

**Physikalisches Anfängerpraktikum - P2**

**Eigenschaften elektrischer Bauelemente**  
**P2-50**

Auswertung von  
**Tobias Renz** und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 5. Juli 2012



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 $200^{\circ}\text{C}$ .**

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  $U=2\text{V}$  liefert. Um die Erwärmung des Widerstands durch den Messstrom gering zu halten, soll dieser jeweils nur kurzzeitig eingeschaltet werden (durch Betätigung des Tasters). Als Brückeninstrument 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  $0^{\circ}\text{C}$ . 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 Literaturmappe und auch auf der Praktikumshomepage.

## 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.

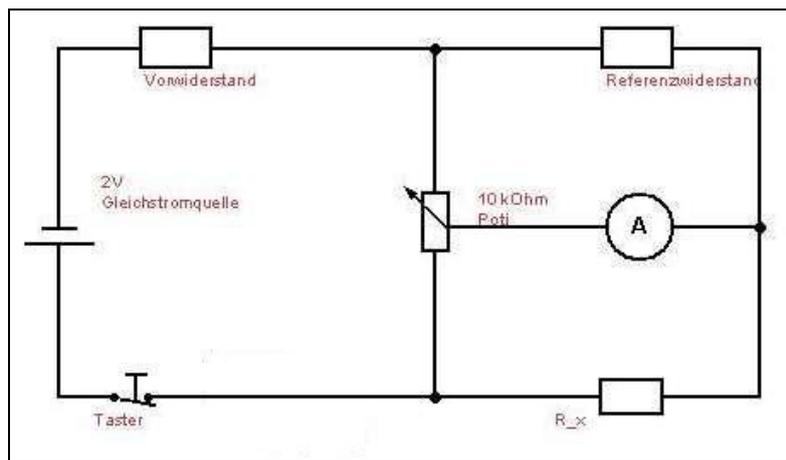
**Achtung:**

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

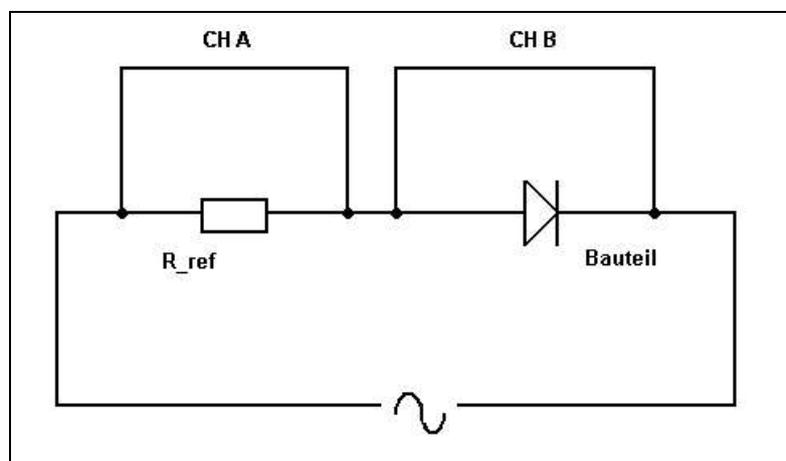
**Zubehör:**

- 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, Konstantendrahtspule, NTC und PT100, eingebautes NiCr-Ni-Thermoelement mit passendem Messinstrument;
- Frequenzgenerator (GW-Instek SFG-2104), Trenntransformator;
- Bauelemente als Steckerbauelemente: 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,
- Vierleitersmessschaltung mit Konstantstromquelle ( $I_{\text{const}}=2,5\text{mA}$ ) und Steckernetzgerät;
- Flüssiger Stickstoff ( $\text{LN}_2$ ).

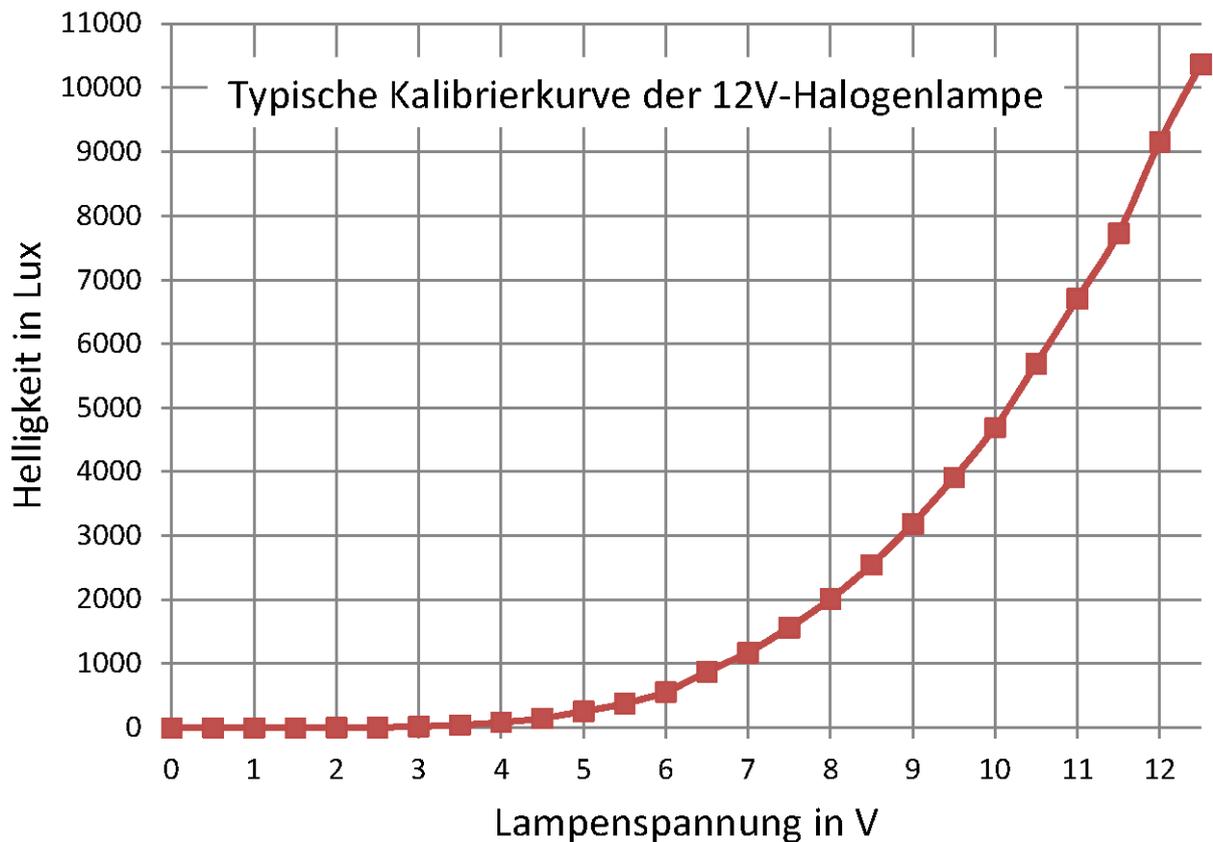
**Schaltskizzen der Versuchsboxen:**



Schaltung (1): Wheatstonesche Brückenschaltung



Schaltung (2): Kennlinienaufnahme



Zu Aufgabe 3: (Phototransistor)

### Linearisierungstabelle: (typ. Werte)

Temperatur	Anzeige	Temperatur	Anzeige	Temperatur	Anzeige	Temperatur	Anzeige
-200	-201.9	-165	-165.9	-130	-130.3	-95	-95.1
-195	-196.7	-160	-160.8	-125	-125.3	-90	-90.0
-190	-191.6	-155	-155.7	-120	-120.2	-85	-85.0
-185	-186.4	-150	-150.6	-115	-115.2	-80	-80.0
-180	-181.2	-145	-145.5	-110	-110.1	-75	-75.0
-175	-176.1	-140	-140.4	-105	-105.1	-70	-70.0
-170	-171.0	-135	-135.4	-100	-100.1		

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**

**Eigenschaften elektrischer Bauelemente**  
**P2-52**

Versuchsvorbereitung von  
**Tobias Renz** und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 5. Juni 2012

## Einführung

Es werden im Versuch die Eigenschaften elektrischer Bauelemente näher untersucht. Diese hängen in der Regel von vielen physikalischen Größen ab. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die wohl stärkste Abhängigkeit des Widerstandes gelegt. So gibt es NTC bzw. PTC-Widerstände, welche stark Temperaturabhängig sind; Widerstände die besonders auf Spannungsänderungen reagieren (VDR) oder auch optoelektrische Bauteile, wie beispielsweise der Photowiderstand oder die Photodiode. Des Weiteren wären druckabhängige Bauelemente (Piezoelemente), Supraleiter und eine Reihe von Halbleitern zu erwähnen. Im Folgenden werden die zum Verständnis dieses Versuchs benötigten Begrifflichkeiten kurz erklärt.

## 0 Begriffserklärungen

### 0.1 Das Bändermodell

Das Bändermodell beschreibt die erlaubten Energiezustände der Elektronen in einem Festkörper durch Anwendung der Quantenmechanik auf einen Festkörper. In einem freien Atom haben die Elektronen diskrete Energieniveaus. Sind viele Atome als Kristall angeordnet, so überlagern sich durch Superposition die atomaren Orbitale (anschaulich: elektrostatische Wechselwirkung) und es entstehen aus der Vielzahl an Einzelenergieniveaus, quasi kontinuierliche Energiebänder. Je weiter die Elektronen vom Kern entfernt sind, desto breiter ist das Band. Diese Bänder sind durch Energielücken getrennt.

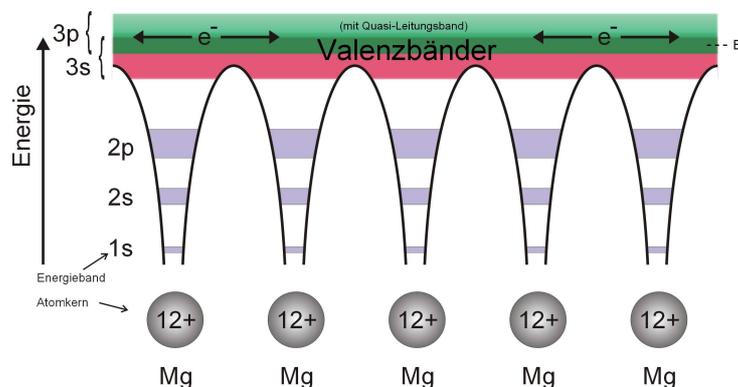


Abbildung 1: Bändermodell

In einem Festkörper gibt es voll, nicht voll besetzte sowie leere Energiebänder. Das innerste nicht (voll) besetzte Band heißt **Leitungsband**. Es liegt über dem bei  $T=0\text{K}$  am höchsten mit Elektronen besetzten Energieband (**Valenzband**).

Je nach Lage und Besetzung der Bänder ist es nun möglich die Leitungseigenschaften von Leitern, Halbleitern und Isolatoren zu erklären.

## 0.2 Metalle

Metalle zählen zu den Leitern, da ihr Leitungsband schon bei sehr tiefen Temperaturen teilweise besetzt ist. Dies ist der Grund weshalb immer eine gewisse Anzahl an freien Elektronen vorhanden ist, die zum Ladungstransport zur Verfügung stehen.

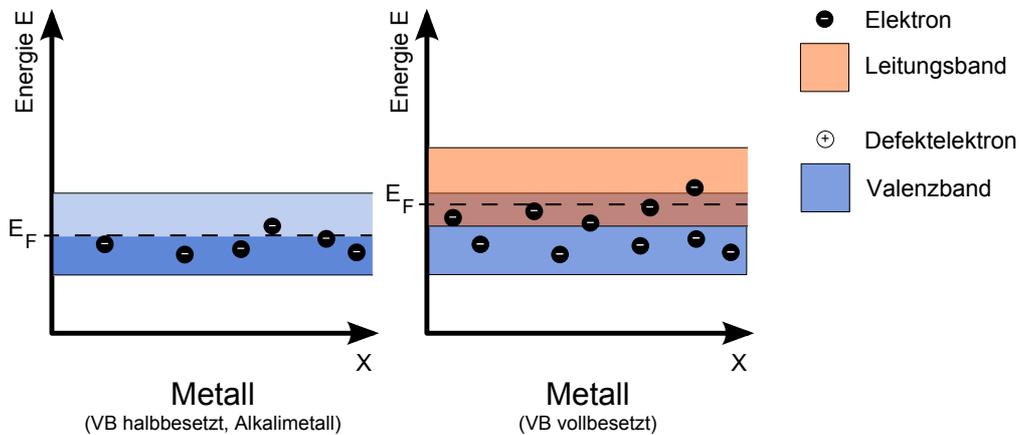


Abbildung 2: Energiebänder im Metall

In mehrwertigen Metallen kommt es zu einer Überlagerung der höchsten Energiebänder. Hier reichen bereits kleine elektrische Feldstärken um Elektronen in einen nächsthöheren Zustand anzuheben.

Die Anzahl der freien Elektronen ist bei Metallen abhängig vom jeweiligen Werkstoff. Die elektrische Leitfähigkeit nimmt, aufgrund von Streuung, also Stöße mit Atomrümpfen, anderen Elektronen oder an der Wand des Kristalls, bei steigender Temperatur ab. Die Streuung an Störstellen sorgt für einen Restwiderstand bei  $T=0\text{K}$ .

## 0.3 Isolatoren

Bei Isolatoren ist das Leitungsband nicht besetzt. Zwischen vollem Valenzband und Leitungsband ist ein Bandabstand, welcher so groß ( $\Delta E_g \gg k_b T \approx 2 - 5\text{eV}$ ) ist, dass die Valenzelektronen ihn (auch bei hohen Energien) nicht erreichen können (vgl. Abbildung 3). Man spricht hier (sowie bei den Halbleitern) davon, dass die Fermi-Energie in der verbotenen Zone liegt. Die Fermi-Energie  $E_F$  gibt den Eigenwert an, für den die Besetzungswahrscheinlichkeit für Elektronen  $1/2$  beträgt.

## 0.4 Halbleiter

Bei Halbleitern ist die Ladungsträgerkonzentration  $n$  temperaturabhängig. Also solche werden Festkörper bezeichnet, die bei tiefen Temperaturen und großer Reinheit als Isolatoren wirken. Mit steigender Temperatur steigt die Leitfähigkeit jedoch steil an. Typische Vertreter befinden sich in der IV. Hauptgruppe (Silizium oder Germanium).

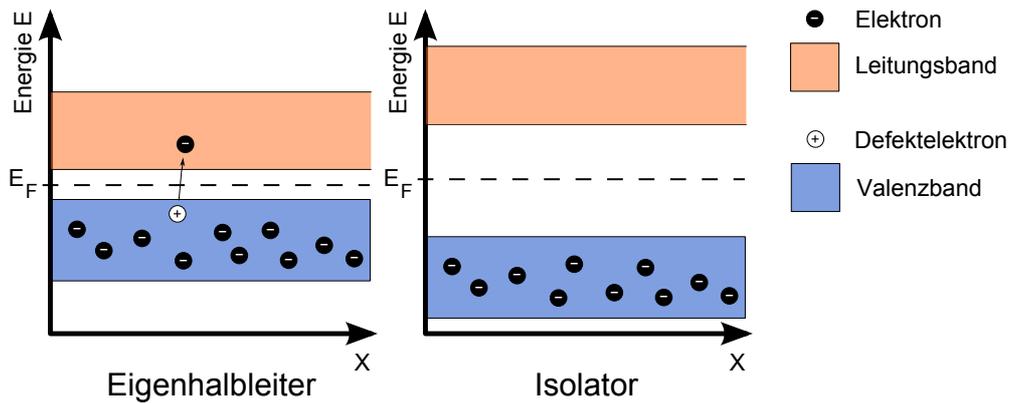


Abbildung 3: Schema Energiebänder bei Halbleiter und Isolator

Zwischen Valenz- und Leitungsband befindet sich wieder eine Bandlücke; dieses mal jedoch nicht wie bei Isolatoren zu groß, sondern in einem Bereich, in dem Elektronen bei steigender thermischer Anregung aus dem Valenz- in das Leitungsband gelangen können. Im Leitungsband kommt es so zur Elektronenleitung. Die fehlenden Elektronen (**Defektelektronen**) im Valenzband führen in selbigem zu einer **Löcherleitung**. Man spricht hier von der sogenannten **Eigenleitung**.

## 0.5 Dotierung

Die Leitfähigkeit von Halbleitern lässt sich neben den durch nicht verhinderbare Verunreinigungen und der Geometrie auftretenden Eigenleitung auch durch geschickte Verunreinigung weiter erhöhen. Dies nennt man Dotierung. Dabei erreicht man durch einbringen von Fremdatomen einen Ladungsträgerüberschuss. Durch die Dotierung des Halbleiterkristalls bewirkt man eine erhebliche, materialspezifische Leitfähigkeitsänderung, die sogenannte **Störleitung**.

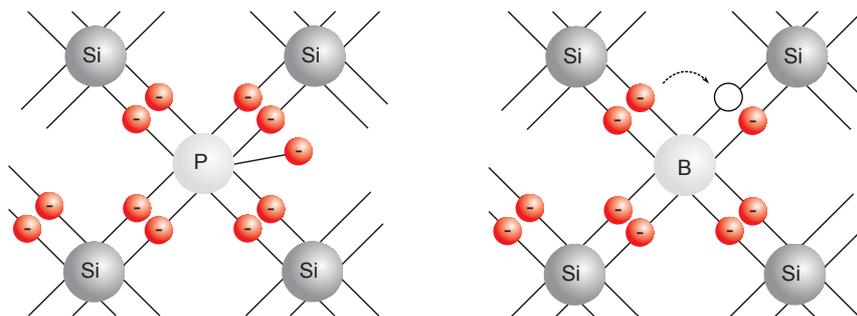


Abbildung 4: Schema n- und p-Dotierung

Man unterscheidet zwischen n- und p-dotierten Halbleitern. Bei n-dotierten Halbleitern werden Atome wie Arsen oder Phosphor mit fünf Valenzelektronen eingebracht. Da diese dem Halbleiter ein freies Elektron zur Verfügung stellen bezeichnet man sie als **Donatoren**.

Bringt man dagegen dreiwertige Fremdatome (**Akzeptoren**), wie Bor oder Gallium in die Kristallstruktur ein, so fehlt an den entstandenen Störstellen jeweils ein Elektron. Es entstehen Elektronenlücken. Es handelt sich dann um einen p-dotierten Halbleiter.

## 0.6 pn-Übergang

Bringt man eine p- und n-dotierte Schicht auf atomaren Abstand aneinander, so entsteht ein pn-Übergang. Liegt keine Spannung an, so diffundieren die Elektronen am Übergang der beiden Schichten aufgrund des Konzentrationsunterschieds aus dem n-Gebiet ins p-Gebiet. Der pn-Übergangsbereich ist durch die **Rekombination** an Ladungsträgern verarmt. Im Grenzgebiet entstehen so in der p-Zone negativ und in der n-Zone positive ionisierte Atome.

In der Mitte entsteht eine **Raumladungszone**, welche verantwortlich für ein elektrisches Feld ist. Die so entstehende Potentialdifferenz heißt **Diffusionsspannung** und wirkt der durch das Konzentrationsgefälle ausgelösten Diffusion der Ladungsträger entgegen. Es stellt sich ein Gleichgewicht ein. Mit steigender Temperatur lässt sich die Raumladungszone aufgrund der höheren kinetischen Energie der Elektronen vergrößern. Im Bändermodell wird dieser thermo-

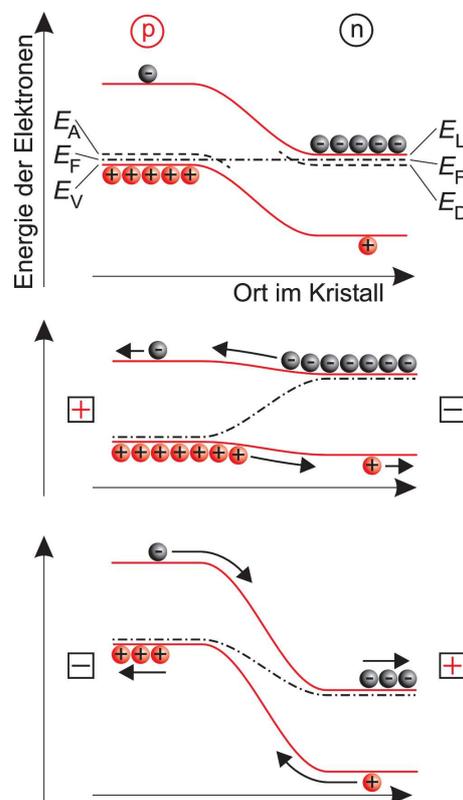


Abbildung 5: pn-Übergang im Bändermodell

dynamische Gleichgewichtszustand, welcher sich einstellt solange keine äußere Spannung am pn-Übergang anliegt, durch die gleiche Fermi-Energie  $E_F$  in p- und n-Teil beschreiben. In Abbildung 5 entspricht  $E_L$  der Unterkante des Valenzbandes und  $E_V$  der Oberkante des Leitungsbandes. Es ist die Energie der Elektronen als Funktion des Ortes im Kristall aufgetragen.

Die Bandverbiegung entspricht dem Potentialsprung am pn-Übergang.

Nun gibt es zwei Möglichkeiten Spannung an den Schichtverbund (genannt Diode, siehe unten) anzulegen.

- a) **Durchlassrichtung:** die n-Zone liegt am Minus Pol, die p-Zone am Plus Pol. Diese Polung erniedrigt die Energiebarriere und nach Abbau dieser fließt ein merklicher Durchlassstrom. Erhöht man die Spannung, so nimmt der Strom langsam zu. Ab der **Schwelspannung** kommt es zu einem exponentiellen Anstieg des Stroms.
- b) **Sperrrichtung:** die umgekehrte Polung liegt vor; also Minus Pol an p-Zone und Plus Pol an n-Zone. Bei dieser Betriebsart vergrößert sich die Sperrschicht am pn-Übergang. Die Ladungsträgerkonzentration nimmt weiter ab und somit auch die Leitfähigkeit. Ein sehr geringer Strom, **Sperrstrom**, fließt. Wird auch hier die angelegte Spannung erhöht, so kommt es ab der **Durchbruchspannung** zum sogenannte **Lawinendurchbruch**. Die Elektronen haben nun eine so hohe Energie, dass sie keine Bindung mehr eingehen und die Spannungsbarriere überwinden können. Durch Stöße lösen diese gebundene Elektronen aus der über den ganzen Halbleiter ausgedehnten Sperrschicht heraus. Es kommt zu einem schlagartigen Anstieg des Stroms.

Der Durchbruch ist in der untersten Grafik in Abbildung 5 zu erkennen. Hier ist durch Anlegen einer großen Spannung ein Punkt erreicht, an dem die Energie des Leitungsbands (obere Kurve) unter die Energie des Valenzbandes gefallen ist. Ist dies der Fall, so können Elektronen von der p-dotierten Schicht (hier liegt der Minuspol an) in die n-dotierte Schicht gelangen und somit die Energie der Bandlücke überqueren (tunneln).

Bei einer normalen Diode ist es jedoch nicht von Vorteil diese in Sperrrichtung bis zur Durchbruchspannung zu betreiben, da diese sonst zerstört wird.

## 0.7 Diode als elektrisches Bauteil

Die eben beschriebenen Effekte macht man sich bei einem wichtigen elektrischen Bauelement - der Diode - zu nutzen. Die Diode besteht aus einer p- und n-dotierten Schicht. Kennzeichnend ist ihre Eigenschaft den Strom nur in eine Richtung durchzulassen. Sie weist eine charakteristische nichtlineare Strom-Spannungskennlinie auf.

Auf der x-Achse ist die Spannung aufgetragen. Auf der y-Achse lässt sich der jeweilige Strom bei angelegter Spannung ablesen. Zu lesen ist das Kennlinienschaubild folgendermaßen. Im 1. Quadranten ist der Durchlassbereich aufgetragen, indem die Diode in Durchlassrichtung betrieben wird. Im 3. Quadranten (Pfeile an den Achsen beachten) ist der Sperrbereich abgebildet. Hier ist die Diode in Sperrrichtung gepolt.

## 0.8 Zenerdiode

Eine Zenerdiode oder auch Z-Diode ist eine hoch dotierte Si-Diode mit einem sehr schmalen pn-Übergang. Sie eignet sich besonders für den Dauerbetrieb in Sperrrichtung.

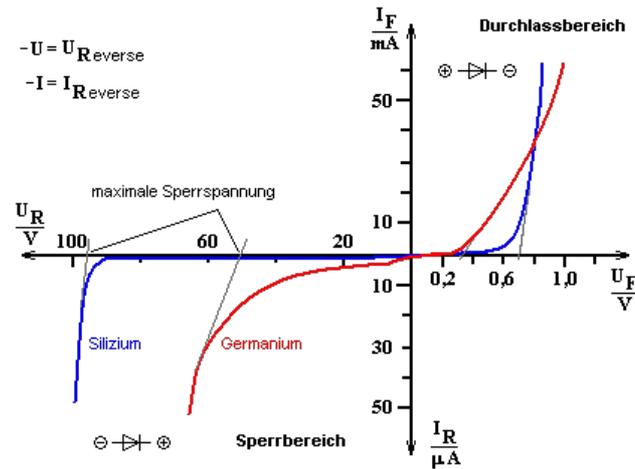


Abbildung 6: Kennlinie einer Si- und Ge-Diode

Die Zenerdioden verhalten sich in Durchlassrichtung wie normale Dioden, in Sperrichtung hingegen werden ab einer bestimmten Größe des elektrischen Feldes Elektronen aus den Kristallbindungen gerissen. Ab der Zener-Spannung wird die Zenerdiode niederohmig und dieser Strom nimmt stark zu. Die durch den **Zener-effekt** freigesetzten Elektronen schlagen nun, beschleunigt durch das elektrische Feld, weitere Elektronen aus (**Lawineneffekt**, siehe oben). Dies wird auch **Zenerdurchbruch** genannt.

Die Kennlinie der Z-Diode ähnelt einem gedrehten Z, ähnlich wie bei der Kennlinie von Silizium oben, jedoch nur etwas zackiger, was ihr auch den Namen gab.

## 0.9 Photoeffekt

Der **innere lichtelektrische Effekt** tritt meistens bei Halbleitern auf. Im Gegensatz zum äußeren lichtelektrischen Effekt, wirkt dass Licht nicht auf freie Elektronen, sondern auf gebundene Elektronen. Die Elektronen werden dann aus ihrer festen Bindung freigesetzt, treten aber nicht aus der Oberfläche heraus, sondern erhöhen die Leitfähigkeit des Materials, welche als **Photoleitung** bezeichnet wird. Diesen Effekt kann man für sogenannte Photowiderstände nutzen, die je nach Lichteinstrahlung ihren Widerstand verändern.

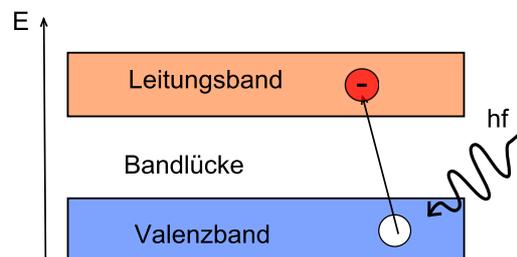


Abbildung 7: Innerer photoelektrischer Effekt

## 0.10 Piezoelektrischer Effekt

Der piezoelektrische Effekt beschreibt die druckabhängige Änderung der Polarisation, welche zum Auftreten einer elektrischen Spannung führt. Man unterscheidet zwischen direktem und inversem piezoelektrischem Effekt.

Den direkten piezoelektrischen Effekt erhält man, wenn eine Kraft auf einen Festkörper wirkt. Diese Kraft verursacht eine Verformung des Materials und damit auch eine Verschiebung der Ladungsträger. Diese Verschiebung verursacht eine Spannung, welche man außen am Kristall/Piezoelement abgreifen und messen kann. Legt man hingegen eine äußere Spannung an ein

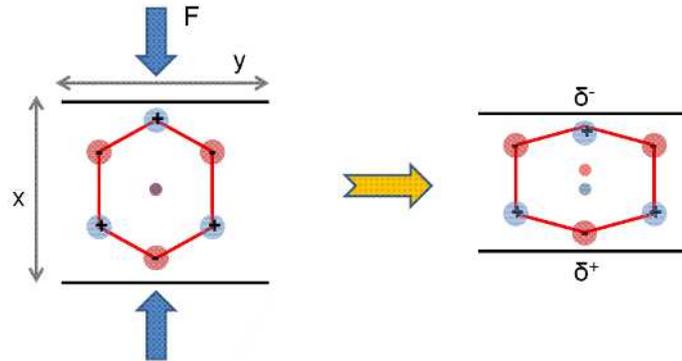


Abbildung 8: Piezoelektrischer Effekt

solches Piezoelement an, so werden die Ladungen durch diese verschoben (innere Polarisation). Das Material verformt sich. Dies wird inverser piezoelektrischer Effekt genannt.

## 0.11 Supraleitung

Als Supraleitung bezeichnet man das widerstandslose Fließen von Strom. Supraleiter sind Materialien, die unterhalb einer gewissen Sprungtemperatur keinen elektrischen Widerstand mehr besitzen. Unterhalb dieser Sprungtemperatur ist der supraleitende Zustand stabil, solange ein äußeres Magnetfeld nicht einen kritischen Wert überschreitet. Übersteigt durch Abkühlen die

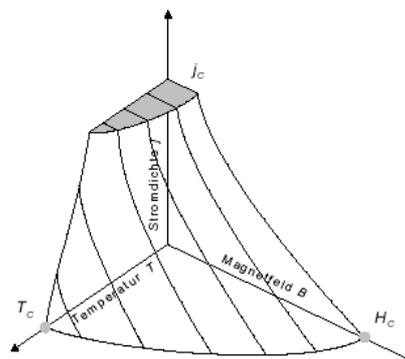


Abbildung 9: Kritische Grenzen eines supraleitenden Zustands

Anziehung zwischen den Elektronen im Kristallgitter und den Kernen die Kraft der thermische

Schwingung des Gitters, so wird das Gitter polarisiert. Die lokale Gitterpolarisation wirkt wie eine positive Ladung und es ist möglich, dass ein zweites Elektron angezogen wird. Es bildet sich ein sogenanntes Cooper-Paar aus zwei Elektronen mit antiparallelem Spin. Es ergibt sich so ein ganzzahliger Spin von Null. Das bedeutet wiederum, dass diese Cooper-Paare zu den Bosonen gehören und nicht dem Fermi-Prinzip unterliegen. Folglich besitzen sie den quantenmechanisch selben Energiezustand. Die Gesamtheit der Cooper-Paare lassen sich mit einer Wellenfunktion beschreiben.

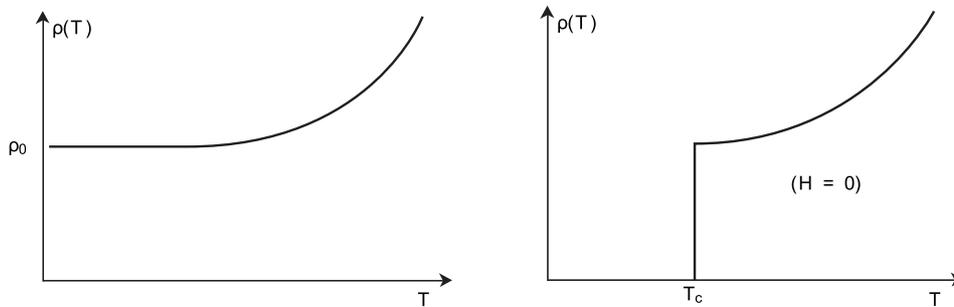


Abbildung 10: Normalleitendes Metall - Supraleitendes Metall

Da zur Bindung der Cooper-Paare ein Teil der kinetischen Energie in Bindungsenergie übergeht, befinden sich alle Paare in einem tieferen Energieniveau und können so nicht mit dem Gitter Wechselwirken. Damit ist eine widerstandslose Stromleitung gegeben. Durch das tiefere Energieniveau entsteht im Bändermodell daher um die Fermi-Energie eine Energielücke. Die Fermi-Energie gibt die Energie des höchsten besetzten Zustands eines Kristallgitters für  $T=0\text{K}$  an.

## 0.12 Wheatstone'sche Brückenschaltung

Die Wheatstone'sche Brückenschaltung dient dazu, einen unbekanntem Widerstand genau zu bestimmen. Dazu schaltet man den unbekanntem Widerstand  $R_x$  mit drei anderen, bekannten Widerständen, wie in der Schaltskizze dargestellt, zusammen. Dabei sind  $R_1$  und  $R_2$  die Widerstände des Potentiometers (Spannungsteiler).

Der Vorteil hier ist, dass man stromlos misst und somit keine Fehler aufgrund der Innenwiderstände der Messgeräte bekommt. Dieses Verfahren ist sehr genau, vorausgesetzt man hat ein Voltmeter, das noch sehr kleine Spannungen misst, da man sonst nur einen ungenauen Nullabgleich hinbekommt.

Es wird das Potentiometer so lange nachjustiert, wie noch eine Potentialdifferenz zu messen ist. Bei der Spannung von  $0\text{V}$  errechnet sich dann der unbekanntem Widerstand  $R_x$  durch:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x} \quad \Rightarrow \quad R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (1)$$

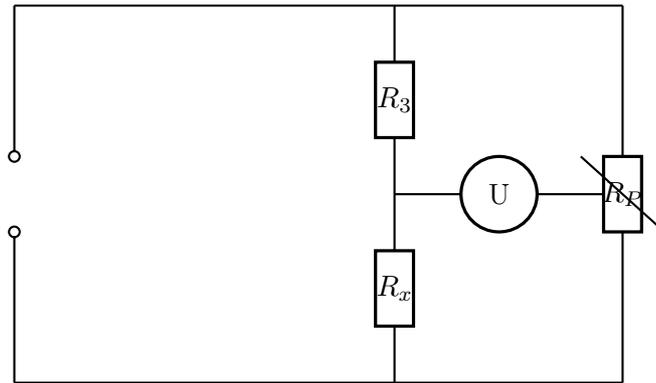


Abbildung 11: Wheatstone'sche Brückenschaltung

### 0.13 Vierleiterschaltung

Wenn bei einer Schaltung Leitungs- und Anschlusswiderstände die Messung verfälschen können, so wird mit der Vierleiterschaltung gemessen. Der Aufbau sieht wie folgt aus: Sie dient dazu

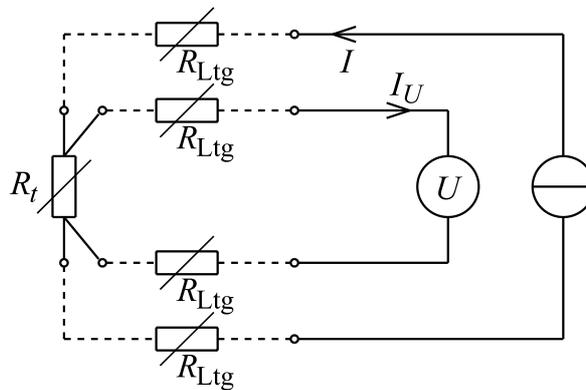


Abbildung 12: Vierleiterschaltung

elektrische Widerstände genau zu messen. Dabei fließt über zwei Leitungen ein bekannter Strom durch den Widerstand. Über zwei weitere Leitungen wird die über dem Widerstand abfallende Spannung (hochohmig) gemessen. Der Widerstand lässt sich so einfach über das ohmsche Gesetz bestimmen.

## 1 Temperaturabhängigkeit verschiedener Bauelemente

Es soll nun in der ersten Aufgabe der Widerstand von Heißleiterwiderstand NTC und Kaltleiterwiderstand PTC in Abhängigkeit der Temperatur mit Hilfe der Wheatstoneschen Brückenschaltung gemessen werden. Um die Erwärmung des Widerstands aufgrund des Messstroms gering zu halten, soll jeweils nur kurz gemessen werden.

Die Messwerte für den NTC werden beim Erwärmen des Ofens aufgenommen, die Messwerte für den PTC (PT100) werden beim abkühlen aufgenommen.

Es ist zu erwarten, dass der Widerstand des NTC bei hoher Temperatur einen Minimalwert erreicht, der PTC bei tiefer Temperatur.

Für den NTC Widerstand ist folgende Gesetzmäßigkeit zu überprüfen:

$$R(T) = a \cdot e^{\frac{b}{T}} \quad (2)$$

Durch logarithmische Auftragung können wir die Koeffizienten a und b einfach bestimmen.

$$\ln(R(T)) = \ln(a) + \frac{b}{T} \quad (3)$$

Ein Einsatzgebiet ist beispielsweise eine Lichterkette aus vielen in Serie geschalteter Glühlampen. Hier liegt parallel zu jeder Lampe ein NTC (Heißeiter). Im Normalfall fließt nur sehr wenig Strom durch den Widerstand und dieser bleibt kalt. Fällt eine Lampe aus, so fließt der komplette Strom durch diesen Widerstand und der Heißeiter erwärmt sich. Dadurch sinkt der Widerstand und somit auch die Spannung die an ihm abfällt. Dies hat zur Folge, dass die anderen Lampen fast normal weiter leuchten.

Beim Kaltwiderstand PT100 ist die folgende Gesetzmäßigkeit zu überprüfen:

$$R(T) = R_0 + c \cdot T \quad (4)$$

Durch direkte Auftragung des gemessenen Widerstands über der Temperatur können wir sowohl die Konstante c und  $R_0$  bestimmen. Beim PT100 entspricht  $R_0 = 100\Omega$  bei  $0^\circ\text{C}$ . Da dieser Widerstand einen linearen Zusammenhang zwischen R und T besitzt, eignet sich dieser besonders gut zur Temperaturmessung.

## 2 Kennlinien

Viele elektrische Schaltungen benötigen eine konstante Spannungsversorgung, damit diese zuverlässig arbeiten können. Zur Spannungsstabilisierung kann eine Zenerdiode verwendet werden. Dies kann wie folgt bewerkstelligt werden.

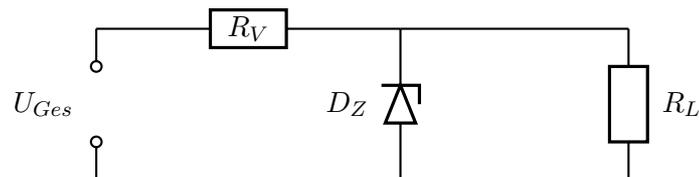


Abbildung 13: Zenerdiode zur Spannungsstabilisierung

Die Zener Diode ist parallel zum Lastwiderstand  $R_L$  eingebaut. Vor ihr befindet sich ein Vorwiderstand  $R_V$  und bildet mit diesem und mit der Spannungsquelle zusammen eine Reihenschaltung. Die Gleichspannungsquelle liegt höher als die benötigte Spannung am Verbraucher und kann auch nicht stabil sein.

Nun betreibt man die Z-Diode in Sperrichtung. Die Z-Diode schaltet in Sperrichtung durch,

sobald die an ihr anliegende Spannung groß genug ist. Sie besitzt im Durchbruchbereich einen sehr steilen Stromanstieg. Das heißt die Sperrspannung ist hier in einem großen Strombereich annähernd konstant; je steiler die Durchbruchkennlinie, umso besser ist die stabilisierende Wirkung. Der Arbeitspunkt der Z-Diode liegt also im Durchbruch der Sperrkennlinie.

Als Schutz gegen induzierte Spannungen (Überspannungen) an Induktivitäten kann ein spannungsabhängiger Widerstand verwendet werden. Ein solcher Widerstand wird Varistor oder VDR (Volt Dependent Resistor) genannt. Im Normalbetrieb ist der Widerstand sehr groß. Tritt hingegen eine zu große Spannung auf, welche ein Bauteil beschädigen könnte, so wird der spannungsabhängige Widerstandswert des Varistors ab einer für ihn spezifischen Schwellspannung sehr gering und die Ladung kann über ihn abgeleitet werden.

Ein Varistor wird demnach parallel zu einer zu schützenden Induktivität eingebaut. Da er aus vielen kleinen ungeordneten Halbleiterkristallen aufgebaut ist, zwischen denen sich die Sperrschichten ausbilden, hat er keine Vorzugsrichtung.

## 2.1 Aufnahme verschiedener Kennlinien

Im folgenden sind die Kennlinien verschiedener Bauelemente aufzunehmen:

- Silizium-Diode (SED)
- Germanium-Diode (GED)
- Zener-Diode (ZED)
- Varistor (VDR)
- Photodiode
- Photowiderstand
- verschiedene LED's

Zur Aufnahme der Kennlinien wird nun die Versuchsbox verwendet. Ihre Schaltung sieht wie folgt aus:

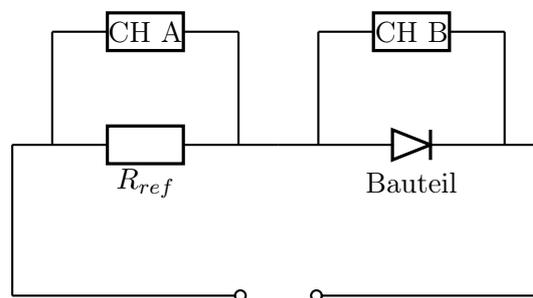


Abbildung 14: Kennlinienaufnahme

Als Eingangssignal der Schaltung wählen wir eine sinusförmige Wechselspannung der Frequenz  $\nu = 100\text{Hz}$ . Den Strom messen wir indirekt über den Spannungsabfall über dem vorgeschalteten Widerstand  $R_{ref} = 100\Omega$  also bei CH A. Die Spannung, welche am Bauteil abfällt wird direkt über diesem gemessen (CH B). Die beiden Spannungen werden zur Messung an die beiden Eingänge des USB Oszilloskops gelegt. Die Kennlinien können im XY-Betrieb angesehen werden.

In der Auswertung sollen die Auftauchenden charakteristischen Punkte näher gedeutet werden. Außerdem soll beim Photowiderstand aus der Steigung der Kennlinien der jeweilige Widerstandswert berechnet werden. Dies ist einfach abzulesen, da die Steigung hier gerade dem Widerstandswert entspricht.

## 2.2 Frequenzabhängigkeit obiger Bauelemente

Es soll qualitativ die Frequenzabhängigkeit der oben aufgeführten Bauelemente untersucht werden. Dabei werden wir die Kennlinien statt bei 100Hz bei 10kHz beobachten und vergleichen. Bei den Dioden ist zu erwarten, dass sich aufgrund der hohen Frequenz die Sperrschichten nicht mehr richtig auf- und abbauen können. Dadurch fällt der Strom beim Rückgang der Spannung nicht ganz auf Null.

## 3 Phototransistors bei verschiedenen Beleuchtungsstärken

Im folgenden soll das Verhalten eines Phototransistors unter Einfluss verschiedener Beleuchtungsstärken untersucht werden. Die Kennlinie ist wieder mit der eben verwendeten Schaltung aufzunehmen. Zur Beleuchtung dient eine Lampe. Es soll ausgehend von einer Lampenspannung von 1V die Kennlinien bei zunehmender Spannung beobachtet und aufgenommen werden. Der Zusammenhang zwischen Sperrstrom und Beleuchtungsstärke soll in der Auswertung graphisch dargestellt werden.

Um von Lampenstrom auf Beleuchtungsstärke schließen zu können, verwenden wir die Tabelle in der Vorbereitungsmappe.

## 4 Piezoelektrischen Effekt

Nun soll der piezoelektrische Effekt untersucht werden. Dazu werden zunächst wir zunächst manuell verschiedene Drücke auf das piezoelektrische Plättchen ausüben und uns dabei die Spannung am Oszilloskop anschauen. Anschließend beschallen wir den Piezokristall mit einem Lautsprecher. Am Oszilloskop erwarten wir ein zum Eingangssignal bis auf leichte Verschiebungen und Rauschen ähnliches Signal. Wir versuchen damit den direkten piezoelektrische Effekt zu beobachten.

Um den indirekten piezoelektrischen Effekt nachzuweisen, werden wir das Piezoelement als Lautsprecher verwenden. Dazu wird ein Frequenzgenerator an das Element angeschlossen. Durch die Spannungsänderungen werden Schwingungen im Material angeregt, welche als Töne wahrgenommen werden können.

## 5 Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters

Abschließend soll die Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters bestimmt werden. Dabei handelt es sich um einen Supraleiter, welcher eine höhere Sprungtemperatur aufweist. Dazu wird der Supraleiter mit flüssigem Stickstoff auf eine Temperatur von 77K in 5-10K Schritten abgekühlt. Dabei wird jeweils die dazugehörige Spannung bestimmt, welche am Widerstand abfällt. Wir verwenden die oben beschriebene Vierleiterschaltung. Der Grund dafür ist, dass der Supraleiter bei tiefen Temperaturen nahezu keinen Widerstand mehr besitzt. Wollen wir diesen jedoch bestimmen, so benötigen wir eine sehr genaue Messapparatur, welche durch eben diese Schaltung gegeben ist.

Die Stromstärke soll dabei konstant auf 2,5mA bleiben. Damit kann der Widerstand einfach berechnet werden. Tragen wir anschließend diesen über der Temperatur auf so erwarten wir einen einigermaßen linearen Abfall bis hin zur Sprungtemperatur; dort fällt der Widerstand schlagartig auf einen sehr geringen Wert ab.

## 6 Quellen

- Vorbereitungsmappe
- Abbildung 1: <http://de.wikipedia.org/wiki/B%C3%A4ndermodell>
- Abbildung 2+3: <http://de.wikipedia.org/wiki/Leitungsband>
- Abbildung 4+5: Eichler, Krohnfeldt, Sahn - Das neue Physikalische Grundpraktikum
- Abbildung 6: [http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/piezo/direkter\\_longitudinaler\\_piezoeffekt.GIF](http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/piezo/direkter_longitudinaler_piezoeffekt.GIF)
- Abbildung 8: [http://www.itp.physik.tu-berlin.de/~basti/download/02\\_Supraleitung.pdf](http://www.itp.physik.tu-berlin.de/~basti/download/02_Supraleitung.pdf)
- Abbildung 9+10: <http://www.ruetz-online.de/helge/helge@uni/fopra/Supraleitung.pdf>
- Abbildung 12: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/TempMess\\_4\\_Leit.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/TempMess_4_Leit.svg)

**Physikalisches Anfängerpraktikum - P2**

**Eigenschaften elektrischer Bauelemente**  
**P2-50**

Auswertung von  
**Tobias Renz** und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 5. Juli 2012

# 1 Temperaturabhängigkeit des Widerstands verschiedener Bauelemente

Im ersten Versuchsteil haben wir die  $R(T)$  Abhängigkeit eines Heißeiterwiderstands NTC und eines Kaltleiterwiderstands PT100 mit Hilfe einer Wheatstoneschen Brückenschaltung gemessen. Diese Widerstände waren fest in einem Ofen verbaut, dessen Heizleistung man variieren kann und die Temperatur mit Hilfe eines eingebauten NiCr-Ni-Thermoelement und passendem Messinstrument misst.

Die Schaltung haben wir wie auf dem Aufgabenblatt skizziert aufgebaut und zunächst den NTC-Widerstand angeschlossen. Für diesen Widerstand haben wir einen Referenzwiderstand  $R_{ref} = 1,2k\Omega$  verwendet. Dies wird später bei der Berechnung noch wichtig. Die Temperatur des Ofens und damit des Widerstandes haben wir nun langsam erhöht und jeweils in Schritten von  $\Delta T = 0,5K$  eine Messung durchgeführt. Dazu haben wir den Taster gedrückt und den Potentiometer so eingestellt, dass die Spannung den Wert null hatte. Den Widerstand am Potentiometer  $R_1$  haben wir dann abgelesen und notiert. Die Temperatur wurde in den besagten Schritten auf  $200^\circ C$  erhöht und der Ofen dann abgeschaltet. Nun haben wir den PT100-Widerstand angeschlossen und den Referenzwiderstand getauscht. Da dieser Widerstand eine Größe im Bereich des PT100-Widerstandes haben soll haben wir einen  $100\Omega$  Widerstand eingesetzt, da der PT100-Widerstand bei  $0^\circ C$  einen Widerstand von  $100\Omega$  hat. Da der Ofen nun abgeschaltet war, ist die Temperatur langsam gesunken und wir haben wieder in  $5K$  Schritten einen Messwert aufgenommen.

Wir haben nun aber den Widerstand  $R_1$  am Potentiometer gemessen und nicht direkt den Widerstand des untersuchten Widerstandes. Da der Referenzwiderstand  $R_{ref}$  und der Widerstand  $R_1$  und somit auch der zweite Widerstand  $R_2$  am Potentiometer bekannt sind, kann der gesuchte Widerstand  $R$  wie folgt berechnet werden:

$$R = R_{ref} \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

Da der Potentiometer einen maximalen Wert von  $10k\Omega$  hat kann der Widerstand  $R_2$  leicht berechnet werden:

$$R_2 = 10k\Omega - R_1 \quad (2)$$

Damit ergibt sich der gesuchte Widerstand zu:

$$R = R_{ref} \cdot \frac{R_1}{10k\Omega - R_1} \quad (3)$$

Hierbei ist noch zu beachten, dass bei den jeweiligen Widerständen ein anderer Referenzwiderstand verwendet wurde. Bei NTC ist  $R_{ref} = 1,2k\Omega$  und bei PT100 ist  $R_{ref} = 100\Omega$ .

Nun können unsere Messwerte und der mit (3) berechnete Widerstand  $R$  angegeben werden.

NTC - Widerstand					PTC - Widerstand				
T / °C	T / K	R <sub>1</sub> / Ω	R / Ω	ln(R/Ω) / 1	T / °C	T / K	R <sub>1</sub> / Ω	R / Ω	
31	304	5620	1539,73	7,34	200	473	6070	154,45	
35	308	5310	1358,64	7,21	195	468	6050	153,16	
40	313	5140	1269,14	7,15	190	463	6030	151,89	
45	318	4920	1162,20	7,06	185	458	6010	150,63	
50	323	4675	1053,52	6,96	180	453	6000	150,00	
55	328	4430	954,40	6,86	175	448	5970	148,14	
60	333	4230	879,72	6,78	170	443	5950	146,91	
65	338	4000	800,00	6,68	165	438	5950	146,91	
70	343	3720	710,83	6,57	160	433	5950	146,91	
75	348	3440	629,27	6,44	155	428	5940	146,31	
80	353	3220	569,91	6,35	150	423	5910	144,50	
85	358	3020	519,20	6,25	145	418	5880	142,72	
90	363	2820	471,31	6,16	140	413	5860	141,55	
95	368	2640	430,43	6,06	135	408	5840	140,38	
100	373	2450	389,40	5,96	130	403	5790	137,53	
105	378	2320	362,50	5,89	125	398	5765	136,13	
110	383	2160	330,61	5,80	120	393	5740	134,74	
115	388	1960	292,54	5,68	115	388	5710	133,10	
120	393	1966	293,65	5,68	110	383	5680	131,48	
135	408	1070	143,78	4,97	105	378	5650	129,89	
140	413	1060	142,28	4,96	100	373	5630	128,83	
145	418	970	128,90	4,86	95	368	5600	127,27	
150	423	840	110,04	4,70	90	363	5580	126,24	
160	433	710	91,71	4,52	85	358	5550	124,72	
165	438	680	87,55	4,47	80	353	5520	123,21	
170	443	540	68,50	4,23	75	348	5485	121,48	
175	448	470	59,18	4,08	70	343	5460	120,26	
180	453	420	52,61	3,96	65	338	5440	119,30	
185	458	380	47,40	3,86	60	333	5400	117,39	
190	463	350	43,52	3,77	55	328	5360	115,52	
195	468	320	39,67	3,68	50	323	5330	114,13	
200	473	290	35,84	3,58	45	318	5310	113,22	
					40	313	5280	111,86	

Tabelle 1: Messwerte zu Aufgabe 1

Für den NTC Widerstand soll nun folgende Gesetzmäßigkeit überprüft werden:

$$R(T) = a \cdot e^{\frac{b}{T}} \quad (4)$$

Um die Konstanten a und b zu bestimmen, tragen wir den Widerstand logarithmisch über  $\frac{1}{T}$

auf.

$$\ln(R) = \ln(a) + \frac{b}{T} \quad (5)$$

Es sollte somit eine Gerade ergeben und aus der Steigung  $m$  der Geraden kann  $b$  bestimmt werden und der Achsenabschnitt entspricht  $\ln(a)$ . Mit Hilfe von Origin haben wir nun  $\ln(R)$  über  $\frac{1}{T}$  aufgetragen und eine Regressionsgerade bestimmt.

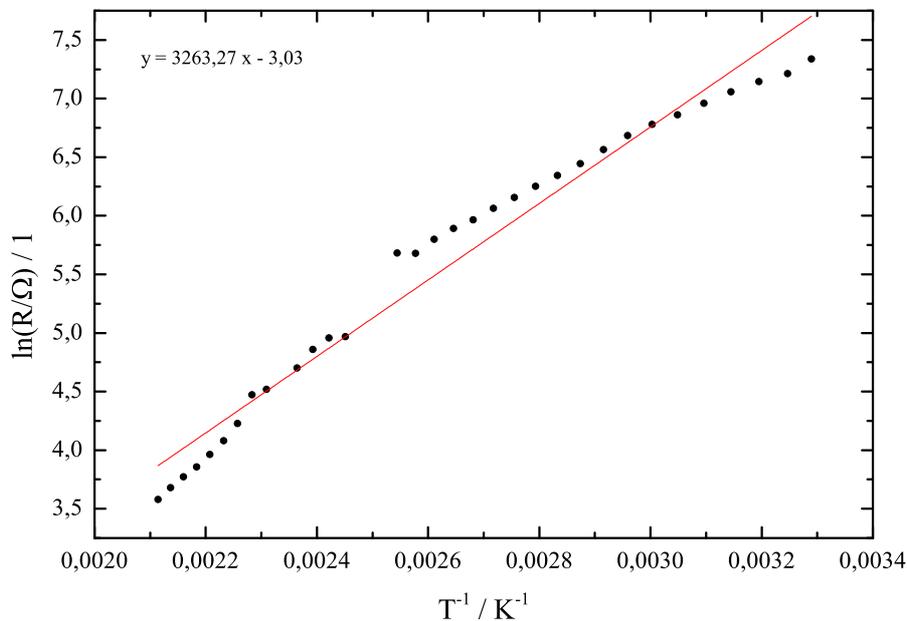


Abbildung 1: Temperaturabhängigkeit des NTC-Widerstands

Die Messwerte liegen leider nicht wirklich auf einer Geraden, wir bestimmen die Koeffizienten  $a$  und  $b$  trotzdem.

Die Regressionsgerade ergibt sich zu:

$$y = 3263,27x - 3,03 \quad (6)$$

Damit kann nun die Konstante  $a$  berechnet werden und  $b$  direkt abgelesen werden zu:

$$\begin{aligned} a &= e^{-3,03} = 0,048\Omega \\ b &= 3263,27K \end{aligned} \quad (7)$$

Man sieht, dass der NTC Widerstand mit steigender Temperatur abnimmt und gegen den Grenzwert  $a = 0,048\Omega$  geht. Dies ist die erwartete Abhängigkeit eines Heißleiterwiderstands.

Für den Kaltleiterwiderstand PT100 soll folgende Gesetzmäßigkeit überprüft werden:

$$R(T) = R_0 + c \cdot T \quad (8)$$

Um diese Gesetzmäßigkeit zu überprüfen tragen wir den Widerstand  $R$  über der Temperatur auf und bestimmen die Regressionsgerade.

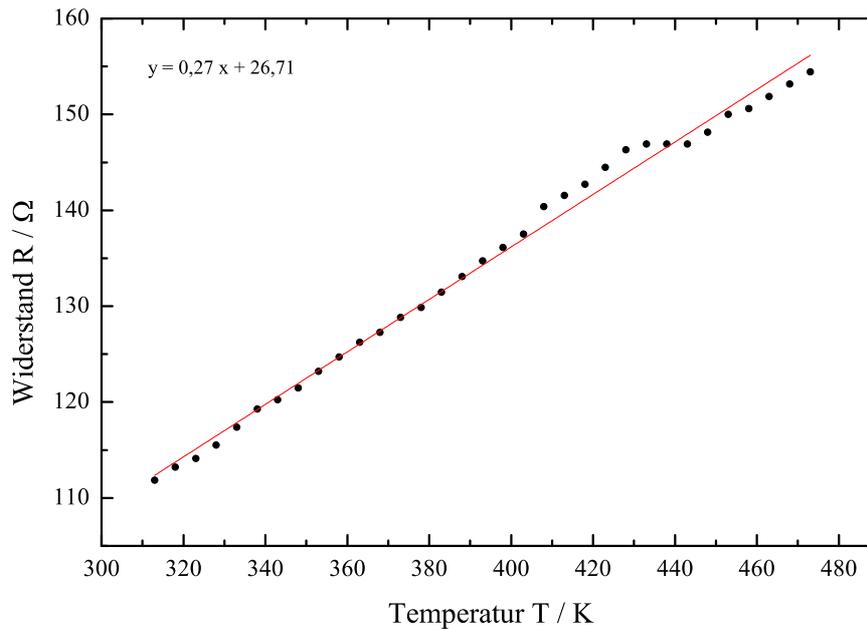


Abbildung 2: Temperaturabhängigkeit des PT100-Widerstands

Bei dieser Messreihe liegen die Messwerte fast alle auf einer folgenden Geraden:

$$y = 0,27x + 26,71 \quad (9)$$

Damit ergeben sich die Koeffizienten  $R_0$  und  $c$  sofort, und die  $R(T)$  Abhängigkeit ergibt sich zu:

$$R(T) = 26,71\Omega + 0,27 \frac{\Omega}{K} \cdot T \quad (10)$$

Bei  $T = 0^\circ\text{C} = 273\text{K}$  sollte man einen Widerstand von  $100\Omega$  erhalten.

Wir erhalten:

$$R(T = 0^\circ\text{C}) = 0,27 \cdot 273 \frac{\Omega}{K} + 26,71\Omega = 100,42\Omega \quad (11)$$

Die von uns bestimmte Abhängigkeit stimmt somit für  $T = 0^\circ\text{C}$  sehr gut mit dem Literaturwert überein und weicht nur um  $0,42\%$  davon ab.

Zum Schluss dieser Aufgabe sollten noch Einsatzgebiete des NTC- bzw. PT100- Widerstands genannt werden.

Der NTC-Widerstand wird z.B in Lichterketten verwendet und der PT100-Widerstand für Temperaturmessungen. Diese Anwendungen wurden schon in der Vorbereitung genannt und dort erläutert.

## 2 Kennlinien

Im nächsten Versuchsteil haben wir die Kennlinien einiger elektrischer Bauteile aufgenommen. Dazu haben wir die Bauelemente nacheinander in Schaltung 2 (Abbildung 14 in der Vorbereitung) eingebaut und die Kennlinien im XY-Betrieb am PicoScope betrachtet.

Dabei wurde die über dem Referenzwiderstand abfallende Spannung an CH 1, die über dem Bauteil abfallende Spannung an CH 2 angelegt. Somit lässt sich mit dem über dem Referenzwiderstand  $R_{ref} = 100\Omega$  abgefallenen Spannung leicht der Gesamtstrom durch die Schaltung bestimmen.

### 2.1 Aufnahme verschiedener Kennlinien

Durch Anlegen einer Tangente an die SSStrom-Spannungs-Flanken haben wir den Schnittpunkt mit der x-Achse bestimmt. Dieser Wert wurde bei jeder Kennlinie als die zugehörige Knick- bzw Durchbruchspannung interpretiert.

Der Frequenzgenerator erzeugte eine Frequenz von 100Hz.

#### Silizium-Diode

Im folgenden ist die von uns aufgenommene Si-Dioden Kennlinie abgebildet. Bis auf dass der Sperrbereich fehlt, entspricht sie dem erwarteten Verlauf. Das Fehlen ist darin zu begründen, dass wir betragsmäßig zu geringe negative Spannungen hatten.

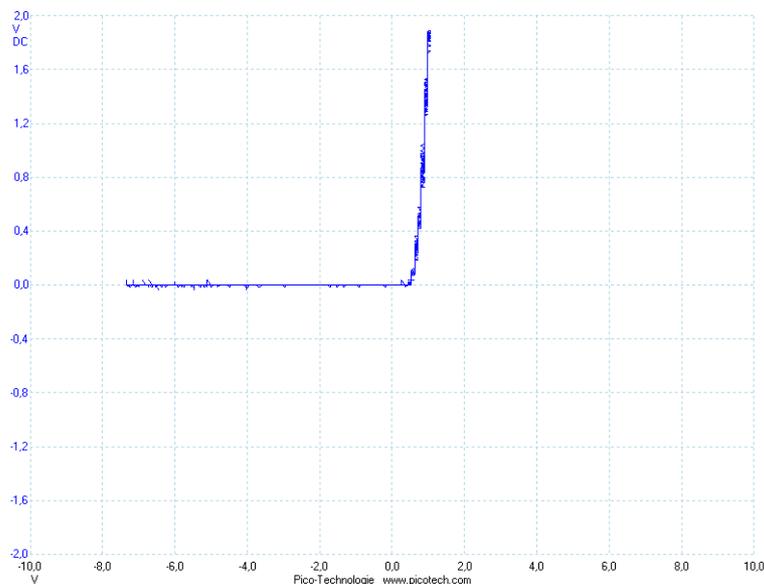


Abbildung 3: Si-Diode

Wir erhielten hier eine Knickspannung von:  $U_{knick} = 673,0mV$ . Der Richtwert für Si-Dioden liegt bei  $U = 700mV$ .

### Germanium Diode

Die Kennlinie der Ge-Diode war wie erwartet sehr ähnlich zu jener der Si-Diode. Man erkennt hier jedoch den nicht ganz so steilen Anstieg des Stroms im Durchlassbereich.

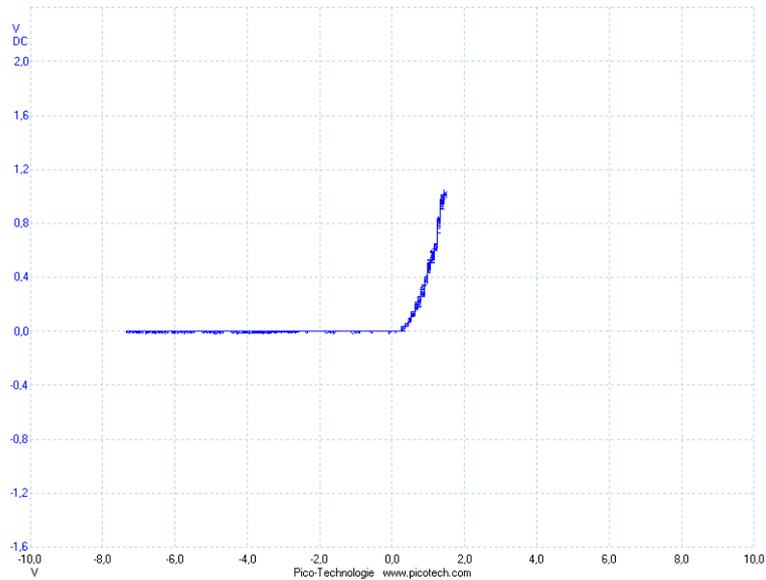


Abbildung 4: Ge-Diode

Die Knickspannung haben wir hier bei:  $U_{knick} = 576,0mV$  gefunden.

### Zener-Diode

Als drittes Bauteil wurde die Zener-Diode verwendet. Diese entsprach unseren Erwartungen.

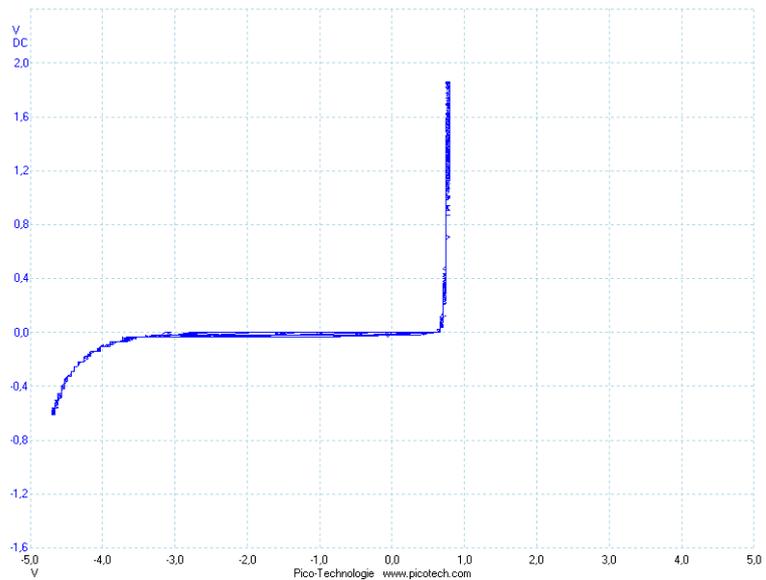


Abbildung 5: Z-Diode

Wir haben hier zusätzlich noch die Zenerspannung bestimmt. Das heißt die Spannung im Sperrbereich, ab der die Diode auch in Sperrichtung Strom durchlässt.

Die Knickspannung war bei:  $U_{knick} = 728,0mV$ . Im Wesentlichen ist die Zener-Diode eine besonders dotierte Silizium-Diode. Daher ist die Knickspannung recht ähnlich und die charakteristische steile Linie im Durchlassbereich bleibt erhalten.

Die Zenerspannung liegt bei  $U_{zener} = -4,278V$ . Wie erwartet liegt dieser Wert in einem messbaren Bereich, der um 5V.

### Varistor

Die Kennlinie des Varistors ist antisymmetrisch zur Stromachse. Das bedeutet unter anderem, dass es egal ist in welcher Richtung man ihn Einbaut. Zusätzlich zu den Hauptflanken haben sich jedoch auch Nebenflanken ausgebildet.

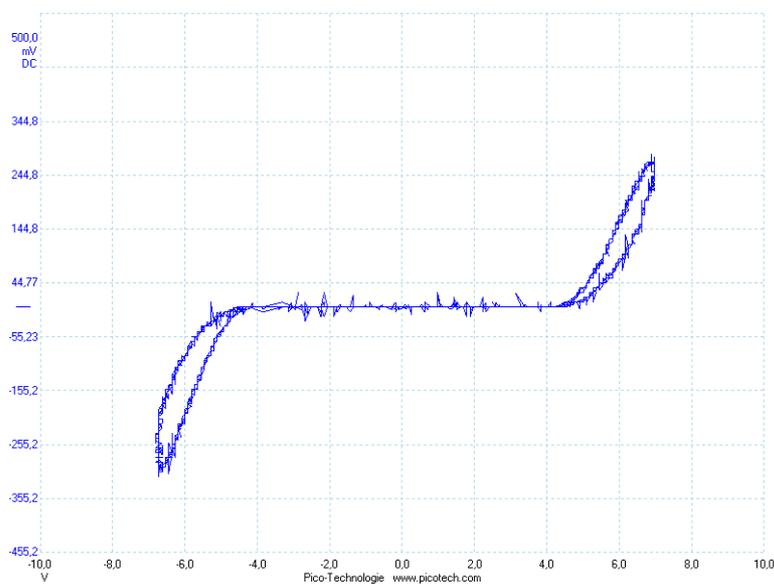


Abbildung 6: Varistor

Diese können wir durch die Trägheit des Materials erklären. Das heißt, dass obwohl die verwendete Frequenz mit  $\nu = 100Hz$  recht gering war, kann der Varistor dem Wechselfeld nicht mehr schnell genug folgen.

### Photo-Diode

Nun haben wir die Photo-Diode untersucht. Sie hat die Eigenschaft, dass sie einen vom Licht abhängigen Widerstandswert besitzt.

Zunächst haben wir die Kennlinie der Photo-Diode bei den Lichtverhältnissen im Raum aufgenommen. Dabei haben wir die folgende Kennlinie erhalten.

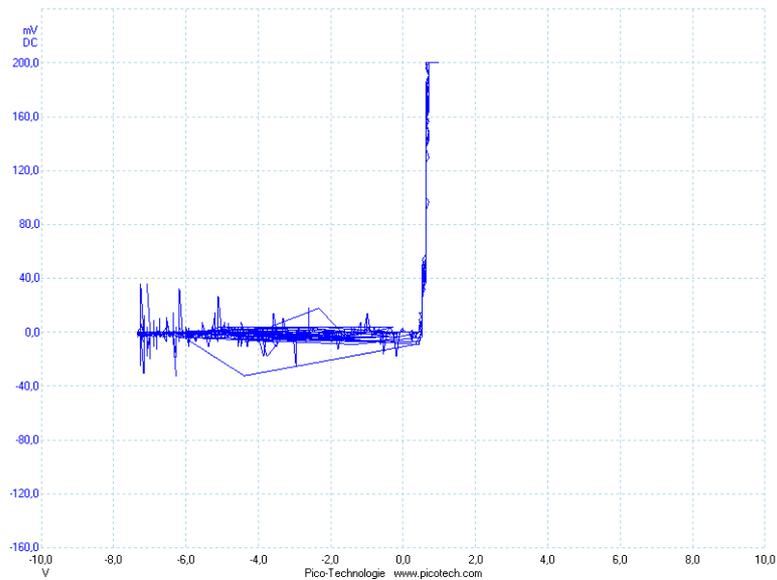


Abbildung 7: Photodiode bei Raumlicht

Vergleicht man diese Kennlinie mit der bei starker Beleuchtung so kann man erkennen, dass sich die gesamte Kennlinie nach unten verschiebt. Dies ist im inneren photoelektrischen Effekt zu erklären (vgl. Vorbereitung). Da nun Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband überführt werden, kann nun auch ein Strom in Sperrrichtung fließen.

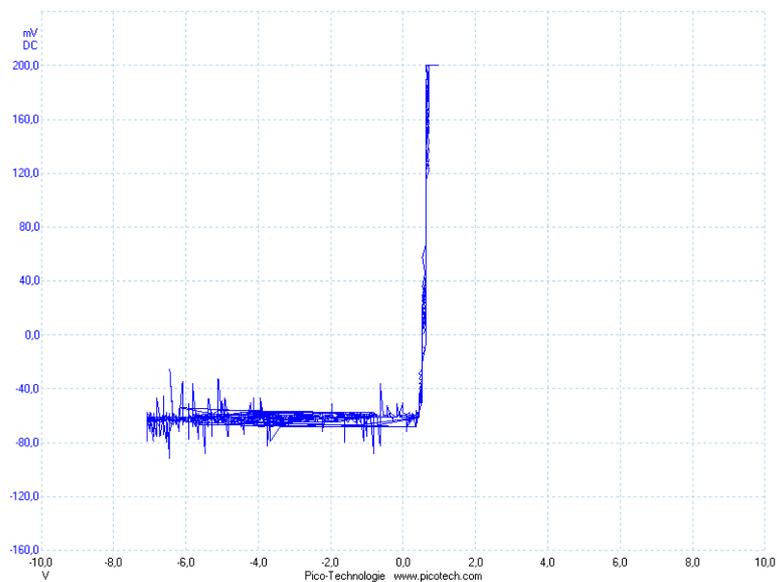


Abbildung 8: Photodiode bei starker Beleuchtung

### Photowiderstand

Als nächstes haben wir den Photowiderstand untersucht. Auch dieser ist abhängig von der Beleuchtung, was wir im folgenden sehen können. Wir haben wie erwartet einen linearen Zu-

sammenhang festgestellt. Zunächst wurde die Kennlinie bei Abdunklung gemessen.

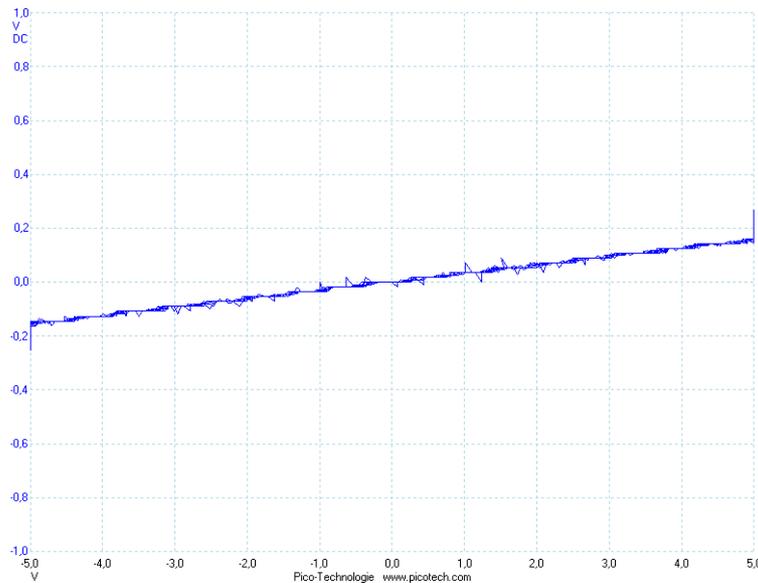


Abbildung 9: Photowiderstand im Dunkeln

Um den Widerstand zu berechnen betrachten wir uns zunächst die Spannung in y-Richtung. Dies ist die Spannung, welche am Referenzwiderstand  $R_{ref} = 100\Omega$  abfällt. So ergibt sich für den Strom, welcher durch die Schaltung fließt:

$$I = \frac{U_y}{R_{ref}} = \frac{0,03V}{100\Omega} = 0,003A \quad (12)$$

Am Photowiderstand fällt die Spannung  $U_x = 10V$  ab. Damit erhalten wir den Photowiderstand bei abgedunkelten Verhältnissen.

$$R_{photo}^{dunkel} = \frac{U_y}{I} = \frac{10V}{0,003A} = 3333,34\Omega \quad (13)$$

Betrachten wir uns die Kennlinie ohne zusätzliche Beleuchtung so sehen wir, dass die Steigung abnimmt.

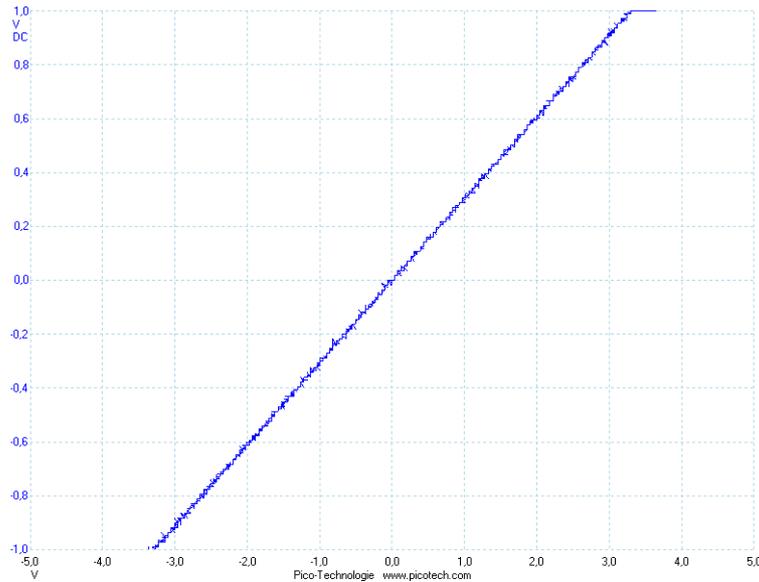


Abbildung 10: Photowiderstand im Raum

Es ergibt sich für den Strom der durch die Schaltung fließt:

$$I = \frac{U_y}{R_{ref}} = \frac{1,2V}{100\Omega} = 0,012A \quad (14)$$

Am Photowiderstand fällt die Spannung  $U_x = 4V$  ab. Damit erhalten wir den Photowiderstand bei Aussetzung der Raumbelichtung:

$$R_{photo}^{raum} = \frac{U_y}{I} = \frac{4V}{0,012A} = 333,34\Omega \quad (15)$$

Als letzten haben wir den Photowiderstand noch mit einer Lampe beleuchtet. Die Kennlinie weist hier eine noch größere Steigung auf.

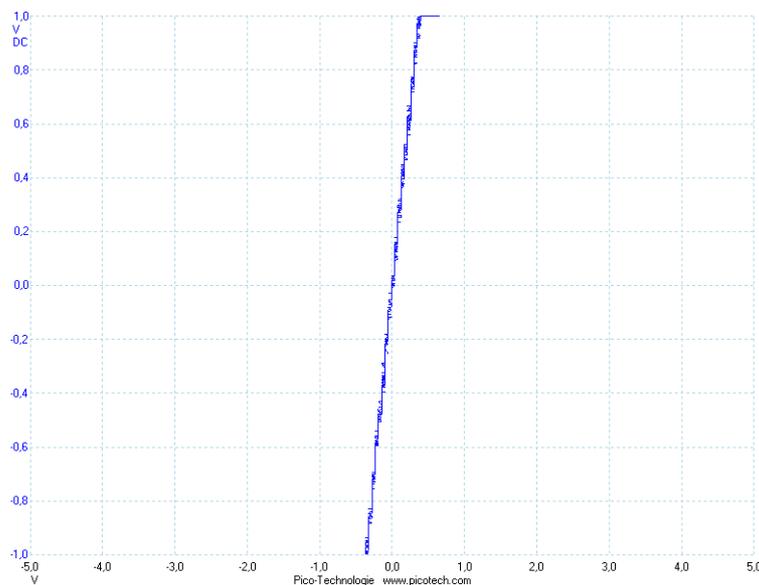


Abbildung 11: Photowiderstand mit Beleuchtung

$$I = \frac{U_y}{R_{ref}} = \frac{2V}{100\Omega} = 0,02A \quad (16)$$

Am Photowiderstand fällt die Spannung  $U_x = 0,71V$  ab. Damit erhalten wir den Photowiderstand bei abgedunkelten Verhältnissen.

$$R_{photo}^{hell} = \frac{U_y}{I} = \frac{0,71V}{0,02A} = 35,5\Omega \quad (17)$$

Somit ist gezeigt, dass der Widerstand mit steigender Beleuchtungsstärke abnimmt.

### 2.1.1 LED's

Anschließend haben wir die Kennlinien von vier LED's bestimmt. Zunächst die grüne LED:

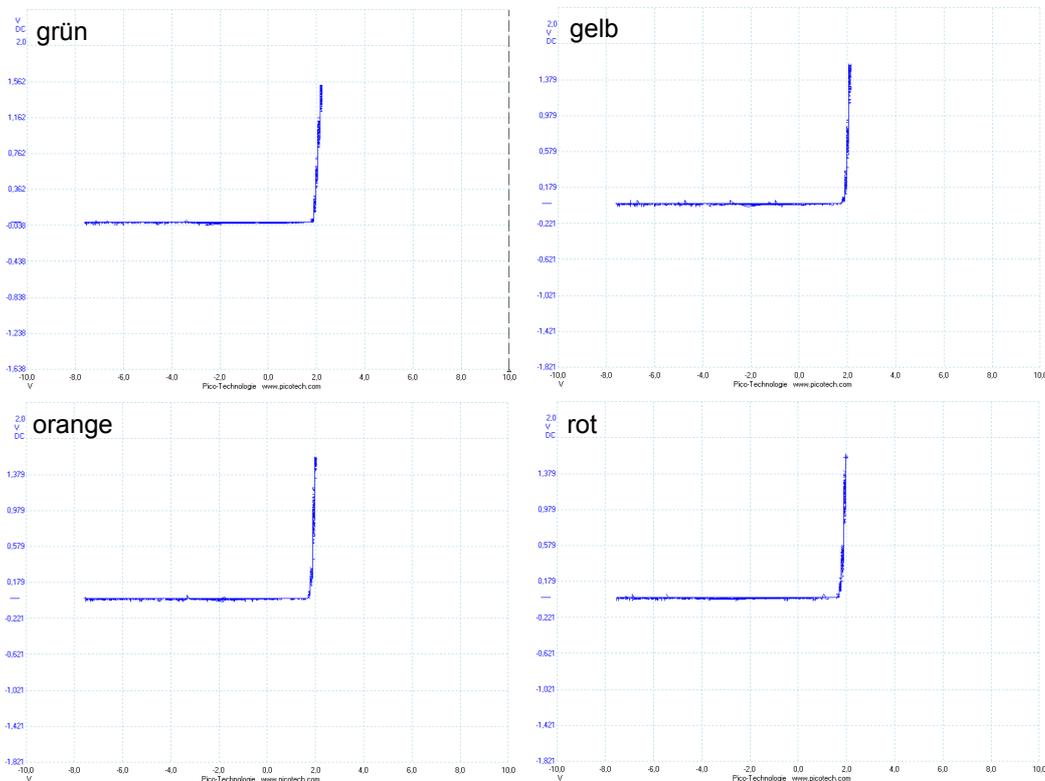


Abbildung 12: Kennlinien der LED's

Die Knickspannungen wurden analog zur Methode von oben bestimmt. Es ergaben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} U_{knick}^{grn} &= 1,945V \\ U_{knick}^{gelb} &= 1,940V \\ U_{knick}^{orange} &= 1,849V \\ U_{knick}^{rot} &= 1,823V \end{aligned} \quad (18)$$

Man erkennt, dass die Kennlinien der LED's sehr ähnlich sind. Es ist zu erkennen, dass die Schwellspannung mit abnehmender Wellenlänge des emittierten Lichts leicht zunimmt.

Dies lässt sich folgendermaßen erklären. Eine LED entspricht einem pn-Übergang, wie bei einer Diode, der Unterschied liegt im verwendeten Halbleitermaterial.

Diese Materialien zeichnen sich dadurch aus, dass Elektronen auf direktem Weg vom Leitungsband ins Valenzband wechseln können und somit Energie für die Lichterzeugung frei wird.

Legt man nun eine Spannung in Durchlassrichtung an, so wird die Energie der Elektronen erhöht und sie bevölkern das Leitungsband auf der n-Seite. Nach Überschreiten der Grenzfläche fallen sie dann auf das Valenzband der p-Seite zurück und rekombinieren dort mit den Löchern. Die Größe der Bandlücke bestimmt also die Wellenlänge des emittierten Lichts.

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_{Band}} = \frac{1240nm \cdot eV}{E_{Band}} \quad (19)$$

Die Knickspannung ist abhängig von der Bandlücke, das heißt je größer die Bandlücke, desto größer ist auch die Knickspannung.

Nehmen wir einmal an, dass die Knickspannung (in eV) gleich der Energie der Bandlücke ist, erhalten wir folgende Wellenlängen. Diese Wellenlängen vergleichen wir mit den Literaturwerten für die Wellenlänge dieser Farbe.

$$\begin{aligned} \lambda_{knick}^{grn} &= 637,5nm & \lambda_{lit}^{grn} &= (490 - 575)nm \\ \lambda_{knick}^{gelb} &= 639,2nm & \lambda_{lit}^{gelb} &= (575 - 585)nm \\ \lambda_{knick}^{orange} &= 670,6nm & \lambda_{lit}^{orange} &= (585 - 650)nm \\ \lambda_{knick}^{rot} &= 680,2nm & \lambda_{lit}^{rot} &= (650 - 750)nm \end{aligned} \quad (20)$$

Man sieht, dass die Wellenlängen, die aus den Knickspannungen im Bereich der Literaturwerte liegen, aber meistens etwas höher. Daraus kann man schließen, dass die Knickspannung nicht genau der Bandlücke entspricht, aber in der selben Größenordnung liegt. Was man aber sieht, dass die Wellenlänge umgekehrt proportional zur Knickspannung ist und daher kann man sagen, dass die Wellenlänge mit steigender Knickspannung des emittierten Lichts abnimmt.

### 3 Phototransistor bei verschiedenen Beleuchtungsstärken

Um den Sperrstrom des Phototransistors in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke zu bestimmen, haben wir die Schaltung von Aufgabe 2 aufgebaut gelassen und den Phototransistor als Bauteil in der Schaltskizze angeschlossen. Damit erhalten wir die Kennlinie für den Phototransistor und können daraus mit Hilfe von PicoScope den Sperrstrom messen. Zunächst haben wir eine Spannung gemessen, die wir dann über das Ohmsche Gesetz in einen Strom umrechnen können. Als Referenzwiderstand haben wir einen 100Ω Widerstand verwendet.

Die Spannung der Lampe haben wir in 0,5V Schritten von 0,5V bis 12,5V erhöht und dabei jedes mal den Sperrstrom gemessen. Die Lampenspannung kann mit der angegebenen Tabelle in die Beleuchtungsstärke umgerechnet werden.

Im folgenden sind nun unsere Messwerte sowie die Beleuchtungsstärke ( $E_V$ ) und der Sperrstrom  $I$  aufgetragen.

Lampenspannung / V	$E_V$ / lx	"Sperrstrom"/mV	Sperrstrom /mA
0,5	0	-0,9	-0,009
1,0	0	-1,0	-0,01
1,5	0	-1,2	-0,012
2,0	2	-1,6	-0,016
2,5	7	-3,2	-0,032
3,0	22	-5,6	-0,056
3,5	45	-9,7	-0,097
4,0	84	-14,4	-0,144
4,5	148	-20,9	-0,209
5,0	258	-29,2	-0,292
5,5	381	-39,1	-0,391
6,0	560	-51,6	-0,516
6,5	876	-66,3	-0,663
7,0	1177	-80,5	-0,805
7,5	1566	-95,1	-0,951
8,0	2010	-113,4	-1,134
8,5	2545	-134,4	-1,344
9,0	3184	-156,7	-1,567
9,5	3905	-175,5	-1,755
10,0	4695	-204,0	-2,04
10,5	5695	-228,0	-2,28
11,0	6710	-261,0	-2,61
11,5	7730	-284,0	-2,84
12,0	9155	-321,0	-3,21
12,5	10365	-346,0	-3,46

Tabelle 2: Sperrstrom in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke

Man sieht, dass der Betrag des Sperrstroms mit zunehmender Beleuchtungsstärke zunimmt. Das der Sperrstrom negativ ist, ist definitionssache.

Tragen wir nun (-I) über der Beleuchtungsstärke  $E_V$  auf erhalten wir folgendes Schaubild. Wie erwartet steigt der Strom mit zunehmender Beleuchtungsstärke. Dies liegt daran, dass durch den inneren photoelektrischen Effekt Elektronen herausgelöst werden und somit in Sperrichtung

ein Strom fließen kann.

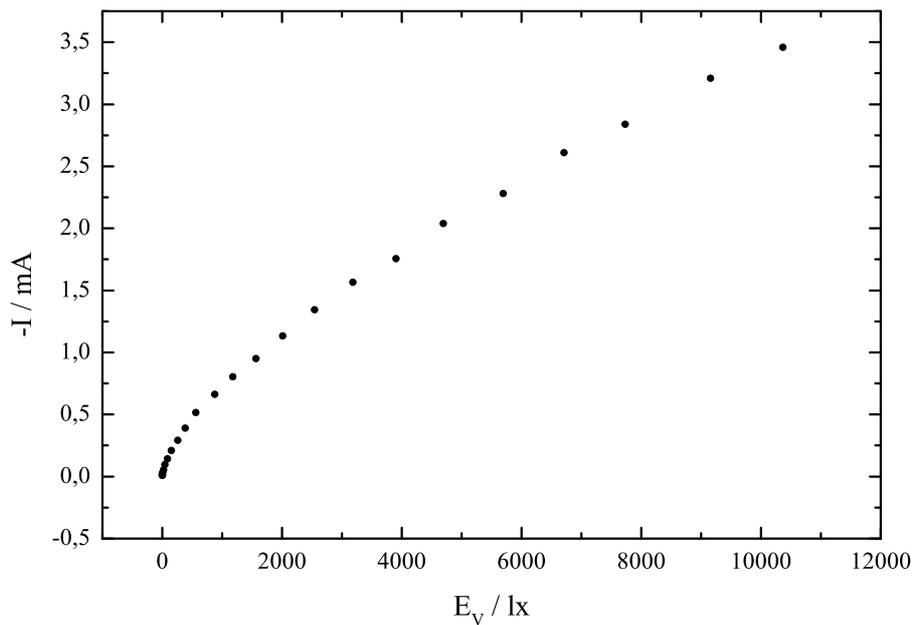


Abbildung 13: Sperrstrom in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke

## 4 Piezoelektrischer Effekt

Bei dieser Aufgabe sollte der Piezoelektrische Effekt am Piezoelement untersucht werden.

Dazu haben wir das Piezoelement direkt an den Eingang des picoScope angeschlossen, um somit die Spannung, die durch Druck auf das Piezoelement entsteht, anschauen zu können.

Zunächst haben wir mit dem Finger manuell Druck auf das Piezoelement ausgeübt. Durch unterschiedliche Klopffolgen konnten verschiedene Spannungsabfolgen am Oszilloskop sichtbar gemacht werden. Dabei konnte man sehen, dass das Piezoelement auf Druckunterschiede reagierte. Drückte man auf das Element entstand ein negativer Spannungsaussschlag, beim Anheben des Fingers entstand ein positiver Ausschlag.

Im folgenden ist nun ein Spannungsverlauf einer Klopffolge dargestellt.

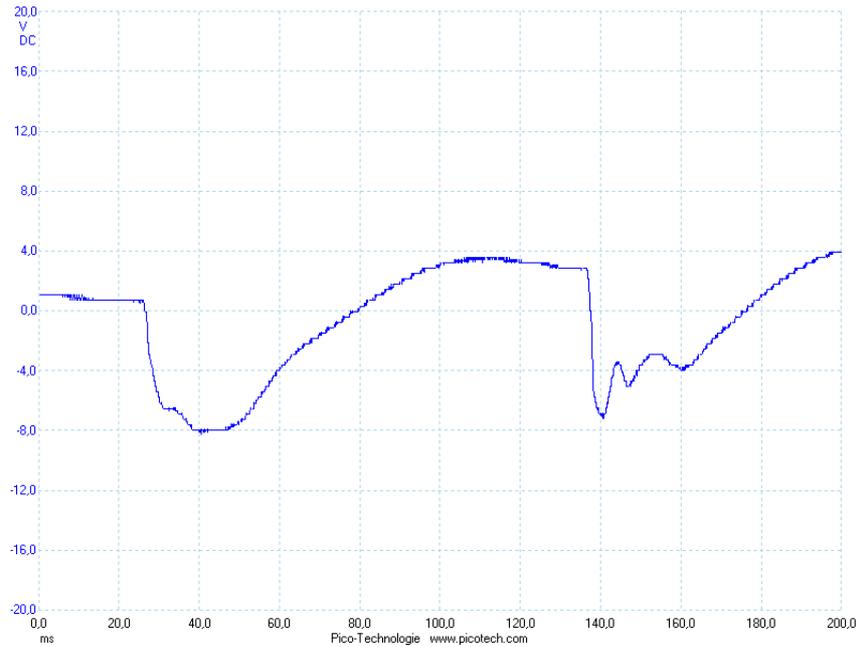


Abbildung 14: Spannungserzeugung mittels eines Piezoelements

Erstaunlich war, dass schon durch schwaches Drücken auf das Piezoelement eine recht große Spannung bis 20V entstehen kann.

Nun sollte mit dem Piezoelement ein Frequenzsignal sichtbar gemacht werden. Dazu haben wir an einen Lautsprecher eine Spannung mit einer Frequenz von 1,6kHz angeschlossen und den Lautsprecher direkt auf das Piezoelement gelegt. Durch die Schallwellen wird ein periodischer Druck auf das Piezoelement ausgeübt. Durch das Piezoelement wird die Schwingung nun wieder in eine Spannung umgewandelt und man kann am Oszilloskop die an den Lautsprecher angelegte Sinusspannung sehen.

Im folgenden ist der durch das Piezoelement erzeugte Spannungsverlauf dargestellt.

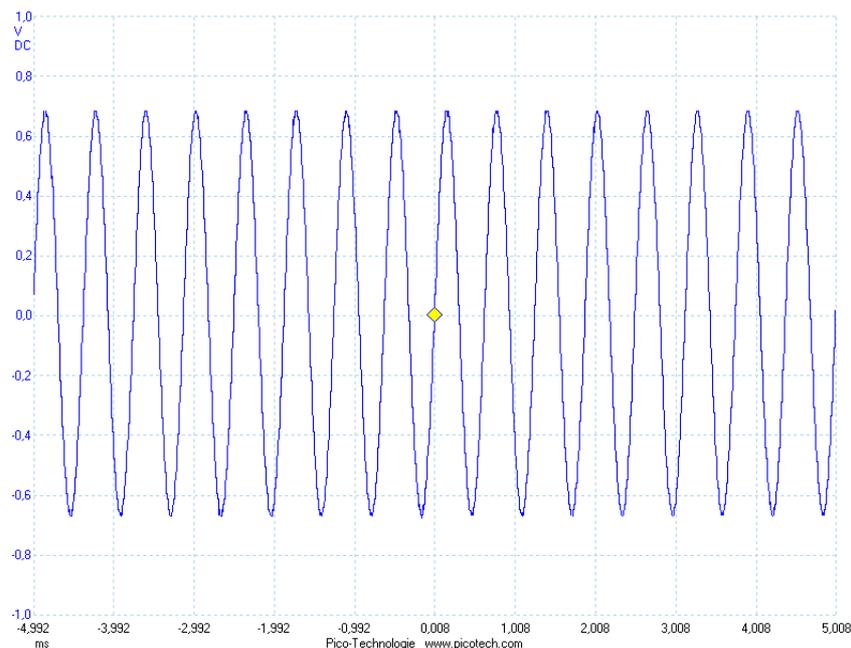


Abbildung 15: Frequenzsignal mit dem Piezoelement

Um zu überprüfen, dass dieses Signal mit dem am Lautsprecher angelegten Signal übereinstimmt, berechnen wir noch die Frequenz dieser Sinusschwingung.

Im Schaubild sieht man, dass bei  $t_1 = -1,992\text{ms}$  und  $t_2 = 3,008\text{ms}$  gerade ein Minimum ist, und deshalb nutzen wir diese beiden Punkte zur Berechnung der Frequenz. Zwischen  $t_1$  und  $t_2$  liegen gerade 8 Schwingungen, so dass sich die Frequenz  $\nu$  zu folgendem Wert ergibt:

$$\nu = \left(\frac{t_2 - t_1}{8}\right)^{-1} = 1,6\text{kHz} \quad (21)$$

Man sieht also, dass die Spannung genau der an den Lautsprecher angelegten Spannung entspricht, so wie es erwartet war.

Zum Schluss haben wir nun an das Piezoelement eine Sinusspannung angelegt. Dadurch wird das Piezoelement zu Schwingungen angeregt und sollte wie ein Lautsprecher nun Schallwellen erzeugen.

Das Piezoelement fungierte wie erwartet wie ein Lautsprecher und erzeugte Schallwellen mit den eingestellten Frequenzen. Der Ton war gut zu erkennen, nur nicht sonderlich laut.

## 5 Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters

Die letzte Aufgabe dieses Versuchs war die Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters zu bestimmen. Der Hochtemperatursupraleiter war dabei schon fest mit einem Spannungsgerät verbunden und mittels eines fest installierten Thermometers konnte zur jeweiligen Spannung die Temperatur gemessen werden.

Der Supraleiter wurde von Raumtemperatur bis auf 77K abgekühlt. Zu Beginn der Messung wurde ca. in 10K Schritten gemessen und ab einer Temperatur von ca.  $-150^{\circ}\text{C}$  in 5K Schritten. Die tiefen Temperaturen werden mit flüssigem Stickstoff erreicht.

Bei der Messung wird dabei so vorgegangen, dass die Messung über dem in einem Behälter befindlichen Stickstoff begonnen wird, und der Abstand zum flüssigen Stickstoff langsam verringert wird, bis der Supraleiter schließlich eintaucht. Dadurch wird der Temperaturgradient über dem Stickstoffbad ausgenutzt um die jeweiligen Temperaturen zu erreichen.

Da wir eine Spannung messen, wir aber den Widerstand des Supraleiters in Abhängigkeit der Temperatur auftragen wollen, müssen wir noch den Widerstand mittels des Ohmschen Gesetzes aus den Spannungen berechnen. Der Strom hatte bei der Messung einen konstanten Wert von  $I = 2,5\text{A}$ .

Zusätzlich muss beachtet werden, dass die Anzeige des Thermometers bei tiefen Temperaturen vom eigentlichen Wert abweicht und der Tabelle auf dem Aufgabenblatt entsprechend korrigiert werden muss.

Im folgenden sind nun unsere Messwerte, sowie die korrigierte Temperatur und der Widerstand des Supraleiters angegeben.

T/°C	$T_{korrr}/^{\circ}\text{C}$	U /mV	R/mΩ
28,4	28,4	1,89	0,756
21,0	21,0	1,87	0,748
15,3	15,3	1,86	0,744
8,0	8,0	1,84	0,736
4,8	4,8	1,82	0,728
-2,0	-2,0	1,79	0,716
-6,0	-6,0	1,78	0,712
-14,0	-14,0	1,75	0,7
-22,5	-22,5	1,73	0,692
-30,0	-30,0	1,70	0,68
-38,0	-38,0	1,67	0,668
-49,3	-49,3	1,65	0,66
-56,0	-56,0	1,62	0,648
-61,0	-61,0	1,60	0,64
-70,0	-70,0	1,56	0,624
-77,0	-77,0	1,54	0,616
-90,0	-90,0	1,52	0,608
-97,0	-96,9	1,50	0,6
-106,0	-105,9	1,47	0,588
-120,0	-118,2	1,43	0,572
-134,3	-134,0	1,41	0,564
-140,5	-140,1	1,38	0,552
-145,0	-144,5	1,37	0,548
-150,0	-149,3	1,36	0,544
-160,0	-159,2	1,35	0,54
-165,0	-164,1	1,30	0,52
-170,0	-169,0	1,23	0,492
-175,0	-174,0	1,20	0,48
-180,0	-178,9	1,19	0,476
-188,7	-187,5	1,16	0,464
-190,5	-189,0	1,07	0,428
-194,0	-192,2	0,23	0,092
-195,3	-193,7	0,16	0,064
-197,3	-195,6	0,07	0,028
-198,2	-196,4	0,06	0,024

Tabelle 3: Sprungtemperatur eines Supraleiters

An den Messwerten sieht man, dass von  $-189,0^{\circ}\text{C}$  auf  $-192,2^{\circ}\text{C}$  der Widerstand sprunghaft abnimmt. Deshalb nehmen wir an, dass in diesem Bereich die Sprungtemperatur liegt.

Nun tragen wir noch den Widerstand über der (korrigierten) Temperatur auf um die Sprungstelle besser erkennen zu können.

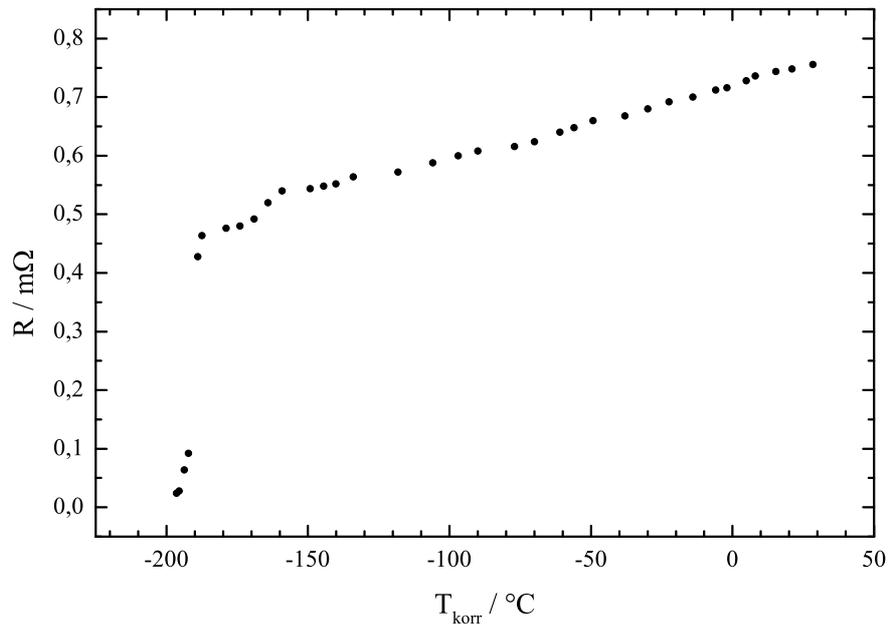


Abbildung 16: Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur

Auch hier erkennt man schön, dass die Sprungtemperatur bei ca.  $-190^{\circ}\text{C}$  liegt. Eigentlich sollte danach der Widerstand  $R = 0\Omega$  betragen. Warum unterhalb der Sprungtemperatur der Widerstand noch einen Wert ungleich null hat, können wir uns nicht erklären.