

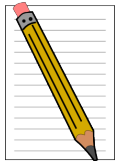
C00 – Grundlagen der elektrischen Messtechnik.

In diesem Versuch werden Sie lernen Messungen im Bereich der Elektrizitätslehre durchzuführen. Zwei Messgeräte stehen dabei im Zentrum: Mit dem Oszilloskop und dem Multimeter werden Sie elektrische Spannungen, elektrische Stromstärken, elektrische Leistungen sowie Widerstände messen. Es gibt drei verpflichtende Versuchsteile zu denen Sie sich bitte mindestens einen weiteren der vier optionalen Versuchsteile auswählen.

Schriftliche VORbereitung:

- Erläutern Sie die Begriffe elektrischer Strom, elektrische Spannung und Ohmscher Widerstand. Einheiten! Was besagt das Ohmsche Gesetz? Wann darf es angewendet werden?
- Machen Sie sich den prinzipiellen Aufbau eines Oszilloskops klar. Wo und wie werden die Elektronen beschleunigt, fokussiert, abgelenkt? Welche physikalischen Gesetze bestimmen die Ablenkung?
- Wie können Periode, Phase, Amplitude mit einem Oszilloskop gemessen werden. Einheiten!
- Kondensatorladung: Skizzieren Sie den Verlauf $U_C(t)$ für den Ladevorgang eines Kondensators.
- Leiten Sie $U_C(t)$ für den Entladevorgang her.
- Bringen Sie zu jeder Aufgabe einen Schaltplan mit.

Die folgenden Fragen zur Vorbereitung müssen Sie nur bearbeiten, wenn Sie den entsprechenden optionalen Versuchsteil bearbeiten wollen.



- Teil 4 und 5: Herleitung der Gleichung (11).
- Teil 4 und 5: Belasteter Spannungsteiler: Skizzieren Sie den Verlauf $\frac{U_a}{U_0}(x)$ für $\frac{R_L}{R} = 1, 0,5$ und $0,1$.
- Teil 6: Stellen Sie eine typische Diodenkennlinie dar.
- Teil 6: Wie unterscheiden sich die Kennlinien von Zener- und Siliziumdioden?
- Teil 7: Welche Widerstands- und Kapazitätswerte sind realistisch um eine Zeitkonstante von einer Sekunde zu erreichen?
- Teil 7: Warum ist der Innenwiderstand des Messgeräts signifikant für die Entladekurve bei sehr großen Zeitkonstanten.

Der Versuch wird von einem virtuellen Oszilloskop begleitet:

https://ap.iqo.uni-hannover.de/doku.php?id=c_elehre:oszilloskop

und in Vollbild:

<https://ap.iqo.uni-hannover.de/VirtuellesOszi/>

1 Grundlagen

Dieser Abschnitt soll die wichtigsten theoretischen Zusammenhänge aufgreifen, die zur Bearbeitung der Messaufgaben im kommenden Abschnitt notwendig sind.

Elektrische Spannung

Die Differenz zweier elektrostatischer Potentiale nennt man elektrische Spannung U . Die Einheit der elektrischen Spannung ist Volt. Spannungen werden also immer zwischen zwei Raumpunkten gemessen. In der Praxis wird ein Bezugspotential definiert auf welches sich die Spannungsmessung bezieht. Dieses Bezugspotential wird *Masse* genannt. Bezeichnen Sie daher die Spannung eindeutig, sodass deutlich wird welche Potentialdifferenz gemessen wurde.

Elektrischer Strom

Der gerichtete Transport von Ladungsträgern wird elektrischer Strom genannt. Die Stromstärke I gibt die Ladungsmenge dQ an, die pro Zeiteinheit dt durch einen Leiter fließt. Die Stromrichtung ist dabei senkrecht zum Querschnitt des Leiters. Die Einheit ist Ampere. Es ist:

$$I = \frac{dQ}{dt}. \quad (1)$$

Elektrischer Widerstand und das Ohm'sche Gesetz

Der elektrische Widerstand ist definiert als Quotient aus der Spannung U , die über einen Leiter abfällt, und der Stromstärke I , die durch den Leiter fließt.

$$R = \frac{U}{I}. \quad (2)$$

Das ist NICHT das Ohm'sche Gesetz!

Ist der elektrische Widerstand konstant, so ist der Leiter ein ohm'scher Widerstand und die Spannung ist über große Bereiche proportional zur Stromstärke I :

$$U = R \cdot I. \quad (3)$$

Das ist das Ohm'sche Gesetz, es gilt häufig, aber nicht immer: Zum Beispiel zeigen Halbleiterdioden ein nicht konstantes Verhältnis der Spannung zur Stromstärke. Hier kann ein differentieller Widerstand angegeben werden:

$$r = \frac{dU}{dI}. \quad (4)$$

Dieser ist auf eine bestimmte Spannung bezogen.

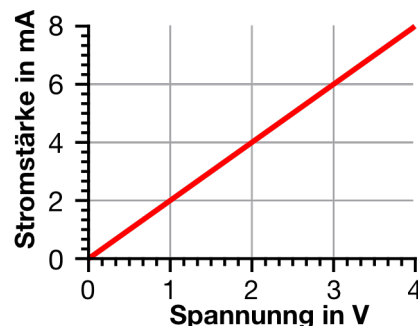


Abb. 1: Die U-I-Kennlinie eines ohm'schen Widerstands ist eine Ursprungsgerade. Ihre Steigung entspricht dem reziproken Widerstandswert. Wie groß ist der zugehörige Widerstand?

Leistung

Um eine Ladungsmenge Q zwischen zwei Raumpunkten zu verschieben, muss elektrische Arbeit zu- oder abgeführt werden:

$$W_{el} = Q \cdot U. \quad (5)$$

U ist dabei die Potentialdifferenz zwischen beiden Raumpunkten. Ist diese zeitlich konstant so folgt mit (1) die elektrische Leistung

$$P_{el} = U \frac{dQ}{dt} = U \cdot I. \quad (6)$$

Für ohm'sche Widerstände gilt dann mit (3):

$$P_{el} = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}. \quad (7)$$

Bei einigen Bauteilen wird eine maximale Leistungsspezifikation angegeben. Zum Beispiel 0.25 W für Standard-Widerstände, die auch im Praktikum verwendet werden. An einem 100Ω Widerstand dürfen somit maximal 5 V abfallen, die Stromstärke durch den Widerstand beträgt dann maximal 50 mA.

Spannungsteiler

Die linke Schaltung in Abbildung 2 zeigt zwei Widerstände R_1 und R_2 in einer Reihenschaltung. Die Eingangsspannung U_0 fällt also über beide Widerstände ab. Der Strom I_{ges} fließt durch beide Widerstände. Es ist $U_0 = (R_1 + R_2) \cdot I_{ges}$. Für die Spannung U_1 welche über den Widerstand R_1 abfällt ergibt sich $U_1 = R_1 \cdot I_{ges}$. Insgesamt also

$$U_1 = R_1 \cdot \frac{U_0}{R_1 + R_2}. \quad (8)$$

Und symmetrisch zu (8) die Spannung U_2 , die über den Widerstand R_2 abfällt:

$$U_2 = R_2 \cdot \frac{U_0}{R_1 + R_2}.$$

Für $R_1 = R_2$ folgt zum Beispiel $U_1 = U_2 = \frac{1}{2}U_0$.

Wenn $R_1 = x \cdot R$ und $R_2 = (1 - x) \cdot R$ gewählt wird, mit $0 \leq x \leq 1$, dann modellieren Sie ein sehr wichtiges elektrisches Bauteil – das *Potentiometer*, vgl. Abbildung 2, rechte Schaltung. Mit diesem lässt sich eine beliebige Ausgangsspannung U_a zwischen 0 V und U_0 erzeugen. Ist ein Spannungsteiler unbelastet (Abbildung 3, $R_L \gg R$), so verhält sich die Ausgangsspannung linear, $U_a = x \cdot U_0$. Im belasteten Fall (R_L in der Größenordnung von R) ergibt sich die Knotenregel:

$$I_{ges} = I_x + I_L = \frac{U_a}{x \cdot R} + \frac{U_a}{R_L} \quad (9)$$

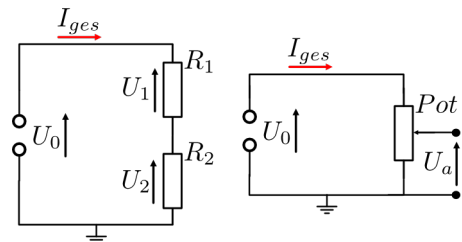


Abb. 2: In der linken Schaltung wurde der Spannungsteiler mit zwei Widerständen R_1 und R_2 umgesetzt. Rechts ermöglicht ein Potentiometer Pot die Spannung U_a von 0 V bis U_0 einzustellen.

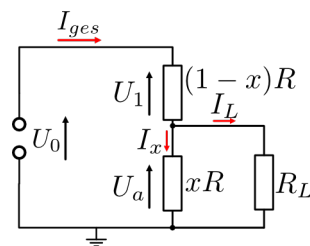


Abb. 3: Ersatzschaltbild zum belasteten Spannungsteiler. Die Widerstände $(1 - x)R$ und xR repräsentieren das Potentiometer. Im Versuch nutzen Sie also statt dieser Widerstände ein Potentiometer.

Weiter gilt die Maschenregel:

$$U_0 = U_1 + U_a = x \cdot R \cdot I_x + (1 - x)R \cdot I_{ges} \quad (10)$$

Zeigen Sie, dass aus den Gleichungen (9) und (10) folgt:

$$\frac{U_a}{U_0} = \frac{x}{(1 - x)x(R/R_L) + 1} \quad (11)$$

Kondensator

Der Kondensator ist ebenfalls ein wichtiges elektrisches Bauteil, er kann als Ladungsspeicher aufgefasst werden. Die Spannung $U_C(t)$, die über dem Kondensator abfällt ist proportional zur gespeicherten Ladungsmenge $Q(t)$:

$$U_C(t) = \frac{1}{C}Q(t). \quad (12)$$

Dabei ist C die Kapazität, sie wird in der Einheit Farad angegeben. Je größer die Kapazität, desto größer ist die Ladungsmenge, die notwendig ist, um den Kondensator aufzuladen.

In Abbildung 4 wird der Kondensator C durch eine Spannungsquelle mit der Spannung U_0 über den Widerstand R_a aufgeladen. Der Wechselschalter befindet sich in Position 1, R_e hat keinen Einfluss auf die Schaltung. Die Spannung $U_C(t)$ beschreibt den Spannungsabfall über dem Kondensator. Am Anfang ist der Kondensator ungeladen $U_C(0) = 0 \text{ V}$. Die gesamte Spannung fällt in diesem Moment über den Widerstand R ab. Diese Situation führt zur Stromstärke $I(0) = \frac{U_0}{R}$. Mit fortlaufender Zeit erhöht sich die Spannung am Kondensator und die Stromstärke nimmt ab. Es ist:

$$I(t) = \frac{U_0 - U_C(t)}{R} \quad (13)$$

Mit Gleichung (12) folgt:

$$I(t) = \frac{U_0}{R} - \frac{Q(t)}{RC} = \frac{U_0}{R} - \frac{Q(t)}{\tau} \quad (14)$$

Leitet man beide Seiten ab, so erhält man mit Gleichung (1) die DGL:

$$\dot{I} = -\frac{1}{\tau}I \quad (15)$$

Die Lösung für $I(t)$ ergibt sich direkt und mit Gleichung (14) folgt $U(t)$:

$$I(t) = I(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ bzw. } U_C(t) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \quad (16)$$

$\tau = R \cdot C$ wird Zeitkonstante genannt und hat die Einheit s. Wird der Wechselschalter in die Position zwei gebracht, entlädt sich der geladene Kondensator ($U_C(0) = U_0$) über den Widerstand R_e .

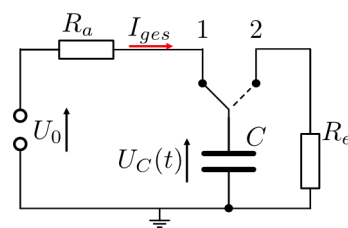


Abb. 4: Ist der Wechselschalter in Stellung 1 so wird der Kondensator aufgeladen. In Stellung 2 erfolgt eine Trennung des Kondensators von der Spannungsquelle. Der geladene Kondensator wird dann über den Widerstand R_e entladen.

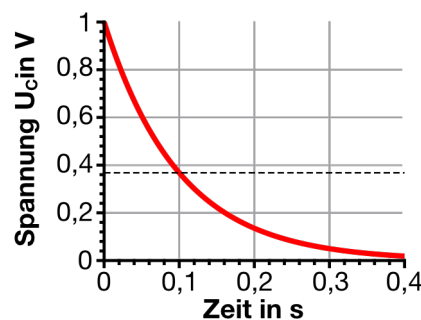


Abb. 5: Dargestellt ist die Entladekurve eines Kondensators, die Zeitkonstante beträgt $\tau = 0.1 \text{ s}$. Während der Zeit τ fällt die Spannung auf e^{-1} ab.

2 Diode

Durch einen pn-Halbleiter-Übergang fließen bei externer Spannung U Ladungsträger. Die Stromstärke hängt dabei stark vom Halbleitermaterial (chemisches Element, Dotierung, Geometrie) und exponentiell von einer extern angelegten Spannung U und der Temperatur T ab. Eine brauchbare Näherung für die Stromstärke I im Halbleiter liefert die Shockley-Formel:

$$I = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U}{nU_{th}}\right) - 1 \right] \quad \text{mit} \quad I_S \approx I_{S0}(T_0) \cdot \exp\left(-\frac{U_G}{U_{th}}\right) \quad \text{Sperrstromstärke.} \quad (17)$$

- Die *Thermospannung* $U_{th} = k_B T / e$ hat bei Zimmertemperatur $T_0 = 300 \text{ K}$ den Wert $U_{th0} = 25.8 \text{ mV}$;
- Externe Spannung U ; typische Werte: $-10 \text{ V} < U < 1 \text{ V}$;
- Bandlücke $U_G = E_G / e$; typische Werte liegen im Volt-Bereich;
- Rekombinationseffekte im Halbleiter reduzieren die wirkende Spannung U . Um diesen Effekt einzubauen, ersetzt man noch U durch U/n , mit dem materialabhängigen *Diodenfaktor* $1 < n < 2$.

Das elektronische Bauteil mit einem pn-Übergang wird als *Halbleiter-Diode* bezeichnet. Man unterscheidet, je nach Polung der externen Spannung *Sperrrichtung* der Halbleiter-Diode ($U < 0$) und *Flussrichtung* ($U > 0$). Die Sperrstromstärke hängt für $|U| \gg U_{th}$ nicht von der externen Spannung ab. In Flussrichtung gepolt, nimmt die Stromstärke exponentiell mit U zu. Die Kennlinienform ist für alle Halbleiterdioden gleich. Abb. 6 zeigt die nach Gl. (17) berechneten Diodenkennlinien. In jedem der Fälle finden Sie eine Exponentialfunktion ohne Schwellenwert. Der Faktor $\exp(-U_G/U_{th})$ führt zu einer Verschiebung der Kennlinien parallel zur Abszisse, die Form bleibt jedoch gleich.

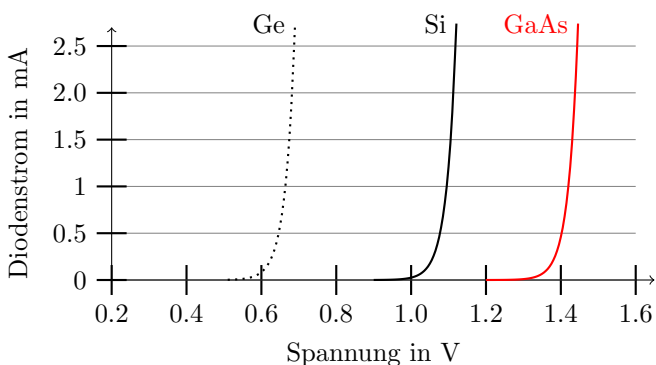


Abb. 6: Diodenkennlinien nach Gl. (17) für $T = 300 \text{ K}$.

3 Messung und Versuche

Sie brauchen für diesen Versuch eine Digitalkamera (Smartphone), denn Sie müssen mehrere Oszilloskopbilder in Ihr Protokollheft übertragen und quantitativ auswerten. Übertragen Sie dazu die Gitternetzlinien des Oszilloskops und den Funktionsverlauf maßstabsgerecht und so genau wie möglich (Digitalkamera gerade/parallel vor den Bildschirm halten!). Notieren Sie stets die Einstellungen (Skalierung für U und t) des Oszilloskops. Eine Auswertung ist sonst nicht möglich. Weiter werden Sie mit digitalen Oszilloskopen arbeiten. Bitte bringen Sie einen USB-Stick mit.

Nachfolgend werden Aufgaben aufgeführt. Die ersten vier Aufgaben müssen Sie durchführen. Von den weiteren Aufgaben dürfen Sie sich mindestens eine Aufgabe aussuchen.

Zu jeder Aufgabe müssen Sie einen Schaltplan als Vorbereitung mitbringen. Aus diesem soll auch hervorgehen, wie Sie die Messgeräte in die Schaltung integrieren.

Aufgabe 1 (Pflicht): Oszilloskop, Funktionsgenerator, Labornetzteil und Multimeter

Diese Aufgabe können Sie bereits vorab mit unserem virtuellen Oszilloskop erarbeiten. Lediglich Aufgabe (M6) und die Aufgaben mit dem Multimeter können Sie am virtuellen Oszilloskop nicht bearbeiten. Da in echt aber alles besser ist, sollten Sie sich dann mindestens von der Funktionsweise der realen Geräte überzeugen.

- (M1) Stellen Sie eine Sinusschwingung mit Gleichspannungsanteil, ein Dreieckssignal und ein Rechtecksignal auf dem Oszilloskop dar.
- (M2) Messen Sie die Amplitude und Frequenz mit dem Oszilloskop und dem Multimeter. Wie können Sie die horizontale und vertikale Skalierung verändern?
- (M3) Was ist der Unterschied zwischen AC und DC Kopplung? (Taste AC/DC)
- (M4) Wie stellt man die Null Volt Bezugslage ein? (Ground Taste)
- (M5) Was ist die Funktion des Triggers?
- (M6) Messen Sie eine Gleichspannung (Labornetzteil) mit Oszilloskop und Multimeter.
- (M7) Schließen Sie zwei Funktionsgeneratoren an. Erzeugen Sie im x-y-Modus Lissajousfiguren.
- (A1) Sind die Messungen von Oszilloskop und Multimeter konsistent?
- (A2) Legen Sie eine Tabelle zu den wichtigsten Funktionen des Oszilloskops an.

Aufgabe 2 (Pflicht): Widerstände und Potentiometer

- (M8) Nehmen Sie die U-I-Kennlinien für zwei unterschiedliche Widerstände auf.
- (M9) Nutzen Sie die Widerstandsmessung des Multimeters, um die Widerstandswerte zu bestimmen.
- (M10) Bauen Sie die Schaltung nach Abbildung 7 auf und überprüfen Sie die Funktionsweise des Potentiometers. Notieren Sie die den Gesamtwiderstand des Potentiometers und den Vorwiderstand. Nehmen Sie die Spannung U_a für verschiedene Stellungen des Potentiometers auf.
- (A3) Stellen Sie die U-I-Kennlinie in einem Diagramm dar.
- (A4) Bestimmen Sie mittels Fitanalyse den Widerstandswert. Unsicherheiten betrachten.
- (A5) Vergleichen Sie den nominalen Wert mit dem ermittelten Wert.
- (A6) Beschreiben Sie die Funktionsweise des Potentiometers.

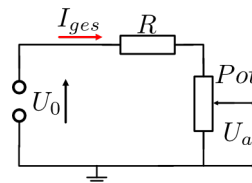


Abb. 7: Im Versuch sollten Sie das Potentiometer mit einem Vorwiderstand betreiben, sodass nicht zu viel Strom durch den Teilwiderstand des Potentiometers fließen kann.

Aufgabe 3 (Pflicht): Kondensatorladung mit dem digitalen Speicheroszilloskop

- (M8) Nehmen Sie für 2 verschiedene Widerstands-Kondensator-Paare die zu unterschiedlichen Zeitkonstanten $\tau < 10 \mu\text{s}$ führen Lade- und Entladekurven auf (vgl. Abb. 4). Stellen Sie die Spannung über dem Kondensator und den Strom dar. Zur Strommessung müssen sie einen Messwiderstand integrieren. Nutzen Sie das digitale Speicheroszilloskop im Triggermodus Single. Speichern Sie die Verläufe auf einem USB-Stick als CSV-Datei ab.
- (A3) Laden Sie die CSV-Dateien, stellen Sie die zeitlichen Verläufe dar.
- (A4) Führen Sie eine Fitanalyse gemäß der Theorie durch und bestimmen Sie jeweils die Zeitkonstante τ .
- (A5) Vergleichen Sie die Zeitkonstanten mit den theoretischen Zeitkonstanten, die sich aus den nominellen Werten ergeben.

Aufgabe 4: Potentiometer

- (M9) Nutzen Sie sowohl die Spannungsmessung als auch die Widerstandsmessung des Multimeters, um sich von der Funktionsweise des Potentiometers zu überzeugen (vgl. Abb. 2).
- (M10) Der belastete Spannungsteiler. Fügen Sie einen Lastwiderstand am Spannungsteiler hinzu, Schaltung analog zu 3.
- (M11) Bestätigen Sie in einer Messung die Gleichung (11) für zwei Verhältnisse $\frac{R_L}{R}$, zum Beispiel für $\frac{R_L}{R} = 1$ und $\frac{R_L}{R} = 0,5$. Überlegen Sie sich die Schaltung vor dem Labortag. Begrenzen Sie den Gesamtstrom durch einen Widerstand mit dem Wert 100Ω . Wie erhalten Sie messtechnisch Zugriff auf das x ?
- (A6) Stellen Sie Messwerte und theoretischen Verlauf in einem Diagramm dar.

Aufgabe 5: Verlassen des Ohmschen Verhaltens

Vorsicht. Die hier verwendeten Bleistiftminen erhitzen sich während des Versuchs. Nutzen Sie eine schwer entflammbare Unterlage. Fassen sie die Mine während des Versuchs und auch kurz danach nicht an.

- (M12) Im Labor finden Sie Fallbleistift-Minen. Spannen Sie diese mit Hilfe von Krokodilklemmen ein. Nehmen Sie eine U-I-Kennlinie.
- (M13) Zeigen Sie mit einer dritten Krokodilklemme, wie ein Potentiometer funktioniert.
- (A7) Stellen Sie die U-I-Kennlinie dar.
- (A8) Identifizieren den Bereich in welchem die Mine als ohm'scher Leiter angenommen werden kann.

Aufgabe 6: Diode

- (M14) Nutzen Sie den Komponententester des Oszilloskops um die U-I-Kennlinie anzuzeigen.
- (M15) Nehmen Sie die U-I-Kennlinie einer Diode, einer Zenerdiode und einer Leuchtdiode mit dem Multimeter auf. Vergessen Sie nicht den negativen Bereich. Achtung, maximaler Strom bei Leuchtdiode 20 mA.
- (A9) Stellen Sie die U-I-Kennlinie dar.
- (A10) Wie groß ist die Durchlassspannung?
- (A11) Ermitteln Sie den differentiellen Widerstand für eine Spannung die deutlich geringer ist als die Durchlassspannung, für die Durchlassspannung und eine Spannung die größer ist als die Durchlassspannung.
- (A12) Können Sie den Bahnwiderstand der Diode bestimmen?

Aufgabe 7: Kondensatorentladung zum Zusehen

- (M16) Nehmen Sie für ein frei gewähltes Widerstand-Kondensator-Paar ($\tau > 1$ s) die Entladekurve mit EINEM! Multimeter und einer Stoppuhr auf. Messen Sie die Spannung über dem Kondensator beim Entladevorgang.
- (A13) Stellen Sie Ihre Messungen aus (M18) dar. Führen Sie für die Strom- und die Spannungsmessung eine Fitanalyse durch, aus der Sie die Zeitkonstante bestimmen.
- (A14) Vergleichen Sie die Zeitkonstante mit der theoretischen Zeitkonstante, die sich aus den nominellen Werten ergibt.
- (A15) Warum ergibt sich eine starke Diskrepanz zwischen der Messung mit dem Multimeter und dem zugehörigen Theoriewert? Benutzen Sie den Begriff Innenwiderstand des Multimeters bei Ihrer Erklärung.

Literatur

fileadmin/praktikumphysik/Zusatzmaterial/Crash_Messunsicherheit.pdf

[1] Scholz, R.(2014): *Analyse und Präsentation von Messdaten* Leibniz Universität Hannover, <https://www.praktikumphysik.uni-hannover.de/>

[2] Oberstufenbücher

[3] Physik-Lehrbücher (Demtröder, Tipler, Hering/Martin/Stohrer, Gerthsen/Kneser/Vogel)

