



~~SS~~ WS 20..12.1.....

Praktikum: (~~P1~~P2) (~~Mo~~DiMiDo) Gruppe-Nr: 23

Name: Wellmann Vorname: David

Name: Hippler Vorname: Marc

Versuch: Eig. el. Bauelemente (~~mit~~ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: Stefan Heindl Durchgeführt am: 24.05.12

Abgabe am: 31.05.12

Rückgabe am: /

Begründung:

Afg. 1: }
| } sehr gut
Afg. 5: }

2. Abgabe am: /

Ergebnis: ~~(+ / 0 / -)~~

Fehlerrechnung: ja / ~~nein~~

Datum: 03.06.12

Handzeichen: S. Heindl

Bemerkungen:

- Protokoll sehr gut
- VB sehr gut



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, Zenereffekt, 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 $U=2\text{V}$ 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°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, Konstantandrahtspule, 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, 1200 Ω , 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);

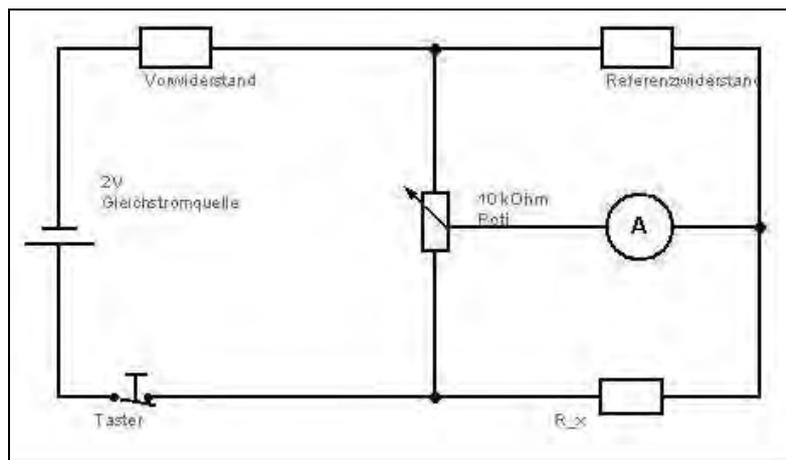
Piezoelement (Resonanzfrequenz 2,9kHz) in Gehäuse, Lautsprecher;

Supraleiter in Gehäuse mit Absenkvorrichtung, Dewargefäß,

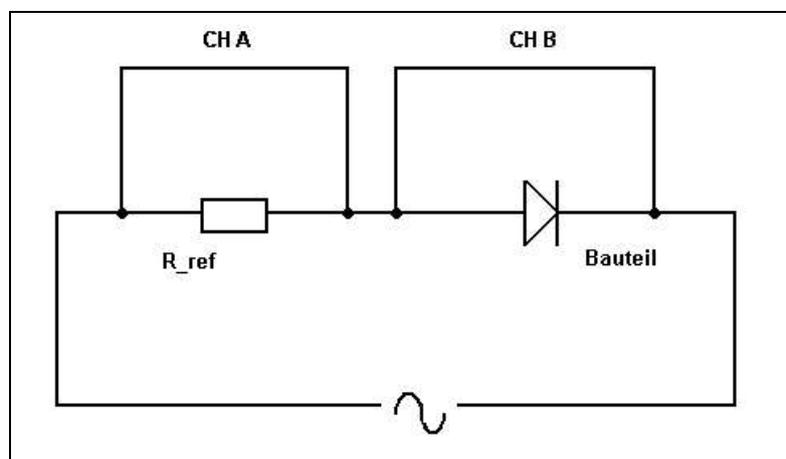
Vierleitermessschaltung mit Konstantstromquelle ($I_{\text{const}}=2,5\text{mA}$) und Steckernetzgerät;

Flüssiger Stickstoff (LN_2).

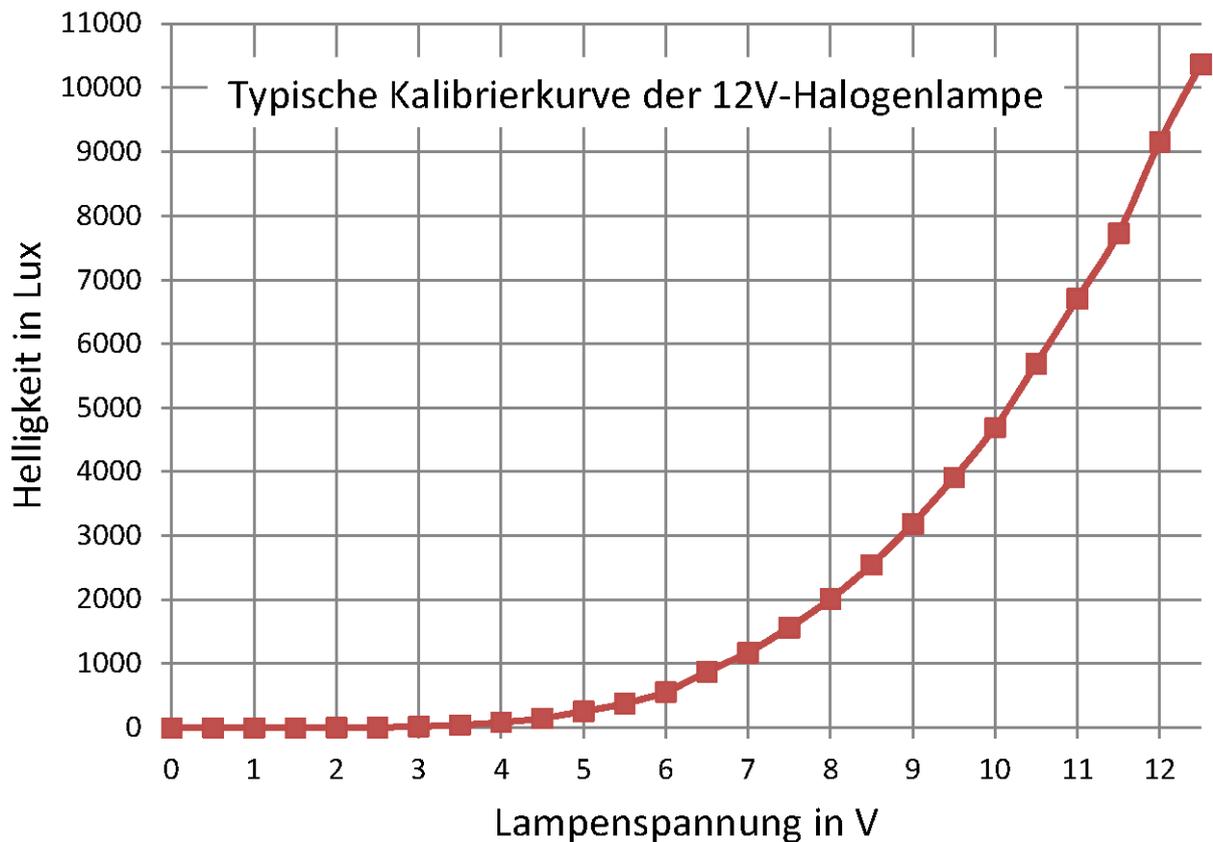
Schaltskizzen der Versuchsboxen:



Schaltung (1): Wheatstonesche Brückenschaltung



Schaltung (2): Kennlinienaufnahme



Zu Aufgabe 3: (Phototransistor)

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
Versuchsvorbereitung
Versuch: Eigenschaften elektrischer
Bauelemente

David Wellmann
Marc Hippler
Sommersemester 2012

6. Juli 2012

Begrifflichkeiten

In diesem Versuch geht es primär darum, die Eigenschaften elektrischer Bauelemente unter verschiedenen Einflüssen zu untersuchen. Um in den folgenden Beschreibungen einige dieser Eigenschaften und Effekte besser beschreiben zu können werden die grundlegenden Dinge im Folgenden bereits vorab diskutiert.

Wheatstone'sche Brückenschaltung

Die Wheatstone'sche Brückenschaltung ist eine vergleichsweise einfache und doch sehr genaue Möglichkeit zur Messung von unbekanntem elektrischen Widerständen oder kleinen Widerstandsänderungen. Sie besteht aus vier zu einem Ring zusammengeschalteten Widerständen die diagonal in der Mitte mit einem Spannungsmessgerät verbunden. Falls keine Spannung in der Diagonalen zwischen den beiden "Spannungsteilern" gemessen wird befindet man sich im abgeglichenen Zustand. Unter Verwendung der Ohmschen Gesetze gilt dann:

$$U_1 = U_3 \quad \text{und} \quad U_2 = U_4$$

Daraus folgt direkt:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{U_3}{U_4} \Rightarrow \frac{R_1 I_1}{R_2 I_1} = \frac{R_3 I_3}{R_4 I_4} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Somit lässt sich ein unbekannter Widerstand (z.B. R_4) bestimmen sofern die drei anderen Widerstände bekannt sind.

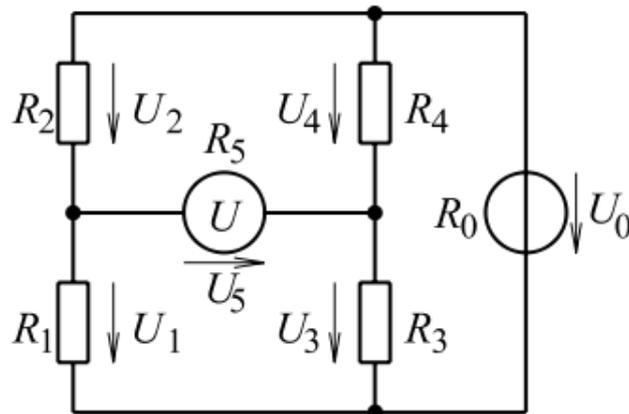


Abbildung 1: Wheatstonesche Brückenschaltung
Quelle: wikipedia.org/WheatstonescheMessbruecke

Elektrische Leitung

Um die Eigenschaften von Festkörpern anschaulich erklären zu können greift man auf das sogenannte **Bändermodell** zurück. Solange man Atome völlig isoliert von der Umgebung betrachtet besetzen deren Elektronen bekannterweise diskrete Energieniveaus. Bringt man nun jedoch zwei oder mehrere Atome nah zueinander kommt es aufgrund der Wechselwirkung zu einer Aufspaltung in Unterniveaus. Gerade beim Festkörper wechselwirken

eine Vielzahl von Atomen miteinander was dazu führt, dass es zu einer immer feineren Aufspaltung der Niveaus kommt die man schließlich aufgrund als Energiebänder bezeichnet. Die Breite dieser Bänder hängt dabei direkt mit der Bindung der Elektronen an das Atom zusammen, da eine stärkere Bindung beispielsweise zu weniger Wechselwirkungen und damit zu einem schmaleren Band führt. In einem Festkörper können vollbesetzt, teilweise besetzte und leere Energiebänder auftreten, was für die Leitungseigenschaften des Materials ausschlaggebend ist. Da nur teilweise besetzte Bänder für den Ladungstransport eingesetzt werden können ist insbesondere das energetisch tiefste und nicht vollbesetzte Band (Leitungsband) von Interesse. Das direkt darunterliegende Band wird auch als Valenzband bezeichnet.

Das Leitungsband von **Metallen** ist bereits bei sehr tiefen Temperaturen teilweise besetzt, was sie zu ausgezeichneten Leitermaterialien macht. Insbesondere bei mehrwertigen Metallen überlappen die höchsten Energiebänder was dazu führt, dass selbst kleinste Anregungen genügen um die Elektronen auf ein höhere Niveau anzuheben. Aus diesem Grund sind stets ausreichend freie Elektronen vorhanden die zum Ladungstransport beitragen können.

Im Gegensatz dazu gibt es auch Materialien, deren Leitungsband nicht besetzt ist. Existiert gleichzeitig ein großer Bandabstand zwischen Valenz- und Leitungsband führen auch große Energiewerte nicht zu einem Elektronenübergang auf das höhere Niveau. Demzufolge sind keine freien Elektronen zum Ladungstransport vorhanden und man spricht von einem **Isolator**.

Nun gibt es auch Stoffe deren elektrische Leitfähigkeiten zwischen der von Leitern und Isolatoren liegt. Diese sogenannten **Halbleiter** besitzen in ihrer reinen Form ein vollbesetztes Valenzband und ein nichtbesetztes Leitungsband bei sehr tiefen Temperaturen. Im Unterschied zu den Isolatoren ist die Lücke zwischen den beiden Bändern jedoch so klein, dass die thermische Anregung der Elektronen bei steigender Temperatur dazu führen kann, dass diese von dem Valenz- in das Leitungsband gelangen können und Ladungstransport möglich wird. Für diese Art des Leitungsverhalten gibt es im Grunde noch zwei weitere mögliche Ursachen:

- Auch bei großen Reinheitsgraden ist es möglich, dass durch Verunreinigungen Fremdatome freie Ladungsträger in das Material einbringen.
- Da Atome an der Oberfläche von Materialien nicht vollständig von anderen Atomen umgeben sind fehlen Bindungspartner für einige Valenzelektronen.

Um solche Eigenschaften herstellen zu können werden die Stoffe gezielt mit Fremdatomen verunreinigt was auch als **Dotierung** bezeichnet wird. Unterschieden wird dabei zwischen sogenannter p-Dotierung und n-Dotierung.

- Ein **n-dotierter Halbleiter** besitzt mehr freie Elektronen als Löcher was dadurch zustandekommt, dass gezielt fünfwertige Elemente (bsp. Phosphor) in die Halbleiterstruktur eingebaut werden. Da das fünfte Valenzelektron des Phosphor, welches in diesem Zusammenhang auch als Donator bezeichnet wird, keine Bindung eingehen kann bleibt ein freies Elektron zur Ladungsübertragung übrig.

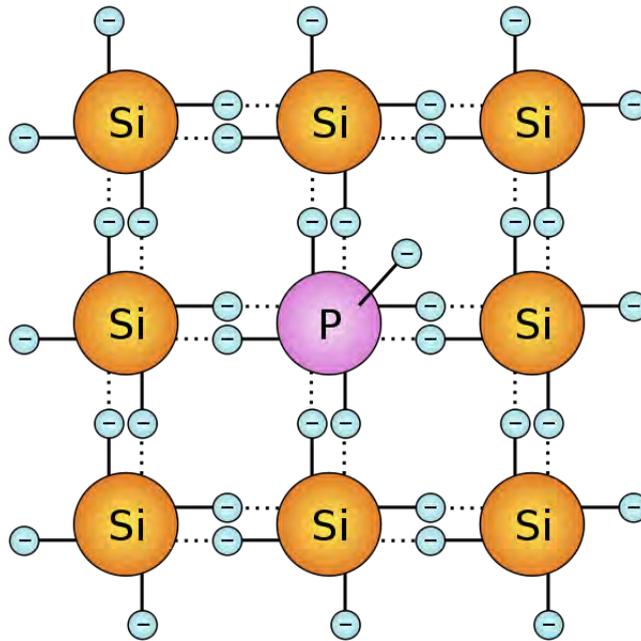


Abbildung 2: Schematische Darstellung der n-Dotierung mit Phosphor
Quelle: wikipedia.org/Dotierung

- Bei einem **p-dotierten Halbleiter** handelt es sich gerade um den umgekehrte Effekt. Durch gezielten Einbau von dreiwertigen Elementen wie beispielsweise Aluminium entstehen viele “Löcher“ da nicht genügend Bindungselektronen vorhanden sind um diese zu schließen. Diese Löcher können ihrerseits wieder von anderen Elektronen verwendet werden um sich durch das Material zu bewegen.

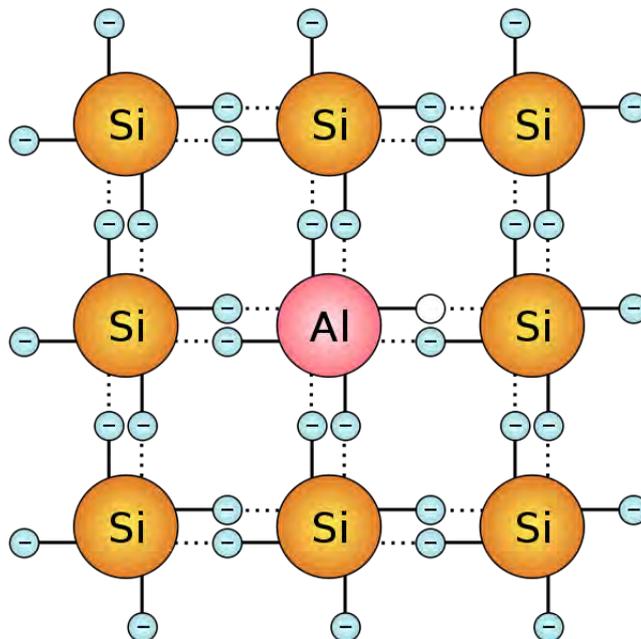


Abbildung 3: Schematische Darstellung der p-Dotierung mit Aluminium
Quelle: wikipedia.org/Dotierung

Bei beiden Arten der Dotierung ist zu beachten, dass die Stoffe an sich trotz Löcher oder Überschüsse von außen betrachtet ungeladen bleiben, da sich die entsprechenden Gegen-

ladungen weiterhin im Kern befinden.

Ein in der Praxis extrem wichtiger Effekt kommt zustande, wenn man die Grenzschicht zwischen einem p-Dotierten und einem n-Dotierten Material betrachtet. Bei diesem sogenannten **pn-Übergang** muss man die Fälle mit und ohne angelegte Spannung unterscheiden:

- Ohne angelegte Spannung kommt es aufgrund thermischer Schwingungen zu einer Wanderung von Elektronen aus der n-Zone (freie Elektronen) in die p-Zone (Löcher). Dabei überquert das Elektron des Phosphoratoms die Grenzfläche jedoch vollständig und wird in die freie Bindung des Aluminiums gezwungen was dazu führt, dass die Phosphoratom positiv und die Aluminiumatome entsprechend negativ ionisiert sind. Durch diese Ladungsübergänge entsteht zwischen den beiden Gebieten eine sogenannte Raumladungszone, in der ein elektrisches Feld vorliegt.

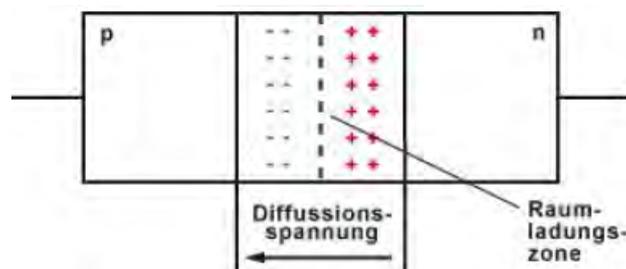


Abbildung 4: Raumladungszone und pn-Übergang

Quelle: Vorbereitungshilfe

Versucht nun eine Elektron von rechts aus der weiterhin neutralen n-Zone in die Raumladungszone vorzudringen wird es von dem entstandenen elektrischen Feld abgebremst und kann dieses nur mit einer sehr großen Anfangsgeschwindigkeit überwinden. Das Material leitet somit bei niedrigen Temperaturen nur schlecht, da die thermischen Anregungen nicht genügen um die Kraftwirkungen auf die Elektronen auszugleichen. Dementsprechend ist auch die Breite der Raumladungszone stark von der Temperatur abhängig.

- Legt man hingegen eine äußere Spannung an ergeben sich je nach Polung zwei unterschiedliche Fälle:
 - Durch Anlegen einer Spannung mit Minuspol auf der Seite der p-Zone füllen die Elektronen die verbliebenen Löcher auf der Seite auf Verstärken das im Inneren der Raumladungszone wirkende Feld. Dadurch wird der Aufenthalt freier Ladungsträger im Inneren unmöglich und auch Elektronen mit hoher Anfangsgeschwindigkeit gelingt es nicht die Raumladungszone zu durchqueren. In diesem Zusammenhang wird die Raumladungszone auch als Sperrzone bezeichnet.

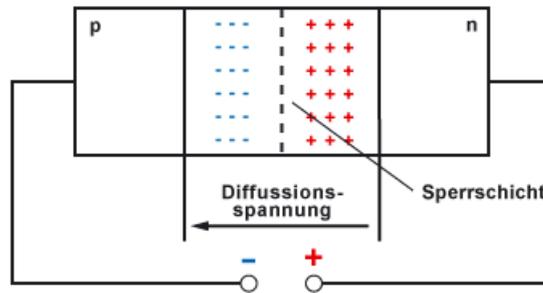


Abbildung 5: Grenzzone in Sperrichtung
 Quelle: <http://www.elektronikkompodium.de/sites/>

- Durch Anlegen einer Spannung mit positivem Pol an der p-Zone drückt die Spannungsquelle Elektronen in die n-Zone was dazu führt, dass die Raumladungszone in der Mitte abgebaut wird. Infolgedessen ist eine Ladungsübertragung durch das elektrische Feld möglich, da es von der außen anliegenden Spannung neutralisiert wird. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der Durchlassrichtung.

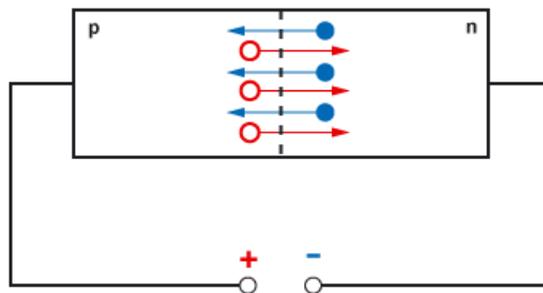


Abbildung 6: Grenzzone in Durchlassrichtung
 Quelle: <http://www.elektronikkompodium.de/sites/>

Bauteile und ihre Eigenschaften

Dioden

Durch die zuvor vorgestellten Effekte lässt sich mit der **Diode** nun direkt eines der wichtigsten elektrischen Bauteile überhaupt erstellen. Sie bestehen prinzipiell gerade aus dem zuvor beschriebenen pn-Übergang und besitzt daher die Eigenschaft Strom nur in einer Richtung durchzulassen. Um konkrete Arten verschiedener Dioden und Betriebsarten zu klassifizieren werden sogenannte **Diodenkennlinien** aufgezeichnet. Dabei handelt es sich um Diagramme bei denen die Stromstärke I_D in Abhängigkeit der an der Diode angelegten Spannung U_D gemessen und aufgetragen wird.

Man unterteilt die Diodenkennlinie meist in 3 unterschiedliche Bereiche:

- Der Durchlassbereich ist dadurch charakterisiert, dass die Diode in Durchlassrichtung betrieben wird. Mit zunehmender Spannung wird die Sperrschicht immer weiter abgebaut bis die sogenannte Schwellenspannung U_S erreicht ist und der Strom exponentiell ansteigt.

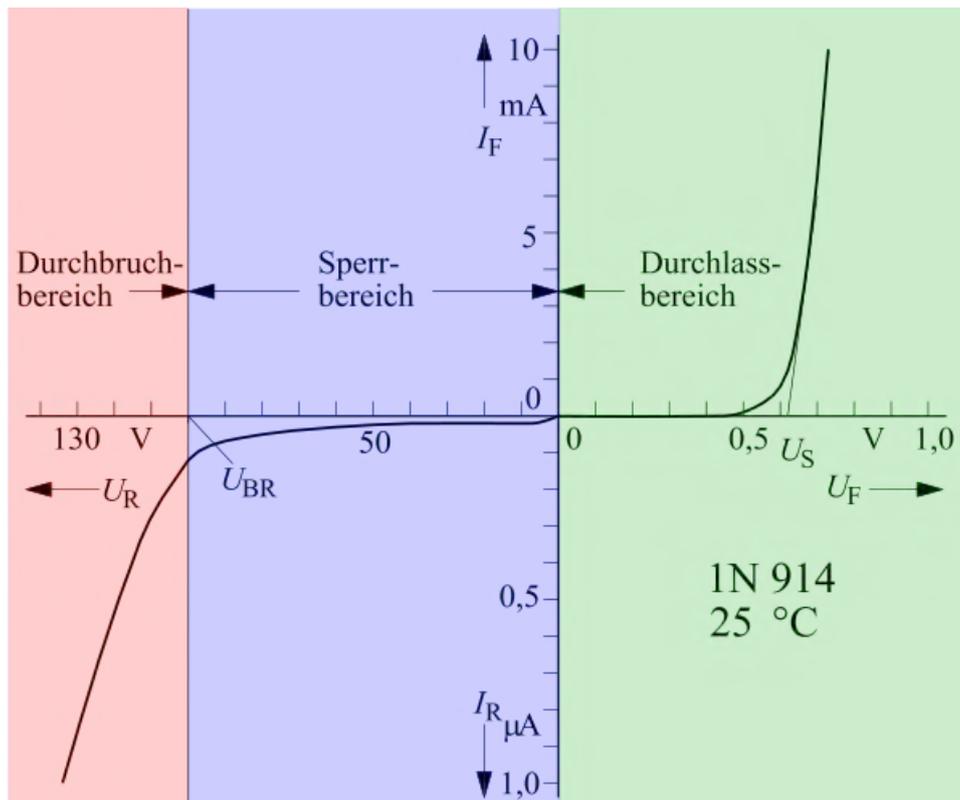


Abbildung 7: Verschiedene Bereiche der Diodenkennlinie
 Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Diode>

- Im Sperrbereich wird die Diode so betrieben, dass keiner bzw. nur ein sehr geringer Strom durch die Diode fließen kann.
- Der Durchbruchbereich liegt dann vor wenn die sogenannte **Durchbruchspannung** U_{BR} erreicht. Dabei handelt es sich um einen Diodenabhängigkeiten Wert der in der Regel zwischen 50V und 1000V liegt. Unter diesem Umständen bricht die Diode durch und es fließt ein Strom.

Eine mögliche Variante ist die sogenannte **Zener-** oder **Z-Diode** die besonders hoch dotiert ist und einen sehr schmalen pn-Übergang besitzt. Außerdem besitzt sie eine genau spezifizierte Durchbruchspannung und ist daher insbesondere für den dauerhaften Betrieb in Sperrrichtung ausgelegt. Dabei kommt der sogenannte **Zener-Effekt** zum Tragen der bewirkt, dass ab einer bestimmten elektrischen Feldstärke Elektronen aus ihren Kristallbindungen gelöst werden und einen Strom I_Z verantworten. Die freigewordenen Ladungsträger werden wiederum von dem elektrischen Feld beschleunigt und schlagen weitere Elektronen aus den Bindungen heraus bis es schließlich zum Zener-Durchbruch kommt. Dieser Vorgang wird aufgrund der Selbstverstärkung auch oft als **Lawineneffekt** bezeichnet. Aufgrund der thermischen Anregungen der Elektronen ist dieser Effekt außerdem stark temperaturabhängig.

Optoelektrische Bauelemente

Eine andere Ausprägungsart sind die sogenannten Optoelektrischen Bauelemente. Diese beruhen grundsätzlich meistens auf dem **Photoeffekt** welcher den Vorgang beschreibt,

dass durch Beleuchtung einer Fotoplatte Elektronen von den Photonen aus ihren Kristallbindungen herausgelöst werden können. Die freien Elektronen tragen dann beispielsweise bei einem Photowiderstand zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit bei sofern der Widerstand beleuchtet wird.

Piezoelektrischer Effekt

Will man Bauteile konstruieren deren Eigenschaften vom äußerem Druck abhängen macht man sich den **piezoelektrischen Effekt** zunutze. Dabei werden spezielle Kristalle verwendet bei denen eine Druckänderung zu einer Ladungsträgertrennung führt. Hierbei unterscheidet man zwischen dem direkten piezoelektrischen Effekt der das Auftreten einer Spannung bei gerichteter Krafteinwirkung beschreibt und dem indirekten piezoelektrischen Effekt welcher eine Verformung des Materials durch eine von außen angelegte Spannung zur Folge hat. So kann ein Material beispielsweise zu Schwingungen angeregt werden indem eine sinusförmige Wechselspannung angelegt wird.

Supraleitung

Als **Supraleiter** werden Stoffe bezeichnet bei denen der Widerstand unterhalb einer kritischen Temperatur T_C auf quasi 0Ω abfällt. Der Effekt lässt sich mithilfe sogenannte Cooper-Paare erklären die durch Polarisationswechselwirkungen auf dem Gitter entstehen können. Normalerweise entsteht der elektrische Widerstand in Leitern dadurch, dass Elektronen mit Fehlerstellen des Gitters und Gitterschwingungen wechselwirken. Durch die Kopplung der Elektronen im Supraleiter zu Cooperpaaren kann jedoch keine Energie mehr an das Gitter abgegeben werden und ein widerstandsloser Stromfluss ist möglich.

1 R(T)-Abhängigkeit verschiedener Bauteile

In vielen Versuchen wird oft vernachlässigt, dass die Eigenschaften mancher elektrischer Bauteile mit ihrer Betriebstemperatur variieren. Um eine solche Temperaturabhängigkeit nachzuweisen werden im ersten Versuch der Widerstand eines Heißleiters (NTC) und der Widerstand eines Kaltleiters (PT100) an einer Wheatstoneschen Brücke gemessen.

Dabei ist zu erwarten, dass bei dem Heißleiter der Widerstand mit zunehmender Temperatur geringer wird und im Gegensatz dazu der Widerstand des Kaltleiters bei Erhöhung der Betriebstemperatur immer weiter ansteigt.

Für den Heißleiter ist anzunehmen, dass dessen temperaturabhängiger Widerstand der Form

$$R_{HL}(T) = a \cdot e^{b/T}$$

folgt. Schnell ergibt sich, dass eine logarithmische Auftragung der Widerstandswerte über der reziproken Temperatur von Vorteil ist, denn aus

$$\ln(R_{HL}(T)) = b \cdot \frac{1}{T} + \ln(a)$$

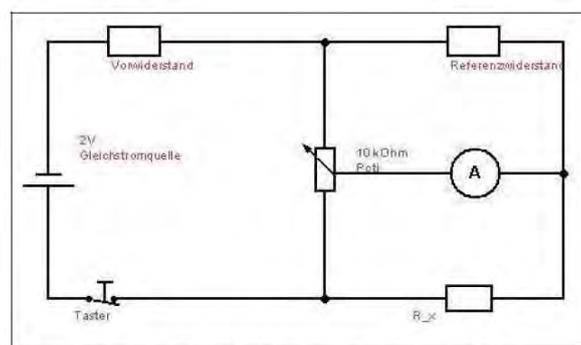
erhält man eine Gerade die bereits die Informationen über die Konstanten b (entspricht der Steigung) und a (lässt sich aus dem Y-Achsenabschnitt $\ln(a)$ berechnen) in einfacher Form beinhaltet.

Für den Kaltleiter wird sich aller Voraussicht ein linearer Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur einstellen.

$$R_{KL}(T) = R_0 + c \cdot T$$

Nach dem Auftragen der Widerstand über Temperatur Kurve lässt sich die Konstante c aus der Steigung der Gerade ablesen.

Bei beiden Versuchen werden Temperaturen zwischen der Raumtemperatur und etwa 200°C untersucht. Da die Messungen an einer Wheatstoneschen Brücke vorgenommen werden, ist es zur Vermeidung von unerwünschten Randeffecten (erwärmen der Vergleichswiderstände) ratsam die Spannung jeweils nur kurz mittels eines Tasters anzulegen.



Schaltung (1): Wheatstonesche Brückenschaltung

Abbildung 8: Verwendete Wheatstonebrücke mit Taster
Quelle: Aufgabenstellung

2 Kennlinien

Wird in einem Graphen die Stromstärke gegen die Spannung aufgetragen, so bezeichnet man dieses als Die Kennlinie eines elektrischen Bauteils. Da die Stromstärke nicht direkt am Oszilloskop aufgetragen werden kann wird auf die eine Achse die Spannung des Bauteils, und auf die andere Achse die Spannung eines in Reihe geschalteten Referenzwiderstands gelegt.

Bei empfindlichen Bauteilen die bei hohen Induktionsspannungen zerstört werden könnten wird parallel zu dem Aufbau noch ein Varistor gelegt. Aufgrund der Eigenschaft, bei hohen Spannungen (Induktionsspannungen) einen stark abfallenden Widerstandswert zu haben, kann durch den Varistor ein Großteil des Induktionsstromes abfließen und die empfindliche Schaltung parallel dazu wird nicht zerstört.

Um eine stabile Spannung zu bekommen kann die Eigenschaft der Zener-Diode ihren Widerstand so anzupassen, dass die Durchbruchspannung (Zenerspannung) anliegt ausgenutzt werden. Zusammen mit einem Vorwiderstand kann somit ein Spannungsteiler aufgebaut werden und mit der Zener-Spannung stabil gearbeitet werden.

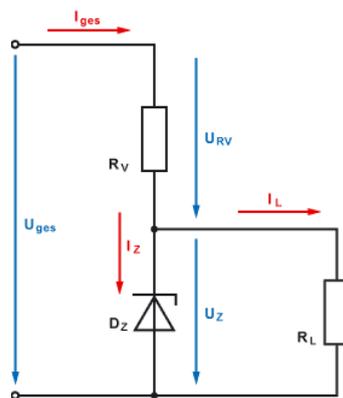


Abbildung 9: Spannungsteiler mit Zener-Diode
Quelle: <http://www.elektronik-kompodium.de>

Mit dieser Vorarbeit können im Anschluss die verschiedenen Kennlinien einiger elektrischer Bauteile aufgenommen werden. Dabei sollen die unterschiedlichen Dioden auch auf ihre Frequenzabhängigkeit hin untersucht werden.

3 Phototransistor

Der Phototransistor hat im Unterschied zu normalen Transistoren eine für Licht offene Basis-Kollektor Sperrschicht. Folglich kann dieser aufgrund des Photoeffekts durch Regulierung des Photonenstroms bzw. Lichteinfalls gesteuert werden.

Es sollen nun bei verschiedenen Lichtintensitäten, die also verschiedenen Basisströmen entsprechen, Kennlinien der Photodiode erstellt werden. Daraus kann im Anschluss graphisch ein Zusammenhang zwischen Sperrstrom und Beleuchtungsstärke gefunden werden.

4 Piezoelement

Aufgrund des Aufbaus mancher Stoffe entsteht bei Kompression ihrer Struktur durch Ausübung von Druck eine Spannung. Man nennt diesen Effekt den Piezoeffekt. Dieser Effekt soll überprüft werden.

Das auch die Umkehrung des Piezoeffekts möglich ist soll ein qualitatives Experiment zeigen, in dem das Piezoelement direkt an den Frequenzgenerator angeschlossen wird. Es wird erwartet, dass dabei hörbare Schallwellen entstehen.

5 Hochtemperatursupraleiter

Im letzten Versuch soll der bereits oben erklärte Supraleiter im Mittelpunkt stehen. Nach einer Abkühlung des Leiters auf etwa 77K (flüssiger Stickstoff) soll dann der Widerstand des Supraleiters in 5K-Schritten gemessen werden. Der Widerstand eines Supraleiters sinkt bei abnehmender Temperatur zuerst völlig normal. Ab der Sprungtemperatur ist der Widerstand jedoch Null. Dieser Sprung bzw. die Sprungtemperatur soll untersucht werden.

1) NTC, $R_{ref} = 1200 \Omega$, $U = 2V$

elekt. Bauteile

24.5.12

T	$R_{pot}(\Omega)$	T	$R_{pot}(\Omega)$	T	$R_{pot}(\Omega)$	T	$R_{pot}(\Omega)$
27	7910	90	5460	155	2560		
30	7810	95	5180	160	2420		
35	7690	100	4960	165	2220		
40	7540	105	4830	170	2120		
45	7360	110	4480	175	2030		
50	7180	115	4270	180	1860		
55	6960	120	3970	185	1740		
60	6760	125	3760	190	1620		
65	6520	130	3660	195	1520		
70	6320	135	3330	200	1480		
75	6120	140	3190				
80	5850	145	2920				
85	5680	150	2690				

exp
+
lin

- PT100, $R_{ref} = 100 \Omega$

T	$R_{pot}(\Omega)$	T	$R_{pot}(\Omega)$	T	$R_{pot}(\Omega)$	T	$R_{pot}(\Omega)$
200	6260	150	5990	100	5730	50	5430
195	6220	145	5960	95	5690	45	5400
190	6200	140	5940	90	5670	40	5380
185	6160	135	5880	85	5650	35	
180	6130	130	5870	80	5670	30	
175	6110	125	5850	75	5590	25	
170	6080	120	5830	70	5570	20	
165	6060	115	5820	65	5530	15	
160	6050	110	5780	60	5500	10	
155	6020	105	5760	55	5450	5	

- 2) silizium Diode - 01. p-n-g - Schwellenspannung $661mV \rightarrow U_s = 0,661V$
 Germanium Diode - 02. p-n-g - $U_s = 0,440V$
 Zener Diode - 03. p-n-g - $U_s = 0,743V$ $U_D = -4,212V$
 LED (Rot) - 04. p-n-g - $U_s = 1,721V$
 LED (Orange) - 05. p-n-g - $U_s = 1,820V$
 LED (Grün) - 06. p-n-g - $U_s = 1,924V$
 LED (Gelb) - 07. p-n-g - $U_s = 1,908V$
 'korrekt' - 08. p-n-g
 photo-eff
 photo-zu
 photo-beleuchtet
 Diode
 Diode-unbel.
 Diode-bel.
 R aus Diagramm
 ablesen ($R = \frac{U}{I}$)

b) Die Frequenz ist zu hoch, Sperrschicht wird nie mehr wieder komplett abgebaut ($I \neq 0$) \Rightarrow Geschw. der e⁻ begrenzt!

J. Bied

3) $x \rightarrow A_{\text{out}}$:

0 V 0 V
0,5 V 0 V
1 V 0 V
1,5 V 0
2,0 V 0
2,5 V 0
3,0 V -1,3 mV

3,5 V - 2,4 mV
4,0 - 3,4 mV
4,5 - 4,5 mV
5,0 - 5,9 mV
5,5 - 7,6 mV
6,0 - 9,6 mV
6,5 - 11,6 mV

7,0 - 14,2 mV
7,5 - 16 mV
8,0 - 18,6 mV
8,5 - 21,2 mV
9,0 - 24,1 mV
9,5 - 27 mV
10,0 - 30,2 mV
10,5 - 33,2 mV

11,0 - 36,4
11,5 - 39,
12,0 - 43,5
12,5 - 47,2

4) Bid

5) $x \rightarrow T [K]$

bis $140^\circ\text{C} \leftrightarrow T = 10K$, $\leftrightarrow T = 5K$

$y \rightarrow R (\Omega)$

~~240 // 5,137 mV~~

17,6 - 5,137 mV

Physikalisches Anfängerpraktikum P2
Versuchsauswertung
Versuch: Spezifische Wärmekapazität

David Wellmann
Marc Hippler
Sommersemester 2012

6. Juli 2012

1 R(T)-Abhängigkeit verschiedener Bauteile

Heißleiter (NTC)

Im ersten Versuchsteil soll die Temperaturabhängigkeit des Widerstands verschiedener Bauteile untersucht werden. Dazu wurde zunächst ein Heißleiter (NTC) kontinuierlich von Raumtemperatur auf etwa 200°C erwärmt und in jeweils 5°C -Schritten ein Messwert genommen. Der Widerstand wurde dabei, wie im Vorprotokoll bereits ausführlich, beschrieben mit einer Wheatstone'schen Brückenschaltung bestimmt. Gemäß der dort beschriebenen Formeln muss aus den abgelesenen Werten für Referenz- und Potentiometerwiderstand der gesuchte Widerstand des Bauteils errechnet werden:

$$R_{NTC} = \frac{R_{pot}}{10k\Omega - R_{pot}} \cdot R_{Ref}$$

Die sich daraus ergebenden Werte wurde zunächst in folgendem Diagramm aufgetragen indem sich deutlich der erwartete exponentielle Abfall der Form $R_{NTC} = a \cdot e^{b/T}$ zeigt.

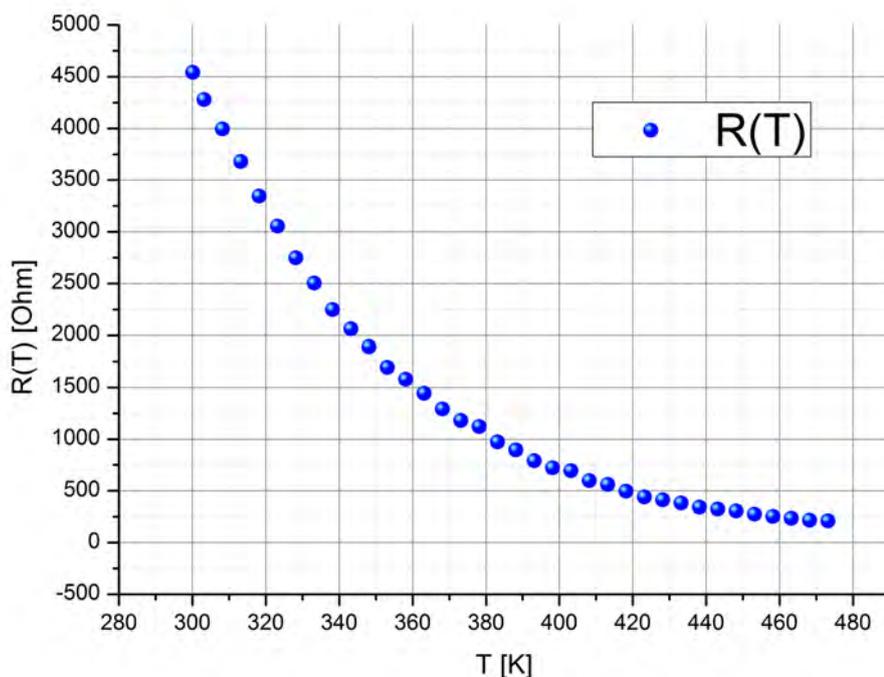


Abbildung 1: R(T)-Abhängigkeit eines Heißleiters

Da es aus dieser Darstellungsform jedoch aufwendig ist die gesuchten Konstanten a und b zu bestimmen wurde im folgenden eine logarithmische Auftragung der Widerstandswerte über der reziproken Temperatur durchgeführt.

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

Auf diese Art und Weise kann eine lineare Regression an der Kurve durchgeführt und die gesuchten Konstanten direkt aus der Steigung und dem Y-Achsenabschnitt berechnet

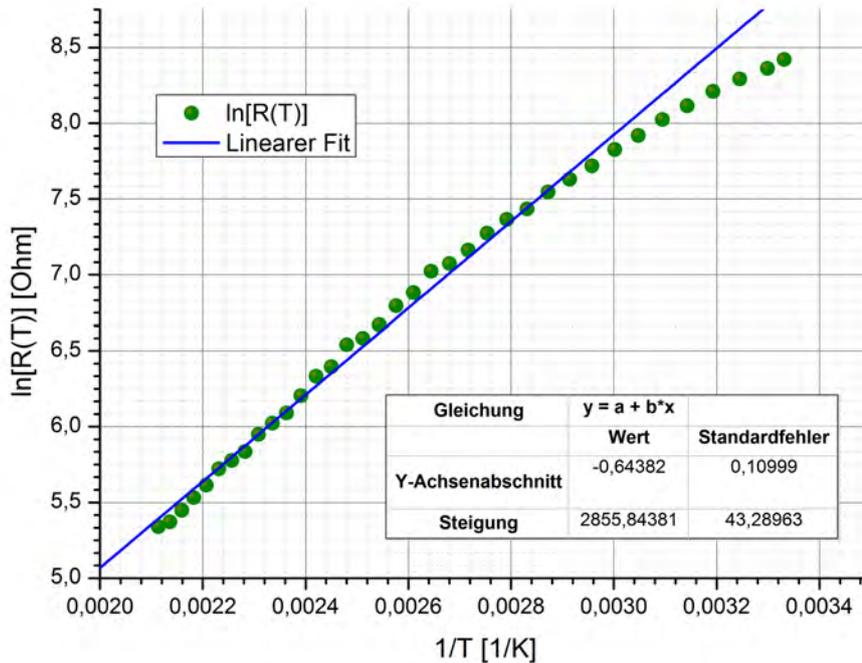


Abbildung 2: $R(T)$ -Abhängigkeit eines Heißleiters (linearisiert)

werden.

Wie man aus den Daten der Regressiongeraden direkt ablesen kann ergibt sich:

$$\ln(a) = -0,64\Omega \Rightarrow a = 0,5253\Omega \quad \text{und} \quad b = 2855,8K$$

Dabei ist zu beachten, dass für die Interpolation die ersten Messwerte nicht mit einbezogen wurden da in diesem Abschnitt der lineare Zusammenhang offensichtlich nicht mehr vollständig gültig ist. Diese Werte entsprechen denjenigen bei niedrigen Temperaturen zwischen $25^\circ C$ und $50^\circ C$. Setzt man die erhaltenen Werte für a und b nun wieder in die ursprüngliche Formel ein um einen tatsächlichen $R(T)$ -Zusammenhang zu erhalten ergibt sich:

$$R_{NTC}(T) = 0,5253 \cdot e^{\frac{2855,8K}{T}} \Omega$$

Kaltleiter (PT100)

Direkt im Anschluss dazu wurde der immernoch $200^\circ C$ heiße Ofen mit den Widerständen dazu verändert das Verhalten eines Kaltleiters (PT100) zu untersuchen. Um nicht darauf warten zu müssen, dass der Ofen wieder auf Raumtemperatur heruntergekühlt ist wurden nun von $200^\circ C$ absteigend in $5^\circ C$ -Schritten Messwerte genommen. Das Verfahren zur Bestimmung des Widerstandswertes mit der Wheatstone-Brücke und die dazugehörigen Auswertformeln sind dabei identisch zum vorherigen Versuch. Gemäß den Überlegungen im Vorprotokoll erwarten wir jedoch beim Kaltleiter im Gegensatz zum Heißleiter ein lineares Verhalten der Form:

$$R_{PT100} = R_0 + b \cdot T$$

Dementsprechend ist auch keine Linearisierung der Messdaten nötig und die gesuchten Konstanten R_0 und c können direkt aus einer Regressionsgeraden durch die Messpunkte ermittelt werden.

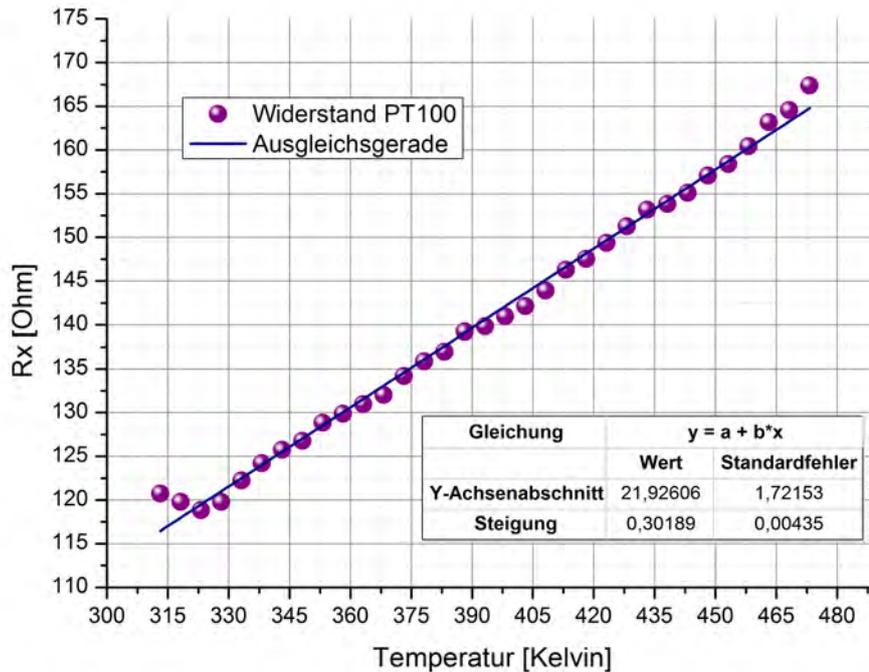


Abbildung 3: $R(T)$ -Abhängigkeit eines Kaltleiters

Auch bei dieser Messung bestätigen sich die Erwartungen und man erhält bis auf wenige Abweichungen für Werte nahe der Raumtemperatur ein eindeutig lineares Verhalten. Aus den Daten der Regressionsgeraden erhält man direkt:

$$a = R_0 = 21,92\Omega \quad \text{und} \quad b = 0,302 \frac{\Omega}{K}$$

Eingesetzt in die oben angegebenen Formel ergibt sich folgendes Gesamtverhalten für den Kaltleiter PT100:

$$R_{PT100}(T) = 21,92\Omega + 0,302 \frac{\Omega}{K} \cdot T$$

2 Kennlinien von Bauelementen

Im zweiten Aufgabenteil sollten die Kennlinien unterschiedlicher Bauelemente unter Verwendung des USB-Oszilloskops ermittelt werden. Dazu wurde eine sinusförmige Wechselspannung mit 100Hz an das Bauteil angelegt und zusammen mit einer am Referenzwiderstand (100Ω) abfallende Spannung am Oszilloskop aufgetragen.

Da sich Stromstärke und Spannung aufgrund des linearen Ohmschen Gesetzes zueinander proportional verhalten, sind die mit dem PicoScope aufgenommenen U_{ref} über U_{Diode} Schaubilder bis auf einen konstanten Streckungsfaktor in Y-Richtung äquivalent zu den tatsächlichen I_{Diode} über U_{Diode} Kennlinien.

Um für die untersuchten Dioden im Anschluss aus dem mit dem PicoScope erstellten Schaubild die Schwellenspannung abzulesen wurde ein gewöhnliches Lineal tangential an die Kennlinie angelegt und der Schnittpunkt von diesem mit der X-Achse notiert.

2.1 Silizium-Diode

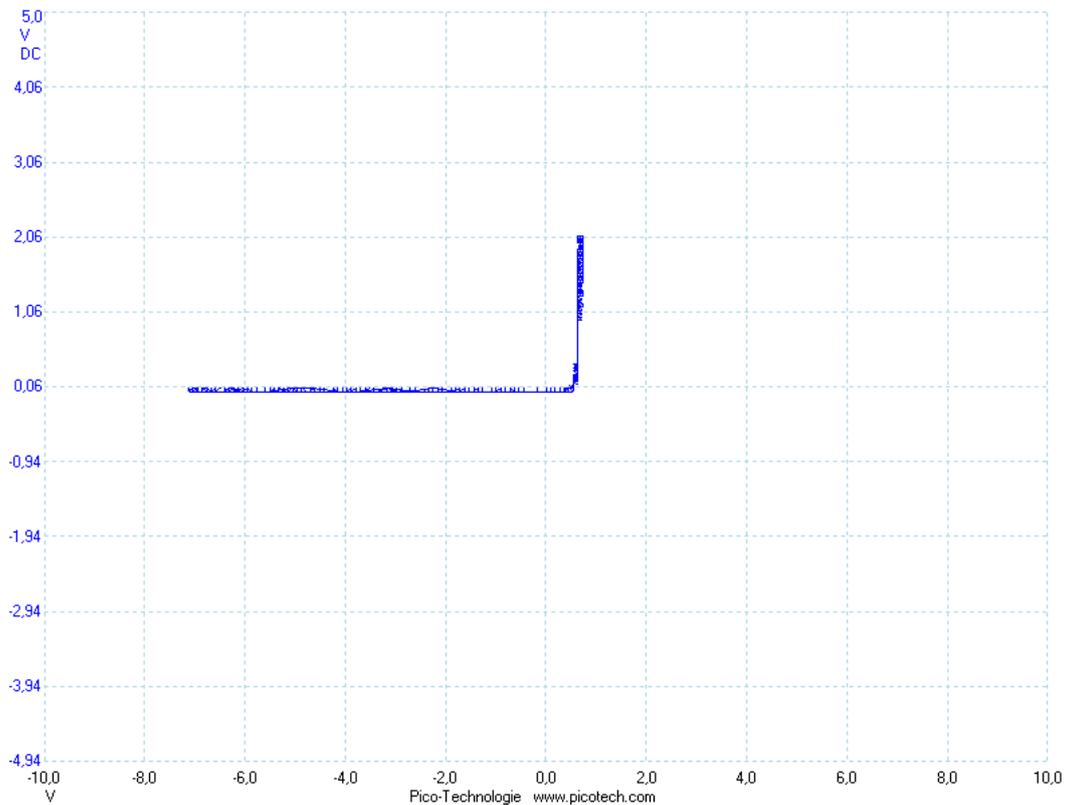


Abbildung 4: Kennlinie Silizium Diode

Für die Silizium-Diode ergab sich aus dem Schaubild die Schwellenspannung:

$$U_S = 0,661\text{V}$$

Ausgehend von einem Literaturwert (<http://www.elektronik-kompndium.de/sites/bau/0201113.htm>) für die Sperrspannung von Silizium-Dioden von etwa $U_S = 0,7\text{V}$ ergibt sich eine Abweichung von etwa 5,6%.

2.2 Germanium-Diode

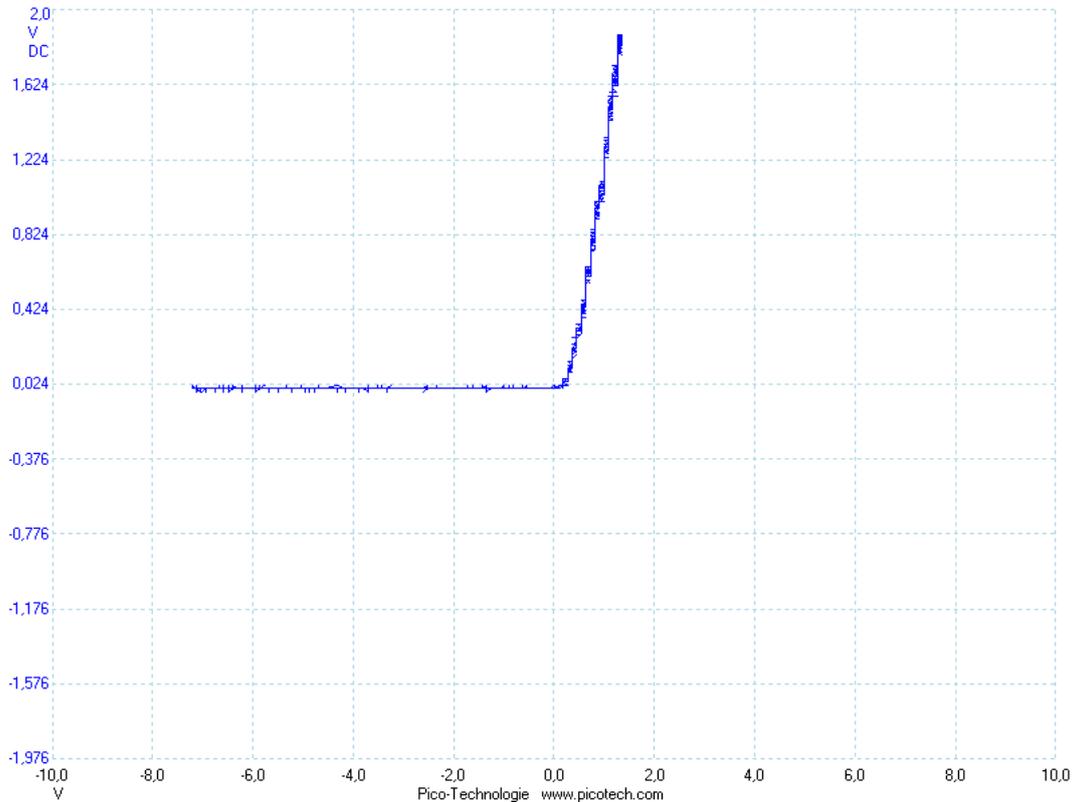


Abbildung 5: Kennlinie Germanium Diode

Mit der oben beschriebenen Messmethode erhielten wir für die Schwellenspannung der Germanium-Diode

$$U_S = 0,440V$$

Vergleicht man hier den gemessenen Wert mit dem entsprechenden Literaturwert $U_S = 0,3V$ erhält man eine sehr große Abweichung von etwa 46,7%.

Die grobe Abweichung ist hier nicht zwingend auf eine stark andere Dotierung des Halbleiters zurückzuführen sondern findet wohl einen großen Anteil in der sehr ungenauen Methode (Lineal an Bildschirm).

2.3 Zener Diode

Da die Zener-Diode in der Regel in Sperrrichtung betrieben wird, konnte für diesen Versuch sowohl die Sperrspannung als auch die Durchbruchspannung bestimmt werden. Für alle anderen Dioden lässt sich natürlich auch eine Durchbruchspannung finden, jedoch gehört ein solcher Versuch nicht zu den zerstörungsfreien Messverfahren.

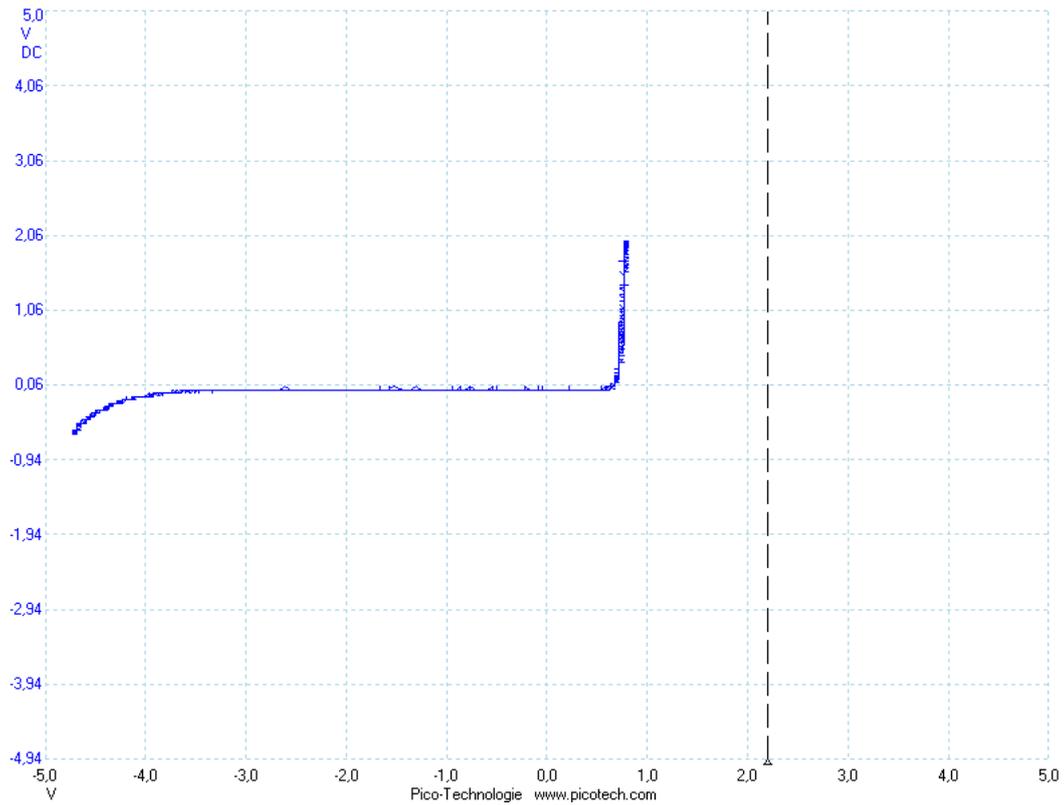


Abbildung 6: Kennlinie Zener Diode

Die aus dem Schaubild abgelesene Schwellenspannung der Zener-Diode ist

$$U_S = 0,743V$$

Für die Durchbruchspannung erhielten wir einen erwartungsgemäß viel höheren Spannungswert von

$$U_D = -4,212V$$

2.4 LED's

Im folgenden sollten die Schwellenspannungen verschiedenfarbiger LED's untersucht werden. Zu erwarten war, dass die Grenzspannung mit der Frequenz (=Farbe) des emittierten Lichts von niederfrequentem rot zu hochfrequentem grün steigt.

2.4.1 LED (rot)

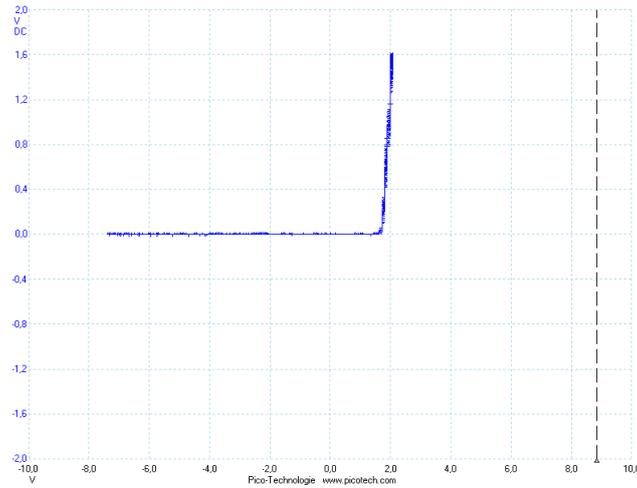


Abbildung 7: Kennlinie LED (rot)

Die gemessene Schwellenspannung ist

$$U_S = 1,771V$$

2.4.2 LED (orange)

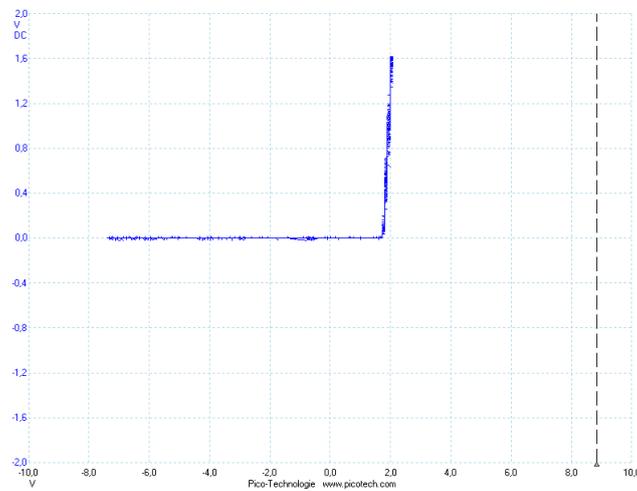


Abbildung 8: Kennlinie LED (orange)

Bei der orangen LED ergab sich im Vergleich zu der roten LED eine etwas größere Schwellenspannung von

$$U_S = 1,820V$$

2.4.3 LED (gelb)

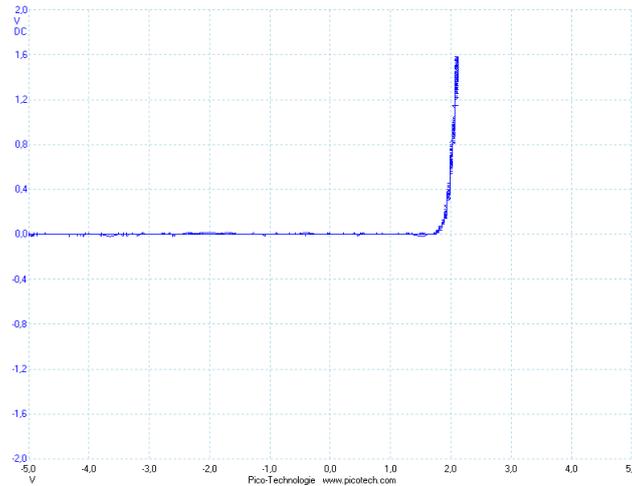


Abbildung 9: Kennlinie LED (gelb)

Auch die gelbe LED, die höherfrequentes Licht als die zuvor betrachtete rote und orange LED ausstrahlt weist in diesem Vergleich eine erhöhte Schwellenspannung auf

$$U_S = 1,908V$$

2.4.4 LED (grün)

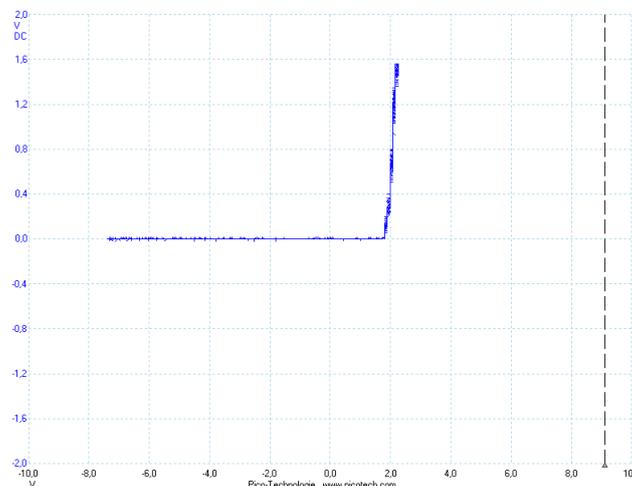


Abbildung 10: Kennlinie LED (grün)

Zuletzt hat auch die grüne LED, die in dieser Messreihe Photonen mit der größten Frequenz aussendet, die höchste Sperrspannung

$$U_S = 1,924V$$

Somit wurden unsere Annahme, dass die zum Auslösen von Photonen benötigte Spannung mit deren Frequenz steigt durch das Experiment bestätigt.

2.5 Varistor

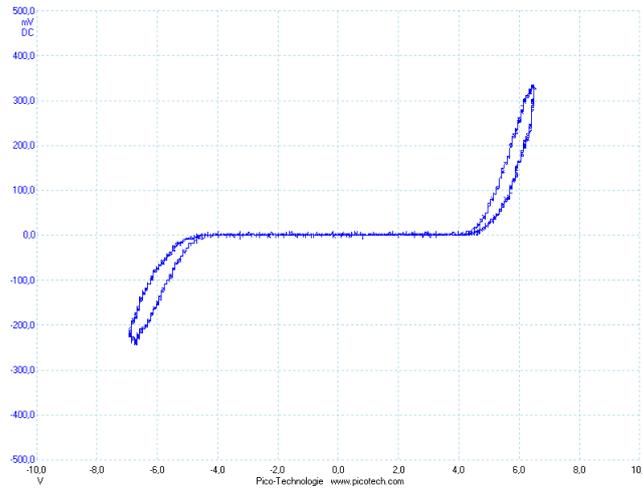


Abbildung 11: Kennlinie Varistor

Die qualitative Aussage des oben gezeigten Schaubildes ist gut zu erkennen. Es ist symmetrisch zum Ursprung. Daher kann man davon ausgehen, dass der Varistor unabhängig von der Einbaurichtung in einer Schaltung immer die selbe Kennlinie aufweist.

Auf die Aufweitung der Kennlinie in ihren Umkehrpunkten in "Schleifen" wird in der Betrachtung der Frequenzabhängigkeit elektrischer Bauteile im Anschluss eingegangen.

2.6 Photodiode

Photodioden haben ein großes Einsatzgebiet in der Sensorik. Der Versuch soll zeigen, dass bei zunehmenden Photoneneinfall der Widerstand der Photodiode sinkt und somit die Stromstärke (in unseren Schaubilder durch die Spannung am Referenzwiderstand auf der Y-Achse dargestellt) zunimmt.

2.6.1 unbeleuchtet

Wird die Photodiode nicht direkt beleuchtet und fängt diese folglich nur diffuses Umgebungslicht auf erhalten wir obige Kennlinie.

2.6.2 beleuchtet

Hier sieht man die Photodiodenkennlinie bei direkter Beleuchtung mittels einer Handtaschenlampe. Im Vergleich mit der Kennlinie im unbeleuchteten Zustand sieht man deutlich, wie der Diodenstrom zugenommen hat. Aufgrund des Ohmschen Gesetzes muss also der Widerstand des Bauteils gesunken sein.

Auch dieser Versuch bestätigt unsere Erwartungen.

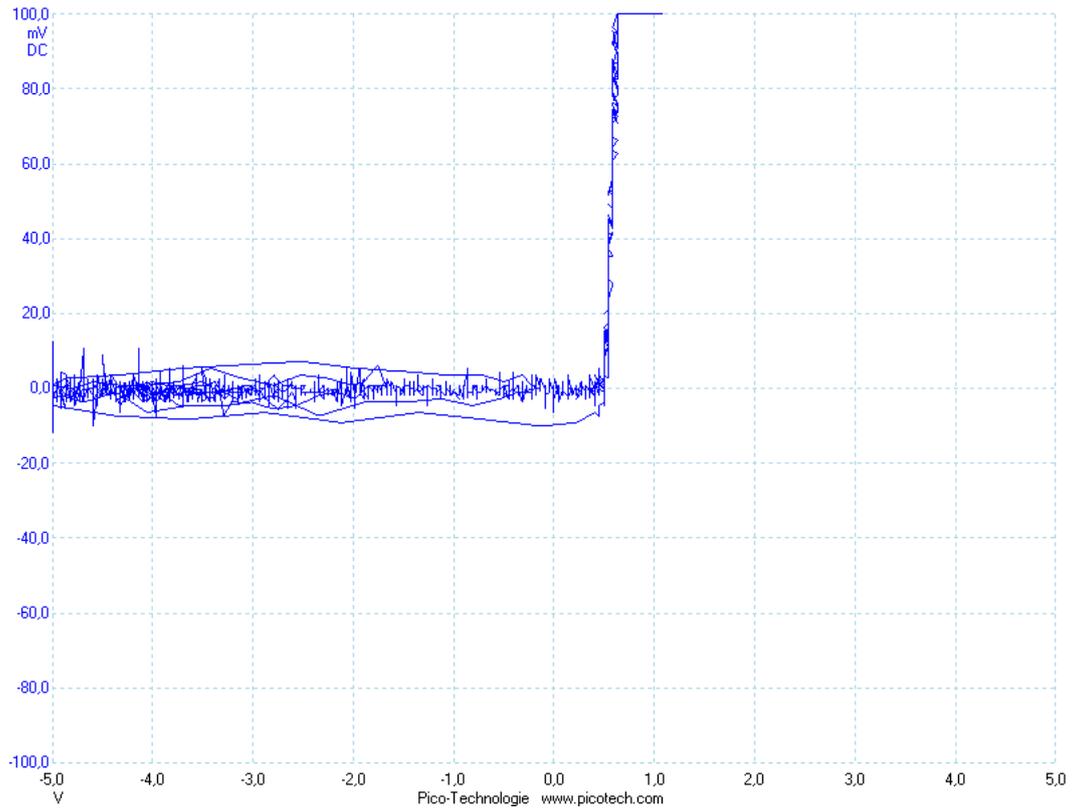


Abbildung 12: Kennlinie Photodiode - unbeleuchtet

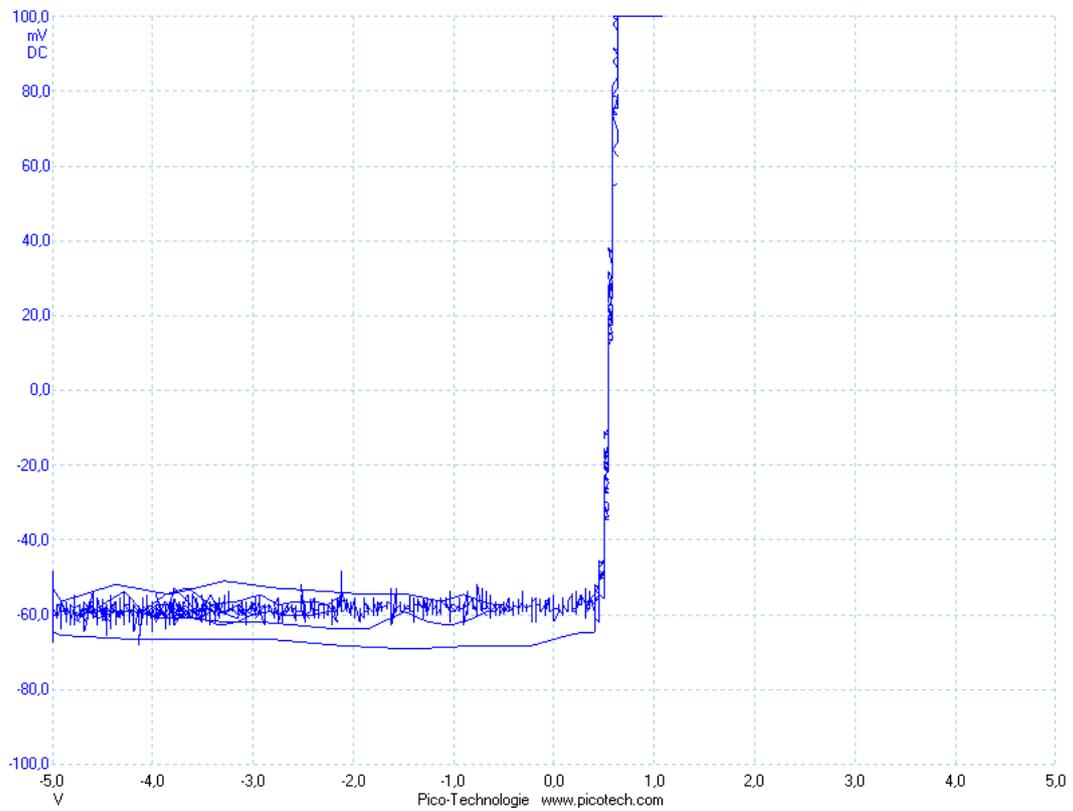


Abbildung 13: Kennlinie Photodiode - beleuchtet

2.7 Photowiderstand

Zuletzt sollte ein Photowiderstand untersucht werden. Wie auch bei der Photodiode ist bei einem Photowiderstand davon auszugehen, dass dieser mit zunehmender Beleuchtungsstärke einen niedrigeren Widerstandswert aufweist.

2.7.1 abgedeckt

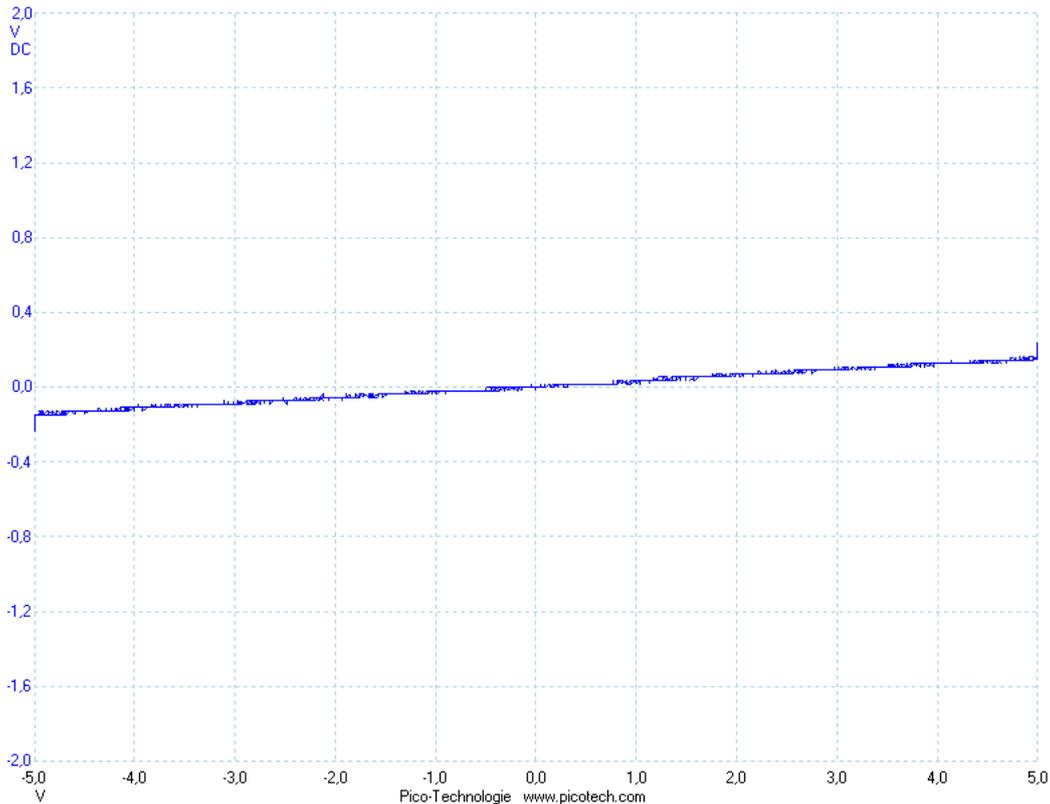


Abbildung 14: Kennlinie Photowiderstand abgedeckt

Zunächst wurde der Photowiderstand abgedeckt, sodass möglichst wenig Licht auf diesen traf. Wie erwartet führte dies zu einer flachen Kennlinie, d.h. niedrigen Stromstärken und somit einem hohen Widerstand.

Aus

$$R = \frac{U_p}{I_p}$$

folgt mit

$$I_p = \frac{U_{ref}}{R_{ref}}$$

$$R = \frac{U_p \cdot R_{ref}}{U_{ref}} = \frac{5V \cdot 100\Omega}{0,15V} \approx 3333\Omega$$

2.7.2 offen

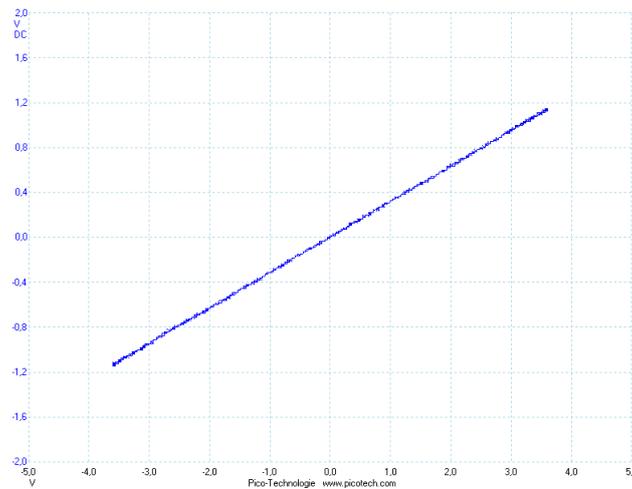


Abbildung 15: Kennlinie Photowiderstand bei Raumlicht

Man erkennt sofort, dass beim entfernen der Abdeckung des Photowiderstands die Kennlinie steiler wird. Es muss also der Widerstand des Bauteils gesunken sein. Aus dem Schaubild folgt durch ablesen:

$$R = \frac{U_p \cdot R_{ref}}{U_{ref}} = \frac{3V \cdot 100\Omega}{0,95V} \approx 316\Omega$$

2.7.3 beleuchtet

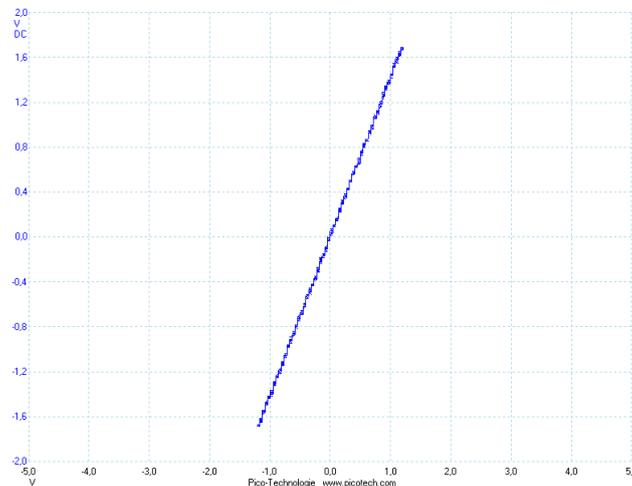


Abbildung 16: Kennlinie Photowiderstand bei Beleuchtung

Wird der Photowiderstand beleuchtet, so erkennt man die stärkste Steigung der drei aufgenommenen Schaubilder. auch hier ist der Widerstand verglichen mit dem Widerstand bei Raumlicht noch einmal beträchtlich gesunken:

$$R = \frac{U_p \cdot R_{ref}}{U_{ref}} = \frac{1V \cdot 100\Omega}{1,45V} \approx 67\Omega$$

Insgesamt ist also deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Beleuchtungsstärke der Widerstand eines Photowiderstandes abnimmt und das Experiment hat erneut unsere Erwartungen bestätigt.

Hochfrequenzverhalten

Alle bisherigen Versuche wurden bei einer Frequenz von etwa $f \approx 100\text{Hz}$ durchgeführt. Zwar ist dies kein hochfrequenter Bereich, doch bereits beim Varistor fiel auf, dass in den Umkehrpunkten die Kennlinie eine Ellipsenform annahm.

Um dieses Verhalten auf die hohe Frequenz der angelegten Sinusspannung zurückzuführen wurde gezielt eine sehr hohe Frequenz von etwa $f \approx 10\text{kHz}$ an der Silizium-Diode angelegt. Dabei ergab sich am PicoScope folgendes Bild:

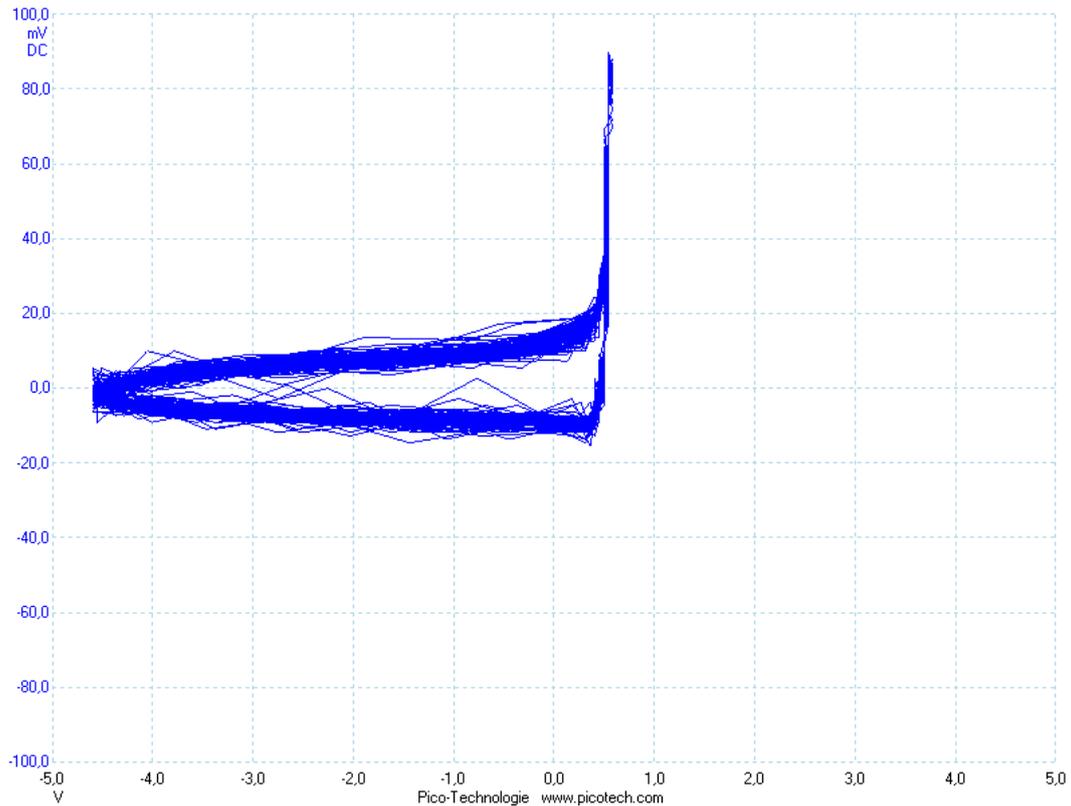


Abbildung 17: Kennlinie bei sehr hoher Frequenz (10kHz)

Man erkennt gut, dass die Frequenz so hoch ist, dass die Sperrschicht nie mehr wieder komplett aufgebaut werden kann und somit für den Diodenstrom fast durchgehend $I \neq 0$ gilt. Man kann daher daraus schließen, dass die Geschwindigkeit der Elektronen nicht beliebig groß werden kann, also begrenzt ist.

3 Phototransistor

In dem dritten Versuch sollte das Verhalten eines Phototransistors unter Einfluss verschiedener Beleuchtungsstärken untersucht werden. Dazu wurde wie in der vorherigen Aufgabe die Sperrspannung aus der vom PicoScope aufgezeichneten Kennlinie abgelesen.

Um stabilere Beleuchtungsstärken zu bekommen, als dies mit einer Taschenlampe in verschiedenen Abständen möglich ist, wurde eine regulierbare Experimentierleuchte verwendet, die in 0,5V Schritten mit einer höheren Spannung versorgt wurde. Aus der in der Vorbereitungshilfe vorhandenen Umrechnungstabelle konnten wir im Anschluss an die Messung den Zusammenhang zwischen der angelegten Spannung in Volt und der ausgesendeten Beleuchtungsstärke in Lux herstellen.

Vom Umgebungslicht abgeschottet konnte somit mit einer guten Genauigkeit notiert werden, zu welcher Beleuchtungsstärke die jeweils angezeigte Kennlinie des Phototransistors gehörte.

Aufgetragen über die Beleuchtungsstärke ergab sich für die durch den Phototransistor fließende Stromstärke folgendes Diagramm:

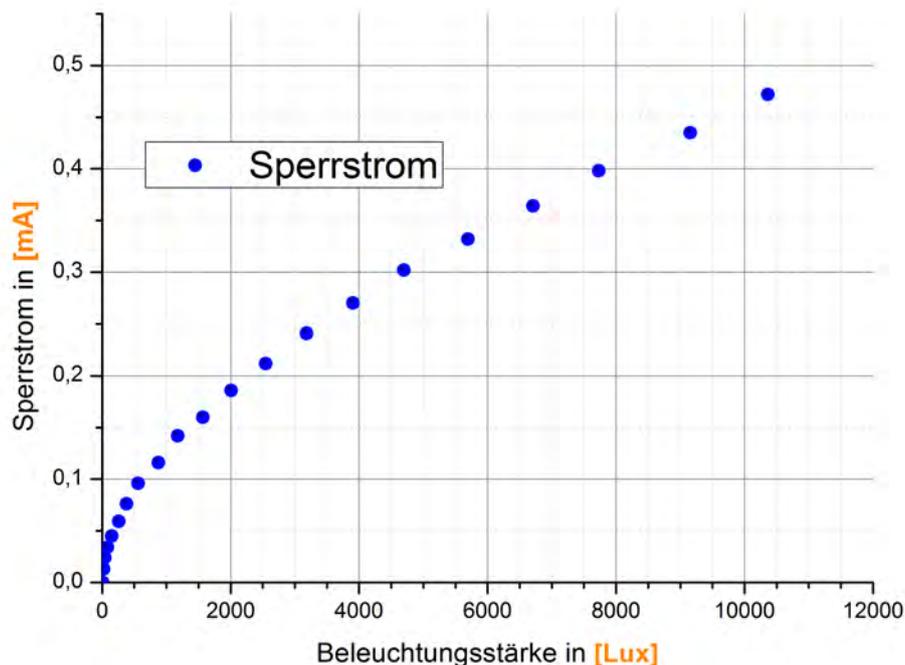


Abbildung 18: Sperrstrom über Beleuchtungsstärke

Zu beachten ist dabei, dass die Stromstärke nicht direkt gemessen wurde, sondern mithilfe der Spannungsmessung an dem in Reihe geschalteten Referenzwiderstands (100Ω) errechnet werden konnte.

4 Piezoelektrischer Effekt

In der Versuchsvorbereitung wurde einleitend bereits auf den piezoelektrischen Effekt eingegangen. In diesem Versuch galt es nun den Effekt und seine Umkehrung mithilfe eines Lautsprechers und des Sinusgenerators am PicoScope zu zeigen.

Um zu zeigen, dass bei Ausübung von Druck eine Spannung am Piezoelement abgreifbar ist, wurde das Piezoelement an das PicoScope angeschlossen und mehrmals hintereinander kräftig mit einem Finger auf das Plättchen geklopft. Das dabei sehr hohe Spannungen entstehen zeigt folgender Bildschirmausschnitt des PicoScopes:

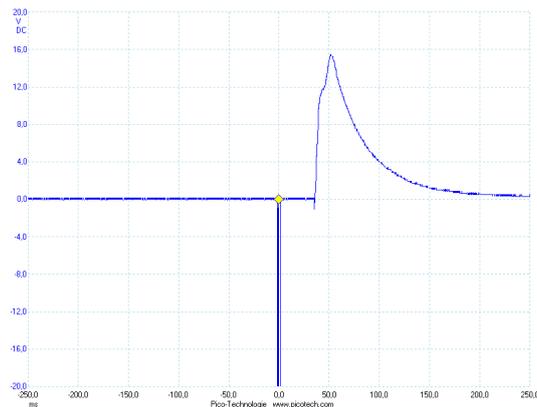


Abbildung 19: "Klopfspannung" am Piezoelement

Man sieht deutlich, dass die Spannung sogar deutlich aus dem Messbereich von maximal 20V herausschlägt. Somit wurde der Piezoeffekt eindrucksvoll mittels "Klopfen" nachgewiesen.

Als nächstes legten wir das Piezoelement auf einen Lautsprecher, der an einen Sinusgenerator angeschlossen war.

Auch hier entstanden Spannungen am Piezoelement, die nachfolgend als Bildschirmausschnitt am PicoScope vorlagen:

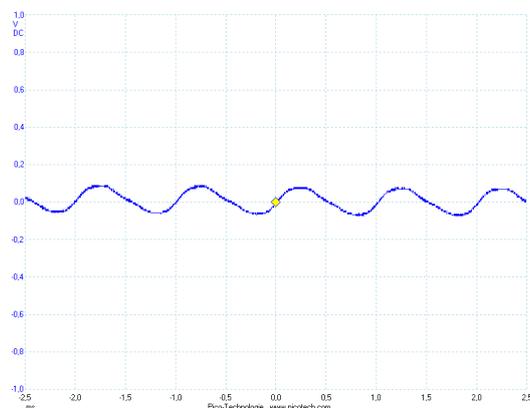


Abbildung 20: Druckinduzierte Sinusspannung

Die Kurve ist zwar nicht so schön wie ein richtiger Sinus, aber man erkennt diesen jedoch deutlich, wenn auch verzerrt.

Als letzten Teilversuch wurde das Piezoelement nun direkt an den Sinusgenerator angeschlossen. Unter der Voraussetzung, dass der Piezoeffekt umkehrbar ist, war zu erwarten, dass das Piezoelement als "Piezolautsprecher" fungieren würde.

Wir konnten in der Tat Sinusfrequenzen hören, jedoch ist das Piezoelement nicht als Lautsprecher geeignet und der Ton war unsauber.

5 Hochtemperatursupraleiter

In der letzten Aufgabe sollte das Widerstandsverhalten eines Hochtemperatursupraleiters bei Temperaturen zwischen $300K$ und $77K$ untersucht werden. Dazu wurde in ein Dewergefäß flüssiger Stickstoff ($77K$) gefüllt und ausgenutzt, dass sich oberhalb der Flüssigkeit in dem Behältnis ein Temperaturgradient einstellt.

Durch schrittweises Absenken in das Temperaturgefälle konnte so der Hochtemperatursupraleiter langsam abgekühlt werden und an der Vierleiterschaltung die Spannung bei einer eingestellten Stromstärke von $I = 2,5mA$ aufgenommen werden.

Prinzipiell war es vorgesehen die Temperatur anfangs um je $10K$ und später in $5K$ -Schritten zu senken. Dies erwies sich jedoch gerade am Ende als schwierig da insbesondere in dem Bereich in denen der Supraleiter tatsächlich in den Stickstoff eingetaucht wurde kleinste Höhenänderungen große Auswirkungen auf die Temperatur hatten. Aus diesem Grund war es nicht zu vermeiden, dass die Messpunkte teilweise um $1K - 2K$ beisammen bzw. etwas weiter auseinander lagen als vorgesehen.

Über das Ohmsche Gesetz konnte im Anschluss der Widerstand berechnet werden:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U}{0,0025A}$$

Temperatur	Spannung	Widerstand
Kelvin	Volt	Ohm
290,75	0,00514	2,055
273,15	0,00507	2,027
263,35	0,00501	2,003
253,15	0,00493	1,974
243,45	0,00487	1,949
233,15	0,00483	1,931
223,15	0,00477	1,907
213,15	0,00473	1,890
203,65	0,00468	1,872
193,15	0,00463	1,854
183,15	0,00457	1,827
168,15	0,00447	1,786
158,15	0,00441	1,764
146,15	0,00436	1,744
138,15	0,00432	1,728
128,15	0,00426	1,704

Temperatur	Spannung	Widerstand
Kelvin	Volt	Ohm
123,15	0,00418	1,673
118,15	0,00402	1,608
113,15	0,00396	1,583
108,15	0,00392	1,567
103,15	0,00388	1,551
93,15	0,00387	1,548
88,15	0,00386	1,544
83,15	0,00007	0,028
78,15	0,00004	0,016

Aus den obigen Messwerten wurde dann mit Origin folgendes Diagramm für den Widerstand über der Temperatur erstellt:

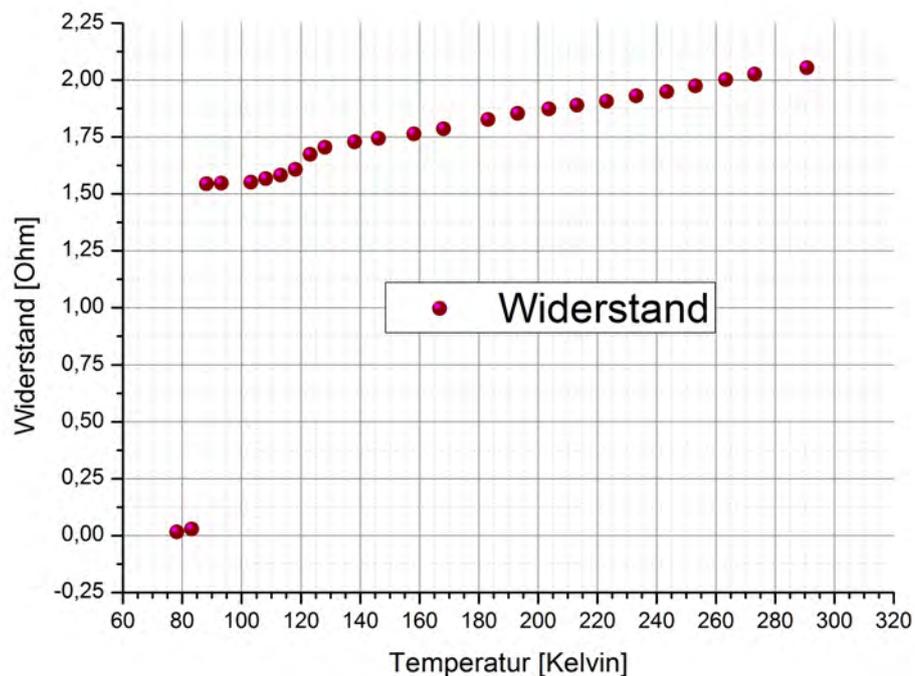


Abbildung 21: Widerstand über Temperatur

Man kann dem Schaubild entnehmen, dass die Sprungtemperatur, bei der der Leiter schlagartig supraleitend wird, bei einer Temperatur um etwa 85 Kelvin, also bei etwa -188°C liegt.