



Hochschule Karlsruhe  
Technik und Wirtschaft

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

**Näher dran.**

# Labor

## Grundlagen Elektrotechnik

### Versuch 3

- Oszilloskop -

#### Gruppe

Name	Vorname	Immatrikulations- nummer	Unterschrift

#### Leistungsnachweis

Mündlicher Test / Online-Test	Datum Versuchs- durchführung	Nummer Versuchschassis	Laborbericht

## Änderungsindex

Version	Datum	Verfasser	Änderungen
3.0	01.09.2017	Prof. Strohrmann, Raffael Naida	Allgemeine Überarbeitung
2.0	30.09.2016	Boris Kuznetsov, Vivian Becher, Prof. Strohrmann	Verbesserungen bezüglich Layout, Abbildungen und Aufgaben
1.0	21.08.2010	Prof. Wolfrum	Erstausgabe

# Inhalt

<b>Hinweis zum Labor .....</b>	<b>4</b>
<b>Einleitung und Zielsetzung des Versuchs .....</b>	<b>4</b>
<b>Allgemeiner Hinweis .....</b>	<b>4</b>
<b>1 Erläuterungen .....</b>	<b>5</b>
1.1 Berechnung des Effektivwertes .....	5
1.2 Eingangskopplung bei einem Oszilloskop .....	7
1.3 Messung magnetischer Größen im X-Y-Betrieb .....	9
1.4 Ultraschallmessung .....	14
<b>2 Aufgaben zur Vorbereitung .....</b>	<b>18</b>
2.1 Effektivwertberechnung .....	18
2.2 Analog-Oszilloskop .....	18
2.3 Trigger Oszilloskop .....	18
2.4 Prüfen der ermittelten Bedingungen .....	19
<b>3 Aufgabenstellung und Auswertung .....</b>	<b>20</b>
3.1 Versuchsaufbau .....	20
3.2 Darstellung eines unbekannten Signals .....	21
3.3 Untere Grenzfrequenz bei AC-Kopplung .....	21
3.4 Hysteresekurve .....	21
3.5 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit .....	22
3.6 Entfernungsmessung mit Ultraschall .....	22
<b>4 Dokumentationsvorlagen .....</b>	<b>23</b>
4.1 Aufgabe 3.2: Darstellung eines unbekannten Signals .....	23
4.2 Aufgabe 3.3: Untere Grenzfrequenz bei AC-Kopplung .....	24
4.3 Aufgabe 3.4: Hysteresekurve .....	25
4.4 Aufgabe 3.5: Bestimmung der Schallgeschwindigkeit .....	26
4.5 Aufgabe 3.6: Entfernungsmessung mit Ultraschall .....	26
<b>5 Literatur .....</b>	<b>27</b>

## Hinweis zum Labor

Ziel des Labors „Grundlagen der Elektrotechnik“ ist es, den Studierenden praktische Kenntnisse im Aufbau und der Analyse elektrotechnischer Schaltungen zu vermitteln. Hierzu gehören neben dem Schaltungsaufbau auch der Umgang mit Messgeräten sowie die Dokumentation und Validierung der gemessenen Ergebnisse. Die gestellten Aufgaben sind als Vorbereitung zur Durchführung des Versuchs zu verstehen. Erarbeiten Sie die Lösungen in Ihrer Gruppe gemeinsam vor Versuchsbeginn und kommen Sie nicht unvorbereitet zum Versuch. Die Prüfungsleistung gilt als erbracht, wenn

- der Online-Test bestanden wurde,
- sowohl die Versuchsvorbereitung als auch die Versuchsergebnisse sauber in einem Laborbericht dargestellt sind,
- eine vom Prüfer ausgewählte Aufgabenstellung aus dem Aufgabenumfang der Vorbereitung ausführlich mündlich dargestellt wurde.

Theoretische Grundlagen zu den Versuchen finden Sie in [GET1], [GET2], [Felder], [Messtechnik], [Führ06], [Moel06], [Heri16].

## Einleitung und Zielsetzung des Versuchs

Das Oszilloskop ist ein wichtiges und vielseitiges Hilfsmittel in der Elektrotechnik. In diesem Versuch wird die grundlegende Bedienung des analogen beziehungsweise digitalen Oszilloskops vorgestellt. Es werden Kenngrößen aus den Vorlesungen Wechselstromtechnik und Felder gemessen, die zunächst unbekannte Signale darstellen. Der zeitliche Verlauf der Signale wird mit dem Oszilloskop erfasst und dargestellt. Auf Basis dieser Verläufe lassen sich gesuchte Größen bestimmen und anschließend durch Rechnung verifizieren. Zusätzlich werden in diesem Versuch allgemeine Eigenschaften des Oszilloskops diskutiert, die Sie messtechnisch prüfen sollen.

## Allgemeiner Hinweis

Analoge Oszilloskope mit Kathodenstrahlröhre sollen niemals längere Zeit bei hoher Strahlintensität ein konstantes Schirmbild anzeigen. Die Intensität ist daher immer so niedrig zu wählen, dass sich ein gerade noch gut ablesbares Bild ergibt. Bei Kontrolle der Nulllage im X-Y-Betrieb ist die Strahlintensität immer auf das absolut notwendige Maß zu reduzieren.

# 1 Erläuterungen

## 1.1 Berechnung des Effektivwertes

Im ersten Versuchsteil soll eine unbekannte Mischspannung hinsichtlich ihrer Bestandteile analysiert werden. Im Allgemeinen besteht ein zeitlich veränderliches Signal  $u(t)$  aus einem sogenannten Gleichanteil  $U_{DC}$  und einem Wechselanteil  $u_{AC}(t)$ . Die Überlagerung beider Signale führt zum Gesamtsignal  $u(t)$ .

$$u(t) = U_{DC} + u_{AC}(t) \quad (1.1)$$

Die Begriffe Gleich- und Wechselanteil eines Signals sind in Bild 1.1 grafisch verdeutlicht.

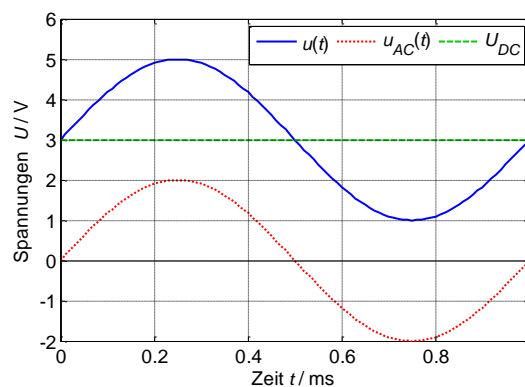


Bild 1.1: Signal mit Gleichanteil und einer harmonischen Schwingung

Ein periodischer Wechselanteil kann als Überlagerung harmonischer Schwingungen dargestellt werden. Die einzelnen Schwingungen besitzen dabei die Form

$$u_{nAC}(t) = \hat{U}_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t + \varphi_n) \quad (1.2)$$

$\hat{U}_n$  ist die Amplitude der Schwingung mit der Frequenz  $\omega_n$  und dem Phasenwinkel  $\varphi_n$ . Die Überlagerung der  $N$  harmonischen Schwingungen kann mathematisch als Summe dargestellt werden.

$$u_{AC}(t) = \sum_{n=1}^N \hat{U}_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t + \varphi_n) \quad (1.3)$$

Bei der Berechnung von Wechselstromkreisen ist der Effektivwert einer zeitabhängigen Größe, wie beispielsweise Spannung oder Strom, von großer Bedeutung. Der Effektivwert  $U_{RMS}$  einer zeitabhängigen Spannung  $u(t)$  ergibt sich aus der Gleichung

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) dt} \quad (1.4)$$

und gilt für beliebige periodische Signale. Unter der Annahme, dass der Wechselanteil  $u_{AC}(t)$  aus nur einer harmonischen Schwingung besteht ( $N = 1$ ), gilt

$$U_{RMS}^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left( U_{DC} + \hat{U}_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \varphi_1) \right)^2 dt \quad (1.5)$$

Anwendung der binomischen Formel und Aufteilen des Integrals führt zu

$$U_{RMS}^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T U_{DC}^2 dt + \underbrace{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T 2 \cdot U_{DC} \cdot \hat{U}_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \varphi_1) dt}_{=0} + \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left( \hat{U}_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \varphi_1) \right)^2 dt \quad (1.6)$$

In Gleichung (1.6) entfällt das mittlere Integral, da die Integration über ein Vielfaches der Periodendauer bei einer harmonischen Schwingung null ergibt. Weiteres Auflösen führt zur Gleichung für den Effektivwert  $U_{RMS}$ .

$$U_{RMS}^2 = U_{DC}^2 + U_{1RMS}^2 \quad (1.7)$$

Die durchgeführte Berechnung gilt zunächst für einen Wechselanteil, der aus einer Schwingung ( $N=1$ ) besteht. Es kann aber gezeigt werden, dass dieser Zusammenhang auch allgemein gültig ist, sodass sich die in Gleichung (1.8) dargestellte verallgemeinerte Form ergibt.

$$U_{RMS} = \sqrt{U_{DC}^2 + \sum_{n=1}^N U_{nRMS}^2} \quad (1.8)$$

Die Effektivwerte der einzelnen Teilsignale addieren sich geometrisch zum resultierenden Effektivwert des Gesamtsignals. Mit bekannten Werten der einzelnen Teilschwingungen lässt sich somit der gesuchte Effektivwert bestimmen.

## 1.2 Eingangskopplung bei einem Oszilloskop

Wird ein Signal mit einem Oszilloskop gemessen, kann dies bei unterschiedlichen Kopplungsarten des Eingangskanals erfolgen. Während bei der DC-Kopplung das zu messende Signal ungefiltert aufgenommen wird, erfolgt die Einkopplung des Signals bei AC-Kopplung über ein Hochpassfilter. Das Filter bewirkt eine Unterdrückung des Gleichanteils  $U_{DC}$ . Bild 1.2 zeigt die entsprechende Schaltung.

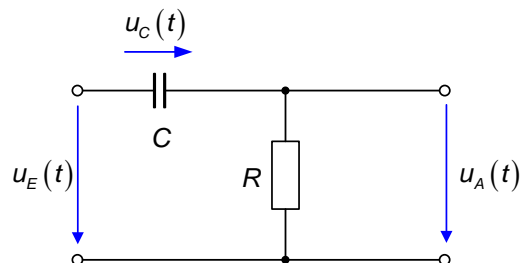


Bild 1.2: Hochpassfilter bei AC-Kopplung

Bei der Messung niederfrequenter Signale mit eingeschalteter AC-Kopplung muss besonders die Grenzfrequenz des Hochpasses beziehungsweise die damit verbundene Dämpfung beachtet werden. Für die Ausgangsspannung eines RC-Hochpasses gilt bei Anregung mit einem für  $t \geq 0$  konstanten Eingangssignal

$$u_A(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1.9)$$

Der Verlauf ergibt sich aus dem Ladestrom  $i(t)$ , der die Kapazität  $C$  auflädt. Mit steigender Zeit nimmt der Ladestrom ab. Damit sinkt auch der Spannungsabfall am Widerstand  $R$ , der gleichzeitig die Ausgangsspannung  $u_A(t)$  ist. Das beschriebene Verhalten ist in Bild 1.3 dargestellt.

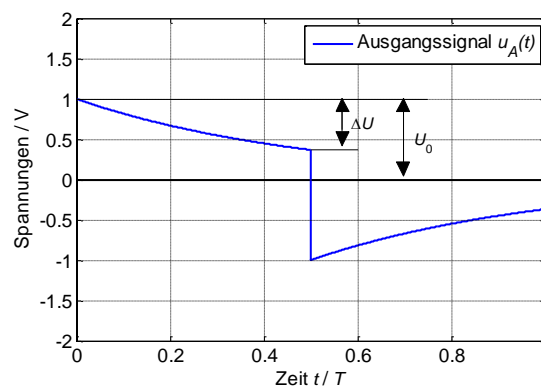


Bild 1.3: Signalverlauf bei AC-Kopplung

Anhand des dargestellten Spannungsverlaufs ist es möglich, die untere Grenzfrequenz des Hochpasses bei AC-Kopplung zu berechnen. Zur Herleitung werden die Zeitpunkte  $t = 0$  und  $t = T/2$  betrachtet. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  ist der Strom maximal groß, die Ausgangsspannung beträgt  $U_0$ . Zum Zeitpunkt  $t = T/2$  ist die Ausgangsspannung auf den Wert  $U_0 - \Delta U$  gesunken. Es gilt

$$U_0 - \Delta U = U_0 \cdot e^{-\frac{T}{2RC}} \quad (1.10)$$

Nach Auflösen der Exponentialfunktion können mit dem Zusammenhang

$$\omega_G = \frac{1}{R \cdot C} \quad (1.11)$$

die Bauteilparameter  $R$  und  $C$  durch die Grenzfrequenz  $\omega_G$  ersetzt werden.

$$\ln\left(\frac{U_0 - \Delta U}{U_0}\right) = -\frac{T}{2} \cdot \omega_G = -\frac{T}{2 \cdot R \cdot C} = -\frac{f_G}{f} \cdot \pi \quad (1.12)$$

Gleichung (1.12) wird nach der gesuchten Grenzfrequenz aufgelöst. Damit ergibt sich

$$f_G = -\frac{f}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{U_0 - \Delta U}{U_0}\right) = \frac{f}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{U_0}{U_0 - \Delta U}\right) \quad (1.13)$$

Die Größe  $f$  stellt dabei die Frequenz des angelegten Rechtecksignals dar. Es gilt zu beachten, dass bei der Grenzfrequenz  $f_G$  das Messsignal bereits um 3 dB gedämpft beziehungsweise verfälscht wird. Bei Messungen in AC-Kopplung muss also im Besonderen die Frequenz des Messsignals und die Grenzfrequenz des Hochpassfilters beachtet werden. Idealerweise liegt die Frequenz des Messsignals einige Größenordnungen über der Grenzfrequenz.



### 1.3 Messung magnetischer Größen im X-Y-Betrieb

Mit Hilfe des Oszilloskops ist es möglich, eine Spannung  $u(t)$  über der Zeit  $t$  zu erfassen. Darüber hinaus können weitere physikalische Größen wie beispielsweise die magnetische Flussdichte  $B$  und die magnetische Feldstärke  $H$  dargestellt werden. Hierzu wird im Versuch die Funktion des X-Y-Betriebs verwendet, bei der eine Spannung  $U_Y$  als Funktion einer zweiten Spannung  $U_X$  aufgetragen werden kann.

#### 1.3.1 Hysteresekurven

Wichtige Größen des magnetischen Feldes sind die magnetische Feldstärke  $H$  sowie die magnetische Flussdichte  $B$ . Die Ursache des Magnetfeldes  $H$  um einen Leiter ist der in ihm fließende Strom  $I$ . In Bild 1.4 ist dieser Zusammenhang am Beispiel einer Spule veranschaulicht.

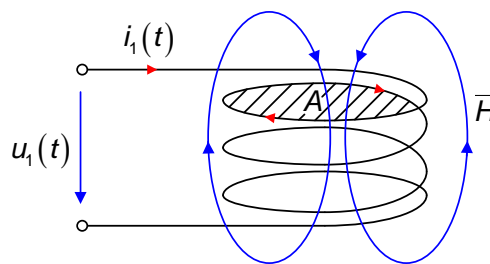


Bild 1.4: Magnetisches Feld bei einer Spule

Die magnetische Flussdichte beschreibt den magnetischen Fluss, der sich bei dem anliegenden magnetischen Feld  $H$  einstellt, bezogen auf eine Fläche  $A$ . Die magnetische Flussdichte und Feldstärke stehen im Idealfall in direkter und linearer Beziehung zueinander.

$$B = \mu_0 \cdot \mu_R \cdot H = \mu \cdot H \quad (1.14)$$

Die Konstante  $\mu_0$  ist die Permeabilität des Vakuums und die Materialkonstante  $\mu_R$  charakterisiert das von den Feldlinien durchsetzte Material. Beide Größen können zur Permeabilität  $\mu$  zusammengefasst werden. Bei wechselnden magnetischen Feldern in magnetischen Werkstoffen ist der Zusammenhang zwischen magnetischem Feld  $H$  und magnetischer Flussdichte  $B$  jedoch nichtlinear. Er wird mit einer sogenannten Hysteresekurve beschrieben, die exemplarisch in Bild 1.5 dargestellt ist.

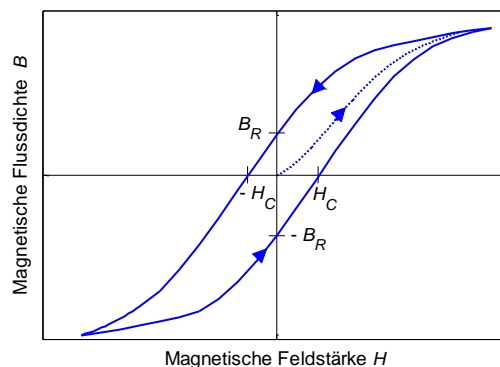


Bild 1.5: Magnetisierungskurve

Handelt es sich um einen entmagnetisierten Stoff, verläuft die Kurve zunächst entlang der gestrichelten Neukurve. Mit steigender Feldstärke  $H$  nimmt die Flussdichte zu, bis sich ein Sättigungseffekt

einstellt. Bei einer Verringerung der Feldstärke nimmt die Flussdichte ab. An der Stelle  $H = 0$  stellt sich die Remanenzflussdichte  $B_R$  ein. Durch Umpolen des Feldes wird die sogenannte negative Koerzitivfeldstärke  $-H_C$  erreicht. Die Flussdichte  $B$  ist in diesem Punkt null. Wird nach Erreichen der negativen Sättigung der Vorgang umgekehrt, ergeben sich daraus die negative Remanenzflussdichte  $-B_R$  und die positive Koerzitivfeldstärke  $H_C$ .

### 1.3.2 Messung von Hysteresekurven

Ziel des Laborversuchs ist die messtechnische Erfassung einer Hysteresekurve, wie sie in Bild 1.5 zu sehen ist. Als Messgerät wird ein Oszilloskop im X-Y-Betrieb verwendet. Zur Aufnahme der Hysteresekurve wird eine Schaltung benötigt, die so aufgebaut sein muss, dass die magnetische Feldstärke  $H$  und die magnetische Flussdichte  $B$  jeweils proportional zu einer messbaren Spannung sind. Bild 1.6 zeigt die in dem Versuch verwendete Schaltung zur Messung der Hysteresekurve.

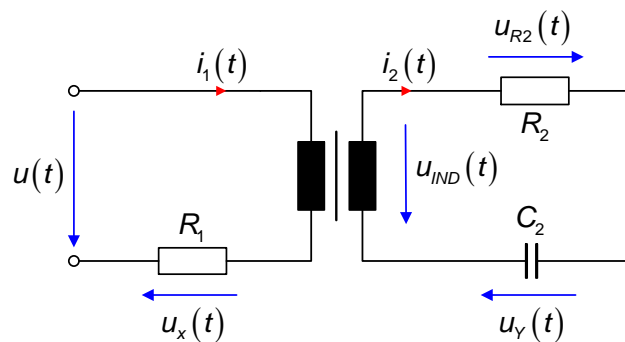


Bild 1.6: Schaltung zur Aufnahme der Hysteresekurve

Im Folgenden wird die Schaltung hinsichtlich der Zusammenhänge zwischen den magnetischen Größen und der jeweils zugehörigen Spannung untersucht. Die Schaltung besteht aus einem Transformator, den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  sowie dem Kondensator  $C_2$ . Zur Analyse der Schaltung wird zunächst der Transformator betrachtet, der durch eine zylindrische Spule mit der Windungszahl  $n$  auf der Primär- und Sekundärseite des gemeinsamen Eisenkerns beschrieben werden kann. Der Eisenkern besitzt dabei die Länge  $l$  und die Querschnittsfläche  $A$ , die als konstruktionsbedingte Größen vorgegeben sind.

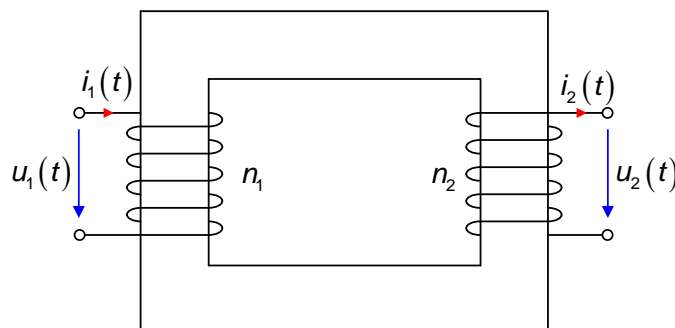


Bild 1.7: Transformator mit Eisenkern

Für die magnetische Feldstärke  $H(t)$  im Eisenkern gilt nach dem Durchflutungsgesetz

$$n_1 \cdot i_1(t) + n_2 \cdot i_2(t) = H(t) \cdot l \quad (1.15)$$

Zur Messung der Hysteresekurve soll die Schaltung auf der Primärseite einen linearen Zusammenhang zwischen der Spannung  $u_X(t)$  und der magnetischen Feldstärke  $H(t)$  herstellen. Allerdings zeigt Gleichung (1.15) auch eine Abhängigkeit der magnetischen Feldstärke  $H(t)$  vom Strom auf der Sekundärseite  $i_2(t)$ . Der Einfluss des Stromes  $i_2(t)$  auf die magnetische Feldstärke kann reduziert werden, indem der Strom  $i_2(t)$  durch den Widerstand  $R_2$  begrenzt wird. Es muss die Bedingung

$$n_1 \cdot i_1(t) \gg n_2 \cdot i_2(t) \quad (1.16)$$

erfüllt werden. In diesem Fall kann Gleichung (1.15) vereinfacht werden zu

$$n_1 \cdot i_1(t) = H(t) \cdot l \quad (1.17)$$

beziehungsweise

$$i_1(t) = \frac{H(t) \cdot l}{n_1} \quad (1.18)$$

Der auf der Primärseite fließende Strom  $i_1(t)$  hat den Spannungsabfall  $u_X(t)$  über dem Widerstand  $R_1$  zur Folge

$$u_X(t) = R_1 \cdot \frac{H(t) \cdot l}{n_1} \quad (1.19)$$

Gleichung (1.19) stellt somit für die Randbedingung  $n_1 \cdot i_1(t) \gg n_2 \cdot i_2(t)$  einen linearen Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke  $H(t)$  und der Spannung  $u_X(t)$  her. Die Spannung wird bei der Messung der Hysteresekurve auf der horizontalen Achse aufgetragen.

Die Sekundärseite der Schaltung soll einen linearen Zusammenhang zwischen der magnetischen Flussdichte  $B(t)$  und der Spannung  $u_Y(t)$  aufweisen. Durch die am Eingang der Schaltung angelegte Wechselspannung  $u(t)$  wird auf der Sekundärseite eine Spannung  $u_{IND}(t)$  induziert, die wiederum die Eingangsspannung für die RC-Kombination darstellt. Dieser Zusammenhang ist in Bild 1.8 zu sehen.

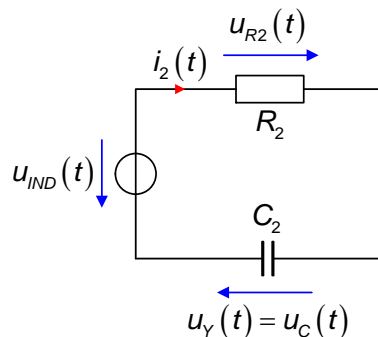


Bild 1.8: Schaltbild der Sekundärseite

Bei einer homogenen Flussdichte  $B(t)$  über der Fläche  $A$  ergibt sich die induzierte Spannung  $u_{IND}(t)$  aus der zeitlichen Ableitung der Flussdichte, multipliziert mit der Fläche  $A$  und der Windungszahl  $n_2$ .

$$u_{IND}(t) = n_2 \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} \quad (1.20)$$

Um die gesuchte Größe  $B(t)$  zu erhalten, muss die induzierte Spannung über der Zeit integriert werden.

$$\int_{-\infty}^t u_{IND}(\tau) d\tau = n_2 \cdot A \cdot B(t) \quad (1.21)$$

Zur Realisierung des Integrals in Gleichung (1.21) wird die Kapazität  $C_2$  verwendet. Für sie gilt

$$u_C(t) = \frac{1}{C_2} \cdot \int_{-\infty}^t i_2(\tau) d\tau \quad (1.22)$$

Um den Zusammenhang von Strom  $i_2(t)$  und Spannung  $u_{IND}(t)$  zu bestimmen, wird für die Schaltung aus Bild 1.8 ein Zeigerdiagramm erstellt.

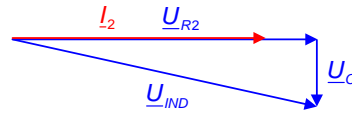


Bild 1.9: Zeigerdiagramm zur Ersatzschaltung der Sekundärseite

$\underline{U}_{R2}$  und  $\underline{i}_2$  sind in Phase, die Spannung  $\underline{U}_C$  eilt  $\underline{i}_2$  um  $90^\circ$  vor.  $\underline{U}_{IND}$  ergibt sich aus der Summe von  $\underline{U}_{R2}$  und  $\underline{U}_C$ . Damit  $\underline{i}_2$  und  $\underline{U}_{IND}$  näherungsweise in Phase sind, muss für die Beträge der Spannungen die Beziehung  $U_C \ll U_{R2}$  erfüllt sein. Über die Bauelementgleichungen

$$U_C = \frac{1}{\omega \cdot C_2} \cdot I_2 \quad (1.23)$$

und

$$U_{R2} = R_2 \cdot I_2 \quad (1.24)$$

ergibt sich aus Bild 1.9 die Bedingung

$$\frac{1}{\omega \cdot C_2} \ll R_2 \quad (1.25)$$

In dem Fall gilt für die induzierte Spannung

$$\underline{U}_{IND} \approx \underline{U}_{R2} = \underline{i}_2 \cdot R_2 \quad (1.26)$$

Mit Gleichung (1.22) berechnet sich das Integral aus Gleichung (1.21) zu

$$n_2 \cdot A \cdot B(t) = \int_{-\infty}^t u_{IND}(\tau) d\tau \approx \int_{-\infty}^t R_2 \cdot i_2(\tau) d\tau = R_2 \cdot C_2 \cdot u_C(t) = R_2 \cdot C_2 \cdot u_Y(t) \quad (1.27)$$

Auflösen nach der Spannung  $u_Y(t)$  liefert den gesuchten proportionalen Zusammenhang zur magnetischen Flussdichte  $B(t)$ .

$$u_v(t) = \frac{n_2 \cdot A}{R_2 \cdot C_2} \cdot B(t) \quad (1.28)$$

Die Spannung wird auf der vertikalen Achse aufgetragen.

## 1.4 Ultraschallmessung

Im letzten Versuchsabschnitt soll die Schallgeschwindigkeit in Luft gemessen und eine Entfernungsmessung durchgeführt werden. Hierzu werden zwei auf Schienen montierte Ultraschallkapseln verwendet, die in Bild 1.10 dargestellt sind.



Bild 1.10: Versuchsaufbau mit Ultraschallkapseln

Grundlage für den Versuchsteil Ultraschallmessungen ist ein Grundverständnis für die Schallausbreitung.

### 1.4.1 Schallausbreitung

Schallausbreitung wird mit Wellen beschrieben. Die Wellengleichung [Heri16]

$$y(t, x) = y_0 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \varphi_0\right) \quad (1.29)$$

beschreibt die Amplitude der Auslenkung  $y(t, x)$  zu einem Zeitpunkt  $t$  an einem Ort  $x$  mit der Amplitude  $y_0$  als Funktion der Periodendauer  $T$  und der Wellenlänge  $\lambda$ . Die Bedeutung von Gleichung (1.29) wird deutlich, wenn zwei Sonderfälle betrachtet werden.

#### Ausbreitung im Raum an einem Zeitpunkt $t_0$

Wird in Gleichung (1.29) die Zeit  $t$  konstant gehalten ( $t = t_0$ ), ergibt sich über der Raumrichtung  $x$  ein harmonisches Verhalten.

$$y(t_0, x) = y_0 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t_0}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \varphi_0\right) = y_0 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{\lambda} + \varphi_1\right) \quad (1.30)$$

Der Abstand zweier gleicher Zustände wird als Wellenlänge  $\lambda$  bezeichnet.

#### Verhalten an einem Ort $x_0$

Wird in Gleichung (1.29) der feste Ort  $x = x_0$  betrachtet, ergibt sich über der Zeit ein harmonisches Verhalten.

$$y(t, x_0) = y_0 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x_0}{\lambda}\right) + \varphi_0\right) = y_0 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T} + \varphi_2\right) \quad (1.31)$$

Das Wellenbild wiederholt sich nach einem Vielfachen der Periodendauer  $T$ .

Die Wellengleichung berücksichtigt demnach einerseits das zeitliche Verhalten, andererseits das räumliche Verhalten der Welle.

Wird ein Teilchen zum Schwingen angeregt, breitet sich dieser Schwingungszustand nicht schlagartig aus, sondern mit einer Geschwindigkeit  $c$ . Zur Bestimmung dieser Geschwindigkeit wird die Schallwelle zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  als Funktion des Ortes  $x$  analysiert, wie es in Bild 1.11 dargestellt ist.

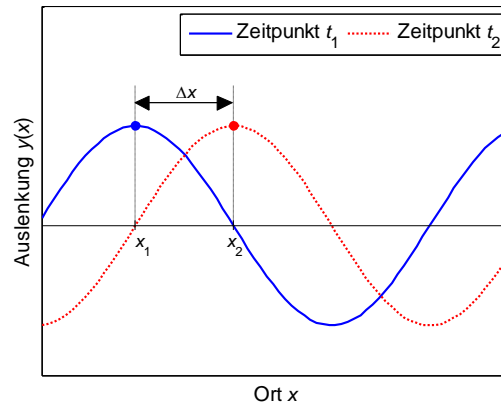


Bild 1.11: Welle zu den unterschiedlichen Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$

Das Maximum der Welle breitet sich im Raum aus. Es wird die von der blauen Markierung bis hin zur roten Markierung zurückgelegte Strecke  $\Delta x$  und die dafür benötigte Zeit  $\Delta t$  untersucht. Damit der Kosinus zu beiden Zeitpunkten den Wert 1 annimmt, muss das Argument zu null werden. Unter Annahme von  $\varphi_0 = 0$  ergibt sich damit nach Gleichung (1.29) die Bedingung für die Ausbreitung eines definierten Punktes auf der Welle.

$$2 \cdot \pi \cdot \left( \frac{t_1}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) = 0 \quad (1.32)$$

und

$$2 \cdot \pi \cdot \left( \frac{t_2}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) = 0 \quad (1.33)$$

Die Differenz der beiden Gleichungen führt zu

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{t_2}{T} - \frac{t_1}{T} = \frac{x_2}{\lambda} - \frac{x_1}{\lambda} = \frac{\Delta x}{\lambda} \quad (1.34)$$

und Umformungen zur Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \quad (1.35)$$

Zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  muss demnach die Wellenlänge  $\lambda$  und die Periodendauer  $T$  oder die Frequenz  $f$  einer Welle bestimmt werden.

### 1.4.2 Piezo-Wandler

Zur Erzeugung von Ultraschall kann eine sogenannte piezoelektrische Keramik verwendet werden. Wird auf ein piezokeramisches Material eine Kraft ausgeübt, führt dies zu einer Verformung des Materials. Aufgrund der Verschiebung der Ladungsschwerpunkte entstehen an den Oberflächen positive und negative Teilladungen. Die dabei entstehende Spannung kann gemessen werden.

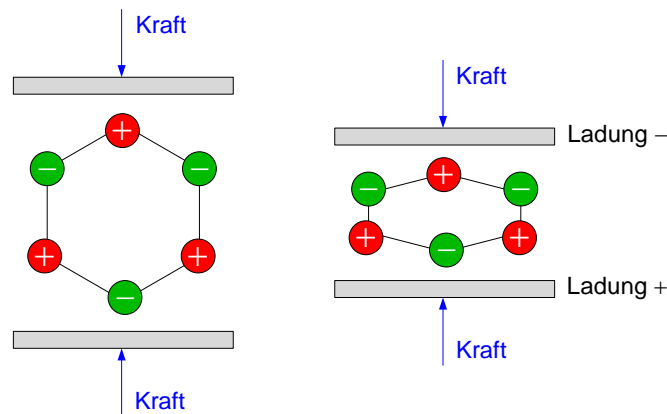


Bild 1.12: Kraftausübung auf ein Piezoelement

Dieser Effekt lässt sich auch umkehren, sodass eine Verformung des Materials durch äußeres Anlegen eines elektrischen Feldes stattfindet. Wird ein Piezoelement mit einer Wechselspannung bei seiner Resonanzfrequenz betrieben, beginnt dieses zu schwingen und Schallwellen senkrecht zur Oberfläche abzustrahlen. Nach diesem inversen piezoelektrischen Effekt arbeitet der im Versuch verwendete Sender. Durch die angelegte Wechselspannung werden Schallwellen im Ultraschallbereich erzeugt. Mit einem Empfänger, der nach dem piezoelektrischen Effekt arbeitet und bei Verformung eine messbare Spannung erzeugt, können die Schallwellen detektiert werden.

### 1.4.3 Messung von Geschwindigkeit

Ziel der ersten Messung ist die Ermittlung der Schallgeschwindigkeit mit Hilfe des Ultraschall-Versuchsaufbaus. Eine Ultraschallkapsel dient dabei als Sender und wird mit einem harmonischen Signal angeregt. Die zweite Kapsel wird zum Empfangen der ausgesendeten Signale verwendet. Das ausgesendete wie auch das empfangene Signal lässt sich mit dem Oszilloskop darstellen. Da die Schallgeschwindigkeit nicht direkt gemessen werden kann, wird zunächst die Wellenlänge  $\lambda$  ermittelt. Mit der Wellenlänge  $\lambda$  und der Frequenz  $f$  des anregenden Signals kann über den Zusammenhang

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \quad (1.36)$$

die Schallgeschwindigkeit berechnet werden. In dem Versuch wird die Wellenlänge  $\lambda$  direkt anhand der Verschiebung der Empfängerhalterung gemessen. Der Abstand zwischen Sender und Empfänger muss dabei um genau eine Wellenlänge  $\lambda$  variiert werden.



### 1.4.4 Entfernungsmessung

Bei der zweiten Messung soll mit dem Ultraschall-Versuchsaufbau die Tischhöhe  $h$  ermittelt werden. Hierbei wird eine sogenannte Laufzeitmessung angewendet. Bei der Laufzeitmessung wird die Zeit zwischen gesendetem und empfangenem Signal gemessen. Da die Schallgeschwindigkeit aus dem ersten Versuchsteil bekannt ist, kann daraus die zurückgelegte Strecke  $\Delta x$  berechnet werden. Damit eine Laufzeit gemessen werden kann, wird als Sendesignal eine begrenzte Anzahl an Schwingungen der gleichen Frequenz  $\omega_0$  verwendet. Ein solches Signal wird als Burst-Signal bezeichnet und ist mit einer Frequenz von  $f = 40 \text{ kHz}$  in Bild 1.13 dargestellt.

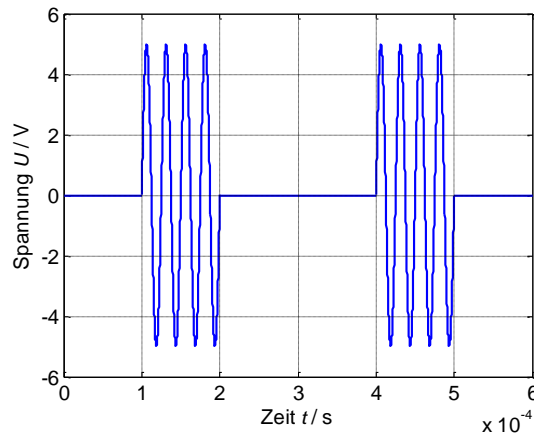


Bild 1.13: Burst-Signal mit  $f = 40 \text{ kHz}$

Zur Generierung des Burst-Signals wird der Ultraschallsender mit einer entsprechend modulierten Spannung versorgt. Diese Spannung wird auf dem Versuchschassis zur Verfügung gestellt. Nach dem Aussenden des Burst-Signals, wird dieses mit einer zeitlichen Verzögerung  $\Delta t$  am Empfänger detektiert. Die vom Signal zurückgelegte Strecke  $\Delta x$  kann mit der Gleichung

$$\Delta x = c \cdot \Delta t \quad (1.37)$$

berechnet werden. Da der Schall den Weg von Tisch zu Boden und anschließend von Boden zu Tisch zurücklegt, gilt für Gleichung (1.37)

$$\Delta x = 2 \cdot h = c \cdot \Delta t \quad (1.38)$$

beziehungsweise für die Tischhöhe  $h$

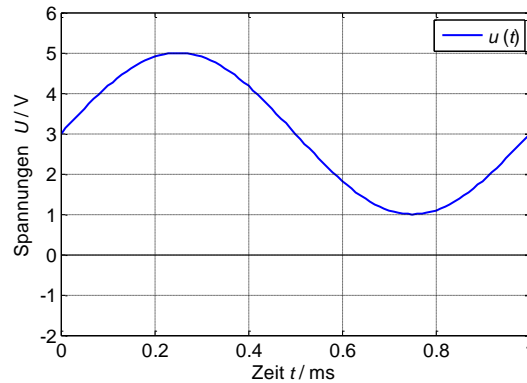
$$h = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (1.39)$$

Zur Messung und Darstellung der Signale wird ein Oszilloskop verwendet. Hierbei ist eine korrekte Triggerung des Oszilloskops entscheidend. Mit Hilfe der Triggerung kann das Senden und Empfangen des Burst-Signals genau dargestellt werden. Grundsätzlich basiert die Trigger-Funktion auf einer zuvor definierten Schwelle, wie beispielsweise einer Spannung oder einer Flanke des zu messenden Signals. Wird die definierte Schwelle erreicht, wird durch den Trigger die Zeitbasis beziehungsweise die Abtastung ausgelöst. Die Festlegung der Schwelle kann durch bereits vom Oszilloskop vorgegebene Einstellungsmöglichkeiten erfolgen. Des Weiteren ist bei vielen Oszilloskopen eine externe Triggerung mit einem auf die Anwendung abgestimmten Trigger-Signal möglich. Zur Messung wird das Oszilloskop mit einem externen Trigger-Signal gespeist, das dem Versuchschassis entnommen werden kann.

## 2 Aufgaben zur Vorbereitung

### 2.1 Effektivwertberechnung

Berechnen Sie den Effektivwert  $U_{RMS}$  des Spannungssignals  $u(t)$ .



### 2.2 Analog-Oszilloskop

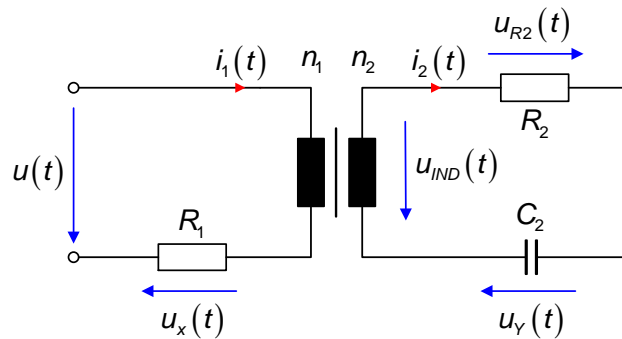
Befassen Sie sich mit den Funktionen und Einstellungsmöglichkeiten des Oszilloskops Hameg HM 507 beziehungsweise Agilent DSO 5014A. Verwenden Sie hierzu die beigelegte Kurzanleitung.

### 2.3 Trigger Oszilloskop

Befassen Sie sich mit der Funktionsweise des Triggers bei einem Oszilloskop und nennen Sie Ereignisse, auf die der Trigger eingestellt werden kann.

## 2.4 Prüfen der ermittelten Bedingungen

In dieser Aufgabe sollen die in Abschnitt 1.3.2 ermittelten Bedingungen mit Hilfe von aufgenommenen Messwerten überprüft werden.



Kennwerte Schaltung		Kennwerte Transformator	
$R_1$	47 $\Omega$	$n_1 / n_2$	1
$R_2$	68 k $\Omega$	$n$	220
$C_2$	2,2 $\mu\text{F}$	$l$ (mittlere Länge Eisenkreis)	12,9 cm
$I_{1,EFF}$	50 mA	$A$	2 cm <sup>2</sup>
$I_{2,EFF}$	0,1 mA		
$\omega$	$2\pi \cdot 50$ Hz		

- Prüfen Sie anhand der Messwerte, ob die Bedingung  $n_1 \cdot i_1(t) \gg n_2 \cdot i_2(t)$  erfüllt ist.
- Prüfen Sie anhand der Messwerte, ob die Bedingung  $1/(\omega \cdot C_2) \ll R_2$  erfüllt ist.

### 3 Aufgabenstellung und Auswertung

#### 3.1 Versuchsaufbau

Die Messungen werden mit dem in Bild 3.1 gezeigten Aufbau durchgeführt. Der Kodierschalter in der Mitte ist auf einen festen Wert eingestellt. Notieren Sie den eingestellten Wert.

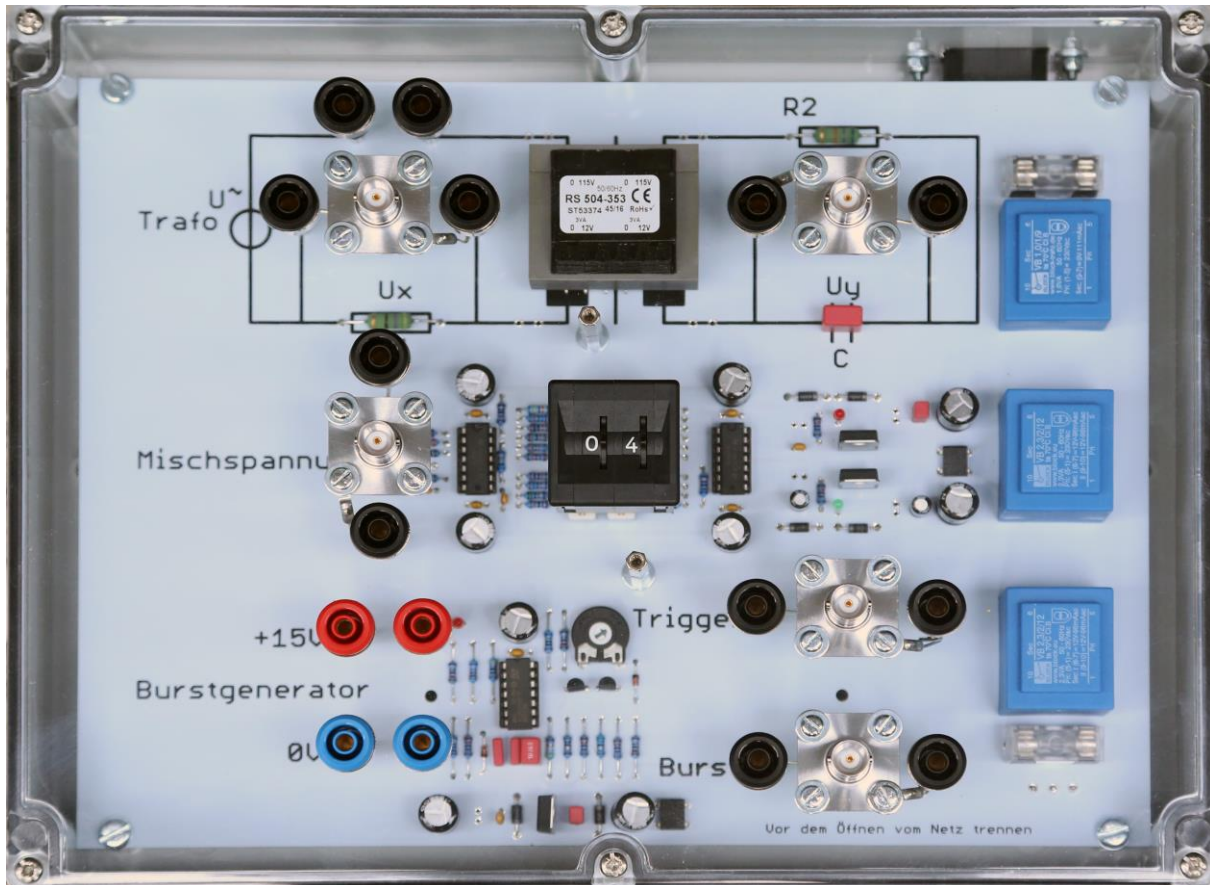


Bild 3.1: Bild des im Versuch verwendeten Chassis

Neben dem Chassis benötigen Sie

- ein Oszilloskop,
- einen Frequenzgenerator,
- den Ultraschall-Versuchsaufbau sowie
- ein Maßband.

### 3.2 Darstellung eines unbekannten Signals

Auf dem Versuchschassis wird Ihnen eine unbekannte Mischspannung zur Verfügung gestellt, die Sie analysieren sollen.

- Stellen Sie das Oszilloskop so ein, dass etwas mehr als eine Periode des Signals sichtbar ist und legen Sie den Bildanfang auf den Nulldurchgang der fallenden Flanke des Signals.
- Wechseln Sie zwischen den Eingangskopplungen des Oszilloskops und skizzieren Sie die Signale im Maßstab 1:1 in die vorgesehenen Vorlagen.
- Markieren Sie in jeder Skizze den Übergang zur nächsten Periode durch einen vertikalen Strich und ermitteln Sie die Periodendauer  $T$ , die Amplitude  $\hat{U}_1$  sowie den Gleichanteil  $U_{DC}$ . Berechnen Sie anschließend den Effektivwert  $U_{EFF}$ .
- Verändern Sie die Einstellungen am Oszilloskop so, dass gerade nur eine Periode der Spannung den Bildschirm ausfüllt. Hierzu soll die Umschaltung auf variable Ablenkung für X- und Y-Achse verwendet werden. Welche Ablenkungsempfindlichkeit stellt sich dabei in X- und Y-Richtung ein?

### 3.3 Untere Grenzfrequenz bei AC-Kopplung

In diesem Versuchsteil sollen Sie die untere Grenzfrequenz des Oszilloskops bei AC-Kopplung durch die in Abschnitt 1.2 erläuterte Methode ermitteln.

- Erzeugen Sie mit einem Funktionsgenerator ein niederfrequentes Rechtecksignal. Ermitteln Sie die Frequenz, bei der das Abfallen des Signals gut zu erkennen ist und tragen Sie die eingestellte Frequenz sowie  $U_0$  und  $\Delta U$  in die Dokumentationsvorlage ein.
- Verwenden Sie anstatt des Rechtecksignals ein Sinussignal mit beliebiger Amplitude  $\hat{U}_0$  und einer Frequenz, die deutlich über der unteren Grenzfrequenz liegt. Reduzieren Sie die Frequenz so lange, bis die Amplitude des ursprünglichen Signals um 3 dB gedämpft ist. Tragen Sie die Amplitude  $\hat{U}_{3dB}$  sowie die Grenzfrequenz in die Dokumentationsvorlage ein.

### 3.4 Hysteresekurve

Stellen Sie das Oszilloskop auf AC-Kopplung ein und vergewissern Sie sich, dass die Intensität nicht zu hoch eingestellt ist. Messen Sie an Kanal 1 die Spannung  $U_X$  und an Kanal 2 die Spannung  $U_Y$ .

- Stellen Sie etwas mehr als eine Periode der Spannungen dar. Schieben Sie die Spannung  $U_X$  in die obere Hälfte der Anzeige und die Spannung  $U_Y$  in die untere Hälfte. Skizzieren Sie die Signalverläufe im Maßstab 1:1 in die entsprechende Vorlage.
- Wechseln Sie in den X-Y-Betrieb und skizzieren Sie die Kurve ebenfalls im Maßstab 1:1 in die entsprechende Vorlage.
- Entnehmen Sie der Kurve die Spannungen, die den Werten  $H_C$  und  $B_R$  sowie den Maximalwerten  $H_{MAX}$  und  $B_{MAX}$  entsprechen. Berechnen Sie mit Hilfe der in Abschnitt 1.3.2 hergeleiteten Formeln die Kennwerte der Hysterese. Verwenden Sie die zugehörige Vorlage.

### 3.5 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

In diesem Versuchsabschnitt wird unter Verwendung der Ultraschallkapseln die Schallgeschwindigkeit messtechnisch ermittelt. Verwenden Sie hierzu einen Funktionsgenerator, dessen Ausgang Sie über ein T-Stück mit einer Ultraschallkapsel und dem Kanal 1 des Oszilloskops verbinden. Schließen Sie den Empfänger am Kanal 2 des Oszilloskops an. Für eine optimale Signalausbeute müssen Sender und Empfänger in Resonanz betrieben werden.

- Bestimmen Sie mit Hilfe der Sprungantwort die Resonanzfrequenz  $f_{S,RES}$  des Senders. Stellen Sie dazu am Funktionsgenerator ein Rechtecksignal mit der Spannung  $U = 5\text{ V}$  und der Frequenz  $f = 80\text{ Hz}$  ein.
- Regen Sie den Sender mit einem Sinussignal der Frequenz  $f = f_{S,RES}$  und der Spannung  $\hat{U} = 5\text{ V}$  an. Ändern Sie die Frequenz, bis der Empfänger das Signalmaximum erreicht und tragen Sie diese Frequenz  $f_{OPT}$  in die Vorlage ein.
- Stellen Sie die Halterung des Empfängers so ein, dass die Phasenverschiebung zwischen gesendetem und empfangenem Signal null ist. Variieren Sie anschließend den Abstand  $x$  zwischen Sender und Empfänger, bis die Signale nach zehn Perioden wieder in Phase zueinander liegen. Bestimmen Sie aus der Verschiebung  $\Delta x$  die Wellenlänge  $\lambda$  der Schallwelle.
- Berechnen Sie die Schallgeschwindigkeit  $c$  aus der am Funktionsgenerator eingestellten Frequenz  $f$  und der zuvor ermittelten Wellenlänge  $\lambda$ .
- Welche der in die Berechnung der Schallgeschwindigkeit einfließenden Größen hat die größte Messunsicherheit? Machen Sie eine überschlägige Fehlerabschätzung.

### 3.6 Entfernungsmessung mit Ultraschall

Zur Entfernungsmessung wird der Ultraschallsender mit einem Burst-Signal betrieben. Schließen Sie an den Burst-Generator eine Versorgungsspannung von  $15\text{ V}$  an.

- Messen Sie mit Hilfe der Ultraschallkapseln die Entfernung zwischen Tisch und Boden, indem Sie die Zeitverzögerung  $\Delta t$  von gesendetem zu empfangenem Signal messtechnisch erfassen. Vergleichen Sie den gemessenen Wert mit dem tatsächlichen Wert.

Hinweis: Verwenden Sie bei der externen Triggerung des Oszilloskops die negative Flanke des auf dem Chassis zur Verfügung gestellten Triggersignals.

- Welche Größen bestimmen die maximale Reichweite der Anordnung?
- Wie groß ist die maximale Reichweite dieser Anordnung?

## 4 Dokumentationsvorlagen

### 4.1 Aufgabe 3.2: Darstellung eines unbekannten Signals

Aufgabenteil b): Skizze bei AC-Kopplung

	t/Div : _____
	CH1 V/Div: _____
	CH2 V/Div: _____
	CH1 f/Hz : _____
	CH2 f/Hz : _____

Aufgabenteil b): Skizze bei DC-Kopplung

	t/Div : _____
	CH1 V/Div: _____
	CH2 V/Div: _____
	CH1 f/Hz : _____
	CH2 f/Hz : _____

## Aufgabenteil c): Ermittlung der Größen des Signals

Messung	
$T$ in ms	
$\hat{U}_1$ in V	
$U_{DC}$ in V	

Berechnung	
$U_{EFF}$ in V	

**4.2 Aufgabe 3.3: Untere Grenzfrequenz bei AC-Kopplung**

## Aufgabenteil a): Grenzfrequenz bei Rechtecksignal

$T$ in ms	
$\Delta U$ in V	
$U_0$ in V	
$f_G$ in Hz	

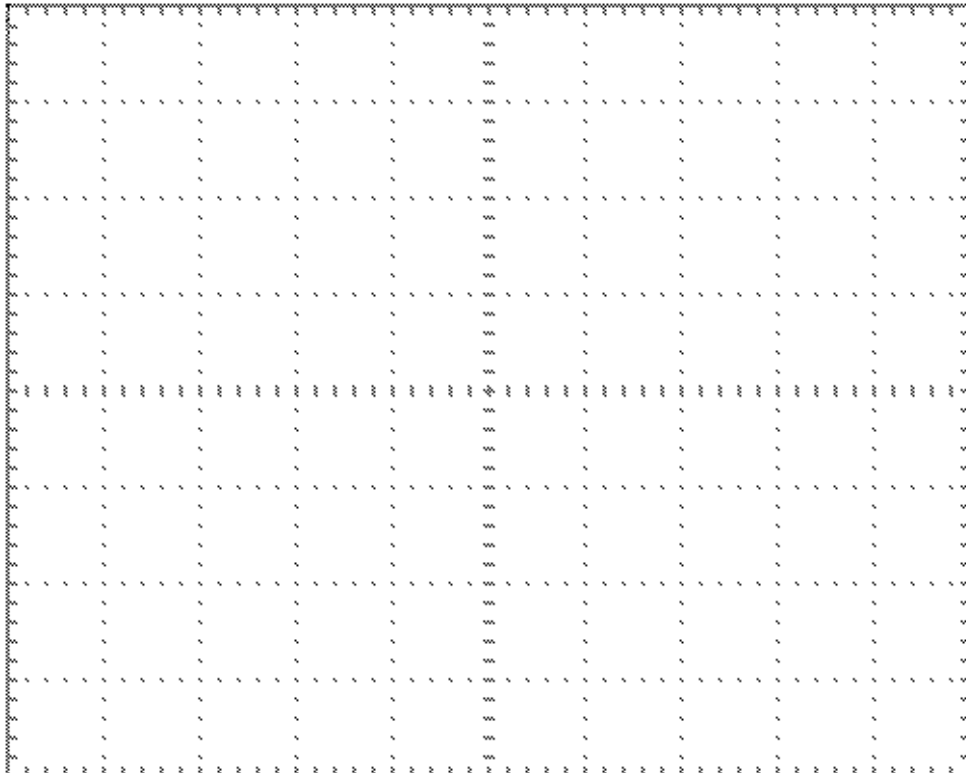
## Aufgabenteil b): Grenzfrequenz bei Sinussignal

$U_0$	
$U_{3dB}$	
$f_G$ in Hz	

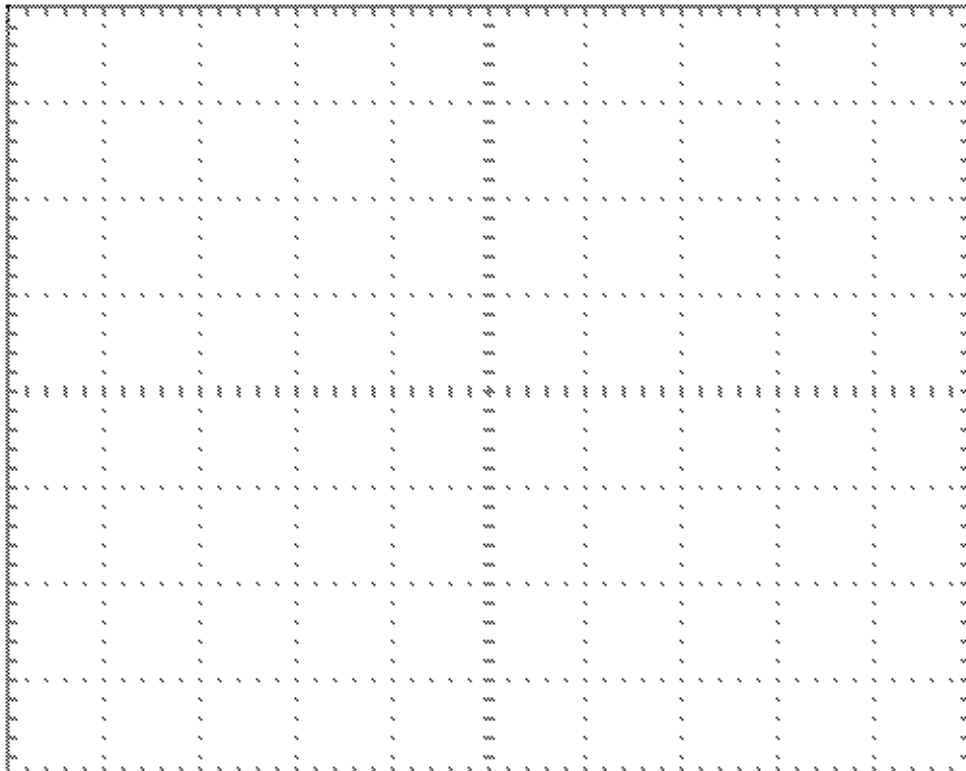


### 4.3 Aufgabe 3.4: Hysteresekurve

Aufgabenteil a): Skizze der Spannungen  $U_X$  und  $U_Y$

	t/Div :
	_____
	CH1 V/Div:
	_____
	CH2 V/Div:
_____	
CH1 f/Hz :	
_____	
CH2 f/Hz :	
_____	

Aufgabenteil b): Skizze im X-Y-Betrieb

	t/Div :
	_____
	CH1 V/Div:
	_____
	CH2 V/Div:
_____	
CH1 f/Hz :	
_____	
CH2 f/Hz :	
_____	

## Aufgabenteil c): Kenngrößen der Hysterese

	gemessene Spannung	berechnete Werte
$H_{MAX}$		
$H_C$		
$B_{MAX}$		
$B_R$		

## 4.4 Aufgabe 3.5: Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

## Aufgabenteil a) und b): Resonanzfrequenz Sender

Sprungantwort $f_{S,RES}$ in kHz	
angepasste Resonanzfrequenz $f_{OPT}$ in kHz	

## Aufgabenteil c): Wellenlänge Schallwelle

Wellenlänge $\lambda$ in cm	
-----------------------------	--

## Aufgabenteil d): Schallgeschwindigkeit

Schallgeschwindigkeit $c$ in m/s	
----------------------------------	--

## 4.5 Aufgabe 3.6: Entfernungsmessung mit Ultraschall

## Aufgabenteil a): Signallaufzeit und Entfernung

Signallaufzeit $\Delta t$	
ermittelte Entfernung $d_{MESS}$ in m	
berechnete Entfernung $d_{RECH}$ in m	

## Aufgabenteil b): Größen, die die maximale Reichweite bestimmen

--

## Aufgabenteil c): Maximale Reichweite der Anordnung

Maximale Reichweite	
---------------------	--

## 5 Literatur

- [GET1] R. Koblitz, M. Strohrmann, M. Ihle,  
Grundlagen der Elektrotechnik - Gleichstromtechnik, Skriptum zur Vorlesung  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, 2017
- [GET2] R. Koblitz, D. Fessler, A. Klönne, Ph. Nenninger, H. Sapotta,  
Wechselstromtechnik, Skriptum zur Vorlesung  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, 2017
- [Felder] Hans A. Sapotta,  
Elektrische und magnetische Felder, Skript zur Vorlesung  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
- [Messtechnik] K. Wolfrum, M. Litzenburger,  
Messtechnik, Skript zur Vorlesung  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, 2012
- [Führ06] A. Führer, K. Heidemann W. Nerreter,  
Grundgebiete der Elektrotechnik, Band 1: Stationäre Vorgänge  
Fachbuchverlag Leipzig; 6. Auflage , 2006
- [Moel06] H. Frohne, K.-H. Löcherer, H. Müller,  
Grundlagen der Elektrotechnik  
Vieweg+Teubner Verlag; Auflage: 20, überarb. Aufl. 2005
- [Heri16] E. Hering, R. Martin, M. Stohrer,  
Physik für Ingenieure  
Springer Vieweg Verlag; Auflage: 12; 2016