

# Akustische und elektrische Signale - SIG

Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München – Grundpraktikum für Humanmediziner  
(31. AUGUST 2021)

## VERSUCHSZIELE

Signale dienen zur Informationsübertragung. In diesem Versuch werden exemplarisch akustische Signale und elektrische Signale zur Reizweiterleitung in einer Nervenzelle betrachtet.

## Contents

|   |    |
|---|----|
| <b>I. Teilversuche</b>  | 2  |
| <b>II. Physikalische Grundlagen</b>                             | 2  |
| II.1. Schwingungen und Wellen                                   | 2  |
| II.2. Akustische Signale  | 3  |
| 1. Grund- und Obertöne einer schwingenden Saite                 | 3  |
| 2. Analyse mittels Fouriertransformation                        | 4  |
| 3. Energie und Intensität, menschliches Hörvermögen             | 4  |
| II.3. Elektrische Signale                                       | 5  |
| 1. Ausbreitung elektrischer Signale                             | 5  |
| 2. Der Kondensator  | 6  |
| 3. RC-Glied: Auf- und Entladevorgang                            | 6  |
| 4. Diskussion aus physiologischer Sicht                         | 7  |
| <b>III. Technische Grundlagen</b>                               | 8  |
| <b>IV. Versuchsdurchführung</b>                                 | 9  |
| PC-Vorbereitung   | 9  |
| IV.1. Musik sichtbar machen („Versuch daheim“)                  | 9  |
| 1. <b>Kurzbeschreibung</b>                                      | 9  |
| 2. <b>Messgrößen und Durchführung</b>                           | 10 |
| IV.2. Frequenz und Amplitude eines Sinustons („Versuch daheim“) | 10 |
| 1. <b>Kurzbeschreibung</b>                                      | 10 |
| 2. <b>Messgrößen und Durchführung</b>                           | 10 |
| IV.3. Vermessung eines Obertonspektrums („Versuch daheim“)      | 10 |
| 1. <b>Kurzbeschreibung</b>                                      | 10 |
| 2. <b>Messgrößen und Durchführung</b>                           | 10 |
| IV.4. Das menschliche Hörvermögen („Versuch daheim“)            | 11 |
| 1. <b>Kurzbeschreibung</b>                                      | 11 |
| 2. <b>Messgrößen und Durchführung</b>                           | 11 |
| IV.5. Auf- und Entladekurve eines Kondensators                  | 11 |
| 1. <b>Kurzbeschreibung</b>                                      | 11 |
| 2. <b>Messgrößen und Durchführung</b>                           | 11 |
| <b>V. Auswertung</b>  | 11 |
| V.1. Musik sichtbar machen („Versuch daheim“)                   | 11 |
| V.2. Frequenz und Amplitude eines Sinustons („Versuch daheim“)  | 11 |
| V.3. Vermessung eines Obertonspektrums („Versuch daheim“)       | 12 |
| V.4. Das menschliche Hörvermögen („Versuch daheim“)             | 12 |
| V.5. Auf- und Entladekurve eines Kondensators                   | 12 |
| <b>VI. Anhang Manual</b>  | 12 |

I. TEILVERSUCHE

1. Musik sichtbar machen („Versuch daheim“)
2. Frequenz und Amplitude eines Sinustons („Versuch daheim“)
3. Vermessung eines Obertonspektrums („Versuch daheim“)
4. Das menschliche Hörvermögen („Versuch daheim“)
5. Auf- und Entladekurve eines Kondensators

II. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

II.1. Schwingungen und Wellen

Grundsätzlich lassen sich Bewegungsabläufe dadurch unterscheiden, ob sie sich regelmäßig wiederholen oder nicht. Als (*zeitlich*) *periodische Vorgänge* bezeichnet man Prozesse, bei denen sich jeder Zustand des Systems nach derselben Zeitdauer wiederholt. Nicht-periodische Vorgänge sind Abläufe, die sich entweder nicht wiederholen (z.B. Herunterfallen eines Steins), oder die sich unregelmäßig wiederholen (z.B. Prasseln von Hagelkörnern auf einem Dach).

Ein Beispiel für periodische Signale sind akustische Töne. Ein akustisches Signal entsteht, wenn z.B. eine Lautsprechermembran aus der Ruhelage ausgelenkt wird und sich danach periodisch hin und her bewegt, also schwingt. Diese *Schwingung* wird auf die umgebenden Luftmoleküle übertragen und weitergeleitet. So entsteht eine periodische räumliche Störung, eine *Welle*. Es breitet sich also eine Schallwelle aus. Der einfachste Fall ist ein Sinuston (Abb. 1). Dieser Ton ist durch seine Amplitude und seine Periodendauer (oder seine Frequenz) charakterisiert. Er wird durch die Gleichung

$$A(t) = A_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \quad (1)$$

beschrieben. Die Amplitude  $A_0$  ist die maximale Auslenkung des Luftmoleküls aus der Ruhelage. Der Spitzetal-Wert ist in diesem Fall festgelegt als  $A_{ST} = 2A_0$ . Je größer die Amplitude eines Tones ist, desto lauter wird dieser wahrgenommen. Die Periodendauer  $T$  ist die Zeit, nach der sich die Bewegung des Luftmoleküls zum ersten Mal wiederholt. Die Frequenz  $f = 1/T$  gibt die Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit (Wiederholrate) an und hat die Einheit  $[f] = 1/s = \text{Hz}$  (Hertz). Mit zunehmender Frequenz steigt die Tonhöhe. Frequenzen hörbarer Töne liegen im Bereich von wenigen Hertz bis ca. 20.000 Hertz. Den Faktor  $\frac{2\pi}{T}$  kann man auch zur Kreisfrequenz  $\omega$  (griech.: „omega“) zusammenfassen.

Um solche schnell ablaufenden Vorgänge sichtbar machen zu können, werden Messgeräte mit sehr kurzen Reaktionszeiten benötigt. Ein Messgerät mit einem mechanischen Zeiger wäre aufgrund der Trägheit ungeeignet.

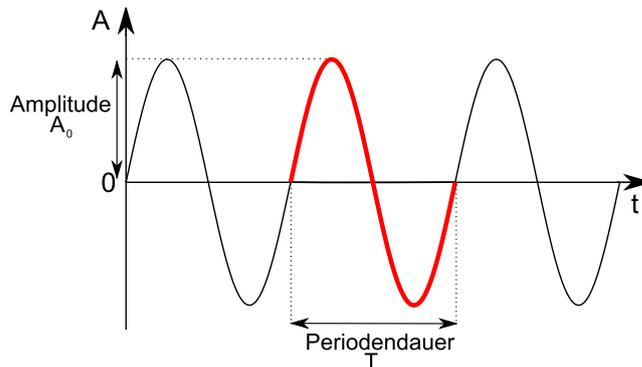


Abb. 1: Akustisches Signal: Sinusförmige Schwingung um die Ruhelage  $A = 0$  mit Schwingungsamplitude  $A_0$  und Periodendauer  $T$  als Funktion der Zeit.

Das Oszilloskop ist ein für diese Anforderungen geeignetes Messinstrument. Im klassischen Oszilloskopmodus (auch *t-x-Modus*) wird das zu messende Signal in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt, indem die gemessene Amplitude (z.B. die Auslenkung  $x$  eines Teilchens oder die Spannung  $U$ ) nach oben und nach rechts die Zeit  $t$  aufgetragen wird (vgl. Abb. 1, 2 und 3).

Da mit einem Oszilloskop nur elektrische Signale verarbeitet werden können, muss ein akustisches Signal zuerst umgewandelt werden. Dabei übersetzt ein Mikrofon die Luftdruckschwankungen in Verschiebungen der elektrischen Ladungen. Im einfachsten Fall bedeutet dies, dass die Ladungen im Leiter die Bewegung der Luftmoleküle 1:1 übernehmen. Eine solche Ladungverschiebung führt zu einer Veränderung der Spannung am Leiter, die vom Oszilloskop gemessen und dargestellt wird.

Auch Spannung  $U$  und Stromstärke  $I$  können sich periodisch ändern. Man spricht von Wechselspannung oder Wechselstrom. Man bezeichnet dann die Amplitude mit  $U_0$  bzw.  $I_0$ . Die im Alltag verwendete Wechselspannung „aus der Steckdose“ zeigt einen sinusförmigen Verlauf mit einer Frequenz von 50 Hz.

Es gibt aber auch andere Formen der Wechselspannung, z.B. Rechteckspannung oder Sägezahnspannung (Abb. 2 von links nach rechts).

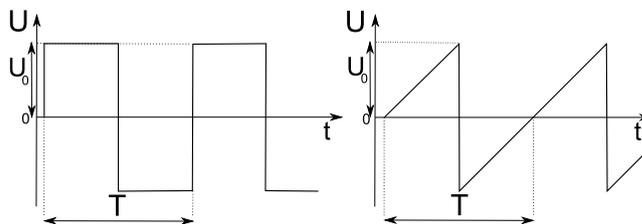


Abb. 2: Rechteckspannung und Sägezahnspannung mit Amplitude  $U_0$  und Periodendauer  $T$ .

In der Medizin werden anhand eines EKGs Informationen über das Herz gewonnen. Während die Wiederholrate des EKG-Signals wie zuvor durch die Frequenz  $f$  beschrieben werden kann, reicht aufgrund der äußeren

Form des Signals die Angabe eines einzelnen Amplitudenwerts nicht mehr aus, sondern es müssen mehrere Werte angegeben werden. Abb. 3 zeigt eine Periode eines typischen EKG-Signals. Einige der einzelnen Abschnitte sind wie in der Medizin üblich beschriftet.

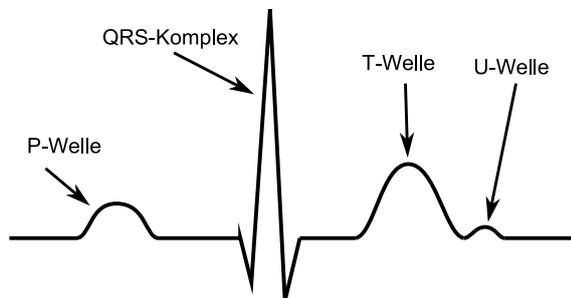


Abb. 3: Eine Periode des EKG-Signals eines gesunden Menschen.

Neben der zeitlichen Periodizität kann bei einer Welle auch räumliche Periodizität auftreten, d.h. die Schwingungszustände wiederholen sich nach einer bestimmten Strecke. Dies lässt sich zum Beispiel bei Meereswellen beobachten. Man definiert dann die Wellenlänge  $\lambda$  als den kleinsten Abstand, bis sich die Auslenkungen wiederholen. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  der Welle gilt  $v = \lambda \cdot f$  (vgl. LIN und SON).

II.2. Akustische Signale

1. Grund- und Obertöne einer schwingenden Saite

Wenn an einer Saite (z.B. einer Gitarre) an einer beliebigen Stelle gezupft wird, dann beginnt dieser punktförmige Saitenabschnitt nach oben und unten zu schwingen. Diese Anregung breitet sich entlang der gespannten Saite aus, so dass sich auch die anderen Abschnitte der Saite nach oben und unten bewegen. Es entsteht eine *laufende Welle*. Die Saitenabschnitte schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Man bezeichnet eine solche Welle als *Transversalwelle*. Da die Saite der Länge  $L$  an den Enden fixiert ist, kann sie dort nicht schwingen. Die Welle wird an den Enden der Saite reflektiert und überlagert sich (interferiert) mit der ankommenden Welle. Diese Interferenz der ankommenden Welle und der reflektierten Welle führt zur Entstehung einer *stehenden Welle* (vgl. Abb. 4 und Abb. 5). Hierbei hängt die Amplitude  $A_0$  der Teilchen von ihrer Position auf der Saite ab. Orte, an denen die Teilchen nicht schwingen können (z.B. an den Enden der Saite) und die daher die Amplitude  $A_0 = 0$  besitzen, nennt man Schwingungsknoten. Die Orte, an denen die Teilchen die größte Schwingungsamplitude haben, heißen Schwingungsbäuche. Die Strecke, nach der sich das Schwingungsmuster der Saite zum ersten Mal wiederholt, heißt Wellenlänge  $\lambda$  der stehenden Welle.

Abb. 4 zeigt einen Abschnitt der Länge  $\lambda$  einer schwingenden Saite zu vier verschiedenen Zeitpunkten. Da die

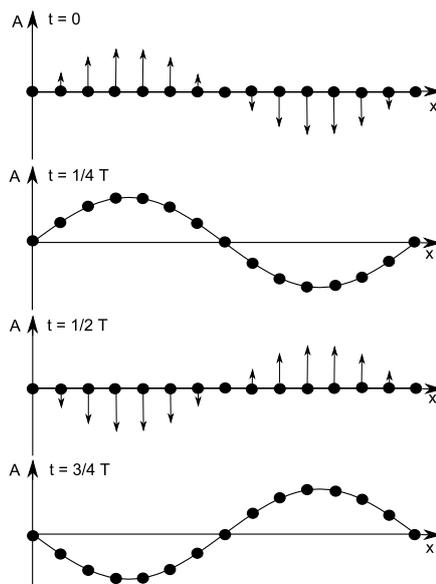


Abb. 4: Eine schwingende Saite der Länge  $L$ : Die schwarzen Punkte stellen die punktförmigen Abschnitte der Saite dar, die Pfeile kennzeichnen Geschwindigkeit (Länge des Pfeils) und Richtung der momentanen Bewegung.

Bewegung eines Saitenabschnitts durch Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung seiner Teilchen charakterisiert wird, sind diese beiden Eigenschaften durch Pfeile gekennzeichnet.

- Die Punkte an den Enden sowie in der Mitte des Abschnitts befinden sich zu jedem Zeitpunkt in ihrer Ruhelage. Dort befinden sich Schwingungsknoten.
- Zum Zeitpunkt  $t = 0$  schwingen alle Teilchen des Abschnitts gerade durch ihre Ruhelage. Die linke Hälfte beginnt dabei mit einer Schwingung nach oben, die rechte mit einer Schwingung nach unten.
- Nach einem Viertel der Periodendauer  $T$  haben die Teilchen des Abschnitts ihre maximale Auslenkung und damit den Umkehrpunkt erreicht; ihre Geschwindigkeit ist  $0 \text{ m/s}$ .
- Nach der halben Periodendauer durchlaufen die Teilchen wieder ihre Ruhelage, aber in umgekehrter Richtung, und erreichen zum Zeitpunkt  $t = \frac{3}{4}T$  den zweiten Umkehrpunkt.
- Nach einer Periodendauer hat der ganze Saitenabschnitt wieder seinen Ausgangszustand erreicht.

Wenn eine Saite zum Schwingen gebracht wird, entstehen nur solche Schwingungen, bei denen an den Saitenenden Schwingungsknoten sind. Beim Grundton sind nur an den Saitenenden Schwingungsknoten. Sind auch dazwischen noch  $n$  Schwingungsknoten, spricht man vom  $n$ -ten Oberton.

Die Wellenlänge  $\lambda_n$  des  $n$ -ten Obertons hängt von der

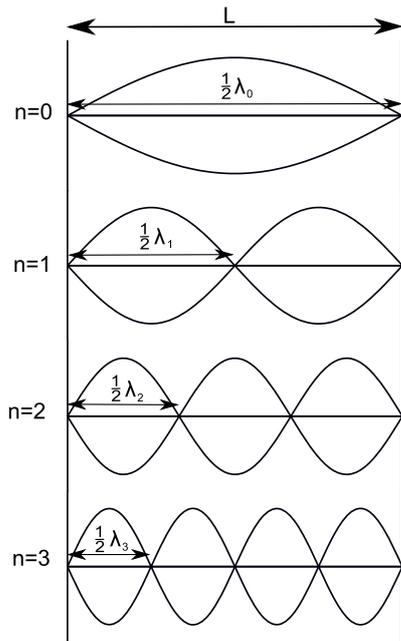


Abb. 5: Grund- und Obertöne einer schwingenden Saite der Länge  $L$ . Die Abbildung zeigt die Amplitudenausschläge in beide Richtungen.

Länge  $L$  der Saite ab (vgl. Abb. 5):

$$L = (n + 1) \cdot \frac{\lambda_n}{2} \quad \text{bzw.} \quad \lambda_n = \frac{2L}{n + 1} = \frac{\lambda_0}{n + 1} \quad (2)$$

Die Wellenlänge der Grundschwingung ( $n = 0$ ) ist damit  $\lambda_0 = 2L$ , die Wellenlänge der  $n$ -ten Oberschwingung ist der  $(n + 1)$ -te Teil davon. Da für die Wellengeschwindigkeit  $v = \lambda \cdot f = \text{const.}$  gilt, folgt für die Frequenzen der Obertöne:

$$f_n = (n + 1) \cdot f_0 = f_0 \cdot n + f_0. \quad (3)$$

Damit ergibt sich für das Frequenzverhältnis von Grund- und Obertönen

$$f_0 : f_1 : f_2 : \dots = 1 : 2 : 3 : \dots \quad (4)$$

Diese Schwingungen der Saite übertragen sich auf die umgebenden Luftmoleküle und führen dazu, dass sich die Schwingungen als Schallwellen im Raum ausbreiten. Die Schwingungsrichtung ist hier parallel zur Ausbreitungsrichtung; Schallwellen sind *Longitudinalwellen*.

### 2. Analyse mittels Fouriertransformation

Der Klang der menschlichen Stimme oder eines Instruments besteht aus einer Überlagerung des Grundtons mit vielen Obertönen. Je nach Anzahl der Obertöne und deren jeweiligen Amplituden entsteht ein charakteristischer Klang.

Die *Fouriertransformation* ist ein mathematisches Verfahren, mit dem eine periodische Funktion durch eine Summe von sinusförmigen Funktionen angenähert

werden kann. Dabei wird die zu untersuchende Funktion (näherungsweise) als Summe von Sinus- und Kosinusfunktionen verschiedener Amplituden und Frequenzen dargestellt. Im Frequenzbild oder Frequenzspektrum werden diese Ergebnisse visualisiert, indem die Amplituden gegen die Frequenzen aufgetragen werden. In einem vereinfachten Fall (Abb. 6a links) ist die dargestellte Funktion eine reine Sinusfunktion. Die Fouriertransformation (Abb. 6a rechts) liefert ihre Frequenz  $f_0 = 440 \text{ Hz}$  und Amplitude  $A_0 = 1$ . Es handelt sich um den Kammerton a. Abb. 6b zeigt eine weitere Sinusfunktion mit  $f_3 = 1760 \text{ Hz}$  und  $A_3 = 0,5$  (3. Oberton des Kammertons a).

Die Überlagerung beider Töne (Abb. 6c links) ergibt einen Klang (Abb. 6c rechts).

### 3. Energie und Intensität, menschliches Hörvermögen

Wenn durch eine Störung Teilchen aus ihrem Ruhezustand ausgelenkt werden, dann ändert sich deren potentielle und kinetische Energie. Die Auslenkung wandert als Welle durch das Medium, somit wird auch Energie transportiert. Da sich die einzelnen Teilchen aber nur um ihre Ruhelage hin und her bewegen, findet Energietransport ohne Massentransport statt.

Die *Intensität* einer Welle ist ein Maß dafür, wie viel Energie  $\bar{E}$  im Mittel durch die Welle pro Zeiteinheit  $\Delta t$  durch eine zur Ausbreitungsrichtung der Welle senkrechte Flächeneinheit  $\Delta S$  transportiert wird. Ihre Einheit ist  $[I] = \text{J}/(\text{m}^2\text{s}) = \text{W}/\text{m}^2$ . Für die Intensität gilt folgende Formel (ohne Herleitung):

$$I = \frac{\bar{E}}{\Delta S \cdot \Delta t} = \frac{1}{2} \rho v A^2 \omega^2 \quad (5)$$

Dabei ist  $\rho$  (griech. „Rho“) die Dichte des Mediums,  $v$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle,  $A$  ihre Amplitude und  $\omega$  ihre Kreisfrequenz. Die Größen Amplitude und Winkelgeschwindigkeit sind von der Störung abhängig. Die Dichte  $\rho$  und die Schallgeschwindigkeit  $v$  sind materialabhängig. Das Produkt aus beiden wird oft zur *Schallimpedanz*  $Z = \rho \cdot v$  zusammengefasst. Die Schallimpedanz ist ein wichtiger materialspezifischer Wert für die Beschreibung von Wellen in Medien.

Schallintensität ist eine für die Audiometrie wichtige Größe. Wie Abb. 7 illustriert, genügt bei  $f = 1 \text{ kHz}$  eine winzige Intensität von  $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ , um eine Hörempfindung auszulösen (Hörschwelle oder Hörgrenze). Die Hörschwelle ist frequenzabhängig. Am empfindlichsten ist das menschliche Ohr im Frequenzbereich von 2 - 5 kHz (vgl. Abb. 7). Schallintensitäten vergleicht man mit  $I_0$  durch Angabe des *Schallpegels*:

$$L_I = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ dB, mit } [L_I] = \text{dB (Dezibel)}. \quad (6)$$

Die Schallintensität ist objektiv und messbar, z. B. mit einem Mikrofon. Bei gleichen Schallintensitäten ist

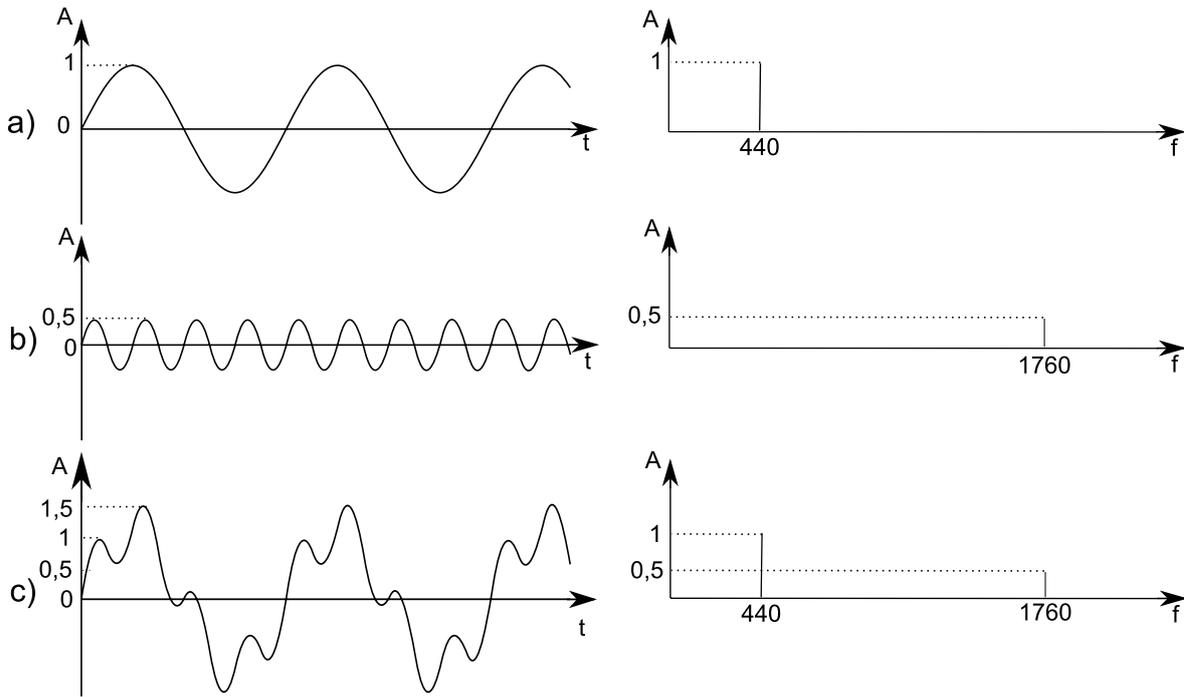


Abb. 6: Grund- und Oberton des Kammertons a, sowie deren Überlagerung. Darstellung links im  $t$ - $x$ -Modus und rechts als Frequenzspektrum.

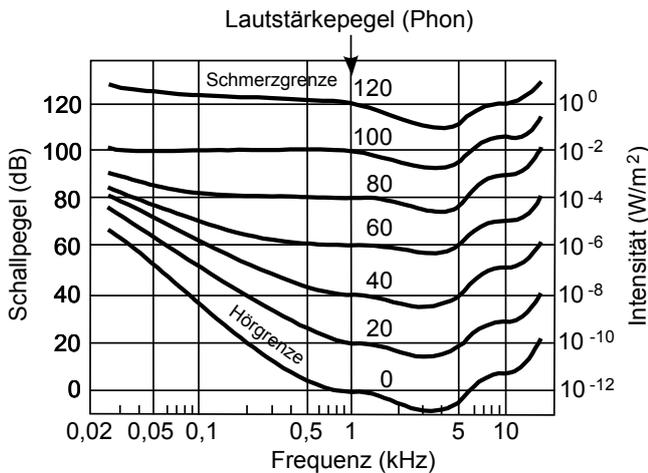


Abb. 7: Frequenzabhängigkeit des menschlichen Hörvermögens. Jeder Graph entspricht einer empfunden gleichen Lautstärke.

die Lautstärkeempfindung des Menschen von der Frequenz der Schallwelle abhängig. Um diese subjektive Empfindung zu charakterisieren, wird die Größe *Lautstärke* verwendet. Um Lautstärken zu vergleichen, benutzt man die Größe *Lautstärkepegel*  $\Lambda$  (griech.: „Lambda“). Er wird in *Phon* gemessen. Für  $f = 1$  kHz hat der Lautstärkepegel gemessen in Phon definitionsgemäß den gleichen Wert wie der Schallpegel in Dezibel.

### II.3. Elektrische Signale

Während in den Experimenten im Physikpraktikum primär Elektronen als freie Ladungsträger verwendet werden, bewegen sich im menschlichen Körper fast ausschließlich Ionen (vgl. auch ZEL).

Da sich Ladungen, je nach Vorzeichen, anziehen oder abstoßen, hängt deren Energie von ihrer Position zueinander ab. Unterschiede in der Energie pro Ladung werden physikalisch als Spannung oder Potentialdifferenz bezeichnet. Wenn sich Ladungen bewegen und sich deshalb die Ladungsverteilung verändert, kann dies als Änderung der Spannung gemessen werden.

#### 1. Ausbreitung elektrischer Signale

Wenn sich in einem metallischen Leiter ein Elektron am Ort A (z.B. Anfang des Leiters) bewegt, dann verändert sich die elektrische Kraft auf die Elektronen am Ort B (z.B. Ende des Leiters) praktisch ohne Zeitverzögerung. Die Geschwindigkeit, mit der die Information mit Hilfe der Bewegung übertragen wird, ist im Idealfall die Lichtgeschwindigkeit. Sie wird als *Signalgeschwindigkeit* bezeichnet. Diese ist aber nicht identisch mit der Geschwindigkeit der Elektronen selbst: Ihre mittlere Geschwindigkeit (*Driftgeschwindigkeit*) entlang des Leiters ist sehr langsam ( $v \approx 0,1$  mm/s).

Im menschlichen Körper findet Signalübertragung durch verschiedene Arten von Nervenzellen statt. Die Signalgeschwindigkeit ist dort viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit. Ein Modell dafür wird im Folgenden erarbeitet.

2. Der Kondensator

Ein Kondensator ist ein elektrisches Bauteil, mit dem Ladungen bzw. Energie gespeichert werden können. Er besteht aus zwei elektrischen Leitern, die durch einen Isolator getrennt sind. Der *Plattenkondensator* ist eine anschauliche Variante dafür. Er besteht aus zwei gleich großen, parallel angeordneten Metallplatten, zwischen denen sich ein Isolator, oft Luft, befindet (Abb. 8 links). Wenn die beiden Platten mit einer Spannungsquelle verbunden werden, fließt für sehr kurze Zeit ein Strom, der den Kondensator auflädt. Abgesehen von diesem kurzen Ladestrom fließt kein Strom durch den Stromkreis, da der Kondensator diesen unterbricht. Trennt man den Kondensator wieder von der Spannungsquelle, dann bleiben die Ladungen auf den Platten. Da sich auf der einen Platte negative und auf der anderen positive Ladungen befinden, hat der geladene Kondensator Eigenschaften einer Spannungsquelle.

Die *Kapazität*  $C$  des Kondensators gibt an, wie viele Ladungen  $Q$  pro angelegter Spannung  $U$  gespeichert werden können:

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{mit} \quad [C] = \frac{C}{V} = \frac{A \cdot s}{V} = F \text{ (Farad)}. \quad (7)$$

Die Kapazität  $C$  (das Fassungsvermögen) hängt von den geometrischen Abmessungen des Kondensators ab.

- Je größer die Fläche  $A$  der beiden Platten ist, desto mehr Ladungen können gespeichert werden. Allgemein gilt  $C \propto A$ .
- Die unterschiedlichen Ladungen auf den beiden Platten ziehen sich gegenseitig an. Bei einer großen Anziehungskraft werden die Ladungen dichter gepackt, wodurch mehr Ladungen Platz haben. Je kleiner der Abstand  $d$  der Platten ist, desto größer ist die Anziehungskraft und desto mehr Ladungen können gespeichert werden. Es gilt  $C \propto 1/d$ .

Zusammengefasst ergibt sich

$$C \propto \frac{A}{d} \quad \text{und damit} \quad C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (8)$$

mit  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ : Dielektrizitätskonstante im Vakuum,  $\epsilon_r$ : relative Dielektrizitätskonstante, Proportionalitätskonstante zur Beschreibung der Isolareigenschaften. (Beispiele: Vakuum:  $\epsilon_V = 1$ , Luft:  $\epsilon_L \approx 1$ , destilliertes Wasser:  $\epsilon_W = 81$ , Myelin:  $\epsilon_M = 7$ .)

Neben dem Plattenkondensator gibt es noch Kondensatoren anderer Bauweisen. Für die Realisierung in elektrischen Bauteilen werden statt der beiden Platten oft zwei Aluminiumfolien und dazwischen ein Isolator (z.B. eine Plastikfolie) übereinander gelegt und platzsparend aufgerollt (Abb. 8 Mitte).

Eine physiologisch interessante Variante ist in Abb. 8 rechts dargestellt. Dabei werden die positiven und negativen Ladungen durch eine zylindrische Wand isoliert. Dies ist ein Modell für eine langgezogene Nervenzelle und wird später noch näher erläutert.

3. RC-Glied: Auf- und Entladevorgang

Ein *RC-Glied* besteht aus einem Widerstand  $R$  und einer Kondensator mit Kapazität  $C$ . Diese beiden Bauteile werden parallel geschaltet und mit einer geeigneten Spannungsquelle verbunden (vgl. Abb. 9), sodass ein Rechteckstrom mit den Werten  $I_0$  und  $0 \text{ A}$  fließt. Aufgrund der Parallelschaltung muss die Spannung am Kondensator gleich der am Widerstand sein.

Zunächst teilt sich der (konstante) Gesamtstrom  $I$  in der Parallelschaltung auf die beiden Zweige (Widerstand und Kondensator) auf. Direkt nach Einschalten der Spannungsquelle fließt nahezu der gesamte Strom auf den Kondensator, da dieser noch ungeladen ist. Der Strom  $I_M$  durch den Widerstand ist nur sehr klein und nach  $U = R_M \cdot I_M$  fällt dort zunächst nur eine geringe Spannung ab.

Je mehr die Platten des Kondensators durch den Stromfluss aufgeladen werden, desto stärker stoßen die dort gespeicherten Ladungen die nachfließenden ab: Der Strom auf den Kondensator nimmt ab. Da der Gesamtstrom  $I$  konstant bleibt, muss in gleichem Maße der Strom  $I_M$  durch den Widerstand ansteigen. Damit steigt auch die am Widerstand gemessene Spannung. Schließlich fließt überhaupt kein Strom mehr auf den Kondensator und deshalb der gesamte Strom  $I_M = I$  durch den Widerstand, so dass am Widerstand die maximale Spannung  $U_0 = R_M \cdot I$  anliegt. Diesen Prozess nennt man Aufladevorgang des Kondensators (mit Hilfe eines Widerstands).

Wenn der Rechteckstrom der Spannungsquelle auf  $0 \text{ A}$  springt, entlädt sich der Kondensator über den Widerstand. Der Entladestrom ist proportional zur Ladung auf dem Kondensator. Er ist also zu Beginn am höchsten und nimmt dann ab. Genauso verhält sich die Spannung am Widerstand. Diesen Prozess bezeichnet man als Entladevorgang.

Die Zeitabhängigkeit des Auf- und Entladevorgangs ist in Abb. 10 dargestellt.

Der Aufladevorgang wird durch Gl. (9), der Entladevorgang durch Gl. (10) beschrieben (ohne Herleitung).

$$U(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-t/(R_M \cdot C_M)}) \quad (9)$$

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-t/(R_M \cdot C_M)} \quad (10)$$

Dabei ist  $U(t)$  die zum Zeitpunkt  $t$  am Widerstand  $R_M$  abfallende Spannung und  $U_0$  die Maximalspannung.

Die in Abb. 10 angegebene Zeit  $\tau$  (griech.: „tau“) ist die Zeitspanne ab Beginn des Aufladevorgangs bis die gemessene Spannung  $(1 - 1/e) = 63\%$  ihres Maximalwertes erreicht hat. Genauso ist sie die Zeitspanne ab Beginn des Entladevorgangs bis die gemessene Spannung auf  $1/e = 37\%$  des Maximalwertes gefallen ist. Bei einem exponentiellen Verlauf sind beide Zeiten gleich. Diese Zeit charakterisiert, wie schnell oder langsam ein solcher Vorgang abläuft bzw. sich ein System „erholt“. Sie heißt daher Zeitkonstante oder Relaxationszeit (englisch: to relax = sich erholen).

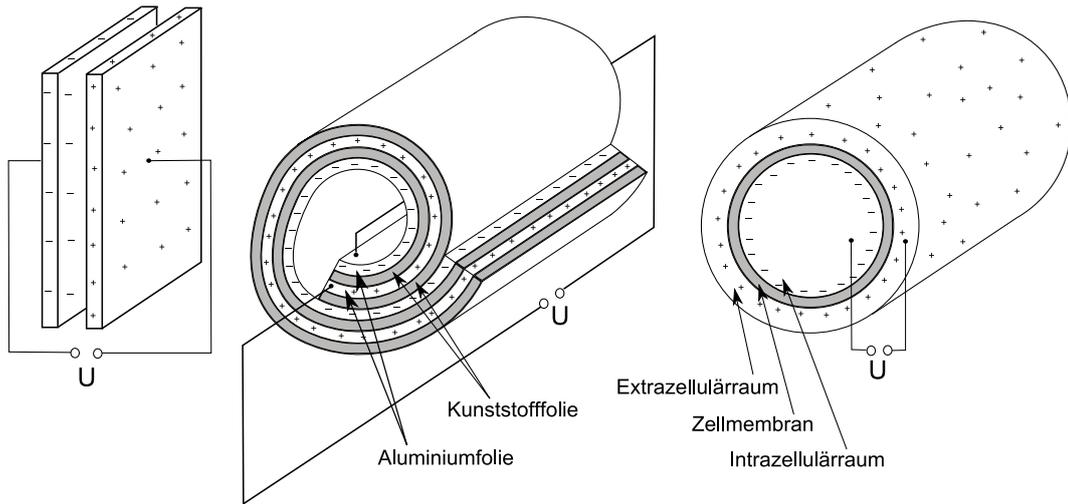


Abb. 8: Verschiedene Bauweisen von Kondensatoren.

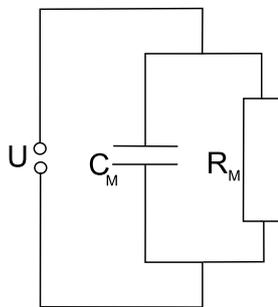


Abb. 9: RC-Glied.

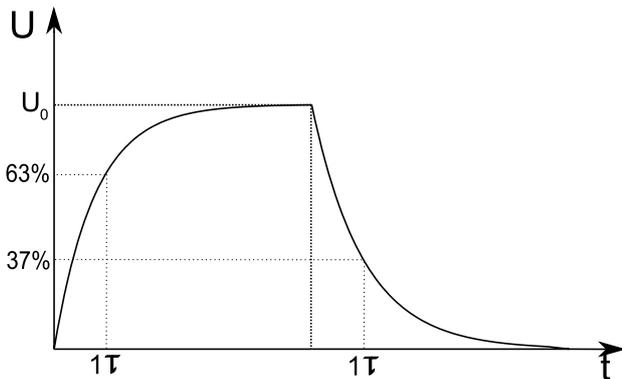


Abb. 10: Auf- und Entladekurve eines Kondensators: Spannung  $U$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$ . Die Zeitkonstante  $\tau$  bezieht sich jeweils auf den Beginn des Auf- bzw. Entladevorgangs.

Sowohl für das Aufladen als auch das Entladen des Kondensators gilt nach Gl. (9) und Gl. (10):

$$\tau = R_M \cdot C_M \quad \text{mit} \quad [\tau] = \text{s} \quad (11)$$

4. Diskussion aus physiologischer Sicht

Die Membran einer Nervenzelle besteht aus einer Doppellipidschicht, welche die Elektrolyte ( $\text{Na}^+$ -,  $\text{K}^+$ - oder  $\text{Cl}^-$ - Ionen) im Intra- und Extrazellulärraum gegeneinander isoliert. So können Intra- und Extrazellulärraum mit den Platten eines Kondensators und die Membran (isolierende Doppellipidschicht) mit dem Isolator zwischen den Platten verglichen werden (vgl. dazu Abb. 8 rechts). Bei den Elektrolyten handelt es sich um bewegliche Ladungen. In der Membran sind Ionenkanäle eingelagert, durch die ein Ionenaustausch stattfinden kann. Sie können mit Widerständen verglichen werden. Diese beiden Eigenschaften der Membran werden also physikalisch durch die Membrankapazität  $C_M$  und den Membranwiderstand  $R_M$  beschrieben. So wird jeweils ein kurzer Abschnitt (Größenordnung:  $\mu\text{m}$ ) einer Membran einer Nervenzelle durch ein RC-Glied simuliert.<sup>1</sup> Aufgrund von Ladungs- und Konzentrationsunterschieden der verschiedenen Ionenarten im Intra- und Extrazellulärraum fließen Ionen durch die Kanäle der Membran und es stellt sich nach einiger Zeit ein Fließgleichgewicht ein, bei dem im Intrazellulärraum effektiv mehr negative Ladungen zu finden sind. Das *Membranpotential* ist die im nicht erregten Zustand zwischen Intra- und Extrazellulärraum messbare Spannung. Es liegt bei  $U \approx -70 \text{ mV}$ .

Abb. 11 zeigt, wie ein kurzer Abschnitt einer Nervenzelle durch ein RC-Glied modelliert werden kann. Die Nervenzelle wird links am Ort A depolarisiert, beispielsweise durch eine Reizung sensorischer Nervenzellen. In diesem Fall strömen  $\text{Na}^+$ - Ionen ins Innere der Zel-

<sup>1</sup> In der Literatur werden diese Größen häufig als spezifische Werte angegeben, z.B.  $C_m = 0,01 \text{ F/m}$  oder  $C_m = 3 \cdot 10^{-7} \text{ F}/\mu\text{m}^2$ : Kapazität pro Länge der Zelle, bzw. Kapazität pro Fläche der Membran. Je nach Angabe wird bei diesen Werten der Radius einer zylinderförmigen Nervenzelle unterschiedlich eingerechnet, trotzdem aber der gleiche Buchstabe verwendet.

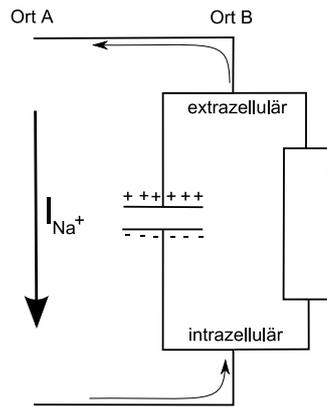


Abb. 11: Ladungsverteilung in einer am Ort A depolarisierten Nervenzelle.

le. Diese Veränderung der Ladungsverteilung führt zu einer Verschiebung des Potentials weg vom Ruhemembranpotential und wird als Erregung bezeichnet. Wenn sich diese Erregung entlang der Membran ausbreitet, ohne aktiv erneuert zu werden (Bildung eines Aktionspotentials), spricht man von passiver oder elektrotischer Erregungsausbreitung. Dabei fließt zunächst ein Teil des Stroms durch den Intrazellulärraum der Nervenzelle - in der Abbildung von unten links nach unten rechts. Da sich die Membran wie ein RC-Glied verhält, nimmt die an der Membran messbare Spannung nicht sofort ihren neuen Wert an.

An dieser Stelle spielt die Zeitkonstante  $\tau$  der  $e$ -Funktion des RC-Glieds eine wichtige physiologische Rolle. Nach der Zeit  $t = \tau$  hat die Depolarisation der Membran (Ort B) erst 63% ihres Maximums erreicht. Die Änderung des Membranpotentials am Ort A kann also erst mit einer Zeitverzögerung am Ort B registriert werden.  $\tau$  bestimmt so die Ausbreitungsgeschwindigkeit entlang der Membran der Nervenzelle.

Für die Beschreibung der aktiven Fortleitung einer Erregung reicht dieses Modell nicht mehr aus. Grundsätzlich hängt die Geschwindigkeit, mit der ein neues Aktionspotential gebildet werden kann, wieder von der Membrankapazität ab. Die Zeitverzögerung durch die an der Membran stattfindenden Ent- bzw. Aufladevorgänge beeinflusst damit auch die Geschwindigkeit der Erregungsausbreitung selbst.

Im Gegensatz zur kontinuierlichen Erregungsausbreitung werden bei der sogenannten saltatorischen Erregungsausbreitung nur an den Ranvierschen Schnürringen neue Aktionspotentiale gebildet. Dazwischen, an den Internodien, breitet sich die Erregung elektrotisch aus. Myelin umgibt das Axon in diesen Bereichen und senkt die Verlustströme durch die Membran ab, da es als elektrischer Isolator einen hohen Widerstand besitzt. Physikalisch wird dies durch einen erhöhten Membranwiderstand beschrieben. Gleichzeitig vergrößert Myelin als elektrischer Isolator den Abstand zwischen Intra- und Extrazellulärraum und senkt damit die Kapazität der Membran sehr stark ab.

Eine normale Membran besitzt eine Zeitkonstante von etwa  $\tau = 1$  ms. Myelinisierung erhöht zwar den Mem-

branwiderstand, senkt die Kapazität der Membran aber sehr viel stärker ab, so dass die Zeitkonstante  $\tau$  insgesamt abnimmt.

### III. TECHNISCHE GRUNDLAGEN

Im klassischen Oszilloskopmodus (auch  $t$ - $x$ -Modus genannt) wird die Zeitachse nach rechts und der Wert des gemessenen Signals nach oben aufgetragen. Durch eine geeignete Wahl der Einstellungen kann ein Signal am Bildschirm gut dargestellt werden.

Bei periodischen Signalen kann mit Hilfe des Triggers (kleines gelbes Kreuz) ein stehendes Bild erzeugt werden, indem man ihn in den Verlauf des Signals schiebt. Moderne Oszilloskope verfügen häufig über eine „autoconfig“-Funktion. Dabei versucht die Software, Zeit- und Amplitudenauflosung sowie die Triggereinstellung automatisch einzustellen. Dies kann als Hilfestellung verwendet werden, normalerweise sollten die Einstellungen jedoch von Hand vorgenommen werden.

Für die Anzeige der Skalierung der Achsen gibt es zwei gängige Varianten: entweder findet sich eine Skala, auf der die Absolutwerte des Signals direkt abgelesen werden können, oder der Schirm wird in Kästchen (englisch: division) unterteilt und die Amplitude eines Kästchens als „x pro div“ angegeben, so dass die Amplitude oder ein Zeitabstand durch „Kästchenzählen“ ermittelt werden kann.

Um zur Zeit- und Amplitudenmessung die Abstände und Kästchen nicht von Hand zählen zu müssen, verfügen Oszilloskope meist über verschiedene Messcursor. Dabei werden via Tastatur oder Maus zwei Cursorlinien auf dem Bildschirm geeignet verschoben, so dass der Messwert als Abstand der Cursor abgelesen werden kann.

Mit dem in diesem Versuch verwendeten Oszilloskop<sup>2</sup> können - je nach Wahl der Eingangsquelle - sowohl akustische als auch elektrische Signale dargestellt und vermessen werden. Eine ausführlichere Beschreibung der Funktion der Bedienelemente finden Sie im Manual, das an Ihrem Arbeitsplatz ausliegt (vgl. Abschnitt VI).

Im ersten Teil des Versuchs analysieren Sie akustische Signale. Um die Lautstärke individuell regeln zu können, wird ein Kopfhörerverstärker (Abb. 12) verwendet. Nachdem dieser mit dem Netzteil verbunden wurde, wird das zu verstärkende Signal über den Eingang (Input) eingespeist. Die Lautstärke Ihres angeschlossenen Kopfhörers können Sie über den entsprechenden Drehregler variieren. Im Heimversuch übernimmt dies Ihr Lautsprecher oder Ihr Kopfhörer.

Im zweiten Teil des Versuchs messen Sie die an einem Widerstand abfallende Spannung. Dabei wird ei-

<sup>2</sup> Die Software wird dankenswerterweise von Herrn Prof. Dr. Christian Zeitnitz von der BU Wuppertal zur Verfügung gestellt und kann für private Zwecke kostenlos unter [www.zeitnitz.de/Christian/Scope/Scope\\_ger.html](http://www.zeitnitz.de/Christian/Scope/Scope_ger.html) heruntergeladen werden.

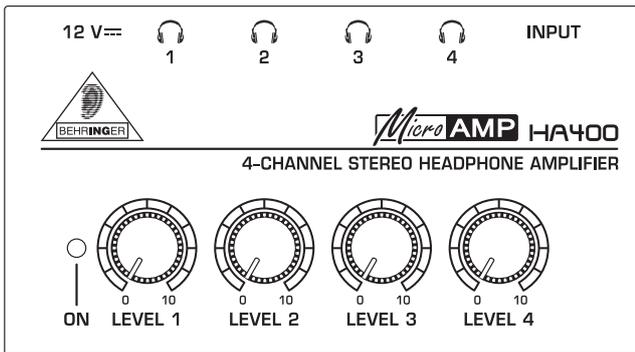


Abb. 12: Anschlüsse des Kopfhörerverstärkers (oben, von links nach rechts): Netzteilanschluss zur Spannungsversorgung, vier Kopfhörerausgänge, Input-Buchse für das Eingangssignal. Mit freundlicher Genehmigung von www.behringer.de.

ne einfache Schaltung auf der in Abb. 13 dargestellten Rastersteckplatte aufgebaut. Diese besteht aus einzelnen quadratischen Kupferplatten (in der Abbildung grau unterlegt). Alle Buchsen einer solchen Platte sind miteinander leitend verbunden. Um zwei solche Platten zu verbinden, werden schwarze Kurzschlussstecker (KS,  $R \approx 0\Omega$ ) oder Widerstände (R) verwendet. Der Anschluss der Stromquelle (SQ) bzw. des Oszilloskops erfolgt mit den roten und schwarzen Messkabeln.

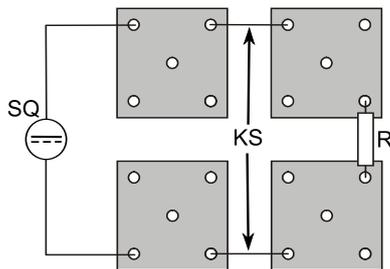


Abb. 13: Die im Versuch verwendete Rastersteckplatte.

Abb. 14 zeigt die verwendete Stromquelle. Über den Anschluss (oben) wird diese mit dem Netzteil verbunden. Die Wahl des Signals erfolgt über den Kippschalter: Im Puls-Modus liefert das Gerät einen Rechteckstrom (vgl. Abb. 2), während im DC-Modus ein konstanter Strom erzeugt wird. Mit dem Drehregler kann die Frequenz des Signals variiert werden. Um einen Stromkreis aufzubauen, werden die beiden Ausgänge auf der rechten Seite des Gehäuses verwendet.

Als Messgerät dient ein digitales USB-Oszilloskop (Abb. 15). Dieses wird über ein USB-Kabel mit dem Rechner verbunden und das Spannungssignal über die Eingänge A1-4 bzw. GND gemessen.

#### IV. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Der Versuch findet in Online-Modus statt. Führen Sie am besten die Teilversuche 1 bis 4 vor der Videokonferenz zu Hause durch, um eventuelle Probleme während

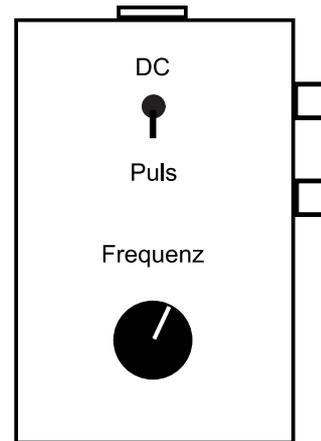


Abb. 14: Stromquelle mit regelbarer Frequenz und Amplitude.

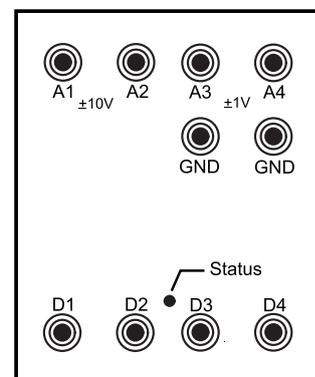


Abb. 15: Die USB-Box.

der Konferenz mit den Betreuenden diskutieren und beheben zu können. Der Teilversuch 5 wird am Praktikumstag anhand von Videos von den Betreuenden erklärt. Sie bekommen Datensätze echter Messwerte zur Auswertung. Die Beschreibung der Durchführung der Teilversuche beinhaltet Schritte, die nur im Präsenz-Modus durchführbar sind, um Ihnen einen Eindruck zu vermitteln, wie der Teilversuch in Realität stattfindet.

#### PC-Vorbereitung

Installieren Sie das Programm „Scope“. Die Software „Scope\_146“ können Sie von der Webseite der Hersteller ([https://www.zeitnitz.eu/scms/scope\\_de](https://www.zeitnitz.eu/scms/scope_de)) herunterladen und auf Ihrem Windows-Rechner installieren. Falls Sie keinen Windows-Rechner haben, kontaktieren Sie Ihre Betreuung.

#### IV.1. Musik sichtbar machen („Versuch daheim“)

##### 1. Kurzbeschreibung

Sie visualisieren ein Musikbeispiel, um sich mit der Funktionsweise und Bedienung des Soundkarten-

Oszilloskops vertraut zu machen.

## 2. Messgrößen und Durchführung

- Starten Sie das Programm „Scope“. Falls das Lizenzfenster auftaucht, klicken Sie auf „Schließen“.
- Wählen Sie einen Musiktitel (1.wav oder 2.wav) aus und starten Sie die Wiedergabe. Eventuell müssen Sie noch die richtige Eingangsquelle für das Soundkarten-Oszilloskop auswählen. Infos finden Sie auf Seite 4 des Manuals (siehe Abb. 17). Solche Hinweise werden im folgenden mit **M4** für „Manual, Seite 4“ angegeben.
- Schalten Sie Kanal 2 aus (**M2**).
- Verwenden Sie die Regler „Amplitude“ und „Zeit“ für ein möglichst gut sichtbares Signal. Nutzen Sie die Einstellmöglichkeiten für die zeitliche Skalierung voll aus und beobachten Sie, wie sich die Form des Signals verändert. Mit dem Knopf „Run/Stop“ können Sie die Darstellung jederzeit einfrieren (**M1**).
- In der Registerkarte „Frequenzanalyse“ finden Sie die Darstellung im Frequenzbild. Falls Sie nichts sehen, ist die Anzeige eventuell eingefroren, drücken Sie dann nochmal Run/Stop. Nutzen Sie die Einstellungen „automatische Skala“ und „log“, um ein Gefühl für die Darstellung zu bekommen (**M3**).

## IV.2. Frequenz und Amplitude eines Sinustons („Versuch daheim“)

### 1. Kurzbeschreibung

Sie untersuchen einen perfekten, von einem Signalgenerator erstellten Sinuston.

## 2. Messgrößen und Durchführung

- Starten Sie die Wiedergabe der Datei 9.wav. Diese gibt einen reinen Sinuston wieder. Wenn das Signal „durchläuft“, verschieben Sie das gelbe Triggerkreuz (**M2**) in das Signal.
- Untersuchen Sie die Frequenz- und Amplitudenabhängigkeit der Darstellung von den Eingangsparametern des Signals, indem Sie die Lautstärke am mp3-Player variieren. Beschreiben Sie die Veränderungen im Oszilloskop- und Frequenzbild in kurzen Worten.
- Schalten Sie für die beiden folgenden Punkte die Cursoren für Zeit bzw. Spannung ein (**M2**). „dT“ bezeichnet die Zeitdifferenz der beiden vertikalen Cursoren, „dA“ die Spannungsdifferenz der beiden horizontalen Cursoren.

- Vermessen Sie die Zeit  $t$  für mindestens drei Schwingungsperioden in ms mit Unsicherheit, um die Periodendauer der Schwingung zu bestimmen und notieren Sie das Ergebnis.
- Vermessen Sie den Spitze-Tal-Wert  $A_{ST}$  anhand eines Maximum-/Minimum-Paares, um die Amplitude der Schwingung zu bestimmen (ohne Unsicherheit).
- Vermessen Sie im Frequenzbild die Frequenz  $f$  mit Unsicherheit. Bringen Sie dazu den Cursor in die Nähe des Peaks und benutzen Sie die Verschiebe- und die Zoom-Funktion für eine möglichst genaue Messung.

Folgende Messwerte sollten Sie notiert haben:

- Zeit für mindestens drei Schwingungsperioden mit Unsicherheit
- Spitze-Tal-Wert ohne Unsicherheit
- Frequenz der Schwingung mit Unsicherheit

## IV.3. Vermessung eines Obertonspektrums („Versuch daheim“)

### 1. Kurzbeschreibung

Sie visualisieren das natürliche Obertonspektrum eines Instruments und bestimmen das numerische Verhältnis der Frequenzen der Obertonreihe.

## 2. Messgrößen und Durchführung

- Wählen Sie eine Sounddatei zum Thema „Obertöne“<sup>3</sup> (Querflöte: 3.wav / Waldhorn: 4.wav / Violine: 5.wav) aus. Betrachten Sie das Tonbeispiel im Oszilloskop- und Frequenzbild. Notieren Sie, welche Sounddatei Sie gewählt haben.
- Frieren Sie im Frequenzbild mit dem Button „Run/Stop“ ein geeignetes Obertonspektrum ein.
- Vermessen Sie die Frequenzen  $f_n$  des Grundtons und weiterer 8 Obertöne ohne Messunsicherheit mittels des Cursors (**M3**).
- Meist taucht sehr nahe bei 0 Hz ein Peak auf. Dieser hat einen mathematischen Hintergrund, zählt aber nicht mit.
- Manche Peaks können auch sehr klein sein. Um keine zu übersehen, überlegen Sie sich bitte nach Vermessung der Frequenz des Grundtons, wo die Frequenzen der Obertöne liegen sollten.

<sup>3</sup> Mit freundlicher Genehmigung von [www.didaktik.physik.fu-berlin.de/sounds/](http://www.didaktik.physik.fu-berlin.de/sounds/)

Folgende Messwerte sollten Sie notiert haben:

- Name der Datei
- $f_n (n = 0, \dots, 8)$  ohne Unsicherheit

#### IV.4. Das menschliche Hörvermögen („Versuch daheim“)

##### 1. Kurzbeschreibung

Sie hören und vermessen den altersbedingten Unterschied im Hörvermögen.

##### 2. Messgrößen und Durchführung

- Sie arbeiten im Frequenzbild. Die dortige Zoom-Funktion sollte während dieses Teilversuches nicht verwendet werden. Der Schieber sollte ganz links stehen.
- Wählen Sie die Option „autom. Skala“ aus.
- Aktivieren Sie die Funktion „Pegelspitzen halten“ (M3). Alle abgespielten Frequenzen bleiben dann angezeigt. Sie erhalten ein kumuliertes Frequenzbild.
- Spielen Sie nun die Datei 7.wav ab. Der Musikausschnitt dauert ca. 40 Sekunden. Nach ca. 15-20 Sekunden können Sie die Aufnahme stoppen.
- Speichern Sie das angezeigte Bild im Stop-Modus. Dieses wird schwarz/weiß und in Farbe am Desktop als JPG-Datei abgelegt. Öffnen Sie das Bild (s/w) mit einem passenden Programm (z.B. Microsoft Fotos, LibreOffice Draw, IrfanView etc.) und drucken Sie dieses auf Ihrem Drucker oder als PDF-Datei aus.
- Wiederholen Sie dies mit der Datei 8.wav.
- Beschriften Sie beide Ausdrucke mit 7.wav bzw. 8.wav und Ihrem Namen.

#### IV.5. Auf- und Entladekurve eines Kondensators

##### 1. Kurzbeschreibung

Sie vermessen ein RC-Glied als Modell für einen kurzen Abschnitt der Membran einer Nervenzelle. Sie bestimmen die Zeitkonstante  $\tau$ .

##### 2. Messgrößen und Durchführung

- Bauen Sie eine Parallelschaltung aus dem Widerstand  $R$  und einem Kondensator mit Kapazität  $C$ .

- Schließen Sie die Rechteckstromquelle gemäß Abb. 9 an.
- Starten Sie die Software „Scope“ neu und wählen Sie als Eingangsquelle (M4) die USB-Box aus (Kanäle A1, A2). Deaktivieren Sie der Übersichtlichkeit wegen Kanal 2 (M2).
- Die Stromquelle erzeugt in der Einstellung „Puls“ einen Rechteckstrom, wodurch am Kondensator die oben beschriebene Auflade- und Entladespannung entsteht. Mit dem Drehregler an der Stromquelle können Sie die Frequenz des Rechteckstroms verändern. Wählen Sie eine beliebige Frequenz aus.
- Verwenden Sie die Einstellmöglichkeiten der Software und der Stromquelle, um einen kompletten Auf- und Entladevorgänge sichtbar zu machen. Variieren Sie die Periodendauer der Stromquelle so, dass der Spannungsverlauf den exponentiellen Verlauf gut erkennen lässt. Insbesondere muss der nahezu waagrechte Verlauf nahe bei  $U_0$  und  $0 V$  erkennbar sein (keine Sägezahnkurve!).
- Beobachten Sie, wie sich das Signal ändert, wenn Sie den Kondensator im laufenden Betrieb kurz herausziehen. Anschließend stecken Sie ihn wieder hinein.
- Bestimmen Sie zunächst die maximale Amplitude  $dA$  und damit den Spannungswert  $U_0$  ohne Messunsicherheit.
- Nach der Zeit  $t = \tau$  ist die Spannung auf  $1/e = 37\%$  des Ausgangswertes  $dA$  abgefallen oder auf  $1 - 1/e = 63\%$  des Endwertes  $dA$  gestiegen. Nutzen Sie dieses Wissen, um mit den Zeit cursoren  $\tau$  zu bestimmen. Nutzen Sie dabei den Auflade- und den Entladevorgang, um insgesamt zwei Werte für  $\tau$  zu erhalten. Auf der Zeitskala werden Millisekunden durch  $ms$  und Mikrosekunden durch  $\mu s$  (statt der üblichen  $\mu s$ ) abgekürzt.
- Falls Sie keine zwei verschiedenen Werte haben, wiederholen Sie eine Messung.

## V. AUSWERTUNG

### V.1. Musik sichtbar machen („Versuch daheim“)

- Bei diesem Teilversuch gibt es keine Auswertung.

### V.2. Frequenz und Amplitude eines Sinustons („Versuch daheim“)

- Berechnen Sie aus der Periodendauer die Frequenz des Signals mitsamt Unsicherheit.
- Vergleichen Sie diesen Wert mit Ihrer Messung im Frequenzbild.

- Berechnen Sie die Amplitude des Signals ohne Unsicherheit.

### V.3. Vermessung eines Obertonspektrums („Versuch daheim“)

- Tragen Sie graphisch  $f_n$  gegen  $n$  auf. Warum bestätigt der Verlauf des Graphen das aus der Theorie bekannte Frequenzverhältnis der Obertöne?

### V.4. Das menschliche Hörvermögen („Versuch daheim“)

- Die Datei 7.wav wurde mit einem Frequenzfilter bearbeitet, so dass Sie eine grobe Vorstellung davon erhalten, wie sich das Hörvermögen im Alter von ca. 60 Jahren verändert hat. Vergleichen Sie die beiden Hörbeispiele anhand Ihrer Ausdrücke. Unterteilen Sie dazu den Frequenzbereich in drei sinnvolle Abschnitte und formulieren Sie die Un-

terschiede zwischen beiden Hörbeispielen für jeden der Bereiche.

### V.5. Auf- und Entladekurve eines Kondensators

- Bestimmen Sie den Mittelwert für Ihren gemessenen Wert  $\tau_{\text{exp}}$  und die Messunsicherheit  $\Delta\tau_{\text{exp}} = (\tau_{\text{max}} - \tau_{\text{min}})/2$ . Berechnen Sie zunächst die Unsicherheit für  $\tau_{\text{theo}}$ , indem Sie die einzelnen relativen Fehler addieren und mit  $\tau_{\text{theo}}$  multiplizieren, und geben Sie so ein Intervall für den theoretischen Wert der Zeitkonstante in folgender Form an:  $\tau \pm \Delta\tau$ .
- Vergleichen Sie Ihren gemessenen Wert für  $\tau$  mit dem rechnerischen Wert.

## VI. ANHANG MANUAL

Siehe nächste Seite.

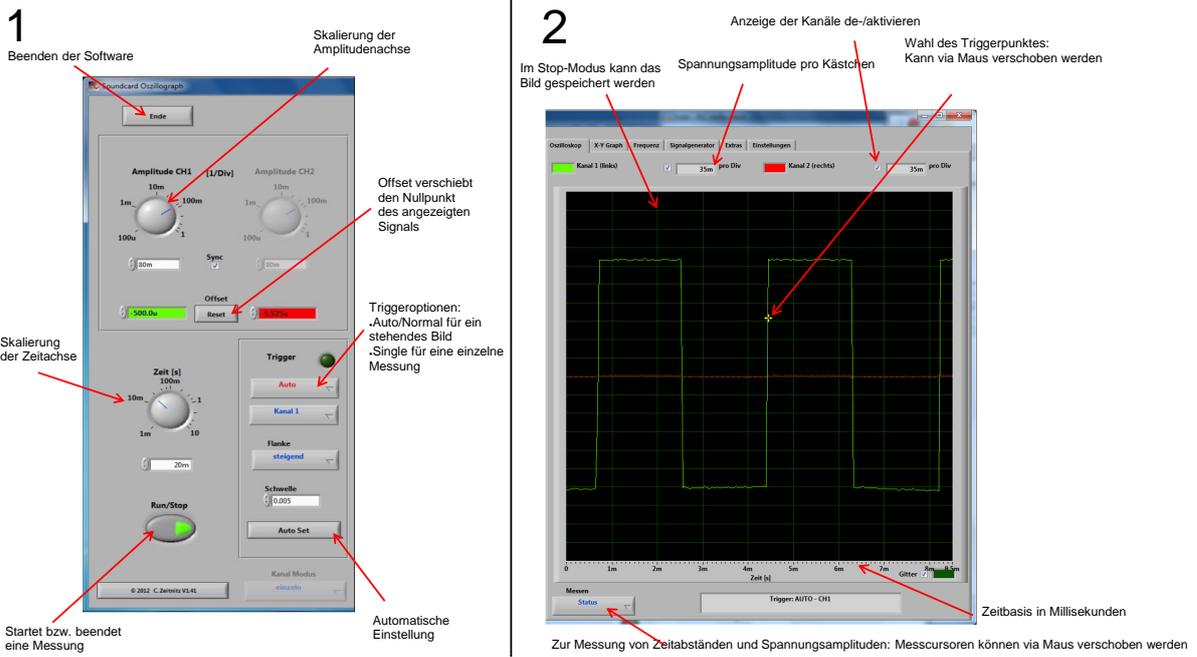


Abb. 16: Manual M1-M2.

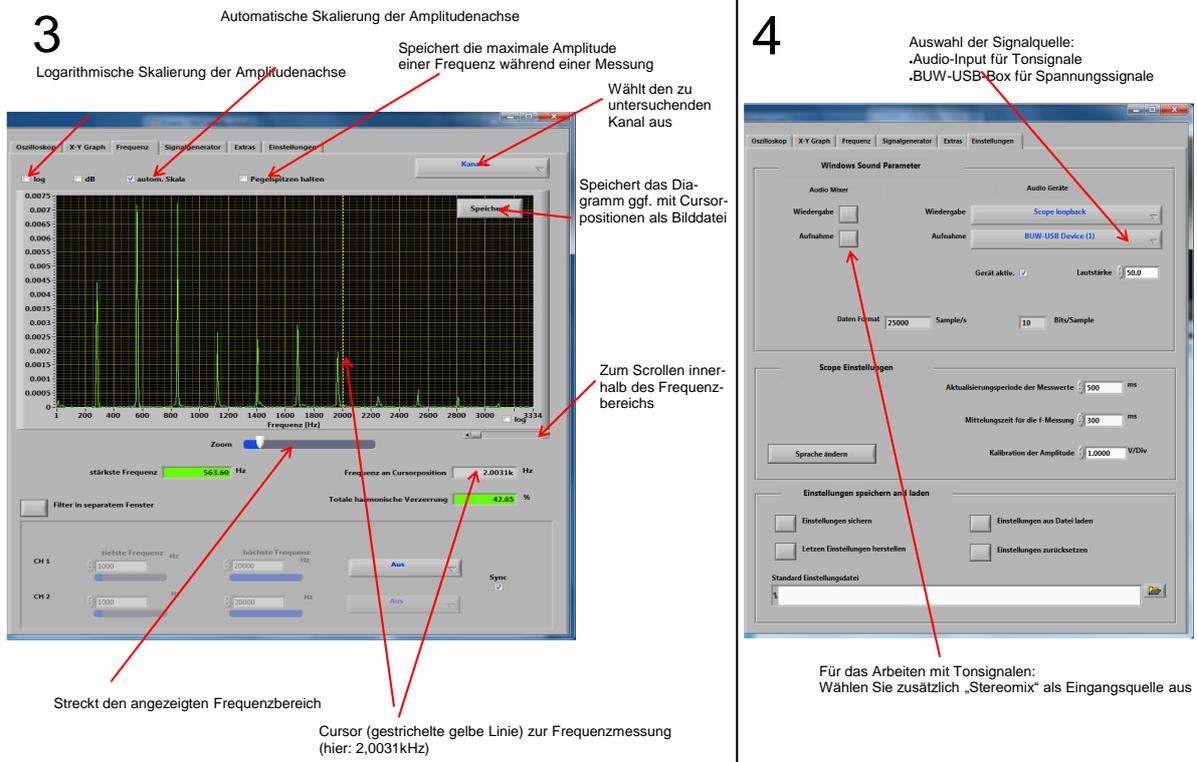


Abb. 17: Manual M3-M4.