungen bei Variation des Gleichspannungsanteils beobachten zu können, muss am Oszilloskop die DC-Kopplung (CH1/2 MENU) eingestellt sein. Stellen Sie gleichzeitig mit dem Ausgangssignal des FG das Signal an der Buchse TTL OUT⁹ dar. Dokumentieren Sie für alle drei Signalformen das Ausgangssignal zusammen mit dem TTL-Signal entweder per Handskizze oder mit einem Bildschirmfoto (siehe Anhang, Kap. 4). Geben Sie den maximalen und minimalen Spannungswert des TTL-Signals sowie seine Phasenlage relativ zu den Ausgangssignalen (Sinus, Dreieck, Rechteck) an.

3.4 Trigger-Level und Trigger-Flanke

Der Funktionsgenerator (DC-OFFSET OFF) wird an CH1 des Oszilloskops angeschlossen. Auf dem Schirm wird ein Bild entsprechend Abb. 14 erzeugt, d. h. ein „Sinussignal mit Grundlinie“. Die Amplitude des Sinussignals soll 1 V betragen, die Frequenz 2 kHz und auf dem Schirm soll *genau eine* Periode sichtbar sein. Getriggert wird im NORMAL-Modus (TRIGGER MENU), der Triggerzeitpunkt soll am linken Bildrand liegen.

⁸ Bei alternativen Modellen: Menü DISPLAY

⁹ Siehe Erläuterungen zu den Ausgangssignalen eines FG im Kapitel „Zum Aufbau elektrischer Schaltungen...“ im Versuchskript.

Das Sinussignal soll am linken Rand nacheinander bei einem Argument (Phasenwinkel) von 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° und 270° beginnen, ohne dass die Einstellung der HORIZONTAL POSITION am Oszilloskop dabei verändert wird. Wie müssen das LEVEL (PEGEL) und der ANSTIEG (FLANKE / SLOPE) der Triggereinheit dazu eingestellt werden? (Darstellung der Ergebnisse in Tabellenform; Trigger-Level für die jeweiligen Phasenwinkel ausrechnen, am Oszilloskop einstellen und in die Tabelle eintragen.)

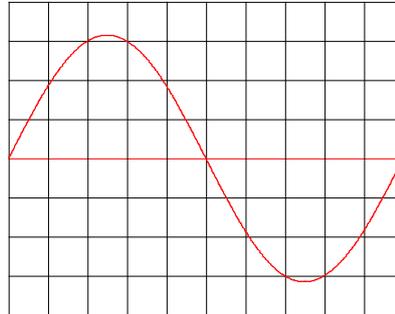


Abb. 14: Oszilloskopbild eines Sinussignals mit Grundlinie (rot). Jedes Kästchen hat die Größe $1 \text{ DIV} \times 1 \text{ DIV}$.

3.5 Quantitative Messung eines Spannungssignals

Mit Hilfe eines Fotodetektors ist es möglich, den zeitlichen Verlauf einer Lichtintensität $I(t)$ in ein dazu proportionales Spannungssignal $U(t)$ umzuwandeln. Mit dem zur Verfügung stehenden Fotodetektor soll der zeitliche Verlauf der Lichtintensität einer an das Stromnetz (50 Hz Wechselspannung) angeschlossenen Glühlampe und einer Leuchtstofflampe (Abb. 15) mit dem Oszilloskop gemessen werden (Frequenz, Amplitude, Signalform (Skizze)). Dabei soll insbesondere auf charakteristische Unterschiede in den Signalen beider Lampen geachtet werden.

Zur Messung wird der Fotodetektor auf die Öffnung des Lampenkastens gelegt und die jeweilige Lampe eingeschaltet. $I(t)$ enthält einen Gleichanteil I_{DC} und einen deutlich kleineren zeitlich variierenden Anteil I_{AC} . Nur das zu I_{AC} gehörende Spannungssignal wird auf dem Oszilloskop dargestellt und vermessen.

Frage 5:

- Warum enthält $I(t)$ einen Gleichanteil I_{DC} ?

Bei der Messung der Signale wird auffallen, dass sie von einem Rauschsignal kleiner Amplitude überlagert sind. Bei periodischen Signalen lässt sich dieser Rauschteil durch Mittelwertbildung verringern. Dazu wählt man die Betriebsart ACQUIRE (ERFASSUNG) \rightarrow MITTELWERT, in der die Signale über 4, 16, 64 oder 128 Zeitintervalle der Länge Δt gemittelt werden können. Δt entspricht dabei der Breite des auf dem Bildschirm angezeigten Zeitbereichs: $\Delta t = 10 \times t_e$, wobei t_e der eingestellte SEC/DIV-Wert ist.

Schalten Sie zwischen den Erfassungsmodi ABTASTUNG und MITTELWERT um, variieren Sie die Zahl der Zeitintervalle, über die gemittelt wird und dokumentieren Sie die Änderungen in den dargestellten Signalen.

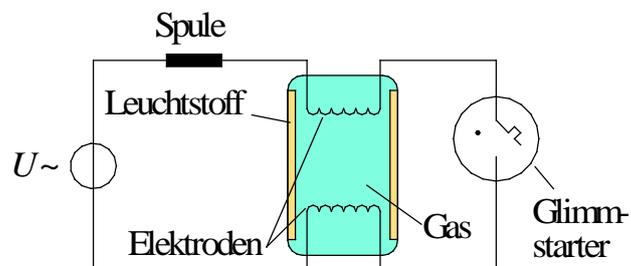


Abb. 15: Blockschaltbild einer Leuchtstofflampe.

Frage 6::

- Abb. 15 zeigt das Blockschaltbild einer Leuchtstofflampe. Wie funktioniert die Lampe prinzipiell? Worin besteht der wesentliche Unterschied zu einer Glühlampe?

3.6 Scheitel- und Effektivwert der Netzspannung

Mit einem hochohmigen Spannungsteiler wird die Netzspannung im Verhältnis 100:1 auf zwei Widerstände aufgeteilt (Abb. 16; Genauigkeit der Widerstände $\pm 1\%$).¹⁰

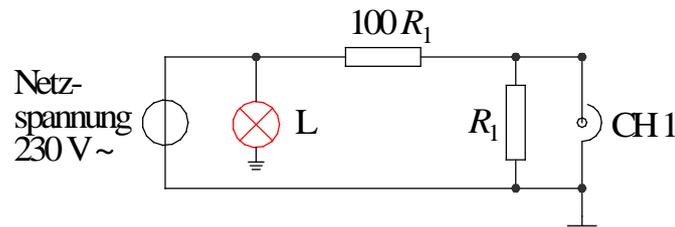


Abb. 16: Hochohmiger Spannungsteiler zur Teilung der Netzspannung mit Kontrolllämpchen L (rot).

Achtung:

- Beim Anschluss des Spannungsteilers an die Netzspannung muss unbedingt auf richtige Polung geachtet werden! Bei richtiger Polung leuchtet das rote Kontrolllämpchen L auf, bei falscher Polung nicht. In diesem Fall muss der Netzstecker umgedreht werden! Keinesfalls darf das Oszilloskop bei falscher Polung angeschlossen werden!
- Aus Sicherheitsgründen ist ein Einsatz der beschriebenen Spannungsteilerschaltung nur durch geschultes Personal zulässig (Gefahr der Berührung von Netzspannung bei falschem Einsatz der Schaltung oder bei Leitungsbruch). Das Kabel am Widerstand R_1 darf daher erst angeschlossen werden, nachdem die Schaltung durch eine betreuende Person überprüft wurde!

Über dem kleineren Widerstand R_1 wird die Spannung abgegriffen, auf CH1 des Oszilloskops gegeben und Form, Frequenz und Amplitude gemessen.

Frage 7:

- Wie groß ist die Amplitude (der Scheitelwert) der Netzspannung, wie groß ihr Effektivwert (sinusförmige Netzspannung vorausgesetzt)? Wie groß wäre der Effektivwert einer rechteckförmigen Wechselspannung gleicher Amplitude?

Frage 8:

- Welcher Strom (Effektivwert) fließt durch eine Heizplatte, die mit Wechselstrom betrieben wird und deren Typenschild die Angabe „230 V / 1,5 kW“ trägt? Wie groß ist der Scheitelwert dieses Stromes?

3.7 Untersuchung eines gedämpften periodischen Spannungssignals

An den Eingang eines Signalformers wird eine Rechteckspannung angelegt (Frequenz 10 kHz, Amplitude einige V). Dieser Signalformer wird als „Black Box“ behandelt, dessen Funktionsprinzip hier nicht interessiert. Wichtig ist nur, dass am Ausgang des Signalformers ein Spannungssignal vorliegt, dessen Verlauf dem einer gedämpften harmonischen Schwingung entspricht.

Frage 9:

- Der Spannungsverlauf $U(t)$ einer gedämpften harmonischen Schwingung (siehe Abb. 17) mit der Anfangsamplitude U_0 , der Kreisfrequenz ω und der Dämpfungskonstanten α lässt sich als Funktion der Zeit t schreiben als:

$$(6) \quad U(t) = U_0 \cos(\omega t) e^{-\alpha t}$$

Die mit der Zeit abnehmenden Amplituden der Teilschwingungen seien U_i ($i = 1, 2, 3, \dots$, s. Abb. 17). Was für ein Funktionsverlauf ergibt sich, wenn die U_i über i a) linear und b) halblogarithmisch aufgetragen wird? (Die i -Achse soll jeweils linear skaliert sein.)

Das Ausgangssignal des Signalformers wird an CH1 des Oszilloskops angeschlossen. Die Triggerung und Zeitablenkung des Oszilloskops wird so eingestellt, dass eine gedämpfte Schwingung vollständig und von

¹⁰ Zur Vermessung der Netzspannung wird ein Spannungsteiler statt eines Netztransformators benutzt, um die Form der Netzspannung nicht zu verfälschen.

einer weiteren der Anfang auf dem Schirm zu sehen ist. Anschließend werden folgende Signaldaten gemessen:

- Frequenz der gedämpften Schwingung,
- Spannungsamplituden U_i der ersten 5 Teilschwingungen.

Stellen Sie im Versuchsprotokoll U_i als Funktion von i grafisch dar (linear und halblogarithmisch) und vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den Erwartungen gemäß Frage 9.

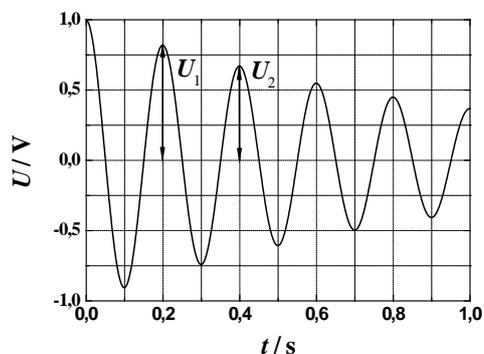


Abb. 17: Gedämpfte harmonische Schwingung gem. Gl. (6). $U_0 = 1\text{ V}$ ist die Anfangsamplitude, U_1 und U_2 sind die Amplituden der beiden nachfolgenden Teilschwingungen.

3.8 Frequenzstabilität eines Stroboskops

Die Aufgabe in diesem Versuchsteil besteht darin, quantitative Aussagen über die Frequenzstabilität eines Stroboskops zu machen, dessen Lichtblitze mit einem Fotodetektor in Spannungsimpulse umgewandelt werden. Ein Maß für diese Frequenzstabilität ist die maximale Zeitspanne ΔT , um die der Abstand zwischen aufeinander folgenden Stroboskopblitzen mit dem mittleren Impulsabstand \bar{T} variiert (s. Abb. 18).

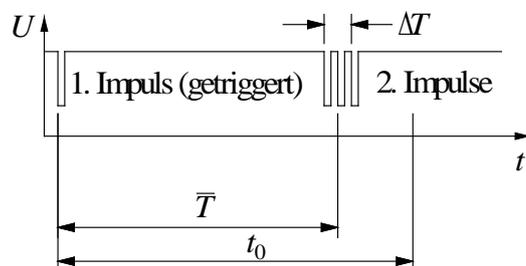


Abb. 18: Oszilloskopbild einer zeitlich schwankenden Impulsfolge.

Zur Lösung der angegebenen Aufgabe wird das Oszilloskop im NORMAl-Triggermodus auf das Spannungssignal des Fotodetektors getriggert. Das Stroboskop wird bei einer Frequenz von $f \approx 30\text{ Hz}$ betrieben. Die Zeitablenkung wird so eingestellt, dass ein Zeitintervall der Länge $t_0 \approx 1,1\bar{T} \approx 1,1/f$ auf dem Bildschirm zur Darstellung kommt.

Danach wird der Triggermodus auf Einzelimpulserfassung umgestellt durch die Taste SINGLE (Taste SINGLE SEQ beim Typ TDS 1012 / 1012B bzw. Triggermodus SINGLE SHOT beim Typ TDS 210/220). Dadurch wird erreicht, dass nach Betätigung der SINGLE-Taste (RUN/STOP-Taste) jeweils *ein* Impulsverlauf gespeichert und dargestellt werden kann, wie er sich nach erfolgter Triggerung ergibt. Vor der Triggerung erscheint im Display READY (das Oszilloskop wartet auf das Erreichen der Triggerschwelle), nach der Triggerung erscheint ACQ COMPLETE (STOP). Mit Hilfe der Zeitscursor kann der Impulsabstand T zwischen dem ersten Impuls, auf den getriggert wurde, und dem zweiten Impuls vermessen werden. Durch mindestens zehnmahlige Wiederholung der Messung (jeweils erneut die RUN/STOP-Taste betätigen) wird ein brauchbarer Schätzwert für das Zeitintervall ΔT ermittelt und in Relation zum mittleren Impulsabstand \bar{T} angegeben.

3.9 Dauer eines Lichtblitzes

Mit Hilfe eines Fotodetektors soll die Dauer des Lichtblitzes aus einem Foto-Blitzgerät ermittelt werden (Taste M am Blitzgerät so oft drücken, bis die LED über 1/64 aufleuchtet). Der Blitz wird aus ca. (0,5 – 1) m auf den Fotodetektor gerichtet und ausgelöst. Das Signal des Fotodetektors wird mit dem Oszilloskop im SINGLE (SINGLE SEQ / SINGLE SHOT)-Modus erfasst.

Da die Dauer des Lichtblitzes kurz ist (< 1 ms) und die Lichtintensität des Blitzes schnell ansteigt und abfällt, muss ein *schneller* Fotodetektor verwendet werden. Darunter versteht man einen Detektor, der Lichtimpulse mit kurzer Anstiegs- und Abfallzeit messen kann. Bei dem verwendeten Fotodetektor erreicht man dies dadurch, dass man die Ausgangskontakte des Fotodetektors mit einem 50Ω -Widerstand verbindet und die Spannung über diesem Widerstand misst. Man spricht in dem Fall von einem 50Ω -Abschluss des Detektors¹¹.

Als Dauer des Lichtblitzes soll die 10%-Breite t_b des aufgezeichneten Spannungsimpulses angegeben werden, wie sie in Abb. 19 definiert ist. Eine Skizze bzw. ein Bildschirmfoto (vgl. Kap. 4) des aufgezeichneten Impulses wird dem Protokoll beigelegt.

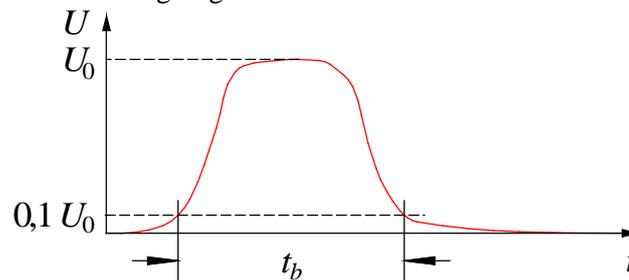


Abb. 19: Zur Definition der 10%-Breite t_b eines Spannungsimpulses $U(t)$ mit der Amplitude U_0 .

3.10 Lissajous-Figuren

LISSAJOUS-Figuren entstehen durch Überlagerung von zwei sinusförmigen Signalen $U_x(t)$ und $U_y(t)$, die im XY-Betrieb an die beiden Eingänge des Oszilloskops gelegt werden.

Frage 4:

- Wie sieht eine LISSAJOUS-Figur aus, die durch die Überlagerung zweier Sinussignale mit dem Amplitudenverhältnis 1:2 und dem Frequenzverhältnis 2:3 entsteht? (Skizze mit Matlab zeichnen. Die Phasenverschiebung zwischen beiden Signalen zur Zeit $t = 0$ sei 0.)

Auf dem Oszilloskop sollen LISSAJOUS-Figuren durch die Überlagerung von zwei sinusförmigen Wechselspannungen aus den Funktionsgeneratoren AGILENT und TOELLNER erzeugt werden. Die Figuren sollen in horizontaler und vertikaler Richtung etwa die gleiche Ausdehnung haben. Der Funktionsgenerator AGILENT wird auf eine feste Frequenz von $f_1 = 50$ Hz eingestellt, am Funktionsgenerator TOELLNER wird die Frequenz f_2 variiert. Es soll versucht werden, möglichst ruhige Bilder für Frequenzen von $f_2 = (25, 50, 100, 150, 200)$ Hz zu erzeugen. Die entstehenden Bilder sollen dokumentiert und interpretiert werden.

Frage 5:

- Was könnte die Ursache dafür sein, dass keine dauerhaft stehenden Bilder erzeugt werden können?

4 Anhang

Um ein Bildschirmfoto des Digital-Oszilloskops auf einem USB-Stick bzw. einer SD-Card zu speichern, müssen folgende Tastenfolgen gedrückt werden:

Grundeinstellungen (müssen nur einmal vorgenommen werden):

SAVE/RECALL	→	Aktion	→	Bild speichern
Dateiformat	→	JPG		
Verzeichnis auswählen	→	GPRnn ¹²	→	Verzeichnis wechseln

¹¹ Ein 50Ω -Abschluss lässt sich realisieren, indem man auf die BNC-Buchse des Fotodetektors ein T-Stück aufsetzt. An einen Ausgang des T-Stücks schließt man einen 50Ω -Widerstand an, an den anderen das Verbindungskabel zum Oszilloskop.

¹² nn ist die Gruppennummer; Auswahl mit dem Drehknopf oben links.

Bild speichern:

SPEICHERN (Speichern / PRINT)

→ TEKnnnn.JPG

nnnn ist die Bildnummer. Sie wird nach jedem Speichervorgang automatisch um 1 erhöht.
