

## 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 können<sup>1</sup>, 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.

---

<sup>1</sup> Einzelheiten dazu werden im Versuch „Sensoren für Kraft, Druck, ...“ behandelt.

## 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  $\mathbf{E}_A$  vom Betrag

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

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.

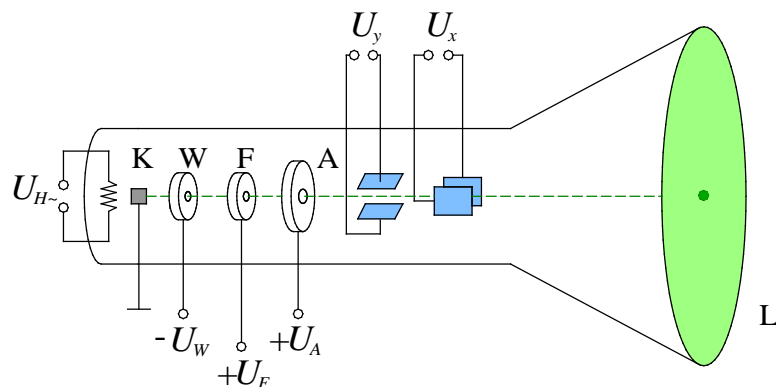


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer Elektronenstrahl-Oszilloskopröhre. Bezeichnungen siehe Text. Die strichpunktiierte grüne Linie gibt schematisch die Bahn der Elektronen im Fall  $U_X = U_Y = 0$  an.

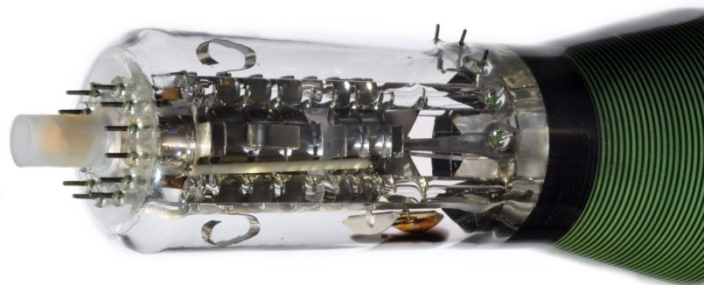


Abb. 2: Foto des hinteren Endes einer Elektronenstrahl-Oszilloskopröhre. Es zeigt die komplexe Struktur der Elektroden zur Formung und Steuerung des Elektronenstrahls. Am Ende der Röhre und rechts am Röhrenmantel sind die Anschlusskontakte für die verschiedenen Elektroden zu erkennen.

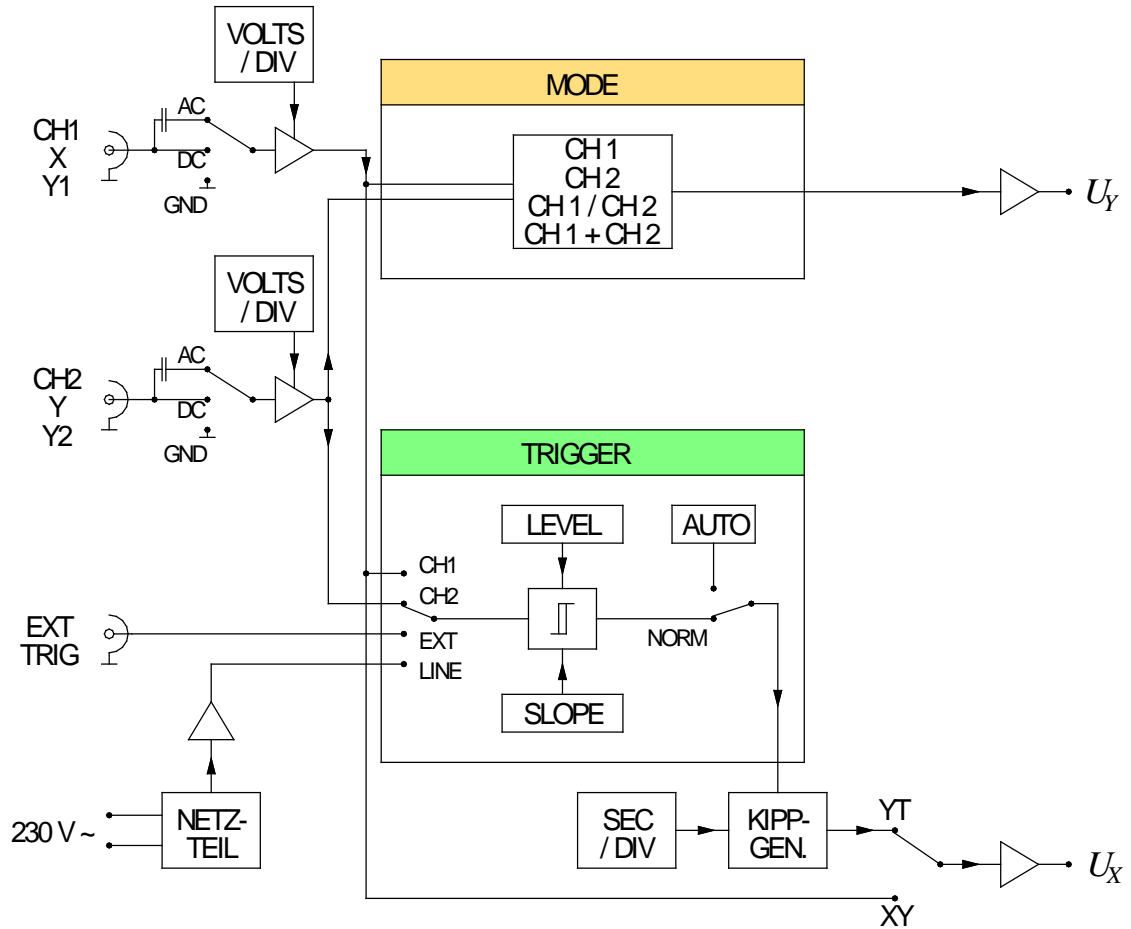


Abb. 3: Blockschaftbild der wichtigsten Funktionseinheiten eines Oszilloskops. Bezeichnungen siehe Text und Abb. 4.

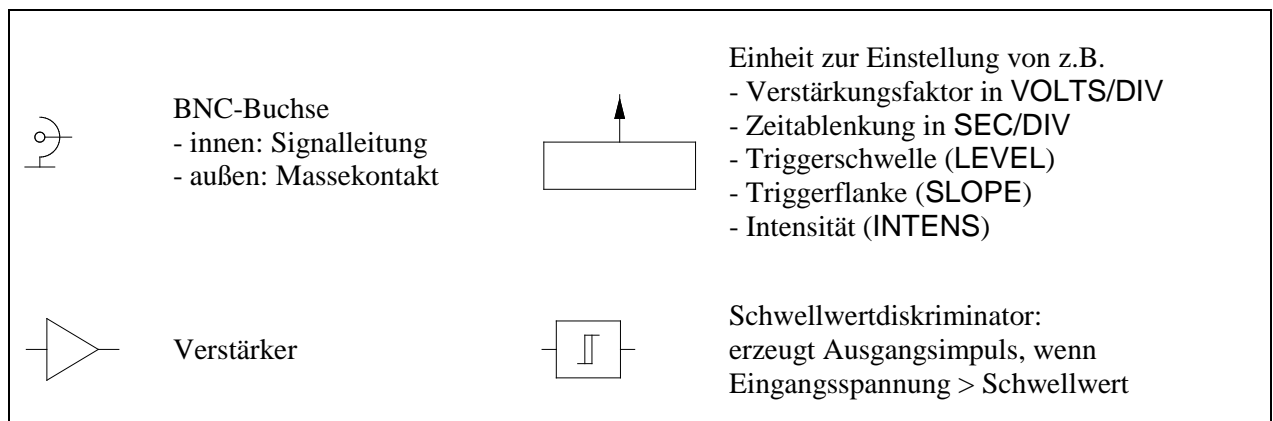


Abb. 4: Erklärung von Blockschaftbild-Elementen.

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 zeigt in einem Blockschaltbild die wichtigsten (*nicht alle!*) Funktionseinheiten für die Ansteuerung der einzelnen Elemente der Oszilloskoprhre. 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 CH1<sup>2</sup> 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 DC<sup>3</sup> des Kanal-Eingangsschalters gelangt das jeweilige Eingangssignal direkt auf einen Eingangsverstärker, in der Schalterstellung AC<sup>4</sup> nur sein Wechselspannungsanteil<sup>5</sup>. In der Stellung GND (Ground) wird der Eingang auf Massepotenzial gelegt.

Mit dem Drehschalter VOLTS/DIV wird der Verstärkungsfaktor des Eingangsverstärkers variiert und festgelegt, wie viel Volt (VOLTS) des Eingangssignals zu einer Elektronenstrahlablenkung 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.

<sup>2</sup> In der Schriftart ARIAL gesetzte Bezeichnungen entsprechen den Beschriftungen auf der Frontplatte des Oszilloskops.

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

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

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

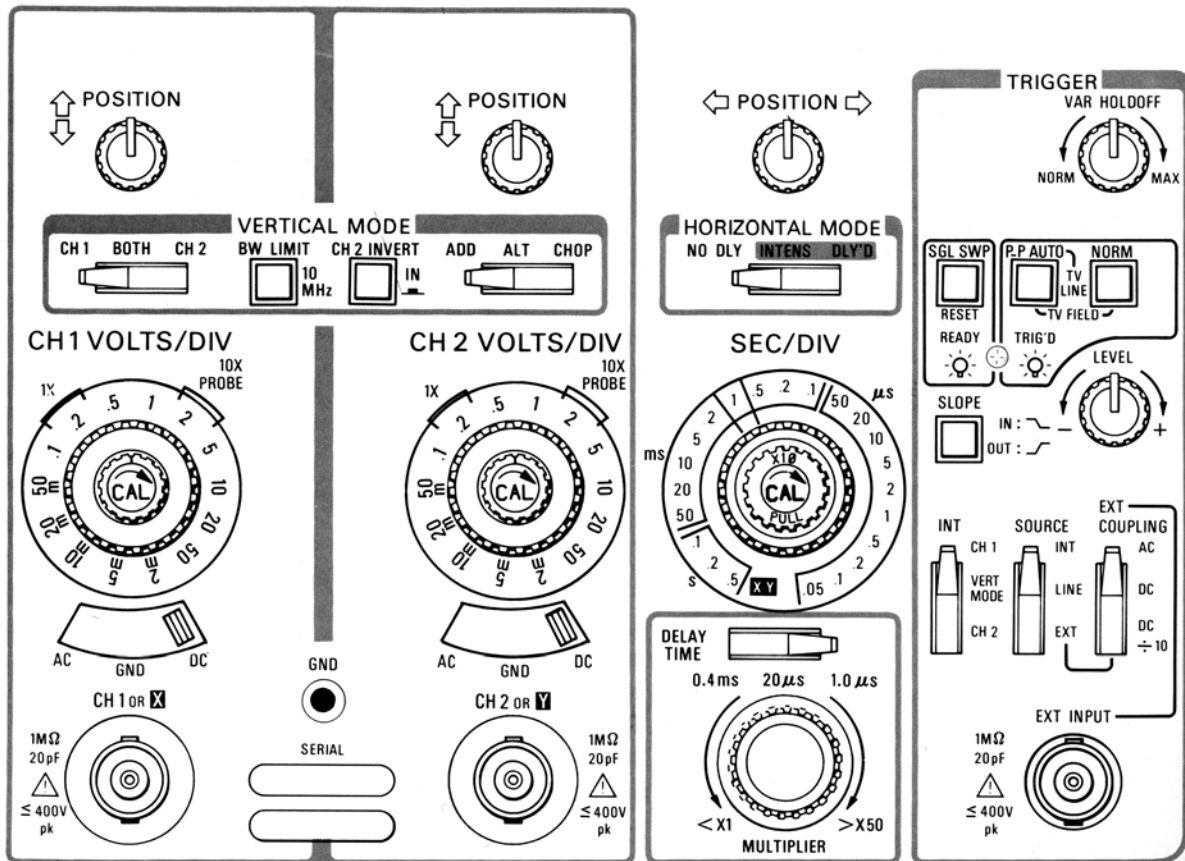


Abb. 5: Frontansicht der Steuereinheiten des Elektronenstrahl-Oszilloskops TEKTRONIX 2213A (Quelle: TEKTRONIX-Manual).

### 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  $t_d = m t_e$ .

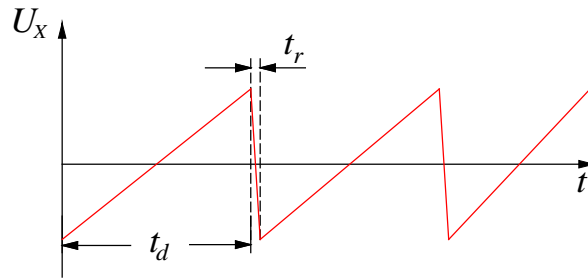


Abb. 6: Sägezahnspannung des Kippgenerators. Während der Zeit  $t_d$  läuft der Elektronenstrahl mit gleichmäßiger Geschwindigkeit von links nach rechts, während der Zeit  $t_r$  läuft er von rechts nach links an den Bildanfang zurück. Durch Verringerung von  $U_w$  wird erreicht, dass der Strahl während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

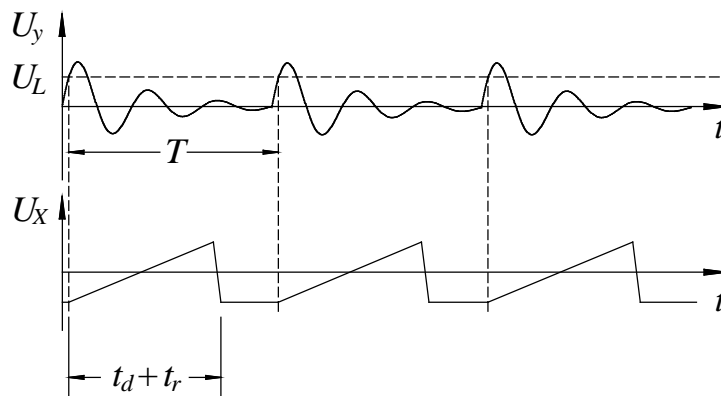


Abb. 7: Signaltriggerung. Oben Eingangssignal  $U_y(t)$ , unten Signal  $U_x(t)$  des Kippgenerators.  $U_L$ : Trigger-Level.

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

- Im **NORMAL**-Modus kann eingestellt werden, auf welches Signal getriggert (synchronisiert) werden soll. Möglich sind die **INTERne** Triggerung auf ein an **CH1** oder **CH2** anliegendes Signal, auf ein **EXTERne** 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 **NORMAL**-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  $\omega$  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  $\varphi$  (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. VOLTS/DIV, SEC/DIV, LEVEL,...) und Tasten (z.B. CH1/2 MENU, TRIG MENU, CURSOR,...), s. Abb. 9 und Abb. 10, 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. 11, Abb. 12, Abb. 13).

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

Die Umwandlung *analog*  $\rightarrow$  *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*<sup>6</sup> 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

---

<sup>6</sup> Weitere Details zum Abtasttheorem und zum Aliasing werden im späteren Versuch „Fourieranalyse“ behandelt.

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

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

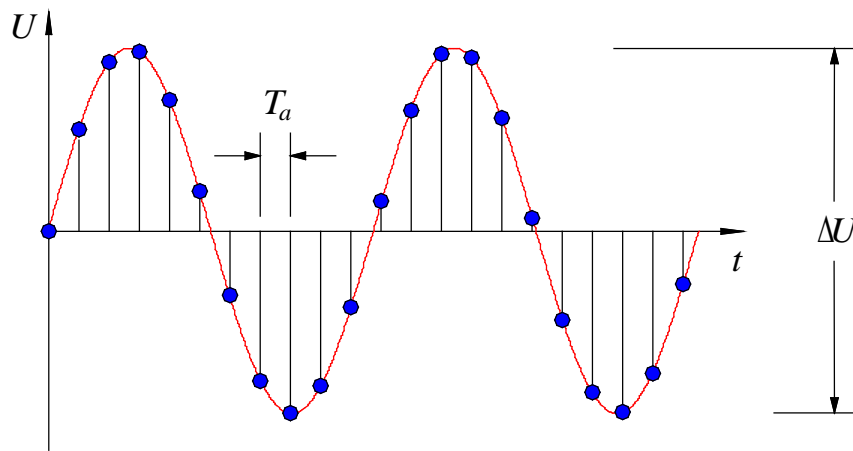


Abb. 8: Abtastung eines Sinussignals (rot). Die Abtastpunkte (blau) haben den zeitlichen Abstand  $T_a = 1/f_a$  voneinander.  $\Delta U$  gibt die maximale Spannungsdifferenz im dargestellten Signal an.

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 VOLTS/DIV-Schalter 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 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 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  $160 \text{ mV} / 2^8 \approx 0,63 \text{ mV}$ .

Für Messungen mit möglichst hoher Auflösung ist es deshalb wichtig, die Eingangssignale über die richtige Einstellung am VOLTS/DIV-Schalter immer soweit 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 Bildschirm mit z.B. 320 (horizontal)  $\times$  240 (vertikal) Pixeln.

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. 11). Mit Hilfe des HORIZONTAL POSITION-Knopfes kann dieser Zeitpunkt nach links und rechts verschoben werden.



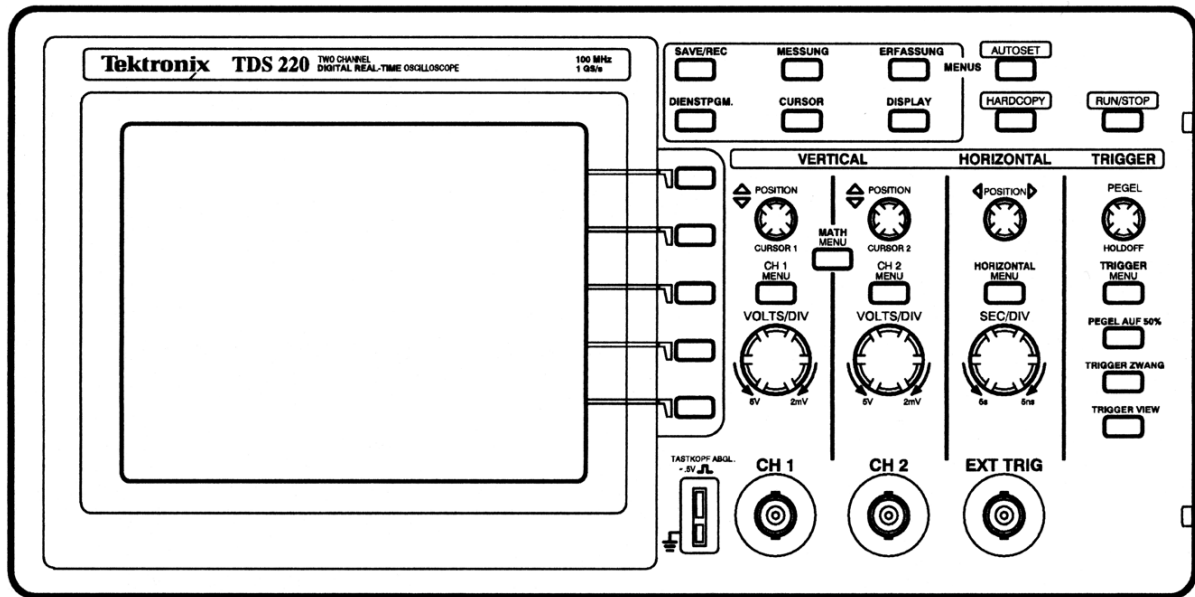


Abb. 9: Frontansicht des Digital-Oszilloskops TEKTRONIX Typ TDS 220 (Quelle: TEKTRONIX-Manual).

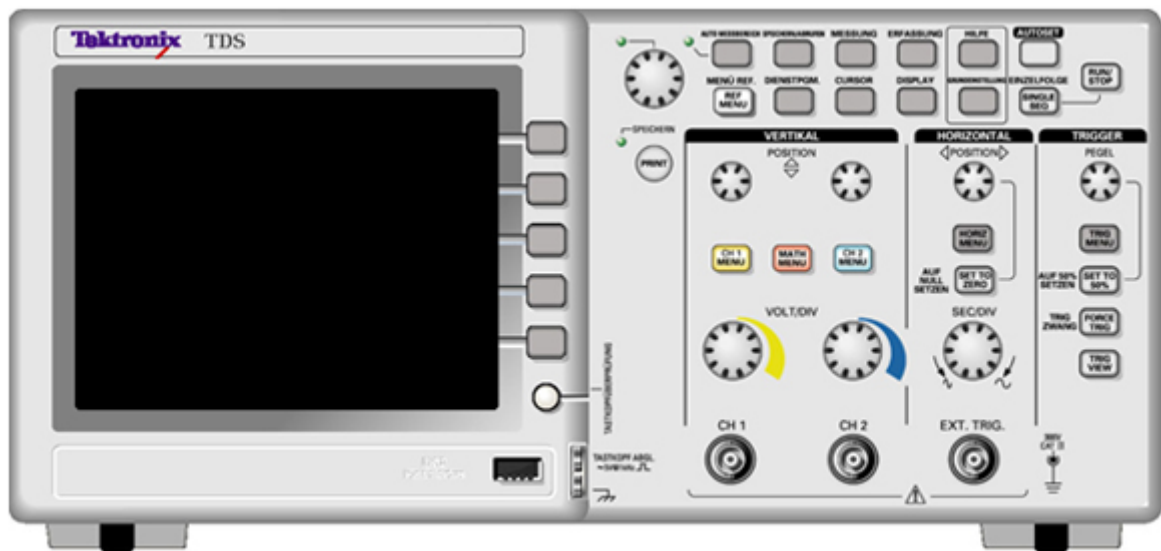


Abb. 10: Frontansicht des Digital-Oszilloskops TEKTRONIX TDS 1012B (Quelle: TEKTRONIX-Manual).  
Die Modelle TDS 1012, TDS 1012B und TDS 2012C verfügen über die Möglichkeit der Datenspeicherung auf einer SD-Karte bzw. einem USB-Speicherstick.

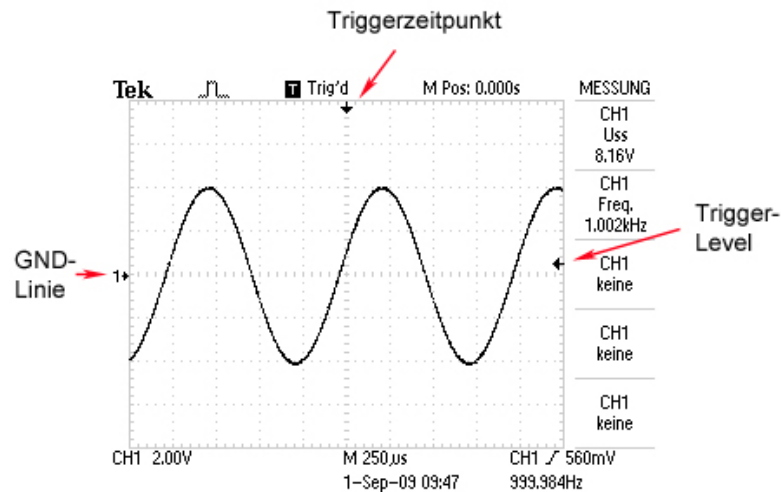


Abb. 11: Bildschirmfoto des Digital-Speicher-Oszilloskops TEKTRONIX TDS 1012, mit dem eine sinusförmige Wechselspannung an CH1 gemessen wird. Durch Aktivierung der Funktion MESSUNG werden am rechten Bildrand der Spitze-Spitze-Wert  $U_{SS}$  der Spannung (8,16 V) sowie ihre Frequenz (1,002 kHz) ausgegeben. Unten wird die Einstellung der Parameter VOLTS/DIV (CH1 2.00V) und SEC/DIV (M 250µs) sowie die Höhe des TRIGGER LEVELs ( $\sqrt{}$  560mV) angezeigt. Das Zeichen  $\sqrt{}$  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 Menü gesteuert. Nach der Betätigung einer Taste wie CH1 MENU, MESSUNG / MEASURE, ERFASSUNG / ACQUIRE, DISPLAY usw. erscheint in der rechten Spalte des Bildschirms ein Menü mit fünf untereinander angeordneten Feldern. Abb. 12 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 → AC → GND → DC → AC → GND →... Weitere Menüs sind in Abb. 13 dargestellt.

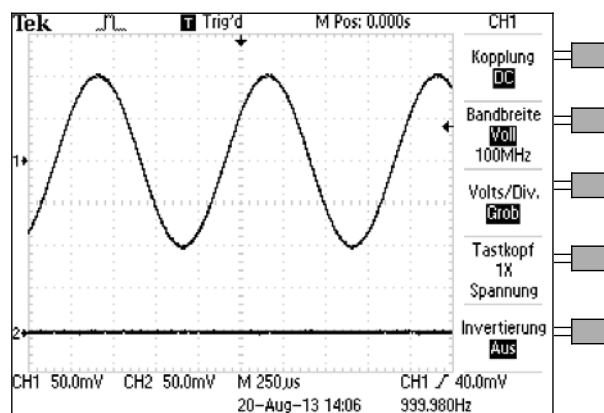


Abb. 12: Menü auf dem Bildschirm (rechte Spalte) nach Betätigung der Taste CH1 MENU. Rechts daneben die Tasten zur Änderung der Menüauswahl in den einzelnen Feldern.

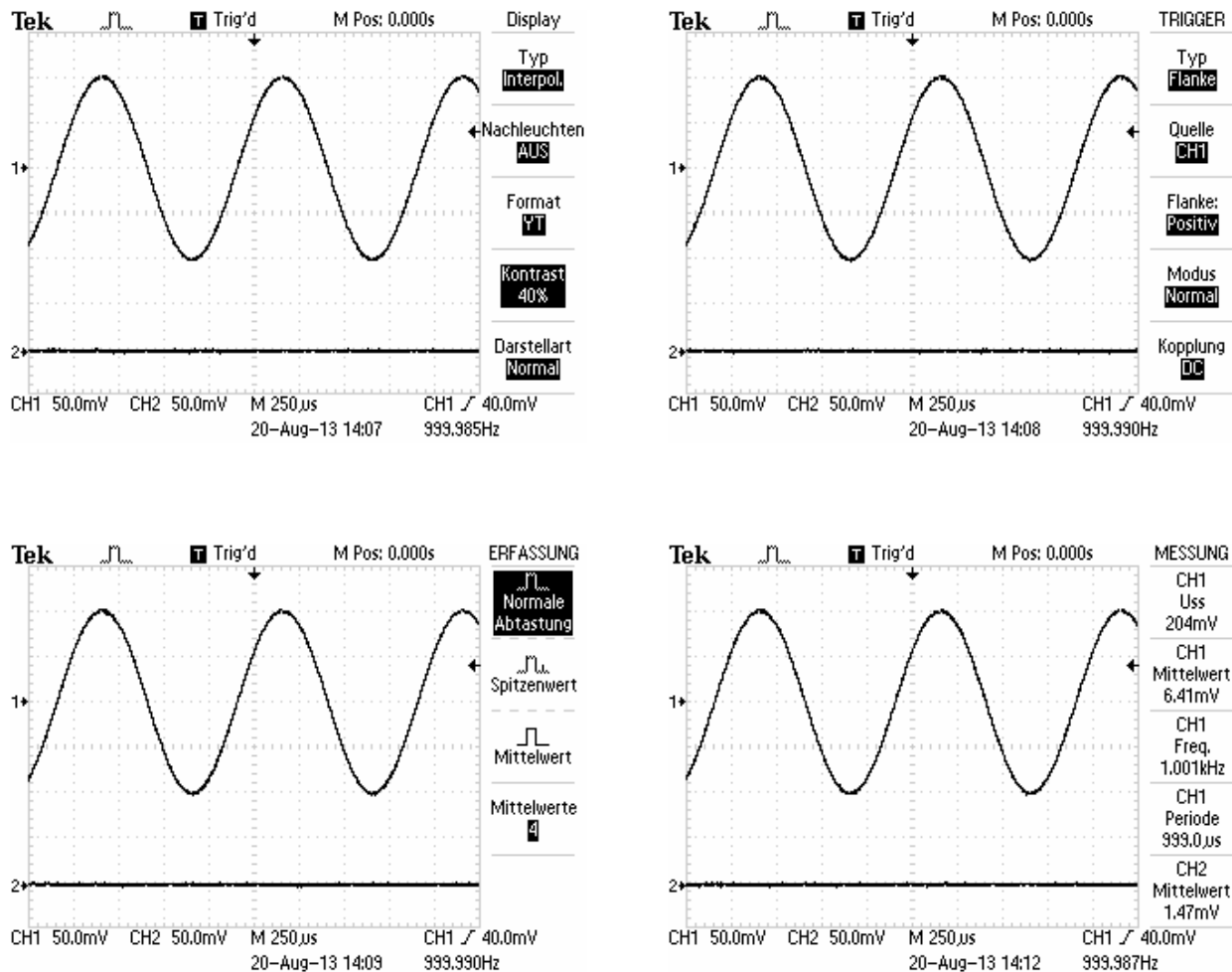


Abb. 13: Menüs nach Betätigung unterschiedlicher Funktionstasten. Von links nach rechts und von oben nach unten sind dargestellt: Menü DISPLAY (u.a. Umschaltung zwischen YT- und XY-Betrieb), Menü TRIGGER, Menü ERFASSUNG und Menü MESSUNG.

### 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 MESSUNG / MEASURE. Die Ergebnisausgabe erfolgt jeweils am rechten und unteren Rand der Anzeige. Abb. 11 und Abb. 13 unten rechts zeigen Beispiele.

Nichtperiodische Signale oder einzelne Spannungs- und Zeitwerte lassen sich mithilfe des CURSOR-Menüs messen (Abb. 14). 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 der POSITION-Knöpfe (Typ TDS 1012) oder mit einem separaten Drehknopf (Typ TDS 1012B / 2012C) verschieben. Die zu den Cursorpositionen gehörenden Messwerte werden jeweils in Anzeigefeldern am rechten Bildrand ausgegeben.

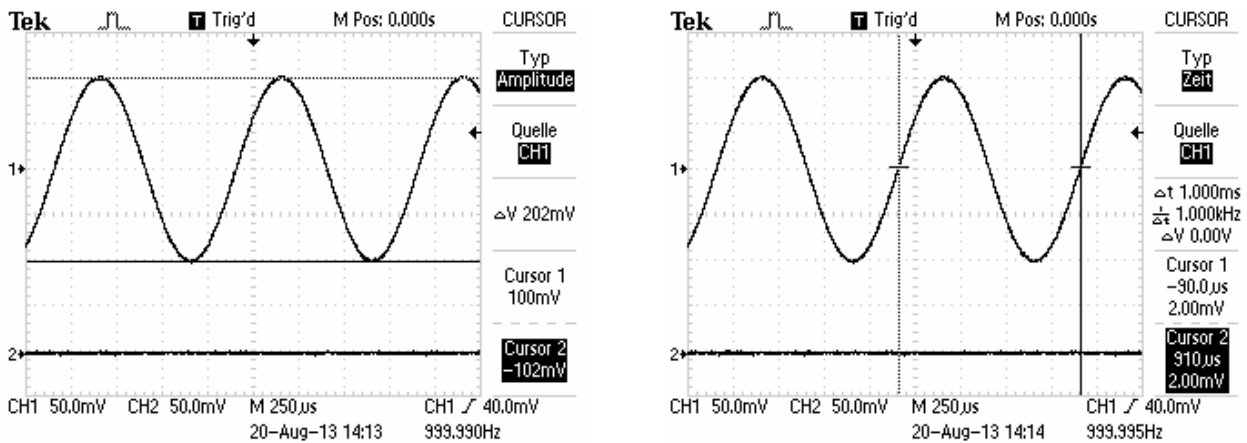


Abb. 14: CURSOR-Menüs. Links zwei Spannungscursor (Typ Amplitude), die die Maxima (CURSOR 1, 100 mV) und die Minima (CURSOR 2, -102 mV) des Signals an CH1 markieren.  $\Delta V$  zeigt die Spannungsdifferenz beider Cursorwerte an (202 mV). Rechts zwei Zeitcursor (Typ Zeit), die den Beginn (CURSOR 1, -90  $\mu$ s) und das Ende (CURSOR 2, 910  $\mu$ s) einer Periode des Signals an CH1 markieren.  $\Delta t$  zeigt die Zeitdifferenz beider Cursorwerte an (1.000 ms).

## 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 (PEGEL / LEVEL, FLANKE / SLOPE,...) unter denen eine einmalige Signalaufzeichnung erfolgen soll. Durch Betätigung der Taste RUN / STOP bzw. SINGLE SEQ 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 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!

Im Laufe des Studiums wird man immer wieder mit Oszilloskopen arbeiten müssen, die jeweils anders aussehen und unterschiedlich in ihrer Bedienung sind. Es wäre daher falsch, sich im Praktikum an nur einen Gerätetyp zu gewöhnen. Im Gegenteil, man sollte im eigenen Interesse häufig zwischen verschiedenen Modellen wechseln, um genügend Routine beim Umgang mit den Geräten zu erwerben.

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 DISPLAY) 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 OUT <sup>7</sup> 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. 15 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 (TRIG MENU), der Triggerzeitpunkt soll am linken Bildrand liegen.

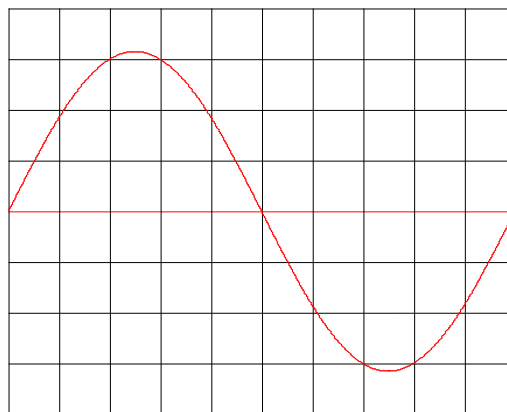


Abb. 15: Oszilloskopbild eines Sinussignals mit Grundlinie (rot). Jedes Kästchen hat die Größe  $1 \text{ DIV} \times 1 \text{ DIV}$ .

Das Sinussignal soll am linken Rand nacheinander bei einem Argument (Phasenwinkel) von  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$  und  $270^\circ$  beginnen, ohne dass die Einstellung der HORIZONTAL POSITION am Oszilloskop dabei verändert wird. Wie müssen der PEGEL / LEVEL und die FLANKE / SLOPE der

<sup>7</sup> Siehe Erläuterungen zu den Ausgangssignalen eines FG im Kapitel „Zum Aufbau elektrischer Schaltungen...“ dieses Skriptes.

Triggereinheit dazu eingestellt werden? (Darstellung der Ergebnisse in Tabellenform; Trigger-Level für die jeweiligen Phasenwinkel ausrechnen, am Oszilloskop einstellen und in die Tabelle eintragen.)

### 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. 16) 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 4:

- 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 Rauschanteil durch Mittelwertbildung verringern. Dazu wählt man die Betriebsart **ERFASSUNG / ACQUIRE** → **MITTELWERT**, in der die Signale über 4, 16, 64 oder 128 Zeitintervalle der Länge  $\Delta t$  gemittelt werden können.  $\Delta t$  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 **NORMALE ABTASTUNG** und **MITTELWERT** um, variieren Sie die Zahl der Zeitintervalle, über die gemittelt wird und dokumentieren Sie die Änderungen in den dargestellten Signalen.

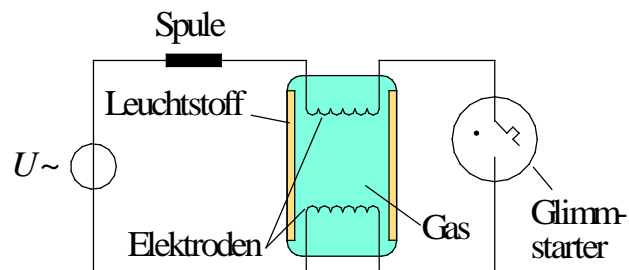


Abb. 16: Blockschaltbild einer Leuchtstofflampe.

#### Frage 5:

- Abb. 16 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. 17; Genauigkeit der Widerstände  $\pm 1\%$ ).<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Zur Vermessung der Netzspannung wird ein Spannungsteiler statt eines Netztransformators benutzt, um die Form der Netzspannung nicht zu verfälschen.

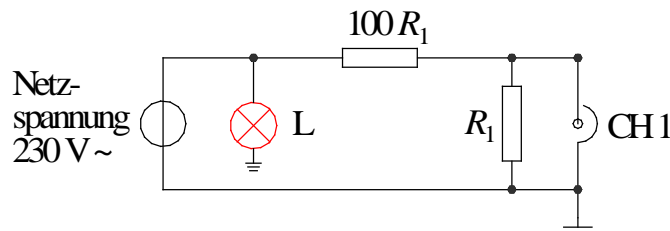


Abb. 17: Hochohmiger Spannungsteiler zur Teilung der Netzspannung mit Kontrolllämpchen L (rot).

**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 6:**

- 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 7:**

- 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 8:**

- Der Spannungsverlauf  $U(t)$  einer gedämpften harmonischen Schwingung (siehe Abb. 18) mit der Anfangsamplitude  $U_0$ , der Kreisfrequenz  $\omega$  und der Dämpfungskonstanten  $\alpha$  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. 18). 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 einer weiteren der Anfang auf dem Schirm zu sehen ist. Anschließend werden folgende Signaldaten gemessen:

- a) Frequenz der gedämpften Schwingung,
- b) Spannungsamplituden  $U_i$  der ersten 5 Teilschwingungen.

Stellen Sie  $U_i$  als Funktion von  $i$  grafisch dar (linear und halblogarithmisch) und vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den Erwartungen gemäß Frage 8.

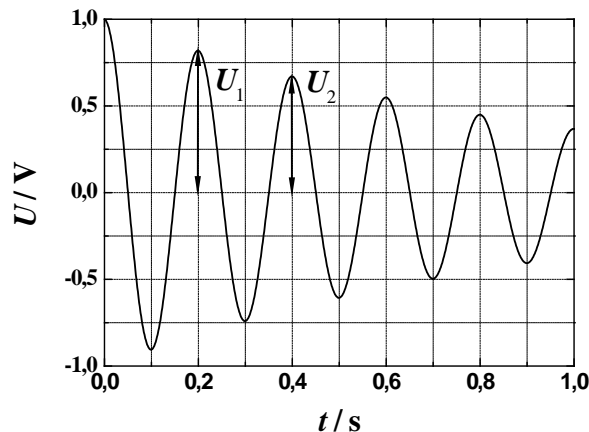


Abb. 18: Gedämpfte harmonische Schwingung gem. Gl. (6).  $U_0 = 1\text{ V}$  ist die Anfangsamplitude,  $U_1$  und  $U_2$  sind die Amplituden der beiden nachfolgenden Teilschwingungen.

### 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  $\Delta T$ , um die der Abstand zwischen aufeinander folgenden Stroboskopblitzen mit dem mittleren Impulsabstand  $\bar{T}$  variiert (s. Abb. 19).

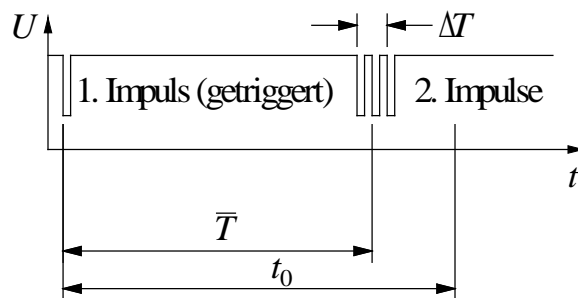


Abb. 19: Oszilloskopbild einer zeitlich schwankenden Impulsfolge.

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 (Taste **SINGLE SEQ** beim Typ TDS 1012 / 1012B bzw. Triggermodus **SINGLE SHOT** beim Typ TDS 210/220). Dadurch wird erreicht, dass nach Betätigung der **RUN/STOP**-Taste jeweils *ein* Impulsverlauf gespeichert und dargestellt wird, 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 **STOP**. Mit



Hilfe der Zeitcursor kann der Impulsabstand  $T$  zwischen dem ersten Impuls, auf den getriggert wurde, und dem zweiten Impuls vermessen werden. Durch mindestens zehnmäßige Wiederholung der Messung (jeweils erneut die RUN/STOP-Taste betätigen) wird ein brauchbarer Schätzwert für das Zeitintervall  $\Delta T$  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 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  $50\ \Omega$ -Widerstand verbindet und die Spannung über diesem Widerstand misst. Man spricht in dem Fall von einem  $50\ \Omega$ -Abschluss des Detektors<sup>9</sup>. Der physikalische Grund für diese Beschaltung wird bei den späteren Versuchen „Messung von Kapazitäten....“ und „Sensoren...“ klar werden.

Als Dauer des Lichtblitzes soll die 10%-Breite  $t_b$  des aufgezeichneten Spannungsimpulses angegeben werden, wie sie in Abb. 20 definiert ist. Eine Skizze bzw. ein Bildschirmfoto (vgl. Kap. 4) des aufgezeichneten Impulses wird dem Protokoll beigelegt.

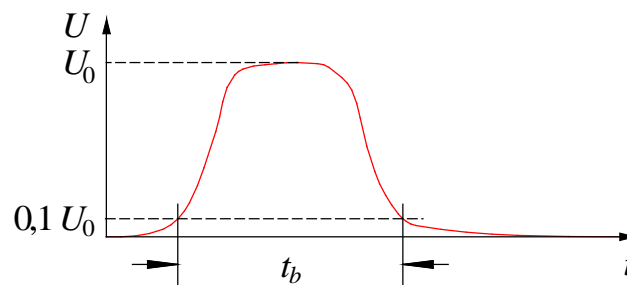


Abb. 20: Zur Definition der 10%-Breite  $t_b$  eines Spannungsimpulses  $U(t)$  mit der Amplitude  $U_0$ .

### 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 9:

- 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

<sup>9</sup> Ein  $50\ \Omega$ -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  $50\ \Omega$ -Widerstand an, an den anderen das Verbindungskabel zum Oszilloskop.

$f_2 = (25, 50, 100, 150, 200)$  Hz zu erzeugen. Die entstehenden Bilder sollen dokumentiert und interpretiert werden.

**Frage 10:**

- 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	→ TIFF	
Verzeichnis auswählen	→ GPRnn <sup>10</sup>	→ Verzeichnis wechseln

Bild speichern:

Speichern / PRINT → TEKnnnn.TIF

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

---

<sup>10</sup> nn ist die Gruppennummer; Auswahl mit dem Drehknopf oben links.