



SS/~~WS~~0.12./.....

Praktikum: (~~X~~/P2) (~~X~~o/Di/~~X~~/X) Gruppe-Nr: ..11..

Name: Fleig Vorname: Georg

Name: Krause Vorname: Marcel

Versuch: ..^{Eigenschaften}elektrischer Bauelemente... (~~X~~t/ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: ... Andreas Nürnberg Durchgeführt am: 12.06.12.

Abgabe am:

Rückgabe am:

Begründung:

2. Abgabe am:

Ergebnis: (+ / 0 / -)

Fehlerrechnung: ja / nein

Datum:

Handzeichen:

Bemerkungen:



Die Eigenschaften eines elektrischen Bauelements hängen von vielen physikalischen Größen ab. Häufig wirkt sich dies besonders auf dessen Widerstand aus. Die vorherrschende Abhängigkeit gibt dem Bauteil seinen charakteristischen Namen: NTC- bzw. PTC-Widerstand weisen eine Temperaturabhängigkeit (Negative/Positive Temperature Coefficient) auf. Der VDR-Widerstand (Varistor, Voltage Dependent Resistance) reagiert auf Spannungsänderungen. Optoelektrische Bauteile wie Photowiderstand (LDR, Light Dependent Resistance), Photodiode und Phototransistor sind lichtempfindlich oder senden wie die Leuchtdiode (LED, Light Emitting Diode) Licht aus. Druckabhängige Bauelemente sind unter dem Namen Piezoelemente bekannt, da ihre Eigenschaften auf dem Piezoelektrischen Effekt beruhen. Supraleiter verlieren ihren elektrischen Widerstand unter bestimmten äußeren Bedingungen sogar gänzlich.

Interessant ist zudem die Klassifizierung in Leiter, Halbleiter und Nichtleiter (Isolatoren) und die Untersuchung der besonderen Eigenschaften. Hier spielen Halbleiterbauelemente auf Grund ihrer Vielfalt die größte Rolle.

Im Versuch sollen außerdem die Messmethoden zur Untersuchung der jeweiligen Eigenschaften kennengelernt werden. In der Auswertung stehen die Erklärung der beobachteten Effekte und die praktischen Anwendungsgebiete im Vordergrund.

Stichworte:

Wheatstonesche Brückenschaltung;

Bändermodell: Metall, Isolator, Halbleiter; Eigenleitung, Dotierung; p-n-Übergang, Diode; Diodenkennlinie, Durchbruchspannung; Zenerdiode, Zener effekt, Lawineneffekt;

Photoeffekt, Piezoelektrischer Effekt, Supraleitung, Vierleiterschaltung.

Achtung: Sie benötigen einen USB-Stick zur Datensicherung.

Aufgaben:

1. Messen Sie mit Hilfe der Wheatstoneschen Brückenschaltung (1) die R(T)-Abhängigkeit verschiedener Bauteile im Bereich von Zimmertemperatur bis 200°C.

Messen Sie mit Hilfe der Versuchsbox (1) nacheinander den Widerstand von NTC und PT100 in Abhängigkeit von der jeweiligen Temperatur. Als Spannungsquelle dient das Netzgerät, welches eine Gleichspannung von $U=2V$ liefert. Um die Erwärmung des Widerstands durch den Messstrom gering zu halten, soll dieser jeweils nur kurzzeitig eingeschaltet werden (durch Betätigung des Tasters). Als Brückensinstrument dient das Multimeter im mA(DC)-Bereich. Wählen Sie den Referenzwiderstand in der gleichen Größenordnung wie das zu messende Bauteil. Nehmen Sie beim Erwärmen des Ofens die Messreihe am NTC und beim Abkühlen die Messreihe am PT100 auf.

Begründen Sie, warum die Messung mit Hilfe der Wheatstoneschen Brückenschaltung in diesem Falle sinnvoll ist. Stellen Sie die R(T)-Abhängigkeiten jeweils graphisch dar und schließen Sie daraus auf die Eigenschaften des Bauteils.

Wählen Sie zur Auswertung für den NTC-Widerstand eine geeignete Auftragung, um die Koeffizienten a und b aus $R(T) = a \cdot e^{b/T}$ zu bestimmen. Überlegen Sie sich, wie man NTC-Widerstände zur Temperaturmessung, zur Füllstandsanzeige und zur Strombegrenzung verwenden kann.

Für den PT100 gilt $R(T) = R_0 + c \cdot T$. Bestimmen Sie die Konstante c und überprüfen Sie den Widerstand R_0 bei 0°C. Diskutieren Sie auch hier mögliche Einsatzgebiete.

Achtung: Das Gehäuse des Ofens erhitzt sich stark! Vermeiden Sie jeglichen Kontakt mit der Oberfläche.

2. Kennlinien:

Überlegen Sie sich im Vorfeld durch Anfertigung von Schaltskizzen,

wie eine Spannungsstabilisierung mit einer Zenerdiode zu realisieren wäre,

wie der Varistor als Schutz gegen induzierte Spannungen an geschalteten Induktivitäten zu verwenden ist.

2a. Nehmen Sie die Kennlinien folgender Bauteile am USB-Oszilloskop auf:

Silizium-Diode (SID)
Germanium-Diode (GED)
Zener-Diode (ZED)
Varistor (VDR)
Photodiode
Photowiderstand
LED (vier verschiedene Farben)

Für die Aufnahme der Kennlinien steht Versuchsbox (2) zur Verfügung, an die das Eingangssignal über den Trenntransformator in Form einer sinusförmigen Wechselspannung ($f=100\text{Hz}$) angelegt wird. Gemäß Schaltung (2) werden über einem Widerstand ($R=100\Omega$) an Kanal A (CH A) und über dem jeweiligen Bauteil an Kanal B (CH B) Spannungen abgenommen. Mit Hilfe der XY-Darstellung der „PicoScope 6-Software“ kann dann die jeweilige Kennlinie aufgenommen werden.

Untersuchen Sie hierbei insbesondere:

- SID, GED und ZED auf ihre jeweilige Schwellenspannung und ggf. auch Zenerspannung
- Verhalten der Photodiode bei verschiedenen Beleuchtungen
- Verhalten des Photowiderstands bei verschiedenen Beleuchtungen
- Verschiedenfarbige LEDs auf ihre jeweilige Schwellenspannung und den Zusammenhang mit der Frequenz des emittierten Lichts

Interpretieren Sie die Kennlinien ausführlich und geben Sie charakteristische Punkte an. Berechnen Sie beim Photowiderstand aus der Steigung der Kennlinien den jeweiligen Widerstandswert. Schließen Sie auf typische Eigenschaften der Bauteile und leiten Sie daraus mögliche Anwendungen ab.

2b. Untersuchen Sie qualitativ die Frequenzabhängigkeit obiger Bauelemente (bei $f\sim 10\text{kHz}$).

3. Beobachten Sie das Verhalten eines Phototransistors unter Einfluss verschiedener Beleuchtungsstärken. Stellen Sie die Kennlinie des Phototransistors bei verschiedenen Beleuchtungsstärken dar und entnehmen Sie dieser jeweils den Sperrstrom. Verwenden Sie hierzu Schaltung (2) aus der vorherigen Aufgabe sowie die regulierbare Experimentierleuchte mit Phototransistor-Aufsatz. Beginnen Sie bei einer Lampenspannung von 1V als niedrigste Stufe der Beleuchtung und beobachten Sie die Veränderung der Kennlinie bei zunehmender Spannung und Beleuchtungsstärke. Stellen Sie in der Auswertung den Zusammenhang zwischen Sperrstrom und Beleuchtungsstärke graphisch dar.

Hinweis: Die Umrechnungstabelle zwischen Lampenspannung und Beleuchtungsstärke finden Sie in der Literaturliste und auch auf der Praktikums-Homepage.

4. Untersuchen Sie den Piezoelektrischen Effekt am Piezoelement.

Beobachten Sie den direkten Piezoelektrischen Effekt am USB-Oszilloskop, indem Sie manuell verschiedene Drücke auf das Piezo-Plättchen ausüben. Machen Sie ein Frequenzsignal sichtbar, indem Sie mit dem Frequenzgenerator verschiedene Signale auf den Lautsprecher geben und diese auf das Piezoelement übertragen. Überprüfen Sie auch die Funktion des Piezoelements als Piezolautsprecher. Schließen Sie hierfür das Piezo-Element direkt an den Frequenzgenerator an. Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen und nennen Sie Anwendungen des Piezoelektrischen Effekts.

5. Bestimmen Sie die Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters.

Messen Sie den Spannungsabfall am Hochtemperatursupraleiter mit Hilfe der fertig aufgebauten Vierleiterschaltung ($I_{\text{const}}=2,5\text{mA}$) und des Multimeters. Kühlen Sie die Probe von Raumtemperatur auf 77K ab. Nutzen Sie hierfür den Temperaturgradienten über dem Stickstoff-Bad. Nehmen Sie eine Messreihe aus U_g und zugehöriger Temperatur T in 5K-Schritten auf. Beschreiben Sie das Verhalten des Hochtemperatursupraleiters. Tragen Sie zur Auswertung den Widerstand $R=U_g/I$ über der Temperatur T auf und geben Sie die Sprungtemperatur an. Erklären Sie, warum zur Messung eine Vierleiterschaltung verwendet wird.

Beachten Sie, daß die Anzeige des Thermometers bei tiefen Temperaturen entsprechend der angehängten Tabelle vom wahren Wert abweicht.

Achtung:

Flüssiger Stickstoff ($T=-196^{\circ}\text{C}$) kann schwere Kälteverbrennungen verursachen! Daher stets Handschuhe und Schutzbrille tragen.

Zubehör:

Versuchsboxen: zur Widerstandsmessung mit Wheatstonescher Brückenschaltung (1) und zur Kennlinienaufnahme (2);

Tisch-Multimeter (Keithley, Modell 2100, 7-1/2-Digit);

USB-Oszilloskop (PicoScope 2000) mit Computer;

Ofen mit Leistungsregelung, bestückt mit Kupferspule, Konstantdrahtspule, NTC und PT100, eingebautes NiCr-Ni-Thermoelement mit passendem Messinstrument;

Frequenzgenerator (GW-Instek SFG-2104), Trenntransformator;

Bauelemente als Steckeinheiten: Widerstände 1, 33, 51, 100 (2x), 680, 1200Ω , je 1% Toleranz,

Si-Diode, Ge-Diode, Zener-Diode, Varistor, Photodiode, Photowiderstand, Lumineszenzdioden LED (grün, gelb, orange, rot);

Taschenlampe zur Beleuchtung;

Experimentierleuchte mit Phototransistor-Aufsatz und Netzgerät (EA-PS-2016);

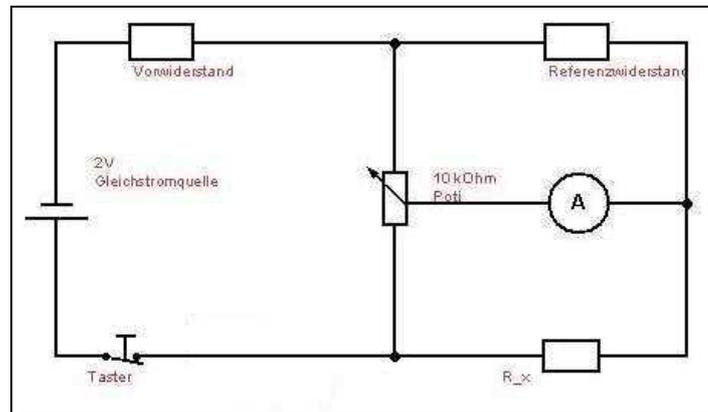
Piezoelement (Resonanzfrequenz 2,9kHz) in Gehäuse, Lautsprecher;

Supraleiter in Gehäuse mit Absenkvorrichtung, Dewargefäß,

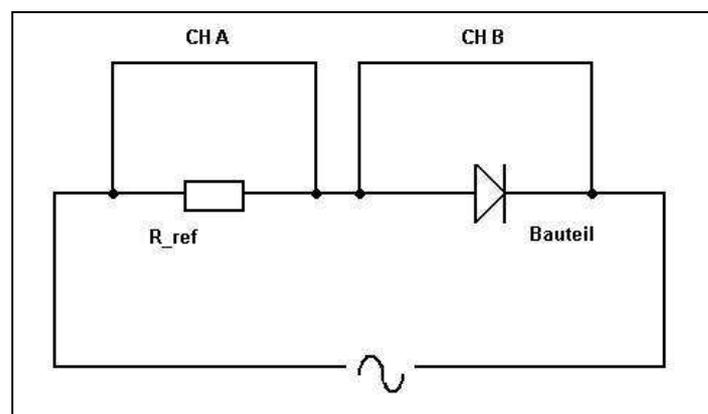
Vierleiterschaltung mit Konstantstromquelle ($I_{\text{const}}=2,5\text{mA}$) und Steckernetzgerät;

Flüssiger Stickstoff (LN_2).

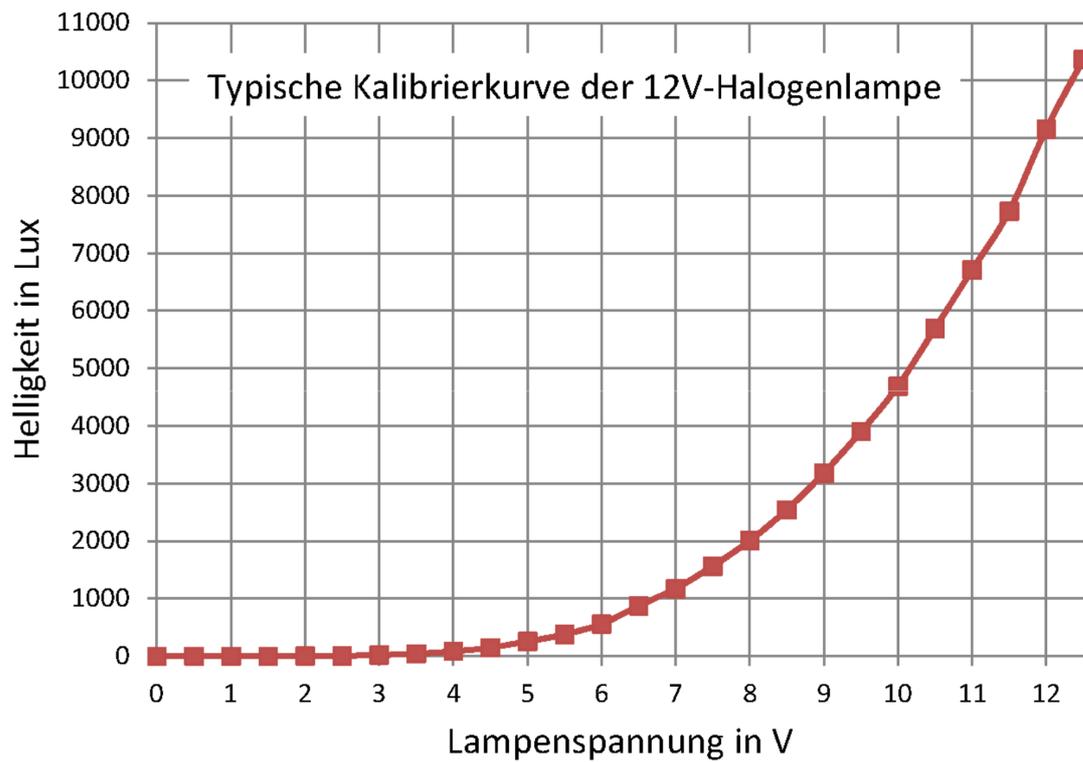
Schaltskizzen der Versuchsboxen:



Schaltung (1): Wheatstonesche Brückenschaltung



Schaltung (2): Kennlinienaufnahme



Zu Aufgabe 3: (Phototransistor)

Zu Aufgabe 5: Korrektur der Temperaturmessung (aus dem Datenblatt entnommen)

Literatur:

- Demtröder: *Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik*
- Hering, Bressler, Gutekunst: *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*
- Tietze, Schenk: *Halbleiterschaltungstechnik*
- Beuth: *Bauelemente*
- Bauckholt: *Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik*

Physikalisches Anfängerpraktikum P2

Versuch:

P2-50,51,52

Eigenschaften elektrischer Bauelemente

Schriftliche Vorbereitung

von

Georg Fleig (georg@leech.it)

Marcel Krause (mrrrc@leech.it)

Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:

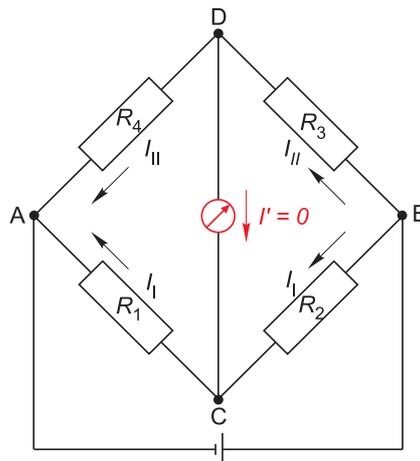
12.06.2012

Theoretische Grundlagen

In diesem Versuch wollen wir uns mit den Eigenschaften verschiedener elektrischer Bauelemente beschäftigen. Diese Eigenschaften hängen von verschiedenen physikalischen Größen ab, welche meistens den Widerstand des Bauelements verändern. Zunächst werden einige Grundlagen aufgeführt, die zum Verständnis des Versuches benötigt werden.

Wheatstonesche Brückenschaltung

Die Wheatstonesche Brückenschaltung kann verwendet werden, um einen unbekanntem Widerstand zu bestimmen. Im Allgemeinen entspricht sie nachstehendem Schaltbild.



An den Punkten *A* und *B* liegt eine Spannung an, die Punkte *C* und *D* werden mit einem empfindlichen Amperemeter verbunden. Fließt kein Strom I' durch dieses Messgerät, so stehen die Widerstände in einem bestimmten Verhältnis zueinander. Mit Hilfe der Kirchhoffschen Regeln findet man:

$$\begin{aligned} I_1 R_2 &= I_2 R_3 & I_1 R_1 &= I_2 R_4 \\ \Rightarrow R_4 &= R_3 \frac{R_1}{R_2} \end{aligned}$$

R_3 ist ein bekannter Vergleichswiderstand, R_4 der gesuchte Widerstand. Anstelle von R_1 und R_2 kann man auch einen Schleifwiderstand wählen. Durch Variation des Schleifwiderstandes wird der Strom I' auf Null geregelt. Nun sind alle Werte der Widerstände bekannt um den gesuchten Widerstand R_4 zu bestimmen.

Bändermodell

Das Bändermodell basiert auf der quantenmechanischen Entdeckung diskreter Energieniveaus von Elektronen in freien Atomen. Durch dieses Modell lassen sich die Eigenschaften von Festkörpern anschaulich erklären. In einem Festkörper befinden Atome in einem gemeinsamen Atomgitter. Die Vielzahl der Energieniveaus der Elektronen sorgt für eine Überlagerung. Die Niveaus sind nun nicht mehr klar unterscheidbar, man spricht daher von Energiebändern. Mit zunehmendem Abstand vom Kern des Atoms nimmt die Breite der Bänder zu. Das erste Band, welches nicht mehr voll mit Elektronen besetzt ist, wird als Leitungsband bezeichnet. Das direkt darunterliegende als Valenzband. Nur nicht voll besetzte Bänder

können zum Ladungstransport beitragen. Leere oder volle Bänder besitzen keine freien Energieniveaus, die zur Aufnahme von Energie aus einem äußeren elektrischen Feld nötig sind. Durch Energiezufuhr können Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband übergehen und so zur elektrischen Leitfähigkeit des Festkörpers beitragen.

Metalle

Bei Metallen wird meistens nicht zwischen Leitungs- und Valenzband unterschieden, da bereits bei sehr niedrigen Temperaturen Elektronen im Leitungsband vorhanden sind und so ein Strom fließen kann. Bei mehrwertigen Metallen überlappen außerdem die höchsten Energiebänder, wodurch die Elektronen bereits bei geringen elektrischen Feldern zwischen den Bändern wechseln können und so teilweise besetzte Bänder vorhanden sind. Bei steigender Temperatur nimmt im Allgemeinen die Leitfähigkeit ab, da durch die Streuung die Geschwindigkeit der Elektronen verringert wird.

Isolatoren

Als Isolator bezeichnet man einen Stoff, welcher nicht elektrisch leitfähig ist. Dies liegt daran, dass das Leitungsband nicht besetzt ist und der Abstand E_g der beiden Bänder so groß ist, dass er für die Valenzelektronen auch bei hohen zugeführten Energien nicht zu überwinden ist. Ohne Elektronen im Leitungsband ist kein Stromfluss möglich.

Halbleiter

Als Halbleiter bezeichnet man Festkörper, welche bei niedrigen Temperaturen als Isolator wirken und erst beim Erreichen höherer Temperaturen als Leiter verwendet werden können. Valenzband und Leitungsband sind in diesen Festkörpern getrennt, es ist jedoch, im Gegensatz zum Isolator, ein Übergang möglich. Ist die Temperatur niedrig, so ist das Leitungsband leer. Bei hohen Temperaturen können Kristallstrukturen im Festkörper aufbrechen und die Valenzelektronen ins Leitungsband übergehen. Typische Stoffe sind hier Silizium und Germanium, welche sich beide in der vierten Hauptgruppe befinden. Durch den Übergang von Elektronen ins Leitungsband, entstehen im Valenzband sogenannte Elektronenlöcher. Wird ein solches Loch durch ein benachbartes Elektron aufgefüllt, entsteht an dessen Stelle ein neues Loch. Diesen Effekt bezeichnet man als **Eigenleitung**.

Dotierung

Durch die geschickte Verunreinigung eines Halbleiters kann dessen Leitfähigkeit weiter gesteigert werden. Bei diesem, als Dotieren bezeichnetem, Prozess wird zwischen p- und n-Dotierung unterschieden. Bei der n-Dotierung werden Fremdatome mit fünf Valenzelektronen (z.B. Arsen oder Phosphor) in die Gitterstruktur des Festkörpers eingebracht, bei der p-Dotierung werden entsprechend dreiwertige Fremdatome wie Gallium oder Bor verwendet. So kann ein Überschuss an Elektronen bzw. ein Überschuss an Löchern im Halbleiter erzeugt werden, welcher jeweils zur Verstärkung der Leitfähigkeit beiträgt.

p-n-Übergang, Diode

Durch das Zusammenführen einer p- und einer n-dotierten Schicht, kann im Grenzgebiet ein p-n-Übergang erzeugt werden. Ohne eine anliegende Spannung diffundieren die Elektronen aufgrund des Konzentra-

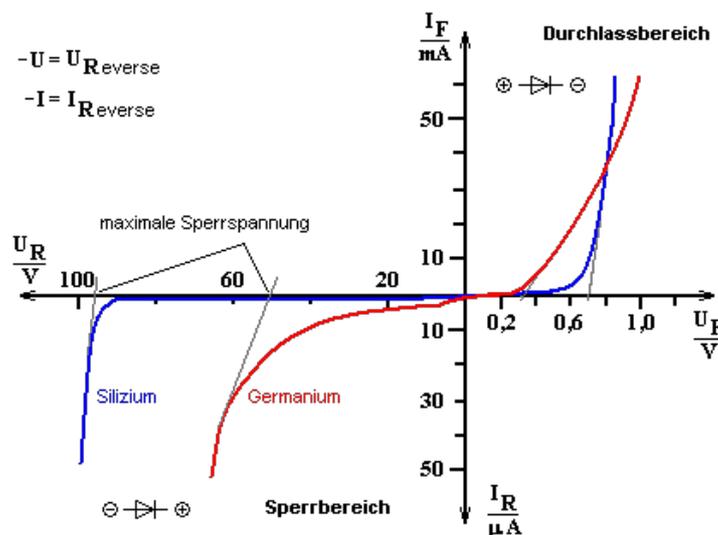
tionsunterschiedes von der n-Schicht in die p-Schicht. Durch diesen Elektronenaustausch werden die Atome im n-dotierten Bereich positiv ionisiert, die im p-dotierten Bereich werden entsprechend negativ ionisiert. So entsteht ein elektrisches Feld, welches ab einer gewissen Stärke, den weiteren Austausch von Elektronen verhindert, da sie nicht mehr gegen das Feld ankommen. Diesen Bereich bezeichnet man als Raumladungszone, die entstehende Potentialdifferenz als Diffusionsspannung. Bei steigender Temperatur vergrößert sich die Raumladungszone aufgrund der erhöhten kinetischen Energie der Elektronen.

Das elektrische Bauteil, welches aus genau zwei solcher Halbleiter besteht, nennt man **Diode**. Eine Diode lässt sich entweder in Durchlassrichtung oder in Sperrrichtung betreiben. Beim Anlegen von Plus an den p-Bereich wirkt die angelegte Spannung der Diffusionsspannung entgegen. Die Energiebarriere zwischen den Schichten verschwindet ab einer gewissen **Schwellspannung**. Nachdem der Strom zunächst nur langsam zugenommen hat, steigt er beim Erreichen dieser Spannung exponentiell an.

Tauscht man Plus- und Minuspol an der Diode, so wird sie in Sperrrichtung betrieben. Eine anliegende Spannung vergrößert die Barriere am p-n-Übergang und es fließt, bis auf einen sehr geringen Sperrstrom, kein weiterer Strom. Durch Erhöhen der anliegenden Spannung kommt es ab der **Durchbruchspannung** zum **Lawineneffekt**. Kristallbindungen werden aufgebrochen und die Elektronen erreichen derart hohe Energien, die zum Überwinden der Barriere am p-n-Übergang nötig sind. Es fließt daher schlagartig ein Strom in Sperrrichtung.

Diodenkennlinie

Eine Kennlinie erhält man im Allgemeinen durch Auftragen von Strom über die angelegte Spannung an einem Bauteil. Anhand der Kurve lassen sich charakteristische Eigenschaften des Bauteils erkennen. Speziell soll hier auf die Diodenkennlinie eingegangen werden. Betrachtet man an einem Oszilloskop den fließenden Strom über der angelegten Spannung, so erhält man ein Schaubild, welches qualitativ dem folgenden entspricht.



Rechts befindet sich der Durchlassbereich, die Diode wird in Durchlassrichtung betrieben, links der Sperrbereich. Anhand eines solchen Schaubildes lassen sich beispielsweise Schwel- und Durchbruchspannung bestimmen. Wie im Graphen zu sehen ist, unterscheiden sich diese Spannungen bei verschiedenen Diodenmaterialien.

Zenerdiode

Eine Zenerdiode ist eine stark dotierte Si-Diode mit sehr schmalen p-n-Übergang. Daher kann sie auch problemlos in Sperrrichtung betrieben werden. Es werden, ab einer bestimmten Größe des elektrischen Feldes, Elektronen aus den Kristallbindungen gerissen, wenn die Diode in Sperrrichtung betrieben wird. Erreicht die außen anliegende Spannung die sogenannte **Zenerspannung**, so wird der Strom durch diese Elektronen verstärkt. Der Zener-Effekt ist im Allgemeinen sehr temperaturabhängig.

Photoeffekt

Einfallende Photonen können bei ausreichender Energie von Elektronen absorbiert werden und durch die Anregung aus ihrer Bindung ausbrechen. Diese so gewonnenen freien Elektronen können zur weiteren Leitfähigkeit beitragen.

Piezoelektrischer Effekt

Man unterscheidet zwischen direktem und indirektem piezoelektrischem Effekt. Bei ersterem kommt es durch gerichtete Krafteinwirkung zu einer Verschiebung der Ladungsträger und so zur Ausbildung von Dipolen. Die erzeugte Spannungsdifferenz kann über dem Material abgegriffen werden.

Beim indirekten piezoelektrischen Effekt wird eine Spannung an das piezoelektrische Material angelegt. Der Effekt läuft daher gerade in umgekehrter Richtung ab. So kann die Kristallstruktur des Materials und damit der Körper selbst verformt werden.

Piezoelemente lassen sich daher als Kraft- und Druckmesser oder als Empfänger akustischer Wellen einsetzen. Umgekehrt über den indirekten piezoelektrischen Effekt auch als Lautsprecher.

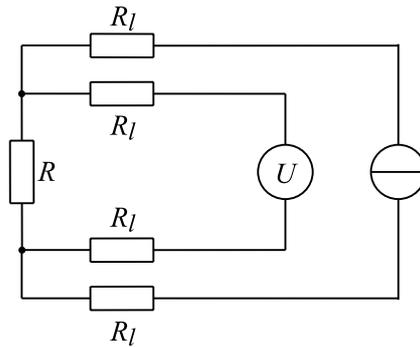
Supraleitung

Supraleitende Materialien leiten erst unterhalb ihrer Sprungtemperatur T_C , oberhalb dieser besitzen sie einen sehr großen Widerstand. Generell ist diese Temperatur materialabhängig. Klassisch lässt sich dieser Effekt nicht mehr erklären, daher muss auf die Quantenmechanik zurückgegriffen werden.

Bei sehr geringen Temperaturen ist die Geschwindigkeit der Elektronen so weit reduziert, dass sich zwei Elektronen mit dem Spin $+\frac{1}{2}$ und $-\frac{1}{2}$ zu einem sogenannten Cooper-Paar koppeln können und so einen Gesamtspin von Null besitzen. Dieses Paar ist nun nicht mehr in der Lage Energie an das ursprüngliche Atomgitter abzugeben. Da der Widerstand eines Materials durch die Wechselwirkung der Elektronen mit den Fehlerstellen des Kristallgitters und den Gitterschwingungen zusammenhängt, geht dieser bei fehlender Wechselwirkung gegen Null. Oberhalb der Sprungtemperatur zerfallen die Cooper-Paare und das Material besitzt wieder einen hohen Widerstand.

Vierleiterschaltung

Um sehr kleine Widerstände zu messen, bei welchen man die Widerstände der Leitungen nicht mehr vernachlässigen darf, kann man die Vierleiterschaltung verwenden. Diese wird entsprechend nachstehendem Schaltplan aufgebaut.



Die Widerstände R_l sind dabei durch die Kabel gegeben und als groß anzunehmen. Der Strom durch den Spannungsmesser, welcher die abfallende Spannung U am zu untersuchenden Widerstand R misst, kann daher vernachlässigt werden. Außerdem ist auch der Spannungsverlust in den verwendeten Leitungen aus demselben Grund verschwindend gering. Durch den Widerstand selbst fließt ein uns bekannter Strom I . So ergibt sich der zu messende Widerstand R nach dem Ohmschen Gesetz zu

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

Temperaturabhängige Widerstände

Ein **Kaltleiterwiderstand (PTC)** leitet bei niedrigen Temperaturen wesentlich besser, als bei hohen. Man definiert für ihn einen positiven Temperaturkoeffizienten α . Bei zunehmender Temperatur sinkt die freie Weglänge der Elektronen, daher steigt die Wahrscheinlichkeit Energie beim Durchgang durch Stöße zu verlieren. Es gilt der Zusammenhang

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T) \quad (2)$$

Mit $R_0 = 100 \Omega$ bei $T = 0^\circ\text{C}$ und $\alpha = 0,00385 \text{ K}^{-1}$.

Ein PTC ließe sich wegen seines linearen Zusammenhangs zwischen Widerstand und Temperatur gut als Temperaturmessinstrument verwenden.

Bei einem **Heißleiterwiderstand (NTC)** sinkt der Widerstand bei steigender Temperatur. Heißleiterwiderstände werden aus Metalloxid-Keramik hergestellt. Hier gilt der Zusammenhang

$$R(T) = a \exp\left(\frac{b}{T}\right) \quad (3)$$

Mit einem NTC kann man beispielsweise eine Füllstandanzeige realisieren, indem er oberhalb einer kalten Flüssigkeit positioniert wird. Sobald die Flüssigkeit nun den Widerstand erreicht, wird dieser abgekühlt und so steigt der Wert des Widerstandes. Mit einer geeigneten Schaltung könnte man diese Änderung weiterverarbeiten.

Als alternativer Verwendungszweck sei der Schutz von empfindlichen Bauteilen (Strombegrenzung) erwähnt. Dazu schaltet man einen NTC parallel zu einem zu schützenden Bauteil. Steigt der Stromfluss, so erwärmt sich der Widerstand und es fließt mehr Strom durch ihn. Das Bauteil wird dadurch geschützt.

Photodiode

Eine Photodiode ist eine Halbleiter-Diode, welche Licht in einen Strom umwandelt. In der Raumladungszone werden durch den Photoeffekt Elektronen freigesetzt und Löcher erzeugt, also Elektronen-Loch-Paare (Ladungsträger). Diese driften entgegen der Diffusionsspannung und sorgen so für einen Strom I_{Ph} . Der Strom ist im Allgemeinen proportional zur Beleuchtungsstärke.

Photowiderstand (LDR)

Ein Photowiderstand ist ein beleuchtungsabhängiger Widerstand. Bei höherer Beleuchtung sinkt sein Widerstandswert. Erklären lässt sich dies einfach mit dem inneren Photoeffekt (siehe oben). Eintreffende Photonen sorgen für weitere freie Elektronen im Kristallgitter. Durch sie steigt die Leitfähigkeit im Medium. Der Effekt hängt von der Intensität des Lichtes ab.

Leuchtdiode (LED)

Leuchtdioden senden Licht aus, wenn sie in Durchlassrichtung betrieben werden. Auf eine n-dotierte Grundsicht wurde eine dünne p-dotierte Schicht mit vielen Löchern aufgetragen. Fließt nun ein Strom durch die Diode, so rekombinieren viele Elektronen mit den Löchern und senden bei diesem Übergang von Leitungsband zum Valenzband Photonen aus. Die Frequenz der Photonen und damit die Farbe des Lichtes hängt dabei vom Abstand der beiden Bänder ab. Die Lichtintensität ist proportional zur Stromstärke. Da LEDs jedoch nur geringe Durchlassströme verkraften, sollte ein strombegrenzender Vorwiderstand eingesetzt werden.

Phototransistor

Ist bei einem Siliziumtransistor die Basis-Kollektor-Strecke offen für einfallendes Licht, erhält man einen Phototransistor. Der Basisstrom wird nun ausschließlich durch das einfallende Licht und den damit verbundenen inneren Photoeffekt gesteuert. Wegen der direkten Verstärkung des Photoeffekts sind Phototransistoren sehr empfindliche Messinstrumente für Bestrahlungsintensitäten.

Aufgabe 1: Temperaturabhängigkeit verschiedener Widerstände

In diesem Versuchsteil sollen wir die Temperaturabhängigkeit eines Heiß- sowie eines Kaltleiterwiderstands überprüfen. Zur genauen Messung der Widerstände verwenden wir die bereits erwähnte Wheatstonesche Brückenschaltung. Das ist sinnvoll, da sich der zu messende Widerstand laufend ändert und diese Methode eine schnelle und genaue Möglichkeit bietet, ihn zu bestimmen. Mit Hilfe eines Ofens werden wir die Widerstände von Zimmertemperatur bis auf 200°C aufheizen.

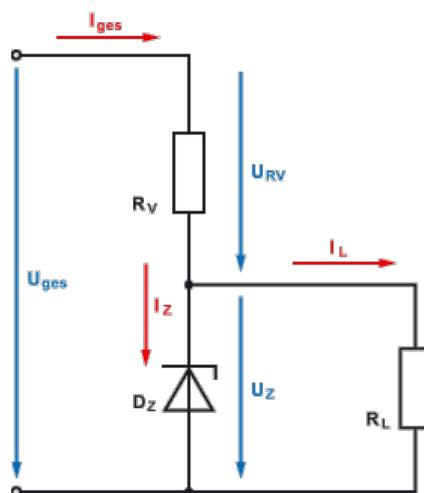
Entsprechend den Gleichungen (2) und (3) erwarten wir beim PTC einen linearen Anstieg des Widerstandes, beim NTC einen exponentiellen Abfall. Um die Koeffizienten a und b des NTC Widerstandes aus Gleichung (3) zu bestimmen, wählen wir eine logarithmische Auftragung der Messwerte:

$$\ln R(T) = b \frac{1}{T} + \ln a$$

Beim PTC Widerstand sollen wir ebenfalls das in Gleichung (2) erwähnte Gesetz überprüfen. Dazu tragen wir direkt den gemessenen Widerstand über der Temperatur auf, wodurch sich ein linearer Zusammenhang ergeben sollte. Die Steigung der Ausgleichsgeraden geteilt durch den Y-Achsenabschnitt liefert uns den Faktor α , R_0 ist der Wert des Widerstandes bei $T = 0^\circ\text{C}$. Dieser lässt sich einfach aus dem Graphen bestimmen. Bei einem PT100 Widerstand sollte er $R_0 = 100\ \Omega$ betragen.

Aufgabe 2: Kennlinien verschiedener Bauteile

In den folgenden Versuchsteilen sollen die Kennlinien verschiedener elektrischer Bauelemente aufgenommen werden. Dazu sollte eine Spannungsstabilisierung mittels einer Zenerdiode realisiert werden. Mit nachstehender Schaltung ist das möglich:

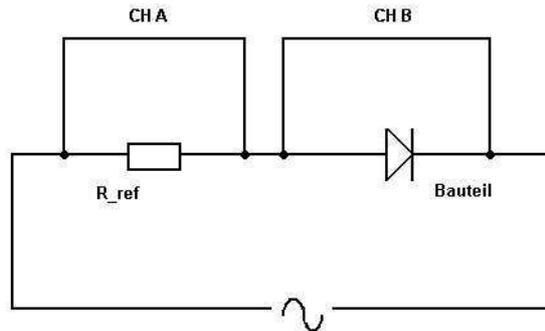


R_V sei ein Vorwiderstand, R_L der Lastwiderstand. Die Zenerdiode schaltet auch in Sperrrichtung durch, sobald die an ihr anliegende Spannung groß genug ist. Ist das der Fall, so fällt ein Teil der Spannung an ihr ab und der Lastwiderstand wird entlastet.

Als Schutz gegen induzierte Spannungen an Induktivitäten kann ein Varistor verwendet werden. Ein Varistor besitzt einen spannungsabhängigen Widerstand, der Wert des Widerstandes sinkt bei steigender Spannung. Ein solcher Varistor wird parallel zu einer Induktivität geschaltet, damit bei zunehmender Spannung ein Großteil des Stromes durch ihn fließt.

Aufgabe 2.1: Aufnahme der Kennlinien

Zur Aufnahme der Kennlinien verwenden wir Versuchsbox (2), deren Schaltplan im Folgenden dargestellt ist.



Wir sollen die Kennlinien folgender Bauteile mit einem USB-Oszilloskop aufnehmen: Silizium-Diode (SID), Germanium-Diode (GED), Zener-Diode (ZED), Varistor (VDR), Photodiode, Photowiderstand, 4 verschiedene LEDs.

Als Eingangssignal der Schaltung wählen wir eine sinusförmige Wechselspannung der Frequenz $\nu = 100 \text{ Hz}$. Den Strom durch das Bauteil messen wir durch den Spannungsabfall an dem Widerstand $R_{ref} = 100 \Omega$, die Spannung wird direkt am Bauteil abgegriffen. Beide Spannungen betrachten wir gleichzeitig im XY-Betrieb des Oszilloskops. Die so aufgenommenen Kennlinien werden in der Auswertung interpretiert und mögliche charakteristische Werte aus ihnen abgelesen.

Dabei soll unter anderem beim Photowiderstand aus der Steigung der Kennlinie der Widerstandswert bestimmt werden. Wegen des zu erwartenden linearen Zusammenhangs entspricht dieser genau der Steigung der Kennlinie.

Aufgabe 2.2: Frequenzabhängigkeit der Bauteile

Die bereits untersuchten Bauteile sollen nochmals mit einer erhöhten Frequenz von $\nu \approx 10 \text{ kHz}$ betrieben werden. Es soll qualitativ die Frequenzabhängigkeit überprüft werden.

Aufgabe 3: Phototransistor

In der folgenden Aufgabe sollen wir die Kennlinie eines Phototransistors bei verschiedenen Beleuchtungsstärken aufnehmen. Es wird wieder Schaltung (2) aus der vorigen Aufgabe verwendet. Als Beleuchtung dient eine Lampe, für die der Zusammenhang zwischen Lampenspannung und Beleuchtungsstärke bekannt ist und in einer Tabelle nachgelesen werden kann. Ausgehend von einer Spannung von $U_{lampe} = 1 \text{ V}$ werden wir die Kennlinien bei zunehmender Spannung beobachten und aufnehmen. Aus diesen können wir dann auf den jeweiligen Sperrstrom schließen.

Aufgabe 4: Piezoelektrischer Effekt

In diesem Versuchsteil werden wir uns mit dem piezoelektrischen Effekt beschäftigen. Zunächst sollen wir seine direkte Variante untersuchen. Wir verbinden ein Piezoelement mit einem Oszilloskop und üben Drücke auf dieses aus. Dabei ist zu erwarten, dass messbare Spannungen erzeugt werden. Zur weiteren Untersuchung soll ein Frequenzsignal mittels eines Lautsprechers auf das Piezoelement übertragen wer-

den. Abgesehen von gewissen Verlusten und etwas Rauschen erwarten wir, dass das Ausgangssignal des Piezoelements qualitativ dem Eingangssignal am Lautsprecher entspricht.

Um den indirekten piezoelektrischen Effekt nachzuweisen, verwenden wir das Piezoelement als Piezolausprecher. Dazu schließen wir einen Frequenzgenerator an das Element an und versuchen, die durch Schwingung des Materials erzeugten Töne, wahrzunehmen.

Aufgabe 5: Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters

Abschließend sollen wir die Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters bestimmen. Wir verwenden dazu eine bereits aufgebaute Vierleiterschaltung. Diese ist nötig, da ein Supraleiter im leitenden Zustand einen sehr geringen Widerstand besitzt, der kaum messbar ist. In den theoretischen Grundlagen wurde bereits erklärt, warum sich eine solche Schaltung zur Messung geringer Widerstände eignet.

Der Supraleiter wird mit Stickstoff auf eine Temperatur von $T = 77\text{ K}$ abgekühlt. Anschließend wird die Temperatur in 5 K-Schritten erhöht und die zugehörige Spannung U bestimmt, welche am Widerstand abfällt. Die Stromstärke bleibt konstant auf $I = 2,5\text{ mA}$. So können wir den Widerstand über Gleichung (1) bestimmen. Durch Auftragen des Widerstandes über der Temperatur, können wir auf die Sprungtemperatur schließen.

Quellenverzeichnis

Eichler, Kronfeldt, Sahn: Das neue physikalische Grundpraktikum

Schaltbild Wheatstonsche Brückenschaltung

Eichler, Kronfeldt, Sahn: Das neue physikalische Grundpraktikum

Schaubild der Diodenkennlinie

http://www.elektroniktutor.de/bauteile/bt_pict/diodkl2.gif, abgerufen am 11.06.2012

Schaltbild Vierleitermessung

<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Vierleitermessung.svg&filetimestamp=20100723141449>
abgerufen am 11.06.2012

Schaltbild Spannungsstabilisierung

<http://www.elektronik-kompendium.de/sites/slt/schalt/10121511.gif>, abgerufen am 11.06.2012

Vorbereitungsmappe

Physikalisches Anfängerpraktikum P2

Versuch:

P2-50,51,52

Eigenschaften elektrischer Bauelemente

Auswertung

von

Georg Fleig (georg@leech.it)

Marcel Krause (mrrrc@leech.it)

Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:

12.06.12

Aufgabe 1: Temperaturabhängigkeit verschiedener Widerstände

Im ersten Aufgabenteil haben wir die Temperaturabhängigkeit verschiedener Widerstände bestimmt. Die zu untersuchenden Widerstände waren dabei ein NTC als Heißleiter- und ein PT100 als Kaltleiterwiderstand. Diese waren bereits fest in einem Ofen verbaut, dessen Heizspannung wir mit Hilfe eines Drehreglers einstellen konnten. Die Widerstände selbst haben wir mit der Wheatstoneschen Brückenschaltung verbunden, die wir gemäß Schaltung (1) des Aufgabenblatts aufgebaut haben.

Zunächst haben wir den NTC mit der Brückenschaltung verbunden und die Heizspannung des Ofens auf eine mittlere Stufe gestellt. Mit steigender Temperatur haben wir auch die Heizspannung immer wieder erhöht, um den Ofen so auf eine maximale Temperatur von $T = 200^\circ\text{C}$ aufzuheizen. Als Referenzwiderstand hatten wir hier $R_{\text{ref,NTC}} = 1,2\text{ k}\Omega$.

Wir haben nun jeweils in Schritten von $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ kurz den Taster in Schaltung (1) betätigt und das dort verbaute Potentiometer so eingestellt, dass die mit einem digitalen Ampèremeter gemessene Stromstärke möglichst verschwand.

Nach Erreichen einer Temperatur von $T = 200^\circ\text{C}$ haben wir die Heizung des Ofens ausgeschaltet und statt des NTCs nun den PT100 mit der Wheatstone-Brücke verbunden. Als Referenzwiderstand diente uns nun $R_{\text{ref,NTC}} = 100\Omega$. Analog zu obiger Vorgehensweise haben wir dann wieder mit Hilfe des Potentiometers die Stromstärke zum Verschwinden gebracht und so den Widerstand R des PT100 in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt.

In nachfolgender Tabelle finden sich alle so von uns aufgenommenen Messwerte. Beim NTC haben wir außerdem gleich den natürlichen Logarithmus aller Widerstandswerte genommen sowie die Temperaturen invertiert, weil wir dies gleich zur weiteren quantitativen Auswertung brauchen. Die Messreihe beim PT100 haben wir nach Absprache mit unserem Betreuer bei einer Temperatur von $T = 40^\circ\text{C}$ abgebrochen.

NTC					PT100			
T in °C	R _{pot,1} in Ω	R _{NTC} in Ω	ln(R)	T ⁻¹ in K ⁻¹	T in °C	T in K	R in Ω	R _{NTC} in Ω
23	8,120E+03	5,183E+03	8,5531	0,0034	200	473,15	6,270E+03	1,681E+02
30	7,990E+03	4,770E+03	8,4701	0,0033	195	468,15	6,240E+03	1,660E+02
35	7,815E+03	4,292E+03	8,3645	0,0032	190	463,15	6,195E+03	1,628E+02
40	7,675E+03	3,961E+03	8,2843	0,0032	185	458,15	6,160E+03	1,604E+02
45	7,525E+03	3,648E+03	8,2021	0,0031	180	453,15	6,145E+03	1,594E+02
50	7,330E+03	3,294E+03	8,1000	0,0031	175	448,15	6,100E+03	1,564E+02
55	7,145E+03	3,003E+03	8,0074	0,0030	170	443,15	6,095E+03	1,561E+02
60	6,990E+03	2,787E+03	7,9326	0,0030	165	438,15	6,075E+03	1,548E+02
65	6,725E+03	2,464E+03	7,8096	0,0030	160	433,15	6,030E+03	1,519E+02
70	6,540E+03	2,268E+03	7,7267	0,0029	155	428,15	6,015E+03	1,509E+02
75	6,305E+03	2,048E+03	7,6244	0,0029	150	423,15	5,980E+03	1,488E+02
80	5,990E+03	1,793E+03	7,4914	0,0028	145	418,15	5,965E+03	1,478E+02
85	5,730E+03	1,610E+03	7,3842	0,0028	140	413,15	5,930E+03	1,457E+02
90	5,530E+03	1,485E+03	7,3029	0,0028	135	408,15	5,895E+03	1,436E+02
95	5,420E+03	1,420E+03	7,2585	0,0027	130	403,15	5,855E+03	1,413E+02
100	5,080E+03	1,239E+03	7,1221	0,0027	125	398,15	5,830E+03	1,398E+02
105	5,000E+03	1,200E+03	7,0901	0,0026	120	393,15	5,795E+03	1,378E+02
110	4,720E+03	1,073E+03	6,9780	0,0026	115	388,15	5,760E+03	1,358E+02
115	4,490E+03	9,779E+02	6,8854	0,0026	110	383,15	5,745E+03	1,350E+02
120	4,295E+03	9,034E+02	6,8062	0,0025	105	378,15	5,720E+03	1,336E+02
125	4,175E+03	8,601E+02	6,7570	0,0025	100	373,15	5,690E+03	1,320E+02
130	3,850E+03	7,512E+02	6,6217	0,0025	95	368,15	5,665E+03	1,307E+02
135	3,620E+03	6,809E+02	6,5234	0,0025	90	363,15	5,640E+03	1,294E+02
140	3,300E+03	5,910E+02	6,3819	0,0024	85	358,15	5,610E+03	1,278E+02
145	2,800E+03	4,667E+02	6,1456	0,0024	80	353,15	5,580E+03	1,262E+02
150	2,400E+03	3,789E+02	5,9374	0,0024	75	348,15	5,545E+03	1,245E+02
155	2,100E+03	3,190E+02	5,7652	0,0023	70	343,15	5,520E+03	1,232E+02
160	1,850E+03	2,724E+02	5,6072	0,0023	65	338,15	5,480E+03	1,212E+02
165	1,590E+03	2,269E+02	5,4244	0,0023	60	333,15	5,455E+03	1,200E+02
170	1,530E+03	2,168E+02	5,3788	0,0023	55	328,15	5,435E+03	1,191E+02
175	1,490E+03	2,101E+02	5,3476	0,0022	50	323,15	5,400E+03	1,174E+02
180	1,350E+03	1,873E+02	5,2326	0,0022	45	318,15	5,380E+03	1,165E+02
185	1,195E+03	1,629E+02	5,0929	0,0022	40	313,15	5,345E+03	1,148E+02
190	1,035E+03	1,385E+02	4,9312	0,0022				
195	9,800E+02	1,304E+02	4,8704	0,0021				
200	8,500E+02	1,115E+02	4,7138	0,0021				

Die von uns so bestimmten Widerstände R mussten wir noch in die gesuchten Widerstände umrechnen. Da wir eine abgegliche Wheatstone-Brücke verwendeten, war dies recht einfach, denn zwei der Widerstände $R_{\text{pot},i}$ ergaben sich aus der Verwendung eines Potentiometers, der dritte Widerstand war als Referenzwiderstand R_{ref} gegeben. Somit ergibt sich der gesuchte Widerstand R_x (mit x =NTC oder x =PT100) zu:

$$R_x = R_{\text{ref}} \cdot \frac{R_{\text{pot},1}}{R_{\text{pot},2}} = R_{\text{ref}} \cdot \frac{R_{\text{pot},1}}{10 \text{ k}\Omega - R_{\text{pot},1}}$$

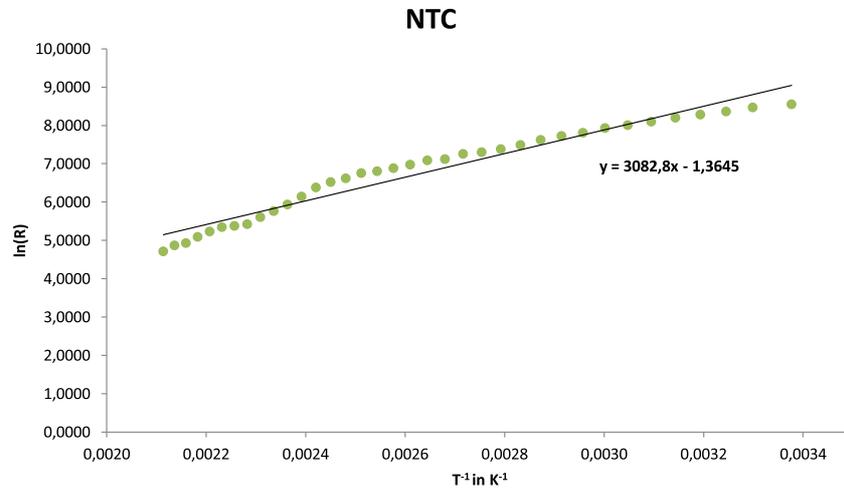
denn das Potentiometer hat Widerstandsbereiche $R_{\text{pot}} \in [0, 10] \text{ k}\Omega$ und $R_{\text{pot},2} = 10 \text{ k}\Omega - R_{\text{pot},1}$. Wie in der Vorbereitung diskutiert stellt sich die Abhängigkeit zwischen Widerstand und Temperatur beim NTC durch den Zusammenhang

$$R_{\text{NTC}} = a \exp\left(\frac{b}{T}\right)$$

dar. Zur Auswertung bietet sich eine Logarithmierung der Gleichung an, die dann die Form

$$\ln(R_{\text{NTC}}) = b \frac{1}{T} \ln(a) = b \cdot T^{-1} + c$$

annimmt. Wir haben nun an alle umgerechneten Messwerte, die wir am NTC aufgenommen haben, eine lineare Regression durchgeführt, um die Koeffizienten b und c der Regression zu bestimmen. Letztere liefert uns den zweiten, gesuchten Koeffizienten a über $a = \exp(c)$. Durch die lineare Regression erhielten wir das nachfolgende Schaubild.



Es ergab sich in etwa eine lineare Verteilung der logarithmierten Messwerte, wie wir es erwartet haben. Aus der Gleichung der Regressionsgeraden können wir direkt die Koeffizienten ablesen. Wie oben bereits angemerkt können wir a mit $c = -1,3645$ berechnen, sodass sich insgesamt ergeben:

$$b \approx 3,083 \cdot 10^3 \text{ K}$$

$$a \approx 0,256 \Omega$$

Wir gehen davon aus, dass die auf diese Weise bestimmten Koeffizienten nicht allzu genau sein dürften, da der statistische Fehler aufgrund der Abweichung von einer sauberen, linearen Form recht groß sein dürfte. Tragen wir die Koeffizienten in die Formel ein, so erhalten wir folgenden Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur:

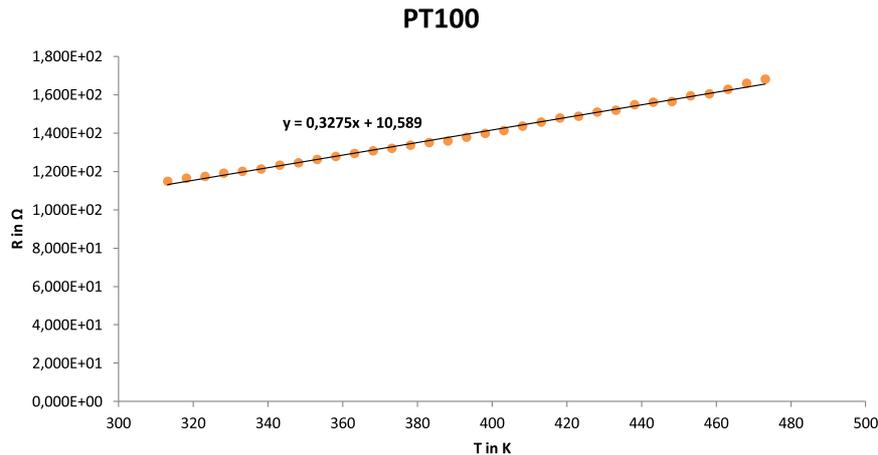
$$R_{\text{NTC}} = 0,256 \Omega \cdot \exp\left(\frac{3,083 \cdot 10^3 \text{ K}}{T}\right)$$

Auch die Messmethode dürfte großen Einfluss auf die Genauigkeit unserer Ergebnisse haben. Im Versuch haben wir den NTC kontinuierlich mit großer Geschwindigkeit beheizt. Es kann also durchaus davon ausgegangen werden, dass sich aufgrund unterschiedlicher Wärmekoeffizienten der Temperaturmessfühler und der NTC unterschiedlich schnell aufgeheizt haben. Wir können also nicht sicher davon ausgehen, dass für jedes Messwertepaar Widerstandswert und Temperatur hundertprozentig korrelieren.

Für den PT100 haben wir nach Diskussion in der Vorbereitung einen Widerstandsverlauf der Form

$$R_{\text{PT100}} = R_0 + R_0 \cdot \alpha \cdot T = d \cdot T + R_0 \quad (2)$$

erwartet. Hier haben wir also den errechneten Widerstand R_{PT100} direkt über der Temperatur T aufgetragen und erneut eine lineare Regression durchgeführt.



Der lineare Zusammenhang ist hier sehr schön zu erkennen. Mit $d = 0,3275 \Omega/\text{K}$ aus der linearen Regression erhalten wir zum einen nach Umrechnen mittels $d = \alpha R_0$, zum anderen durch direktes Ablesen von R_0 aus der linearen Regression:

$$R_0 = 10,589 \Omega$$

$$\alpha = 3,093 \cdot 10^{-2} \text{K}^{-1}$$

Damit ergibt sich der Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur zu:

$$R_{\text{PT100}} = 10,589 \Omega \cdot (1 + 3,093 \cdot 10^{-2} \text{K}^{-1} \cdot T)$$

Aufgrund des gering erscheinenden statistischen Fehlers halten wir die so bestimmten Koeffizienten für recht genau. Wir wollen noch R_0 bei einem Temperaturwert von $T = 0^\circ$ bestimmen, was in obiger Formel $T = 273,15 \text{K}$ entspricht. Setzen wir dies ein, so erhalten wir:

$$R_{\text{PT100}}(273,15\text{K}) = 100,05 \Omega$$

In der Vorbereitungsmappe waren die Literaturwerte folgendermaßen gegeben:

$$R_{0,\text{lit}} \hat{=} R_{\text{PT100}}(273,15\text{K}) = 100 \Omega$$

$$\alpha_{\text{lit}} = 0,00385 \text{K}^{-1}$$

Die Abweichung von R_0 ist bei uns sehr gering, sie beträgt nur etwa 0,1%. Die Abweichung des Koeffizienten α hingegen ist deutlich größer, sie beträgt etwa 703%. Diese unnatürliche hohe Abweichung können wir uns nur damit erklären, dass die Angabe von α_{lit} um eine Größenordnung falsch angegeben ist. Unter dieser Annahme beträgt die relative Abweichung unseres Messwertes noch $-19,7\%$. Aufgrund des uns recht gering erscheinenden statistischen Fehlers können wir uns diese weiterhin große Abweichung nur so erklären, dass das PT100 eventuell bereits Alterserscheinungen aufzeigt und nicht mehr einwandfrei funktioniert.

Die Anwendungsgebiete des NTC und des PT100 wurden bereits in der Vorbereitung diskutiert, daher sei an dieser Stelle darauf verwiesen.

Aufgabe 2: Kennlinien verschiedener Bauteile

In der nächsten Versuchsreihe haben wir die Kennlinien verschiedenster Bauteile aufgenommen und qualitativ sowie quantitativ ausgewertet. Dazu haben wir Schaltung (2) gemäß der Darstellung auf dem Aufgabenblatt aufgebaut. Die über dem Referenzwiderstand abfallende Spannung haben wir auf Channel 1, die über dem zu untersuchenden Bauteil abfallende Spannung auf Channel 2 mit einem Oszilloskop abgegriffen.

Da der Referenzwiderstand und die über ihm abfallende Spannung bekannt sind, lässt sich daraus leicht der Gesamtstrom der Schaltung bestimmen. Auf diese Weise ist wegen dem Ohmschen Gesetz eine XY-Auftragung mit Channel 1 über Channel 2 proportional zu einer Strom-Spannungs-Kennlinie. Als Referenzwiderstand R_{ref} wählten wir $R_{\text{ref}} = 100 \Omega$.

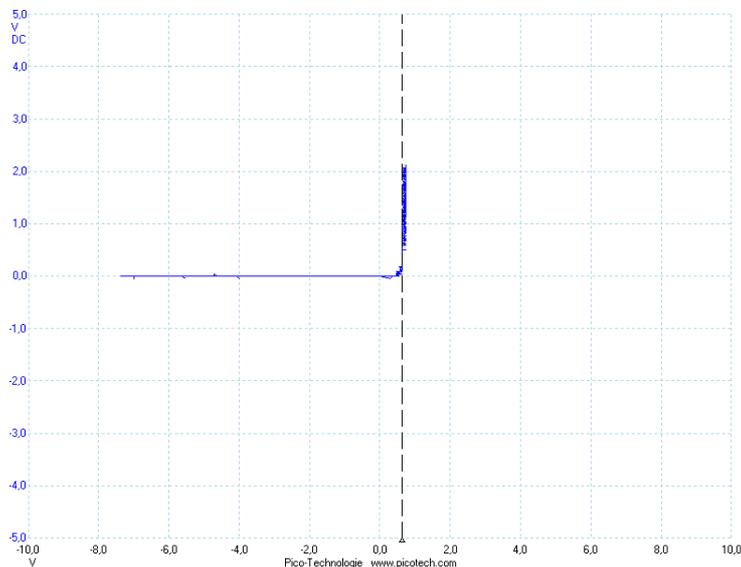
Aufgabe 2.1: Aufnahme der Kennlinien

Wir haben nun die Kennlinien eines jeden Bauteils über den XY-Betrieb des Oszilloskops aufgenommen und hatten unglaublich viel Spaß dabei. Außerdem haben wir je nach Kennlinie die Schwell- oder Durchbruchspannung sowie andere charakteristische Spannungen aufgenommen.

Nach Absprache mit unserem Betreuer haben wir an die steilen Strom-Spannungsflanken Tangenten angelegt und deren Schnittpunkte mit der x-Achse als Schwell- bzw. Durchbruchspannung interpretiert. Als Frequenz haben wir im Funktionengenerator $\nu = 100 \text{ Hz}$ eingestellt.

Si-Diode

Die Kennlinie entsprach dem von uns erwarteten Verlauf. Sie ist nachfolgend dargestellt.



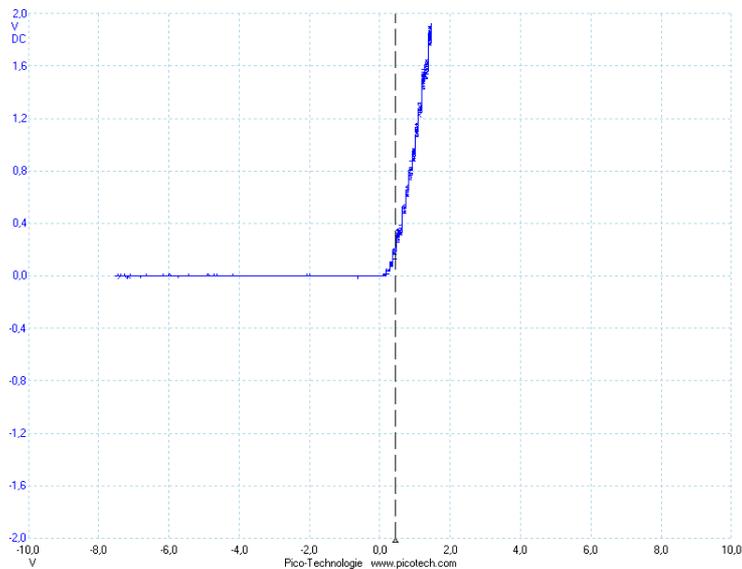
Die von uns nach obiger Vorgehensweise abgelesene Schwellspannung lag bei:

$$U_{\text{schwell}} = 640 \text{ mV}$$

Typisch für die Kennlinie einer Diode ist die steile Flanke der Strom-Spannungs-Kurve hinter der Schwellspannung. Im negativen Spannungsbereich liegt der Strom in weiten Bereichen bei $U = 0 \text{ V}$. Würde man die Spannung stetig erhöhen, so würde man auch hier irgendwann eine Durchbruchspannung vorfinden, die allerdings sehr viel höher ist als die bei der in Durchlassrichtung geschalteten Diode.

Ge-Diode

Auch hier entsprach die Kennlinie dem erwarteten Verlauf.



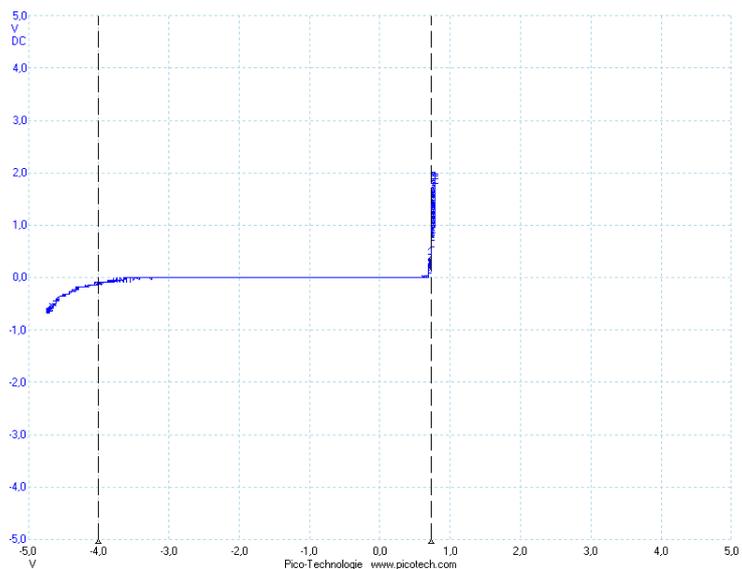
Die Schwellspannung lag hier (aufgrund der relativ flachen Flanke nur ungefähr) bei:

$$U_{\text{schwell}} = 440 \text{ mV}$$

Die Germanium-Diode hat also ähnliche Eigenschaften wie die Silizium-Diode, allerdings steigt hier der Strom bei steigender Spannung nicht so schnell an. Auch hier konnten wir schön sehen, dass die Diode in den von uns geprüften Spannungsbereichen nur in Durchlassrichtung den Strom passieren lässt.

Zener-Diode

Die nachfolgend abgebildete, von uns aufgenommene Kennlinie der Zener-Diode entsprach ebenfalls unseren Erwartungen.



Neben einer Schwellspannung, die auftritt, wenn man die Diode in Durchlassrichtung betreibt, haben wir hier außerdem noch eine Durchbruchspannung, die man vorfindet, wenn man die Diode in Sperrichtung

betreibt. Die beiden Werte wurden von uns wieder mit Hilfe des Oszilloskops bestimmt.

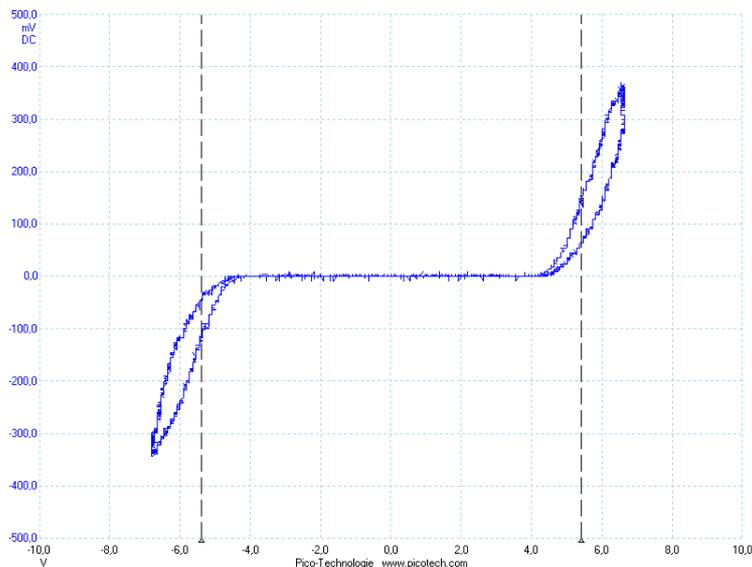
$$U_{\text{schwell}} = 727 \text{ mV}$$

$$U_{\text{durchbruch}} = -4,008 \text{ V}$$

Die Zener-Diode zeigt somit formal dieselbe Kennlinie wie jede andere Diode, allerdings ist die Raumladungszone sehr viel schmaler, sodass man bereits bei geringen Spannungen in Sperrichtung einen Strom registrieren kann. Der Anstieg dieses Stroms ist allerdings geringer als die Strom-Spannungs-Flanke, die sich ergibt, wenn man die Diode in Durchlassrichtung betreibt.

Varistor

Die Kennlinie des Varistors wich etwas von unseren Erwartungen ab.



Die Kennlinie ist antisymmetrisch zur Stromachse, wie wir es eigentlich erwartet haben. Zusätzlich zu den Hauptflanken bilden sich aber noch zwei Nebenflanken aus, die der Kurve eine hysteresese-ähnliche Form verleihen.

Dies erklären wir uns durch die Trägheit des Varistor-Materials. Obwohl die verwendete Frequenz noch recht gering ist, reicht diese bereits aus, dass der Varistor den sich einstellenden Wechselfeldern nicht mehr folgen kann.

Wir haben nun die beiden Schwellspannungen mittels Oszilloskop bestimmt:

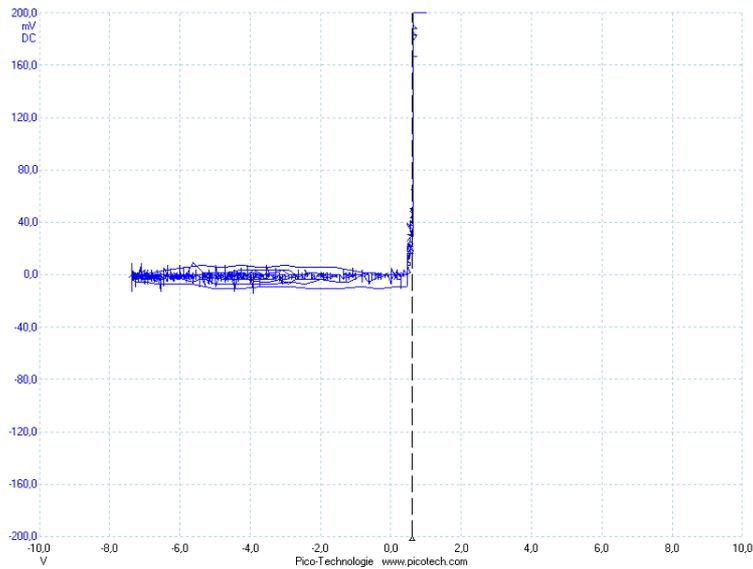
$$U_{\text{schwell},1} = 5,410 \text{ V}$$

$$U_{\text{schwell},2} = -5,400 \text{ V}$$

Man sieht gut, dass diese im Rahmen der Messgenauigkeit übereinstimmen, wie wir es auch erwartet haben.

Photodiode

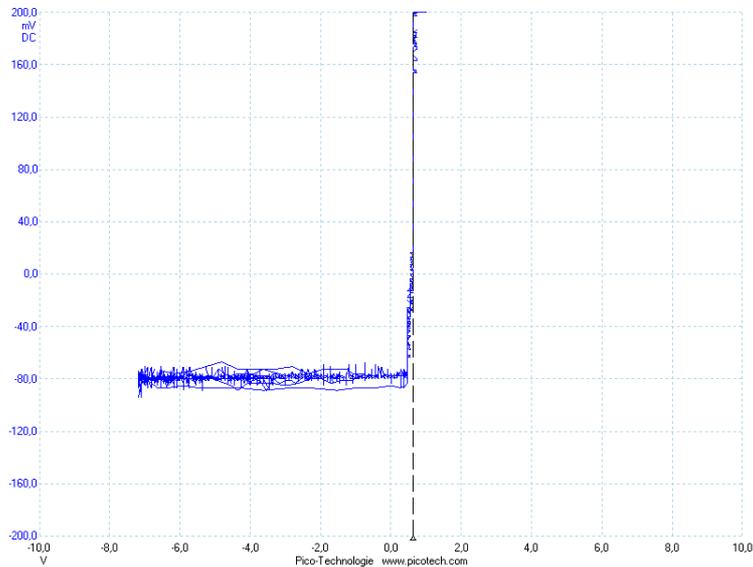
Mit der Photodiode haben wir das erste Bauteil untersucht, dessen Eigenschaften durch Lichteinfall verändert werden können. Wir haben zunächst die Kennlinie der Photodiode aufgenommen, ohne sie zu beleuchten. Es ergab sich auf dem Oszilloskop das nachstehende Bild.



Die Kennlinie entspricht wieder einer typischen Dioden-Kennlinie. In Durchlassrichtung sehen wir ab der Schwellspannung

$$U_{\text{Schwell,o}} = 600 \text{ mV}$$

eine steile Flanke der Strom-Spannungs-Kennlinie, in Sperrichtung hingegen fließt auch bei größeren Spannungen kein Strom. Wir haben nun die Photodiode mit Hilfe einer Taschenlampe beleuchtet und erneut eine Kennlinie aufgenommen. Uns ist dabei aufgefallen, dass die Veränderung der Kennlinie bei- nahe instantan erfolgte.



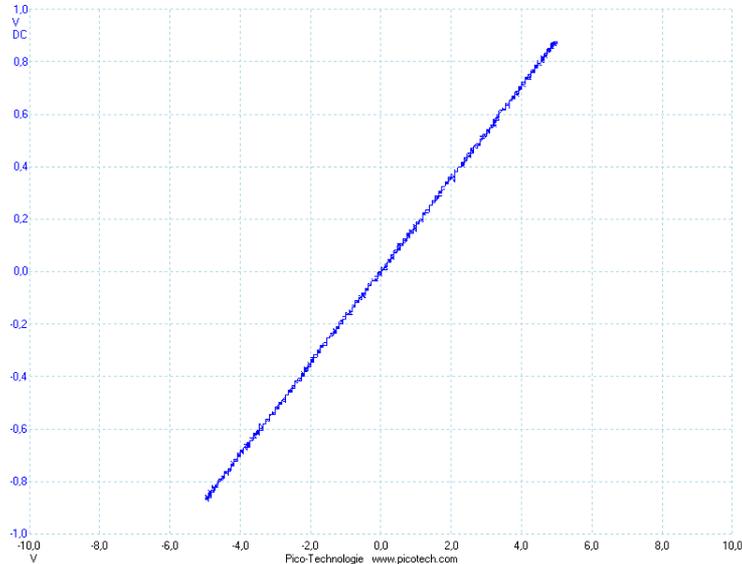
Man erkennt sehr gut, dass sich die gesamte Kennlinie nach unten verschoben hat. Die Schwellspannung ergab sich diesmal zu

$$U_{\text{Schwell,o}} = 630 \text{ mV}$$

was im Rahmen der Messgenauigkeit ungefähr gleich dem Ergebnis ohne externe Lichtquelle ist. Da sich die Kennlinie allerdings in den negativen Strombereich verschoben hat, haben wir nun den Fall vorliegen, dass beim Betrieb der Photodiode in Sperrichtung dennoch ein Strom fließt.

Photowiderstand

Als nächstes haben wir einen Photowiderstand hinsichtlich seiner Eigenschaften untersucht. Auch dieser ist abhängig von der Beleuchtung, wie wir im Folgenden sehen werden. Zunächst haben wir die Kennlinie des Widerstands ohne zusätzliche Beleuchtung aufgenommen.



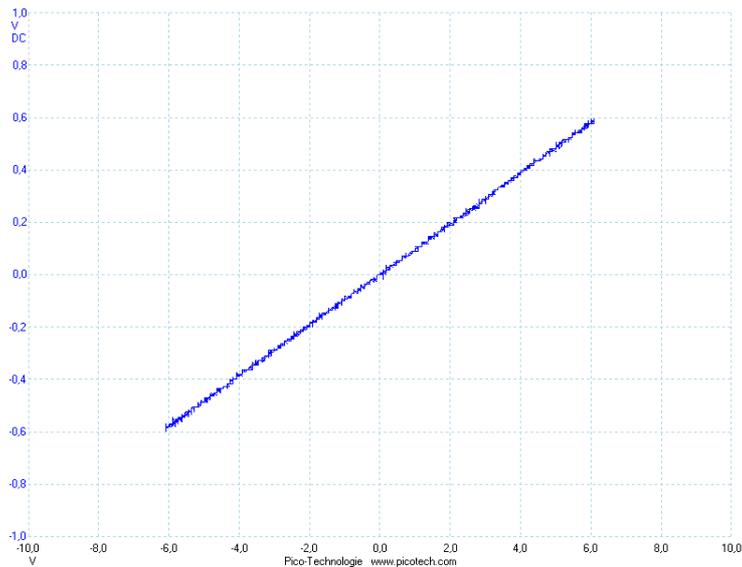
Es ergab sich, wie es zu erwarten war, ein linearer Zusammenhang nach dem Ohmschen Gesetz. Damit können wir nun auch den Widerstandswert des Photowiderstands bestimmen. Wir betrachten dazu willkürlich den Punkt $(x; y) = (4,00; 0,70)\text{V}$ der Kennlinie. Die Spannung $U_y = 0,70\text{ V}$ ist diejenige, die am Referenzwiderstand $R_{\text{ref}} = 100\ \Omega$ abfällt. Über

$$I = \frac{U_y}{R_{\text{ref}}}$$

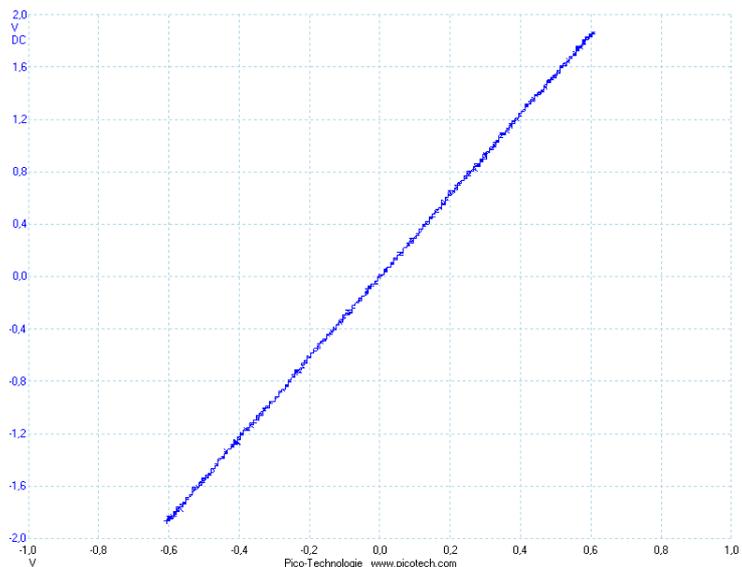
erhalten wir so den konstanten, durch die ganze Schaltung fließenden Strom zu $I = 7 \cdot 10^{-3}\text{ A}$. Da an dem Photowiderstand die Spannung $U_x = 4,00\text{ V}$ abfällt, erhalten wir so den Widerstand des Photowiderstands über

$$R_{\text{pw}} = \frac{U_x}{I}$$

und in diesem Fall zu $R = 571,43\ \Omega$. Um die Abhängigkeit des Widerstands von der Beleuchtung aufzuzeigen, haben wir ihn als nächstes mit einem Daumen zugehalten, um ihn von der Umgebungsbeleuchtung abzuschirmen. Die sich dann einstellende Kennlinie ist nachfolgend abgebildet.



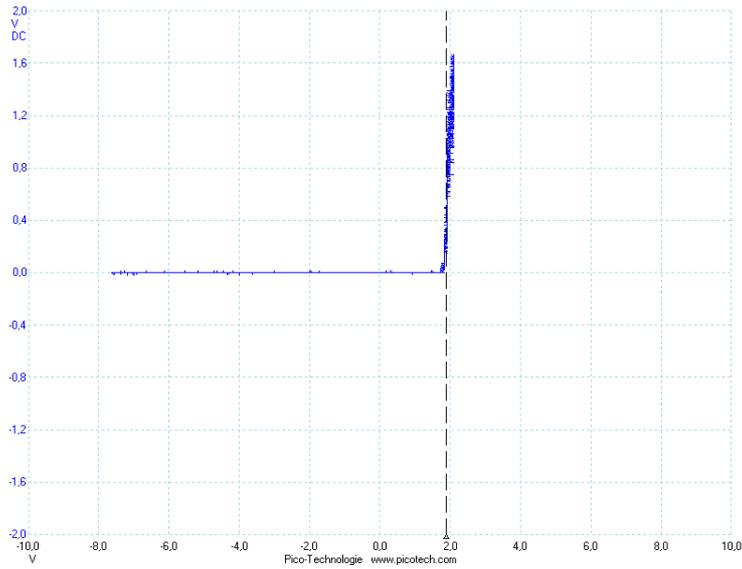
Als Messpunkte haben wir hier $(x; y) = (4,00; 0,39)V$ gewählt. Die Stromstärke ergibt sich auf analoge Weise zu $I = 3,9 \cdot 10^{-3} A$, woraus ein Widerstandswert von $R = 1,026 k\Omega$ folgt. Abschließend haben wir den Photowiderstand noch mit der Taschenlampe beleuchtet. Die Kennlinie ist nachfolgend abgedruckt.



Als Messwertepaar haben wir uns hier $(x; y) = (0,40; 1,25)V$ ausgesucht. Dadurch erhalten wir $I = 1,25 \cdot 10^{-2} A$, woraus der Widerstand $R = 32 \Omega$ folgt. Wir haben somit deutlich zeigen können, dass der Widerstand mit steigender Beleuchtungsstärke abnimmt, was wir auch erwartet haben.

LEDs

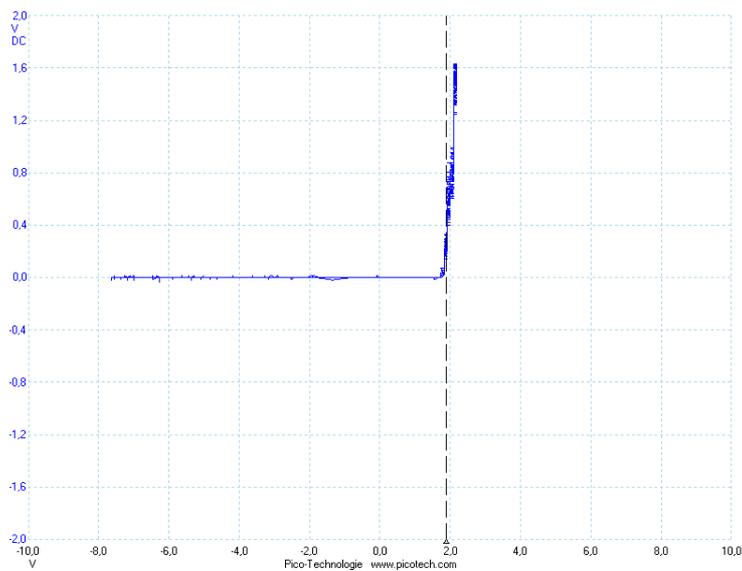
Abschließend haben wir die Kennlinien vier verschiedenfarbig leuchtender LEDs untersucht, angefangen bei einer unsympathisch gelb leuchtenden LED, deren Kennlinie nachfolgend dargestellt ist.



Die Schwellspannung ergab sich hier auf analog zu oben erklärte Weise zu:

$$U_{\text{schwell}} = 1,880 \text{ V}$$

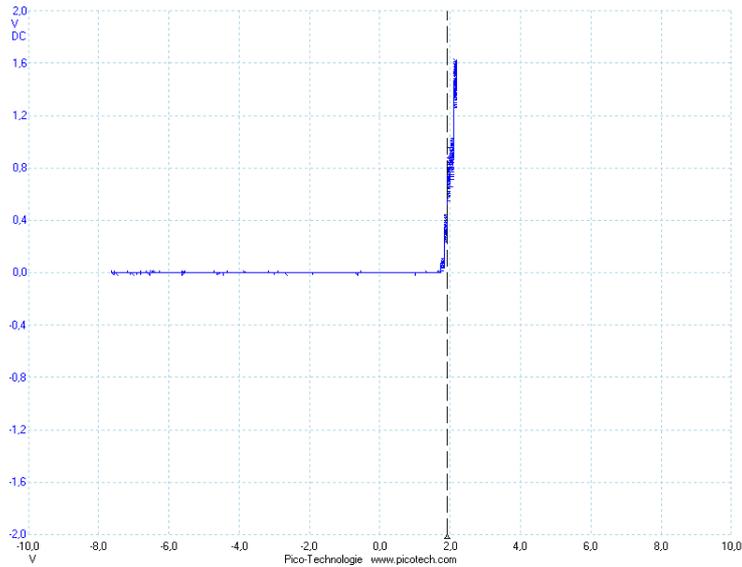
Danach haben wir Kennlinie einer blass grün leuchtenden LED aufgenommen.



Deren Schwellspannung ergab sich zu:

$$U_{\text{schwell}} = 1,900 \text{ V}$$

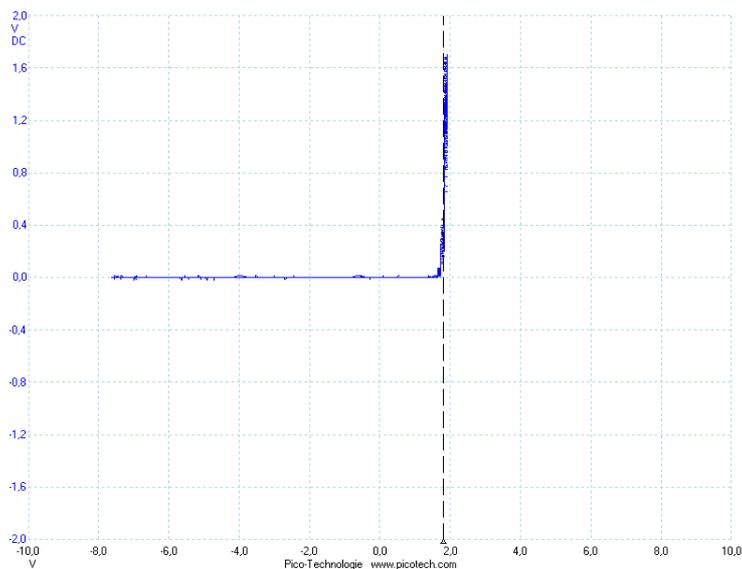
Das nächste von uns untersuchte Bauteil war eine satt rot leuchtende LED, deren Kennlinie wie zuvor aufgenommen wurde und nachfolgend dargestellt ist.



Die Schwellspannung ist von ähnlicher Größenordnung wie zuvor und ergab sich zu:

$$U_{\text{schwell}} = 1,870 \text{ V}$$

Abschließend haben wir eine ungewöhnlich orange leuchtende LED untersucht.



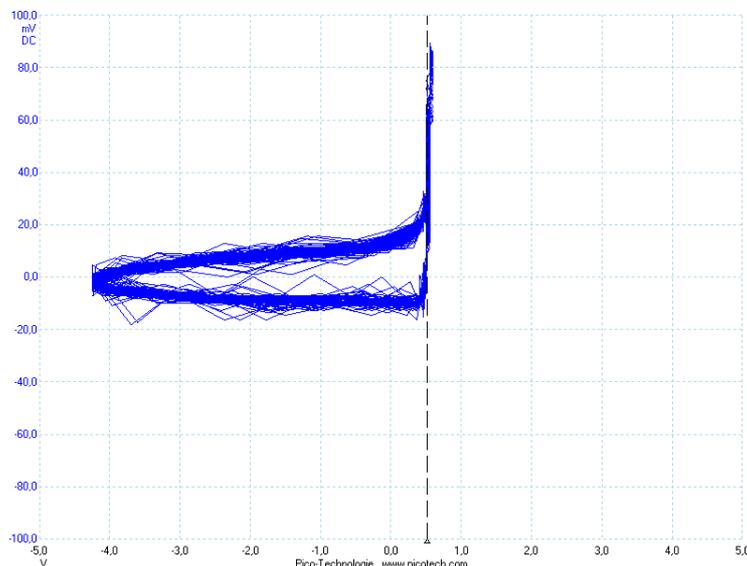
Die Schwellspannung war hier schließlich:

$$U_{\text{schwell}} = 1,800 \text{ V}$$

Wir haben erwartet, dass die Schwellspannung mit abnehmender Wellenlänge der Farbe zunehmen müsste, denn bei kürzerer Wellenlänge finden wir einen energiereicheren Übergang in der LED, womit auch eine höhere Spannung benötigt wird, um die Raumladungszone zu überwinden. Diese Erwartung hat sich bei der roten, gelben und grünen LED bestätigt, deren Schwellspannungen in dieser Reihenfolge zunahm. Lediglich die orange LED deckt sich hier nicht mit unseren Erwartungen, was wir auf Messfehler oder eventuell andere Funktionsweisen in der LED zurückführen.

Aufgabe 2.2: Frequenzabhängigkeit der Bauteile

Anschließend haben wir, nach Absprache mit unserem Betreuer, lediglich die Silizium-Diode mit einer sehr viel höheren Frequenz von $\nu = 10 \text{ kHz}$ betrieben und erneut die Kennlinie aufgenommen. Sie ist nachfolgend abgedruckt.



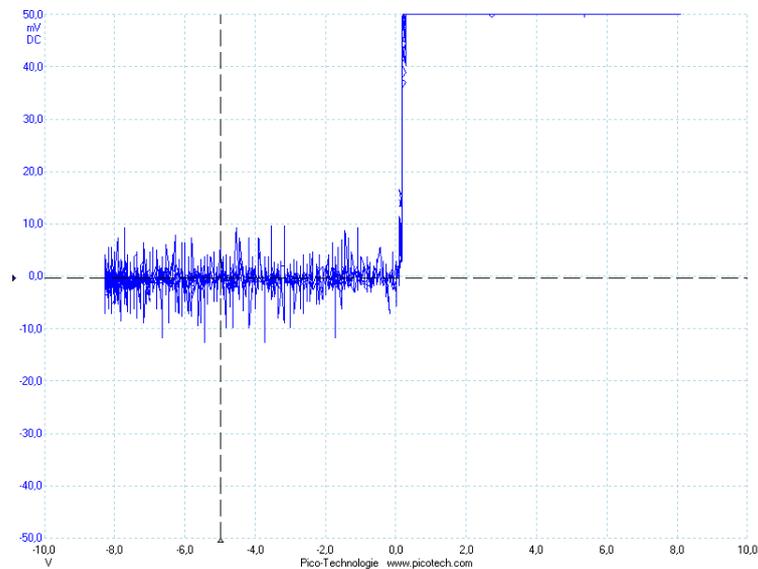
Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kennlinie von der zu erwartenden Form einer Diode stark abweicht. Die Kennlinie weist eine gewisse Retardiertheit auf, was nach Fleig et al. auch als „Abkacken“ bezeichnet wird. Der schnelle Wechsel der Spannungspolarität sorgt dafür, dass in der Diode eine ordentliche Sperrschicht weder auf- noch abgebaut werden kann. Dadurch fällt der Strom beim Rückgang der Spannung nicht ganz auf Null ab.

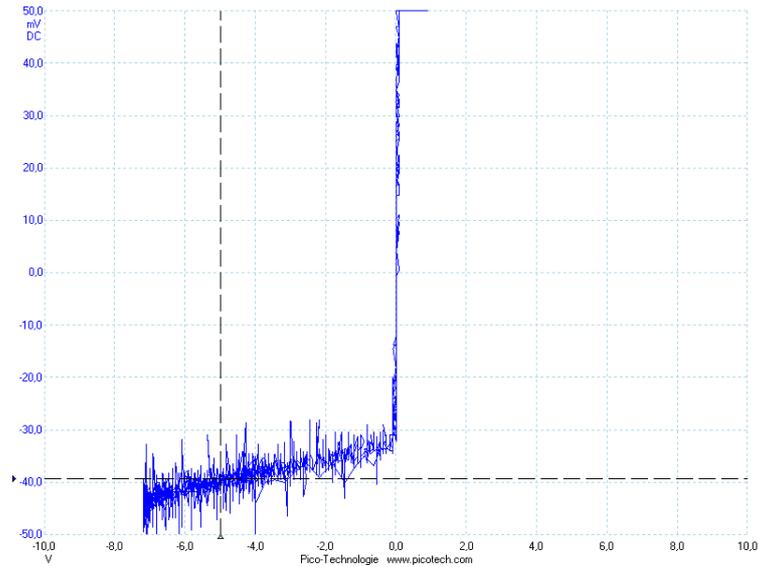
Aufgabe 3: Phototransistor

Nachdem wir die Kennlinien verschiedener elektrischer Bauelemente aufgenommen haben, sollten wir noch die eines Phototransistors bei verschiedenen Beleuchtungsstärken aufnehmen. Dazu verwendeten wir wieder Schaltung (2) mit $R_{\text{ref}} = 100 \Omega$ als Referenzwiderstand und einen Phototransistor, welcher in einem Kasten mit einer Lampe als Lichtquelle verbaut war. Zu dieser Lampe war der Zusammenhang zwischen angelegter Spannung U_{lampe} und Beleuchtungsstärke E_V in der Versuchsmappe gegeben. Wir starteten bei einer Lampenspannung von $U_{\text{lampe}} = 1 \text{ V}$ und erhöhten diese in $0,5 \text{ V}$ -Schritten. Am USB-Oszilloskop nahmen wir bei jeder Spannung die Kennlinie des Phototransistors auf und bestimmten aus ihr den Sperrstrom über das Ohmsche Gesetz und den Referenzwiderstand. Die Messwerte sind alle in folgender Tabelle aufgelistet.

U_{lampe} in V	E_v in Lux	$U_{\text{widerstand}}$ in mV	I in mA
1,0	0	0,0	0,000
1,5	0	0,0	0,000
2,0	2	0,5	0,005
2,5	7	0,7	0,007
3,0	22	1,0	0,010
3,5	45	1,5	0,015
4,0	84	2,3	0,023
4,5	148	3,2	0,032
5,0	258	4,5	0,045
5,5	381	5,6	0,056
6,0	560	7,0	0,070
6,5	876	8,7	0,087
7,0	1177	10,5	0,105
7,5	1566	12,2	0,122
8,0	2010	14,6	0,146
8,5	2545	17,0	0,170
9,0	3184	19,7	0,197
9,5	3905	22,0	0,220
10,0	4695	24,7	0,247
10,5	5695	27,0	0,270
11,0	6710	29,9	0,299
11,5	7730	33,1	0,331
12,0	9155	35,7	0,357
12,5	10365	39,4	0,394

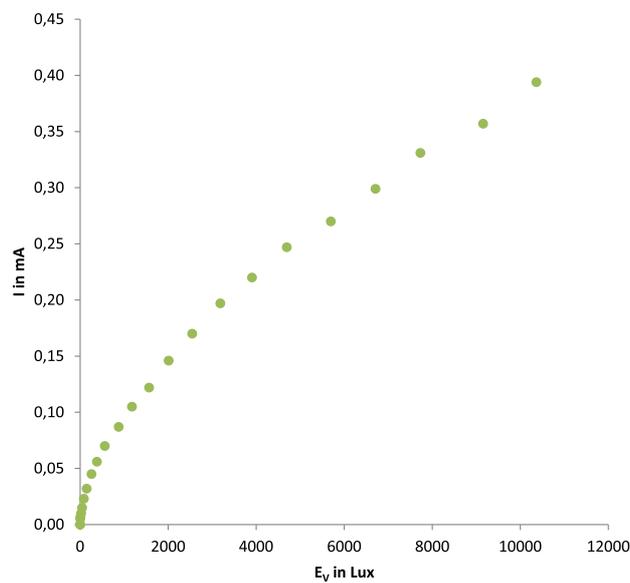
Die Kennlinien ohne Beleuchtung und bei maximaler Beleuchtung ($U_{\text{lampe}} = 12,5 \text{ V}$) sind hier ebenfalls abgebildet.





Anfangs war der Sperrstrom wie zu erwarten Null, mit zunehmender Beleuchtungsstärke nahm er allerdings zu. Eigentlich haben wir einen horizontalen Verlauf der Kennlinie erwartet, allerdings erhielten wir einen schiefen Verlauf, welcher vermutlich bauteilbedingt ist. Daher wählten wir eine konstante Spannung, bei welcher wir die zugehörige Spannung für den Sperrstrom maßen. Den Zusammenhang zwischen Sperrstrom und Beleuchtungsstärke machen wir in nachstehendem Schaubild sichtbar.

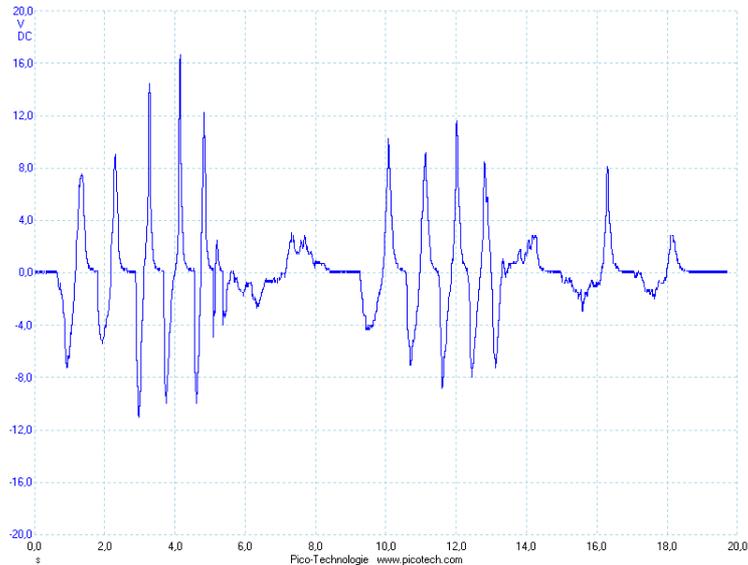
Sperrstrom über Beleuchtungsstärke



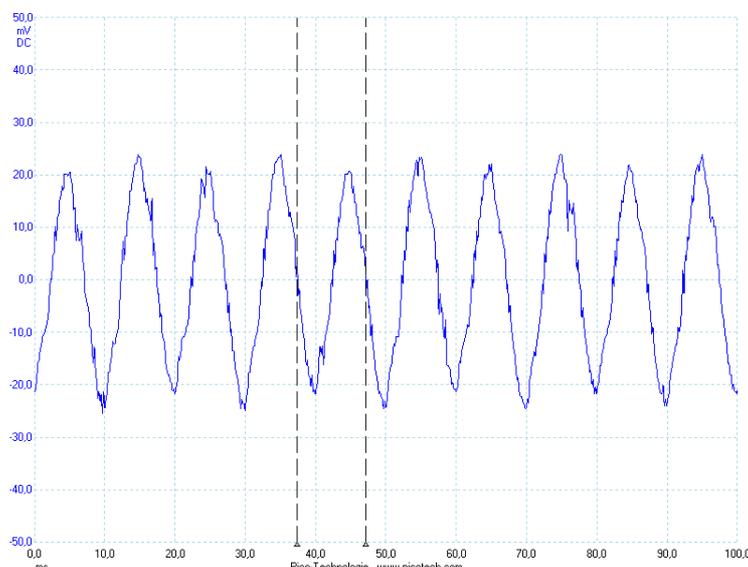
Der Sperrstrom scheint bei steigender Beleuchtungsstärke gegen eine Sättigungsgrenze zu streben. Physikalisch lässt sich dieses Phänomen sehr einfach erklären. Wird der maximale Sperrstrom erreicht, so sind alle verfügbaren Elektronen in der Basis-Kollektor-Strecke angeregt. Eine weitere Erhöhung der Bestrahlungsstärke hat daher keinen Effekt mehr auf den Sperrstrom.

Aufgabe 4: Piezoelektrischer Effekt

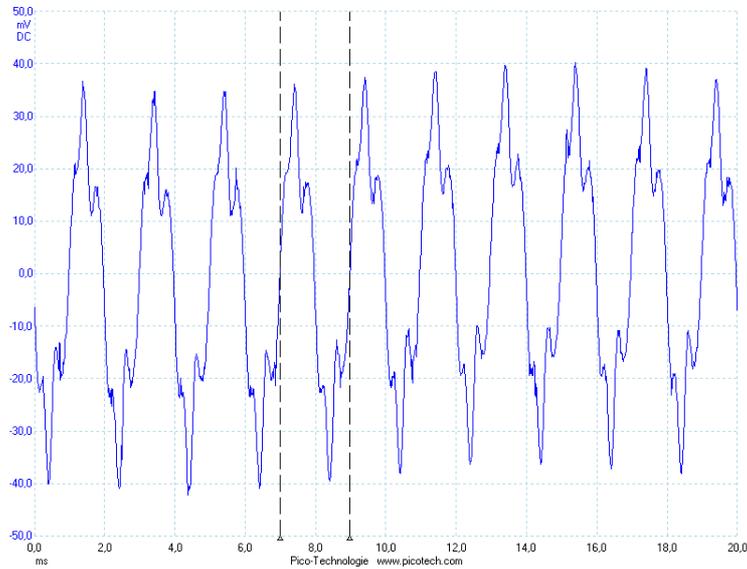
Zunächst galt es den direkten piezoelektrischen Effekt durch manuelles Drücken zu untersuchen. Dazu schlossen wir das Piezoelement an das USB-Oszilloskop an. Das Element reagiert nicht auf Druck selbst, sondern auf Druckänderungen. Ein kurzes Drücken erzeugte einen negativen Spannungsspike, das Anheben des Fingers einen positiven. So war es uns möglich Spannungen von bis zu 20 V zu erzeugen. Das Schaubild zeigt mehrfaches Drücken und Entlasten verschiedener Stärken.



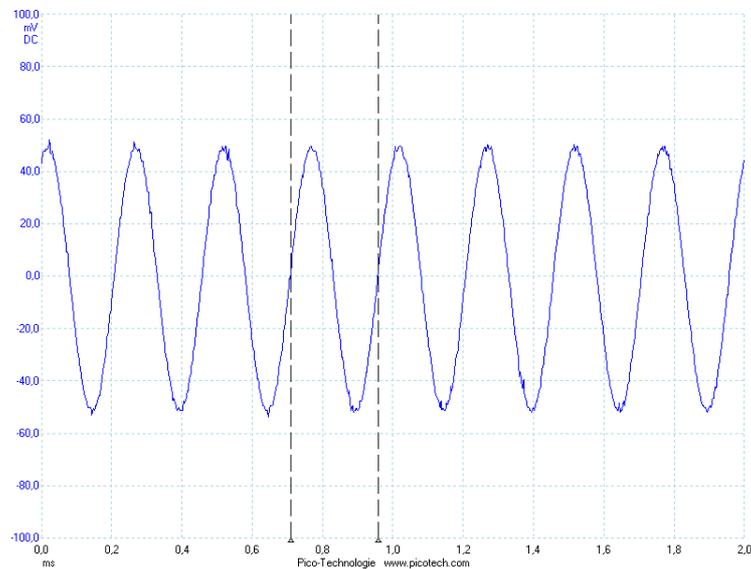
Man kann gut erkennen, dass auf jeden negativen Peak ein positiver Peak ähnlicher Stärke folgt. Um den Effekt weiter zu untersuchen, legten wir das Piezoelement auf einen kleinen Lautsprecher, der mit einem Spannungsgenerator verbunden war. Wir erzeugten mit ihm Spannungen verschiedener Frequenzen und beobachteten das Signal, welches am Piezoelement anlag. Wie vermutet, wurde das Bauelement durch die Schallwellen zu Schwingungen gleicher Frequenz angeregt und erzeugte so messbare Spannungen, die ebenfalls derselben Frequenz entsprachen. Wir führten den Versuch mit Sinusspannungen der Frequenzen $\nu \in [100; 500; 4000]$ Hz durch. Im Folgenden sind die Graphen des Oszilloskops zu sehen.



Bei der Frequenz $\nu = 100$ Hz war eine Sinusspannung mit leichten Zacken zu erkennen. Die akustische Übertragung des Signals scheint nicht ganz verlustfrei zu erfolgen. Dennoch konnten wir mit Hilfe des Oszilloskops die zeitliche Breite einer Periode bestimmen ($T = 9,66$ ms) und kamen so auf eine Frequenz von $\nu_{\text{piezo}} = 103,5$ Hz.



Hier betrieben wir den Lautsprecher mit der Frequenz $\nu = 500$ Hz. Das Ausgangssignal des Piezoelements war noch zackiger als zuvor, wir konnten jedoch keine bessere Sinuswelle durch Variation der Einstellungen am Oszilloskop erzeugen. Trotzdem schlossen wir wieder über die Periodendauer $T = 1,99$ ms auf die Frequenz des Signals und erhielten $\nu_{\text{piezo}} = 502,5$ Hz.



Als wir am Lautsprecher ein Sinussignal mit der Frequenz $\nu = 4$ kHz anlegten, erhielten wir ein nahezu perfektes Sinussignal am Piezoelement. Hier maßen wir eine Periodendauer von $T = 0,249$ ms, was einer Frequenz von $\nu_{\text{piezo}} = 4016$ Hz entspricht.

So konnten wir eindrucksvoll zeigen, dass das Piezoelement in der Lage ist, Schallwellen in ein entsprechendes elektrisches Signal umzuwandeln. Damit ist die erwähnte Verwendung als Empfänger von Schallwellen bestätigt. Die Genauigkeit der Frequenz ist dabei ziemlich hoch und übertraf unsere Erwartungen.

Nachdem wir uns mit dem direkten piezoelektrischen Effekt beschäftigt hatten, sollte auch dessen indirekte Variante untersucht werden. Dazu schlossen wir das Piezoelement direkt an den Funktionsgenerator an und speisten Sinusspannungen verschiedener Frequenzen ein. Bei niedrigen Frequenzen im Bereich von 100 – 400 Hz konnten wir Vibrationen auf der Oberfläche des Piezoelements spüren. Gleichzeitig wurde ein Brummen hörbar, welches bei steigender Frequenz in ein hohes, durchaus unangenehmes Piepen überging. Piezoelemente lassen sich daher als Lautsprecher verwenden. Man kennt sie beispielsweise aus Geschenkkarten, welche beim Aufklappen ein Lied abspielen oder als Summer/Sirene im Computer.

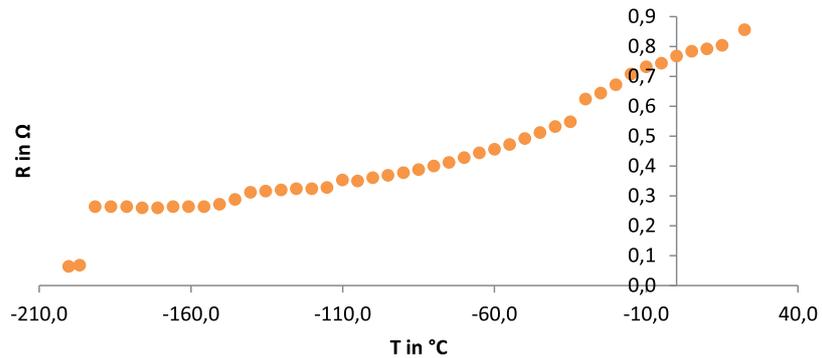
Aufgabe 5: Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters

In diesem letzten Versuchsteil haben wir uns mit einem Hochtemperatursupraleiter beschäftigt und ihn auf seine spezielle Eigenschaften untersucht. In der Vorbereitung wurde bereits erklärt, dass ein solcher Supraleiter ab einer Sprungtemperatur T_C schlagartig niederohmig wird. Es galt diesen Zusammenhang zu erkennen und die Sprungtemperatur zu bestimmen. Dazu nutzten wir die bereits aufgebaute Vierleiterschaltung. Mit ihr ist es möglich auch sehr geringe Widerstände zu messen. Wir kühlten den Supraleiter mit flüssigem Stickstoff von Zimmertemperatur aus auf $-200,3\text{ °C}$ ab, indem wir ihn schrittweise der Flüssigkeit näherten. Bei einem konstanten Strom $I = 2,5\text{ mA}$ maßen wir zu jeder Temperatur die Spannung, die am Supraleiter abfiel. Nachfolgend sind die Messwerte aufgelistet. Die Temperaturen ab $T = -95\text{ °C}$ wurden bereits entsprechend der Tabelle aus der Versuchsbeschreibung korrigiert. Der Widerstand berechnet sich ganz einfach aus dem Ohmschen Gesetz.

T in °C	U in mV	R in Ω
22,4	2,14	0,856
15,0	2,01	0,804
10,0	1,98	0,792
5,0	1,96	0,784
0,0	1,92	0,768
-5,0	1,86	0,744
-10,0	1,83	0,732
-15,0	1,77	0,708
-20,0	1,68	0,672
-25,0	1,61	0,644
-30,0	1,56	0,624
-35,0	1,37	0,548
-40,0	1,33	0,532
-45,0	1,28	0,512
-50,0	1,23	0,492
-55,0	1,18	0,472
-60,0	1,14	0,456
-65,0	1,11	0,444
-70,0	1,07	0,428
-75,0	1,03	0,412
-80,0	1,00	0,400
-85,0	0,97	0,388
-90,0	0,94	0,378
-95,1	0,92	0,369
-100,1	0,90	0,361
-105,1	0,88	0,350
-110,1	0,88	0,353
-115,2	0,82	0,328
-120,2	0,81	0,324
-125,3	0,81	0,324
-130,3	0,80	0,320
-135,4	0,79	0,316
-140,4	0,78	0,312
-145,5	0,72	0,288
-150,6	0,68	0,272
-155,7	0,66	0,264
-160,8	0,66	0,264
-165,9	0,66	0,264
-171,0	0,65	0,260
-176,1	0,65	0,260
-181,2	0,66	0,264
-186,4	0,66	0,264
-191,6	0,66	0,264
-196,7	0,17	0,068
-200,3	0,16	0,064

Diese Messpunkte wurden in einem Schaubild gegeneinander aufgetragen:

Supraleiter



Zunächst nahm der Widerstand einigermaßen linear ab. Die Unebenheiten können einerseits bauteilbedingt sein, andererseits kühlte der Supraleiter teilweise sehr schnell ab, wodurch es nicht immer möglich war, Temperatur und Widerstand zeitgleich zu messen. Man kann dennoch gut erkennen, dass der Wert des Widerstandes bei $T_C \approx -195^\circ\text{C}$ schlagartig abfällt. Diese Temperatur stellt also die Sprungtemperatur unseres Supraleiters da. Leider war es uns nicht möglich den Widerstand gegen Null gehen zu lassen. Selbst als der Supraleiter komplett mit dem flüssigen Stickstoff bedeckt war, wurde ein solcher Wert nicht erreicht. Wir nehmen an, dass die Vierleiterschaltung nicht voll funktionsfähig war oder der Supraleiter beschädigt war. Die Theorie des Supraleiters sehen wir aber trotzdem als bestätigt an.