

Prak.: P2 Semester: SS20 Wochentag: Mo Gruppennr.: 02

Name: Bartnick Vorname: Kai

Name: Brandes Vorname: Jan

Emailadresse(n): _____

Versuch: Eigenschaften elektrischer Bauelemente P2-51 Fehlerrech.: Nein

Betreuer: Adrian Kriewitz Durchgeführt am: 13.07.20

Wird vom Betreuer ausgefüllt.

1. Abgabe am: 20.7.20

Rückgabe am: 20.7.20 Begründung:

- Kleinigkeit sieht sich Protokoll

evtl. Musterprotokoll

2. Abgabe am: 23.07.20

Ergebnis: (+) / 0 / -

Fehlerrechnung: Ja / (Nein)

Datum: 5.8.2020

Handzeichen: 

Bemerkungen:

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

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

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

Stichworte:

Wheatstonesche Brückenschaltung;

Bändermodell: Metall, Isolator, Halbleiter; Eigenleitung, Dotierung; p-n-Übergang, Diode; Diodenkennlinie, Photodiode, 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 einer Photodiode unter Einfluss verschiedener Beleuchtungsstärken.

Stellen Sie die Kennlinie einer Photodiode bei verschiedenen Beleuchtungsstärken dar und entnehmen Sie dieser jeweils den Sperrstrom. Verwenden Sie hierzu Schaltung (2) bei 10 Hz aus der vorherigen Aufgabe sowie die regulierbare Experimentierleuchte mit Photodioden-Aufsatz. Beginnen Sie bei einer Lampenspannung von 2V 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 ($I_{\text{const}}=63\text{mA}$) 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. Für die Beurteilung der Sprungtemperatur beachten Sie, dass am Ort von Temperatursensor und Supraleiter ein hoher Temperaturgradient vorliegt.

Achtung:

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

Zubehör:

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

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

USB-Oszilloskop (PicoScope 2000) mit Computer;

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

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

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

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

Taschenlampe zur Beleuchtung;

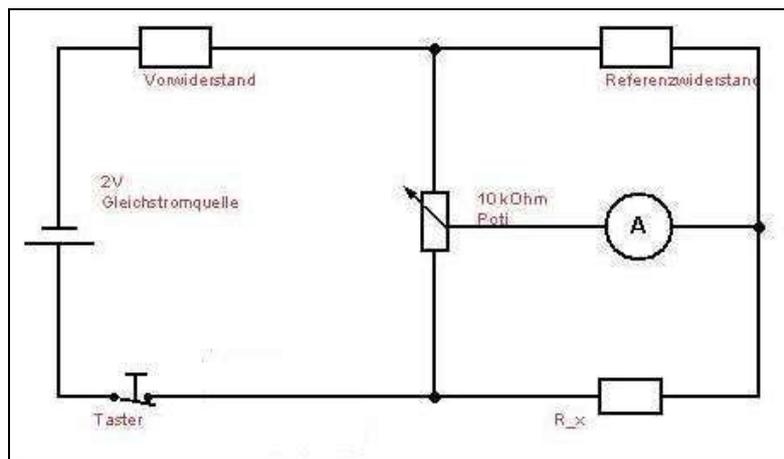
Experimentierleuchte mit Photodioden-Aufsatz und Netzgerät (EA-PS-2016);

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

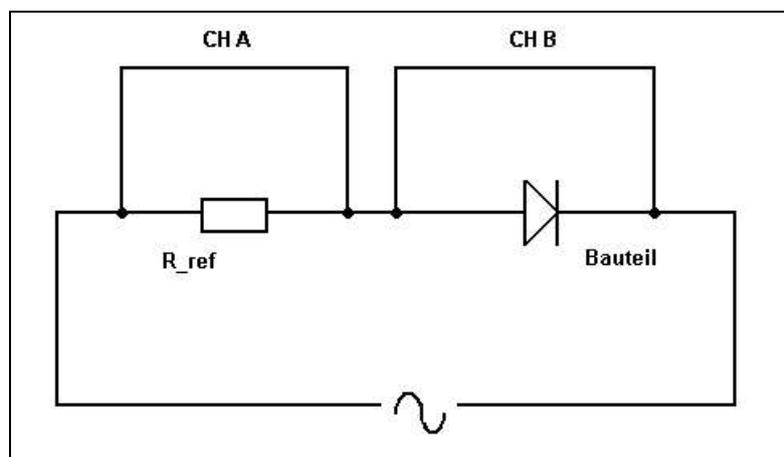
Supraleiter in Gehäuse mit Absenkvorrichtung, Dewargefäß,

Vierleitersmessschaltung mit Konstantstromquelle ($I_{\text{const}}=63\text{mA}$) und Steckernetzgerät;

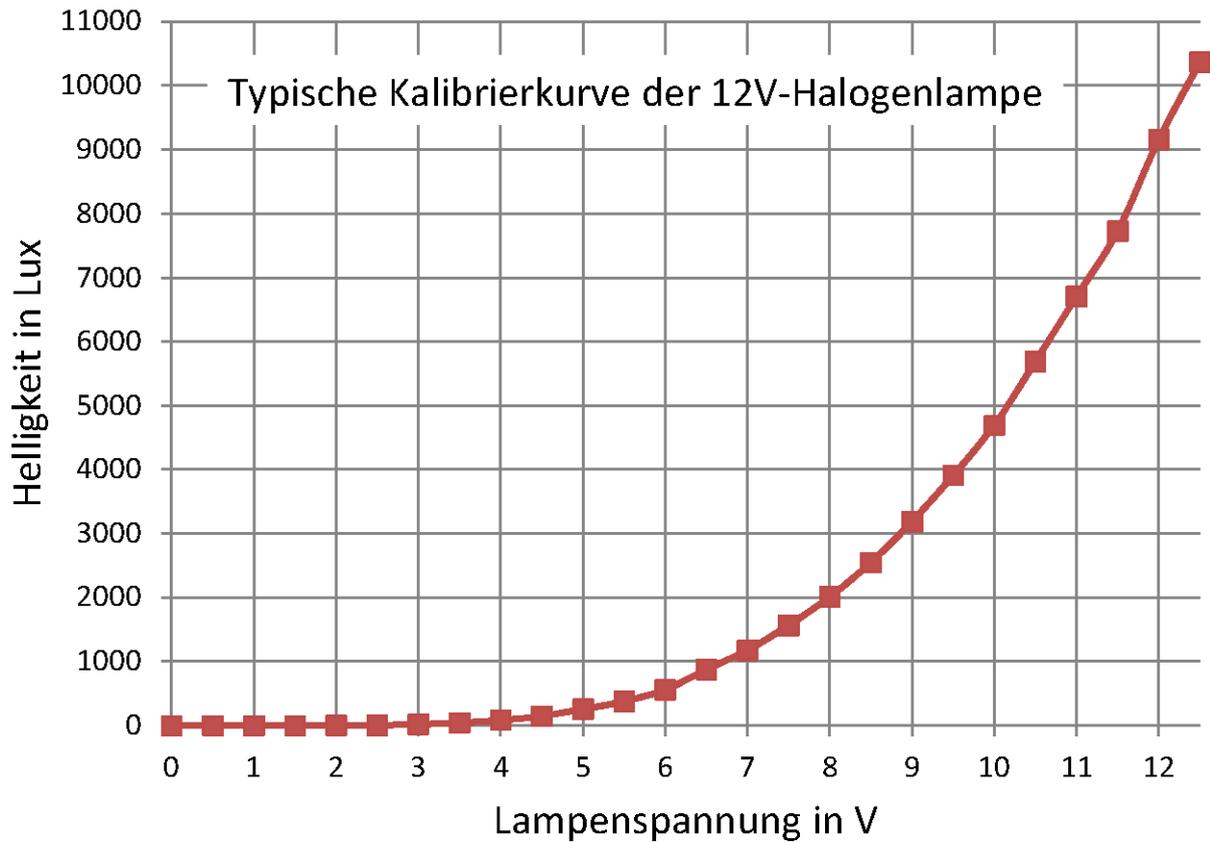
Flüssiger Stickstoff (LN_2).

Schaltskizzen der Versuchsboxen:

Schaltung (1): Wheatstonesche Brückenschaltung



Schaltung (2): Kennlinienaufnahme



Zu Aufgabe 3: (Photodiode)

Linearisierungstabelle: (typ. Werte)

<u>Temperatur</u>	<u>Anzeige</u>	<u>Temperatur</u>	<u>Anzeige</u>	<u>Temperatur</u>	<u>Anzeige</u>	<u>Temperatur</u>	<u>Anzeige</u>
-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*

P 2 - 5 1

A1

Referenzwiderstand: $R = 1 \text{ k}\Omega$

$U = 1,9 \text{ V}$

$R_{\text{pot}} = 10 \text{ k}\Omega$

NTC

$T/^\circ\text{C}$	R k Ω	PT 100 R k Ω
26	8,19	
30	8,06	
40	7,46	
50	7,46 7,405	
60	6,99	1,05
70	6,6	1,07
80	6,19	1,085
90	5,71	1,12
100	5,185	1,16
110	4,57	1,17
120	4,04	1,19
130	3,615	1,21
140	3,18	1,23
150	2,92	1,255
160	2,63	1,28
170	2,41	1,30
180	2,185	1,32
190	1,84	1,345
200	1,63	1,37

A2

Si	U_0 /mV	Farb	U_{in} V
Si	606	rot	1,69
Ge	502 602	rot	1,69
Zed	703,6	grün	1,789
rd	11,85 V \rightarrow 11,8 V	gelb	1,814
Polodiode	633 mV	orange	1,735

A3

U_1	U_0 /mV
1	316,6
3	375,9
5	407,4
7	475,9
9	
9	502,0
11	520,17
13	537,8

A_5	$T/^\circ C$	I / mA
	25	0,1825
	20	0,1800
	10	0,1750
	0	0,1707
	-10	0,1665
	-20	0,1626
	-30	0,1598
	-40	0,1559
	-50	0,1537
	-60	0,1514
	-70	0,1473
	-80	0,1448
	-90	0,1400
	-100	0,1352
	-110	0,1278
	120	0,1200
	130	0,1125
	140	0,1050
	150	0,0975
	160	0,0900
	170	0,0825
	180	0,0750
	190	0,0675
	200	0,0600

$-T/^\circ C$	$10^{-4} A$
118	0,933
114	0,800
110	0,667
108	0,533
106	0,400
104	0,267
102	0,133
100	0,000
98	-0,133
96	-0,267
94	-0,400
92	-0,533
90	-0,667
88	-0,800
86	-0,933
84	-1,067
82	-1,200
80	-1,333
78	-1,467
76	-1,600
74	-1,733
72	-1,867
70	-2,000
68	-2,133
66	-2,267
64	-2,400
62	-2,533
60	-2,667
58	-2,800
56	-2,933
54	-3,067
52	-3,200
50	-3,333
48	-3,467
46	-3,600
44	-3,733
42	-3,867
40	-4,000
38	-4,133
36	-4,267
34	-4,400
32	-4,533
30	-4,667
28	-4,800
26	-4,933
24	-5,067
22	-5,200
20	-5,333
18	-5,467
16	-5,600
14	-5,733
12	-5,867
10	-6,000
8	-6,133
6	-6,267
4	-6,400
2	-6,533
0	-6,667
-2	-6,800
-4	-6,933
-6	-7,067
-8	-7,200
-10	-7,333
-12	-7,467
-14	-7,600
-16	-7,733
-18	-7,867
-20	-8,000
-22	-8,133
-24	-8,267
-26	-8,400
-28	-8,533
-30	-8,667
-32	-8,800
-34	-8,933
-36	-9,067
-38	-9,200
-40	-9,333
-42	-9,467
-44	-9,600
-46	-9,733
-48	-9,867
-50	-10,000
-52	-10,133
-54	-10,267
-56	-10,400
-58	-10,533
-60	-10,667
-62	-10,800
-64	-10,933
-66	-11,067
-68	-11,200
-70	-11,333
-72	-11,467
-74	-11,600
-76	-11,733
-78	-11,867
-80	-12,000
-82	-12,133
-84	-12,267
-86	-12,400
-88	-12,533
-90	-12,667
-92	-12,800
-94	-12,933
-96	-13,067
-98	-13,200
-100	-13,333
-102	-13,467
-104	-13,600
-106	-13,733
-108	-13,867
-110	-14,000
-112	-14,133
-114	-14,267
-116	-14,400
-118	-14,533
-120	-14,667
-122	-14,800
-124	-14,933
-126	-15,067
-128	-15,200
-130	-15,333
-132	-15,467
-134	-15,600
-136	-15,733
-138	-15,867
-140	-16,000
-142	-16,133
-144	-16,267
-146	-16,400
-148	-16,533
-150	-16,667
-152	-16,800
-154	-16,933
-156	-17,067
-158	-17,200
-160	-17,333
-162	-17,467
-164	-17,600
-166	-17,733
-168	-17,867
-170	-18,000
-172	-18,133
-174	-18,267
-176	-18,400
-178	-18,533
-180	-18,667
-182	-18,800
-184	-18,933
-186	-19,067
-188	-19,200
-190	-19,333
-192	-19,467
-194	-19,600
-196	-19,733
-198	-19,867
-200	-20,000

Entwickeln
198,8

Feld
kolonne

llh

Inhaltsverzeichnis

0	Aufgaben und Mitschriebe aus dem Praktikum	1
1	Temperaturabhängigkeit von Widerständen	7
2	Kennlinien	12
2.1	Kennlinien und Schwellenspannung verschiedener Bauelemente	15
2.1.1	Silizium-Diode	15
2.1.2	Germanium-Diode	15
2.1.3	Zener-Diode	16
2.1.4	Varistor	16
2.1.5	Photodiode	17
2.1.6	Photowiderstand	17
2.1.7	LED	18
2.2	Frequenzabhängigkeit verschiedener Bauelemente	19
3	Die Photodiode	20
4	Piezoelektrischer Effekt	22
5	Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters	24
6	Fazit	26
7	Anhang	27
	Literaturverzeichnis	29

1. Temperaturabhängigkeit von Widerständen

Ein wichtiger Aspekt bei der Untersuchung von elektrischen Bauelementen sind die Eigenschaften der verwendeten Leitermaterialien. Zur Bestimmung einiger Eigenschaften wird deshalb im ersten Versuchsteil die Temperaturabhängigkeit verschiedener Widerstände untersucht.

Um diese zu verstehen ist es nützlich ein quantenmechanisches Modell der Stromleitung zu verwenden. In einzelnen Atomen befinden sich die Elektronen auf diskreten Energieniveaus, die untereinander bestimmte Abstände haben. Kommen jedoch andere Atome hinzu, kommt es durch Wechselwirkungen zwischen den Atomen zu einer Aufspaltung eines Energieniveaus in mehrere dicht benachbarter Energieniveaus.

Im Grenzfall vieler Atomen kann die Aufspaltung näherungsweise in ein kontinuierliches Spektrum überführt werden, in dem sich die Elektronen bewegen. Trotzdem können zwischen einzelnen Niveaugruppen noch nicht verschwindende Energielücken entstehen. Diese Näherung wird gemeinhin als Bändermodell bezeichnet: Die Elektronenenergien befinden sich in einem Energiespektrum welches aus kontinuierlichen Energiebändern, getrennt durch Bandlücken also Energien, für die kein elektronischer Zustand existiert, besteht.

Trotzdem bleibt das Pauli-Prinzip gültig, das heißt die Anzahl der Elektronen, die sich gleichzeitig in einem Energie-Band befinden können ist beschränkt. Um elektrischen Strom leiten zu können, müssen die Elektronen Zustandswechsel ausführen können, andernfalls würde sich nichts ändern. Insbesondere heißt das, dass leitende Energiebänder nicht voll besetzt sein können. Somit lässt sich nun leicht die verschiedenen Leitfähigkeiten unterschiedlicher Materialien erklären.

Dazu zeigt Abbildung 1.1 schematisch die Elektronenenergien im Bändermodell für Metalle, Halbleiter und Isolatoren.

Die Energie des höchsten besetzten elektronischen Zustands im Grundzustand ist per Definition durch die Fermi-Energie E_F beschränkt. Für die Leitung ist im wesentlichen das Energie-Band direkt unter der Fermi-Energie, das heißt das oberste besetzte Band relevant, dieses wird auch Valenzband genannt.

Bei Metallen ist das Valenzband nicht vollständig besetzt (vgl. Abb. 1.1 links). Somit gibt es oberhalb der besetzten Zustände ohne Energielücke weitere Zustände, die für einen elektrischen Leitvorgang zur Verfügung stehen. Der Widerstand entsteht also nur durch Stöße im Leiter, zum Beispiel mit den Atomrümpfen. Da die thermische Bewegung und damit auch die Stoßwahrscheinlichkeit mit der Temperatur zunimmt, gilt selbiges auch für den elektrischen Widerstand. Im Rahmen einer Taylorreihenentwicklung gilt für viele Metalle (in hinreichend kleinen Temperaturbereichen) für den Widerstand R in der Abhängigkeit der Temperatur T :

$$R(T) = R_0 + c \cdot T \tag{1.1}$$

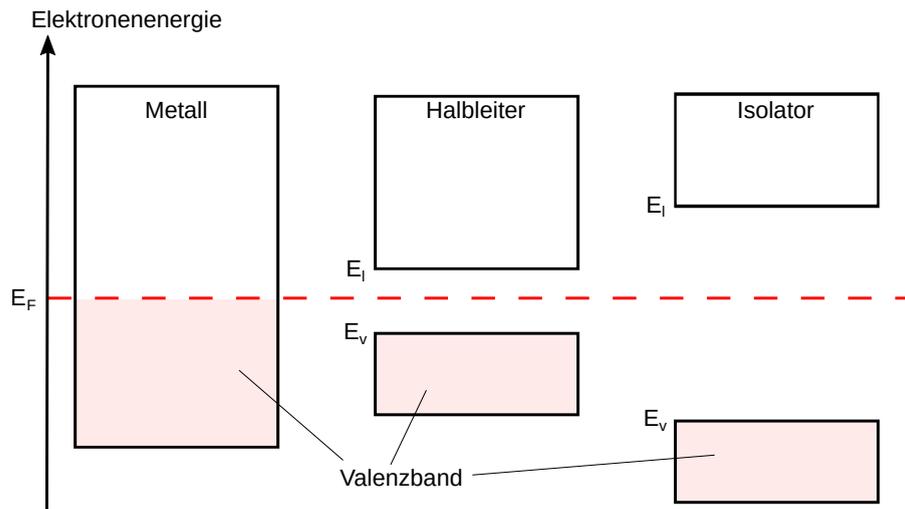


Abbildung 1.1: Bändermodell zur Erklärung der Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit (besetzte Zustände rot, unbesetzte weiß) (nach [vor])

Bei Isolatoren hingegen ist die Energielücke $\Delta E = E_l - E_v$ zwischen dem Valenzband und dem ersten freien Band (dem Leitungsband) sehr groß. Somit ist es nur sehr schwer möglich, Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband anzuregen. Da sich somit quasi keine Elektronen in einem Band mit freien Zuständen befinden, kann auch keine elektrische Leitung stattfinden, das Material wirkt als Isolator.

Bei Halbleitern hingegen ist die Energielücke $\Delta E = E_l - E_v$ deutlich kleiner. Typischerweise ist $\Delta E \approx 1 \text{ eV}$. Nach der Boltzmannverteilung gilt nun für das Verhältnis zwischen der Zahl der Elektronen bei Energie E_l und E_v :

$$\frac{n_l}{n_v} = e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}} \quad (1.2)$$

Bei Raumtemperatur ist $k_B T \approx 25 \text{ meV}$ eine Anregung in den Leitungszustand ist also sehr unwahrscheinlich. Für sehr hohe Temperaturen wird der Halbleiter so jedoch leitend. Eine weitere Möglichkeit um die Leitfähigkeit zu erhöhen, stellt die Dotierung dar (vgl. insbesondere Kapitel 2). Bei dieser werden gezielt Fremdatome in die Halbleiterstruktur eingebracht. Dies sorgen für zusätzliche Energieniveaus zwischen Valenzband und Leitungsband und erhöhen so die Chance für eine Anregung von Elektronen ins Leitungsband. Weiterhin gilt jedoch für die Zahl der Elektronen n im Leitungsband und damit auch für die Leitfähigkeit σ näherungsweise:

$$\sigma \propto n \propto e^{-\frac{\Delta E'}{k_B T}} \quad (1.3)$$

Für den Widerstand R folgt also unter Einführung zu messender Konstanten a und b :

$$R \propto \frac{1}{\sigma} \propto e^{\frac{\Delta E'}{k_B T}} \Rightarrow R = a \cdot e^{\frac{b}{T}} \quad (1.4)$$

Beide Verhaltensweisen von Materialien werden experimentell überprüft. Dazu wird ein entsprechender Widerstand in einem Ofen erwärmt oder abgekühlt. Währenddessen wird in 10°C Schritten der Widerstand bestimmt. Um die Messung möglichst exakt zu gestalten wird auf die Wheatstonesche Brückenschaltung zurückgegriffen. Abbildung 1.2 zeigt den verwendeten experimentellen Aufbau.

Zur Bestimmung des Widerstandes im Ofen, wird das Potentiometer jeweils so eingestellt, dass der Strom durch das Amperemeter 0 ist. Dies kann sehr genau gemessen werden, da

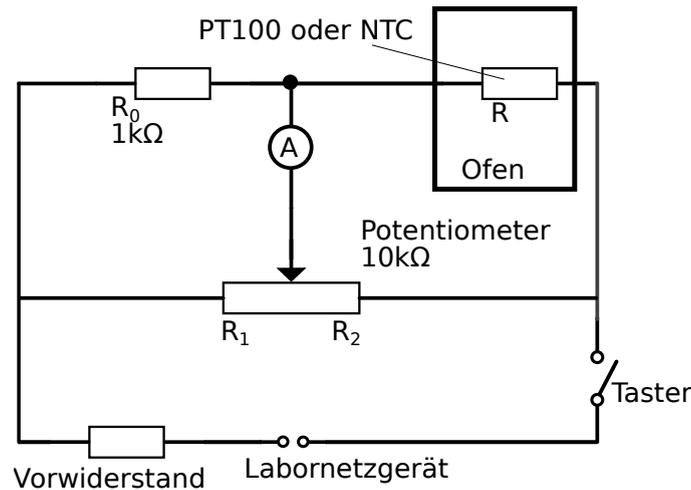


Abbildung 1.2: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeit von Widerständen

für $I = 0$ insbesondere der Innenwiderstandes des Potentiometers und relative Fehler keine Rolle spielen. Verschwindet der Strom, so gilt nach Maschen und Knotenregel:

$$\begin{aligned} I_u \cdot R_1 &= I_o \cdot R_0 \\ I_u \cdot R_2 &= I_o \cdot R \\ \implies \frac{R_2}{R_1} &= \frac{R}{R_0} \end{aligned}$$

Unter Berücksichtigung von $R_1 + R_2 = R_{\text{Pot}} = 10 \text{ k}\Omega$ folgt also für den zu messenden Widerstand R :

$$R = 1 \text{ k}\Omega \cdot \frac{R_2}{10 \text{ k}\Omega - R_2} \quad (1.5)$$

Durch den Taster wird gewährleistet, dass nur während des Ablesens des Amperemeters Strom durch die Schaltung fließt. Dies verhindert, dass sich der Widerstand R durch die in ihm disipierte Leistung zu stark aufwärmt. Der Vorwiderstand dient der Strombegrenzung in der Messapparatur.

Der Ofen beginnt bei Raumtemperatur (25°C) und wird elektrisch bis auf 200°C aufgeheizt. Während des Aufheizvorgang wird durch kontinuierliches nachregeln des Potentiometers der Widerstand des Widerstandes NTC (Negative Temperatur Coefficient) in 10°C -Schritten bestimmt. Wie der Name sagt, nimmt der Widerstand mit der Temperatur ab, also sollt $R(T)$ dem Verlauf aus 1.4 genügen.

Aus den abgelesenen Potentiometer-Werten wird mittels Gleichung 1.5 der Widerstand bestimmt (vgl. Tabelle 7.1 im Anhang). Abbildung 1.3, Seite 10, zeigt die gemessenen Widerstandswerte zusammen mit einer Anpassung an den theoretisch erwarteten Verlauf.

Der Verlauf passt im wesentlichen zu den gemessenen Daten, die vermutete Form scheint also durchaus zutreffend. Es lassen sich mehrere Ursachen für die dennoch auftretenden Abweichungen vermuten. Einerseits kann trotz der Verwendung des Tasters nicht ganz ausgeschlossen werden, dass der Strom den NTC zusätzlich erwärmt. Weiter wären Temperaturgradienten im Ofen denkbar, da die Temperaturmessung nicht direkt am Widerstand erfolgt, würde auch dies eine Abweichung erklären. Weiterhin ist zu beachten, dass der Widerstand R_2 nur am Potentiometer abgelesen wird, diese Methode ist relativ ungenau. Für die Anpassung ergibt sich:

$$R(T) = 2,527 \Omega \cdot \exp\left(\frac{2253 \text{ K}}{T}\right) \quad (1.6)$$

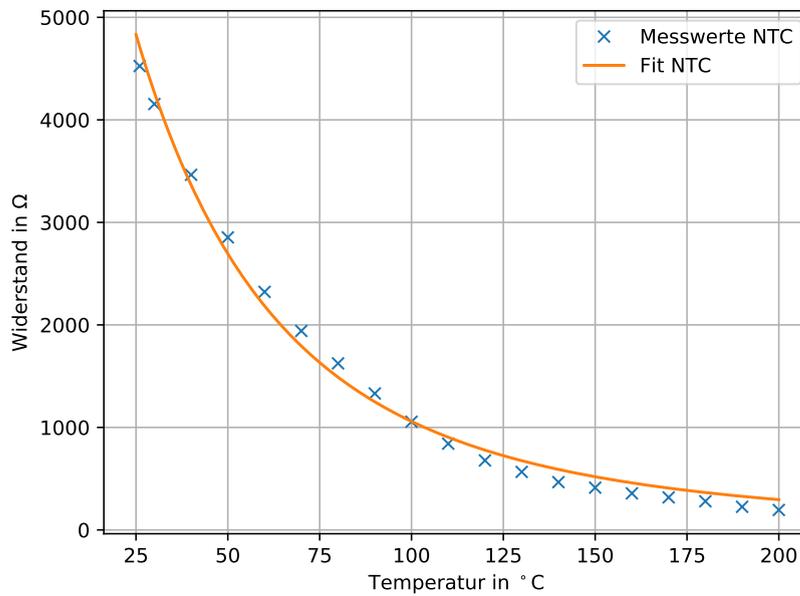


Abbildung 1.3: Temperaturabhängigkeit des Widerstandes NTC

Dabei ist die Temperatur, wie in der Boltzmannverteilung in Kelvin einzusetzen.

Ein solcher NTC-Widerstand lässt sich vielseitig einsetzen. Aufgrund der ausgeprägten Temperaturabhängigkeit um mehr als eine Größenordnung im vermessenen Temperaturbereich eignet sich dieser insbesondere direkt zur Temperaturmessung, in dem der Widerstand unter Messung des Stromes an eine konstante Spannungsquelle angeschlossen wird. Insbesondere im Bereich zwischen 25 und 100 °C scheint die Steigung steil genug für eine gute Temperaturmessung.

Auch zur Strombegrenzung lässt sich ein NTC einfach benutzen. Dazu wird dieser parallel zum schützenden Bauteil geschaltet. Ist nun die Spannung so hoch, dass der Strom durch das Bauteil zu groß werden würde, würde auch am NTC viel Leistung abfallen, dieser erwärmt sich und der Widerstand sinkt. Somit geht der größte Teil des Stromes durch den NTC, der Strom im Bauteil ist begrenzt.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist die Füllstandhöhenmessung von Flüssigkeiten. Dies funktioniert beispielsweise durch anlegen einer Spannung an den NTC unter Messung des Stromes, dadurch erwärmt sich der NTC. Sobald er jedoch mit der Flüssigkeit in Berührung kommt, kühlt er ab, der Widerstand steigt, Strom und Heizleistung sinken, der Füllstand kann also gemessen werden.

Während des Abkühlens des Ofens wird die gleiche Messung für den Widerstand PT100 im Temperaturbereich zwischen 200 °C und 60 °C durchgeführt. Per DIN-Norm ist der PT100 ein Widerstand mit positiven Temperaturkoeffizient (d.h. der Widerstand nimmt mit der Temperatur zu), der bei 0 °C einen Widerstandswert von 100 Ω aufweist und pro Kelvin um 0,385 % ansteigt (Quelle [vor]). Aus den Potentiometerwerten wird mittels Gleichung 1.5 wieder der Widerstand R bestimmt (vgl. Tabelle 7.1 im Anhang). Eine Auftragung des Widerstandes über der Temperatur ergibt Abbildung 1.4, Seite 11.

Eine lineare Anpassung an den Verlauf gemäß Gleichung 1.1 liefert die Ausgleichsgerade mit:

$$R(T) = 0,296 \frac{\Omega}{^{\circ}\text{C}} T + 99,3 \Omega = 99,3 \Omega \left(1 + 0,0030 \frac{1}{^{\circ}\text{C}} T \right) \quad (1.7)$$

Dies passt im wesentlichen gut zu den Messwerte, die oben diskutieren Fehlerquellen

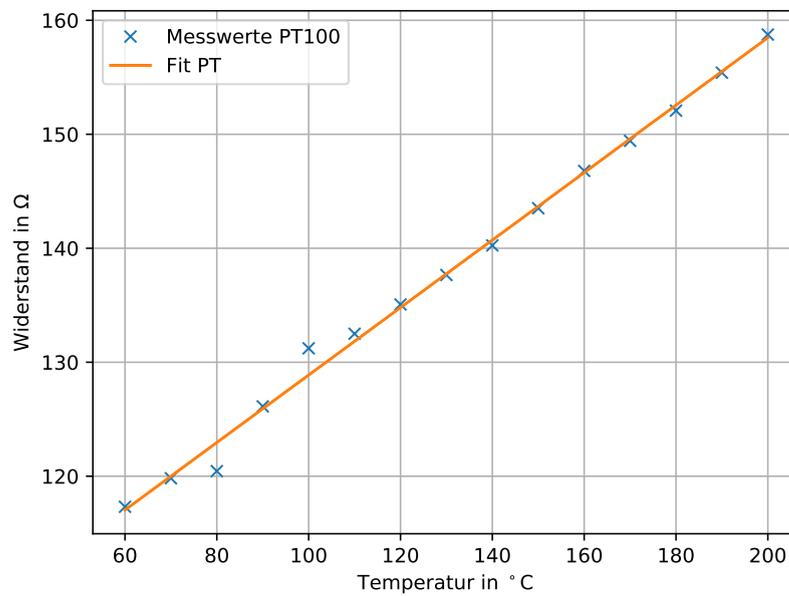


Abbildung 1.4: Temperaturabhängigkeit des Widerstandes PT100

erscheinen als Erklärung für die auftretenden Abweichungen plausibel.

Insbesondere der Widerstand für $T = 0^\circ\text{C}$ wird mit einer relativen Abweichung von 0,7% sehr genau getroffen. Für die Steigung ergibt sich mit einer relativen Abweichung von 22% ein großer Fehler. Dieser lässt sich neben Produktionsschwankungen des Widerstands auch mit den diskutierten Messungenauigkeit erklären.

Auch ein Widerstand mit positivem Temperaturkoeffizient lässt sich vielseitig einsetzen. Insbesondere die Linearität des Temperaturverlaufs vereinfacht viele Dinge. Wird ein PT100 zur Temperaturmessung verwendet, ist die Genauigkeit aufgrund der geringen Steigung wahrscheinlich geringer, allerdings ist die Umrechnung auch deutlich einfacher, insbesondere wenn die Temperatur beispielsweise in eine elektrische Schaltung ohne Elektronik eingehen soll.

2. Kennlinien

In diesem Versuch sollen die Kennlinien von verschiedenen Dioden aufgenommen und untersucht werden.

Dazu werden zuerst einige theoretische Erklärungen zu Dioden und deren Kennlinie vorangestellt.

Eine Diode ist grundsätzlich ein elektrisches Bauelement, welches Strom nur in eine Richtung durchlässt.

Dieser Effekt liegt dem Aufbau einer solchen Diode zugrunde. In der Regel besteht sie aus einem Verbund von n-dotierten und p-dotierten Halbleiter.

Ein n-dotiertes Material ist meist ein bewusst verunreinigter Siliziumkristall, als Verunreinigung lässt sich beispielsweise Phosphor wählen. Phosphor ist fünfwertig und Silizium vierwertig, weswegen das fünfte Valenzelektron keine Bindung mit dem Silizium eingehen kann und es dadurch als quasi freies Elektron fungiert.

Deswegen kann ein n-dotierte Material auch prinzipiell elektrischen Strom leiten.

Ein p-dotiertes Material ist dem n-dotierten „entgegengesetzt“, bei diesem liegt kein überschüssiges Elektron, sondern ein „Elektronenloch“ vor. Durch die Verunreinigung von einem Siliziumkristall, mit z.B. Aluminium, welches dreiwertig ist, entstehen diese Löcher. Mit diesen Löchern können auch Ladungen weitergegeben werden, indem diese durch auffüllen mit Elektronen von Atom zu Atom springen. Somit ist auch ein p-dotiertes Material leitfähig.

Zu bemerken ist, dass trotz der Elektronenlöcher, bzw. dem freien Elektron die Materialien immer noch elektrisch neutral sind, da alle eingehenden Atome neutral sind.

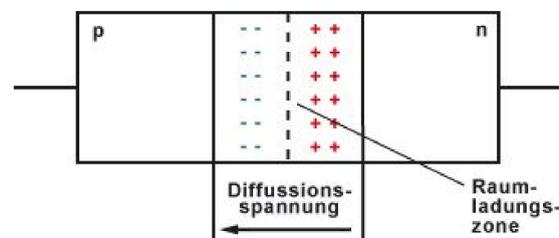


Abbildung 2.1: Schema einer Diode ohne angelegte Spannung (Quelle:[vor])

Bei einer Diode wird ein p-dotiertes Material an ein n-dotiertes Material gebracht. Dadurch werden am Übergang die Löcher des p-dotierten Material mit den freien Elektronen des n-dotierten „aufgefüllt“ (sie diffundieren in das andere Material), das hat zur Folge, dass auf der p-dotierten Seite eine Elektronenüberschuss herrscht und diese negativ geladen ist. Analog ist die n-dotierte Seite wegen des Elektronendefizit positiv. Es entsteht ein elektrisches Feld (Diffusionsspannung), die sogenannte Raumladungszone, welche von Ladungsträger ohne eine äußere Spannung nicht überwindet werden kann (vgl. Abbildung 2.1).

Wird an das p-dotierte Material eine negative Spannung (im Vergleich zu anderen Seite) angelegt und an das n-dotierte eine positive, so wird die Raumladungszone, also das elektrische Feld verstärkt: Die negative Spannung füllt weitere Löcher mit Elektronen auf, die positive entfernt weitere Elektronen. Die so entstehende breite Zone wird Sperrzone genannt, da durch das elektrische Feld keine Ladungsträger fließen können. Die Diode ist also in Sperrrichtung geschaltet (vgl. Abbildung 2.2) und leitet keinen Strom.

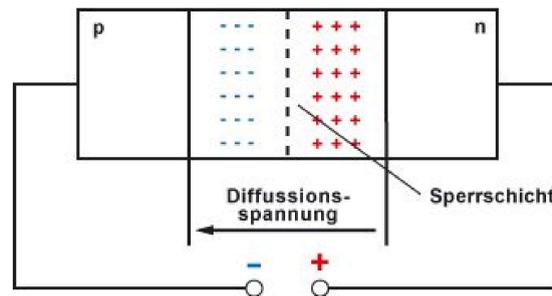


Abbildung 2.2: Schema einer in Sperrrichtung geschalteten Diode (Quelle:[vor])

Ist die Spannung entgegengesetzt, so werden die Elektronen durch das äußere elektrische Feld wieder in das n-dotierte Material bewegt, die Raumladungszone wird abgebaut. Strom kann durch die Diode fließen. Sie ist demnach in Durchlassrichtung geschaltet (vgl. Abbildung 2.3).

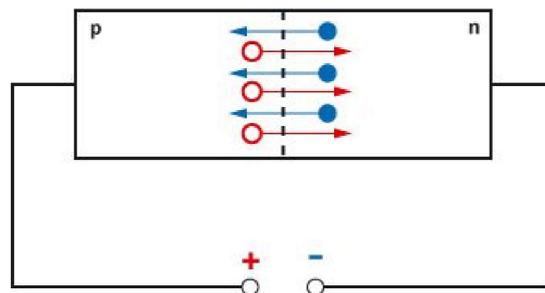


Abbildung 2.3: Schema einer in Durchlassrichtung geschalteten Diode (Quelle:[vor])

Durch diesen Effekt ist die Diode je nach angelegter Spannung unterschiedlich leitfähig. Um dies zu veranschaulichen wird der fließende Strom über der angelegten Spannung aufgetragen. Dieser Graph wird auch als Kennlinie einer Dioden bezeichnet und soll in dieser Aufgabe näher betrachtet werden.

Da I über U aufgetragen wird und für Ohmsche Widerstände $U = R \cdot I$ gilt, repräsentiert der Verlauf der Kurve den Widerstand der Diode, bzw. deren Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Spannung.

Im Allgemeinen werden die Kennlinien in drei Bereiche unterteilt, welche auch in Abbildung 2.4 zu sehen sind:

- **Durchlassbereich:**
Wenn nur eine kleine Spannung angelegt ist, so fließt auch nur ein sehr kleiner Strom durch die Diode. Ab einer Schwellenspannung (in der Abbildung mit U_S bezeichnet) steigt der Strom mit steigender Spannung exponentiell. Dies liegt daran, dass nun die Raumladungszone vollständig abgebaut ist.
- **Sperrbereich:**
In diesem Spannungsbereich fließt kein, bzw. fast kein Strom durch die Diode, da die

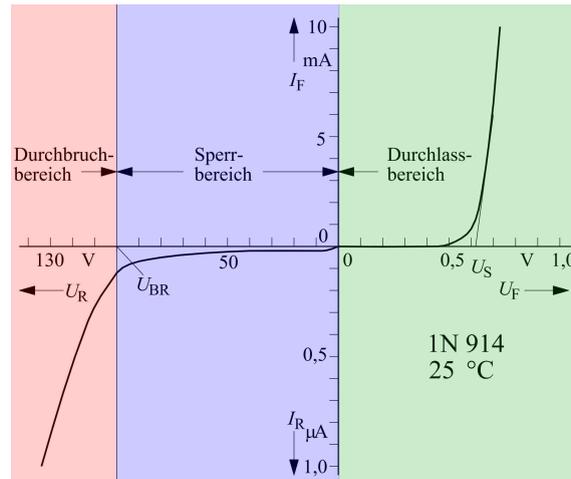


Abbildung 2.4: Darstellung einer Kennlinie (Quelle:[Wik])

angelegte Spannung zu schwach ist, um entweder die Raumladungszone abzubauen oder diese zu überwinden (im Durchbruchbereich).

- Durchbruchbereich:

Ab einer Durchbruchspannung ($U_{BR} < 0$) beginnt der Durchbruchbereich. Dieser Wert ist von der Diode abhängig. Ab ihm werden die Elektronen so stark beschleunigt, dass sie die Sperrzone trotz der Diffusionsspannung überwinden können.

Der eben beschriebene Aufbau einer Diode ist der Grundaufbau. Mittlerweile gibt es allerdings Weiterentwicklungen, bzw. Abwandlungen zur normalen Diode mit einfachem PN-Übergang. Dazu gehört beispielsweise die Zener-Diode, diese hat nur eine sehr kleine Raumladungszone, dadurch tunneln schon bei kleinen Spannungen in Sperrrichtung Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband, wodurch ein Strom fließt. Die freien Elektronen werden weiter beschleunigt und schlagen so weitere Elektronen aus dem Kristallgitter, ein Lawineneffekt tritt auf. Dadurch kommt es dann zum Zener-Durchbruch der Sperrschicht. In Durchlassrichtung verhalten sich Zener-Dioden wie normale Dioden. Zener-Dioden werden z.B. zur Spannungsstabilisierung genutzt.

Wird eine Zener-Diode parallel und in Sperrrichtung zu einem Bauteil geschaltet, so fällt erst bei zu hohen Spannungen durch den Zenereffekt ein Teil der Spannung an der Diode ab und nicht an dem Bauteil. Dadurch kann das Bauteil vor zu hohen Spannungen geschützt werden.

Ein weiterer nennenswerter Diodentyp ist der Varistor, seine Kennlinie ist punktsymmetrisch zum Ursprung. Diese Eigenschaft kommt durch dessen Aufbau zustande. Im Gegensatz zur normalen Diode besteht ein Varistor aus vielen kleinen Halbleiterkristallen in verschiedenen Richtungen ausgerichtet, durch die es keine ausgezeichnete Sperr- und Durchlassrichtung gibt, stattdessen treten in beiden Spannungsrichtungen symmetrische Durchlasseffekte auf. Varistoren werden beispielsweise zum Schutz vor induzierten Spannungen an geschalteten Induktivitäten verwendet. Dazu wird der Varistor als Spannungsableiter eingesetzt. Da induzierte Spannungen auftreten, ist es von Vorteil, dass der Varistor symmetrisch ist, denn in beide Richtungen kann so bei sehr hohen Spannungen die anderen Bauteile geschützt werden. Bei normalen Spannungen ist der Widerstand des Varistors groß, bei hohen Spannungen allerdings klein, weswegen bei zu hohen Spannungen der Strom über den Varistor (parallel geschaltet) abfließen kann.

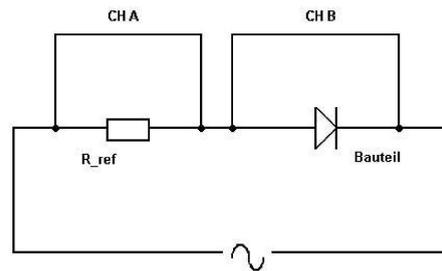


Abbildung 2.5: Schaltung für die Aufnahme der Kennlinien (Quelle:[vor])

2.1 Kennlinien und Schwellenspannung verschiedener Bauelemente

Im folgenden sollen die Kennlinien verschiedener Bauelemente (im wesentlichen Dioden) erfasst werden und zudem deren Schwellenspannung ermittelt werden. Dazu wird die in Abbildung 2.5 gezeigte Schaltung benutzt. Es wird eine Wechselfrequenz mit $f = 100 \text{ Hz}$ benutzt. Am Channel A wird die Spannung gemessen, welche über den Referenzwiderstand $R_{\text{ref}} = 100 \Omega$ abfällt. Wegen dem Ohmschen Gesetz charakterisiert diese Spannung (bis auf einen Faktor) den Strom, der durch die Diode fließt. Am Channel B wird die Spannung U , welche an der Diode abfällt gemessen. Mit dem Picoscope wird die Spannung U_{ref} an R_{ref} über U an der Diode aufgetragen.

Die jeweilige Schwellen-, bzw. Zener-Spannung wird durch das anlegen eines Lineals an die Kennlinie auf dem Bildschirm gemessen. Dabei liefert der Schnittpunkt mit der Spannungsachse den jeweiligen Grenzwert.

2.1.1 Silizium-Diode

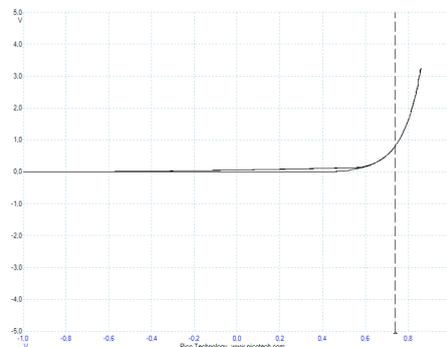


Abbildung 2.6: Kennlinie einer Siliziumdiode

Im Versuch ergibt sich eine gemessene Schwellenspannung von $U_S = 666 \text{ mV}$. Der Literaturwert ist $U_{S,\text{Lit}} = 700 \text{ mV}$ (Quelle: [Ele]), wodurch sich eine prozentuale Abweichung von 4,9% ergibt. Dieser Wert ist also trotz der sehr ungenauen Messmethode recht gut. Wie gut zu erkennen ist reicht die angelegte Spannung in Sperrichtung keinesfalls für einen Durchbruchstrom aus. Auf der Durchlassseite wird das theoretisch erwartete Verhalten reproduziert.

2.1.2 Germanium-Diode

Hierbei wurde eine Spannung von $U_S = 602 \text{ mV}$ gemessen, diese ist damit niedriger als die der Siliziumdiode. Der Literaturwert ist mit $U_{S,\text{Lit}} = 300 \text{ mV}$ (Quelle: [Ele]) gegeben. Die sehr große Abweichung von 100,7% liegt vermutlich am Messverfahren, welches große Fehler erwarten lässt. Zudem wird in der Quelle lediglich von Grobwerten gesprochen, letztlich ist der genaue Wert immer vom Bauteil abhängig. Dioden wie die Silizium- und Germanium-Diode eignen sich beispielsweise gut zur Gleichrichtung von Wechselfrequenzen, da die

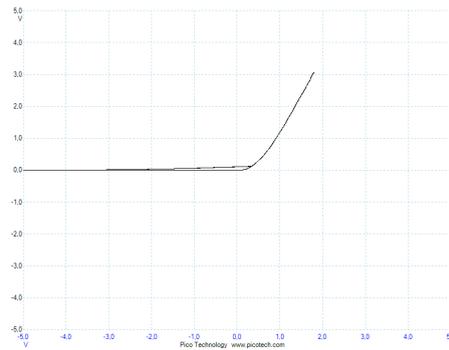


Abbildung 2.7: Kennlinie einer Germaniumdiode

Durchbruchspannung sehr groß ist und so Strom wirklich nur in eine Richtung durchgelassen wird.

2.1.3 Zener-Diode

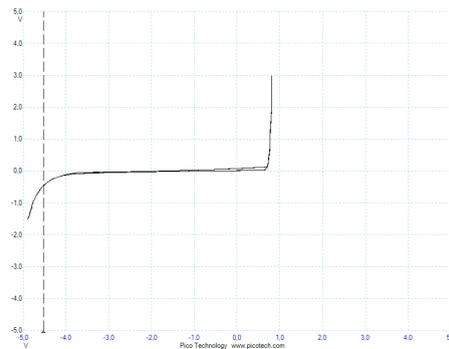


Abbildung 2.8: Kennlinie einer Zenerdiode

Hierbei ist sehr gut das zuvor besprochene Verhalten der Zenerdiode zu beobachten, denn auch schon für kleine Spannungen in Sperrrichtung fließt bereits ein Strom. Dadurch kann bei dieser Diode auch die Durchbruchspannung $U_D = -4,52\text{ V}$ gemessen werden. Zudem wurde eine Schwellenspannung $U_S = 705,6\text{ mV}$ gemessen, diese ist vom Betrag erwartungsgemäß deutlich kleiner als die der Durchbruchspannung.

2.1.4 Varistor

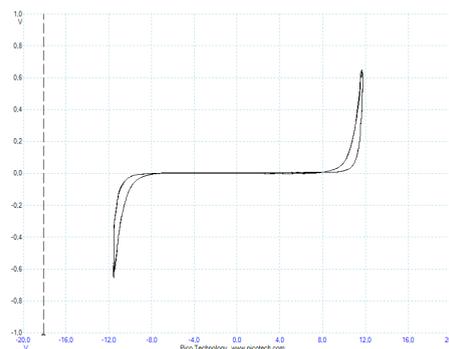


Abbildung 2.9: Kennlinie eines Varistors

Wie zuvor erklärt, ist hier die Kennlinie punktsymmetrisch zum Ursprung. Auch hier kann demnach eine Durchbruchspannung bestimmt werden, welche allerdings gleich der Schwellenspannung sein sollte. Es ergibt sich $U_S = 11,85\text{ V}$ und $U_D = -11,6\text{ V}$, die kleine

Abweichung entsteht vermutlich durch die Messung.

In der Abbildung ist ebenso sehr gut zu erkennen, dass die Elektronen träge sind und bei einem Spannungswechsel nicht direkt „reagieren“, wodurch die Doppellinie entsteht.

2.1.5 Photodiode

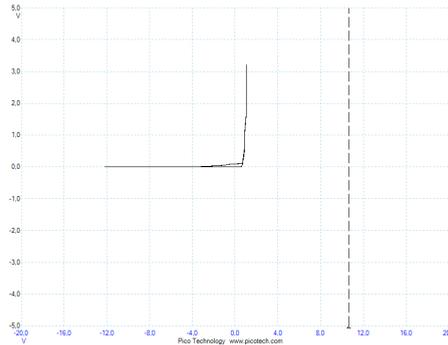


Abbildung 2.10: Kennlinie einer Photodiode bei Raumlicht

Bei einer Photodiode kommt es bei Belichtung zur Absorption von Photonen. Dadurch entstehen in der Raumladungszone Elektronen-Loch-Paare, die sich als Strom durch die Raumladungszone bewegen (Driftstrom). Außerhalb der Raumladungszone bilden sich ebenso Elektronen-Loch-Paare, diese bewegen sich zur Raumladungszone hin (Diffusionsstrom). Die Ströme sind proportional zur Beleuchtungsstärke und damit ist die Beleuchtungsstärke proportional zur Leitfähigkeit. Somit sollte bei einer stärkeren Beleuchtung der Widerstand abnehmen. Das würde sich durch eine Zunahme im Strom (Channel A) äußern. Leider ist dieser Effekt bei der im Versuch benutzten Photodiode nicht zu erkennen. Im Kapitel 3 wird dieser Effekt genauer untersucht.

2.1.6 Photowiderstand

Der Photowiderstand beruht analog zur Photodiode auf dem Photoeffekt. Wenn Licht auf das Material trifft werden Elektronen gelöst, welche dann als freie Elektronen die Leitfähigkeit des Materials steigern und somit den Strom bei gleicher Spannung erhöhen. Das äußert sich in der Steigung der Kennlinie, bei stärkerer Beleuchtung wird diese also schneller steigen. Da sich sonst der Photowiderstand wie ein Ohmscher Widerstand verhält, ist die Kennlinie eine Gerade.

Aus der Geraden soll der Widerstand bestimmt werden. Dazu werden die benötigten Werte aus der Abbildung abgelesen. Aus dem Ohmschen Gesetz folgt für den Widerstand:

$$R = \frac{U_P}{I_P} \quad (2.1)$$

Wobei U_P die Spannung ist, die am Photowiderstand abfällt und I_P die Stromstärke. Weil der Photowiderstand mit dem Referenzwiderstand in Reihe geschaltet ist gilt:

$$I_P = \frac{U_{\text{ref}}}{R_{\text{ref}}} \quad (2.2)$$

insgesamt folgt:

$$R = \frac{U_P \cdot R_{\text{ref}}}{U_{\text{ref}}} \quad (2.3)$$

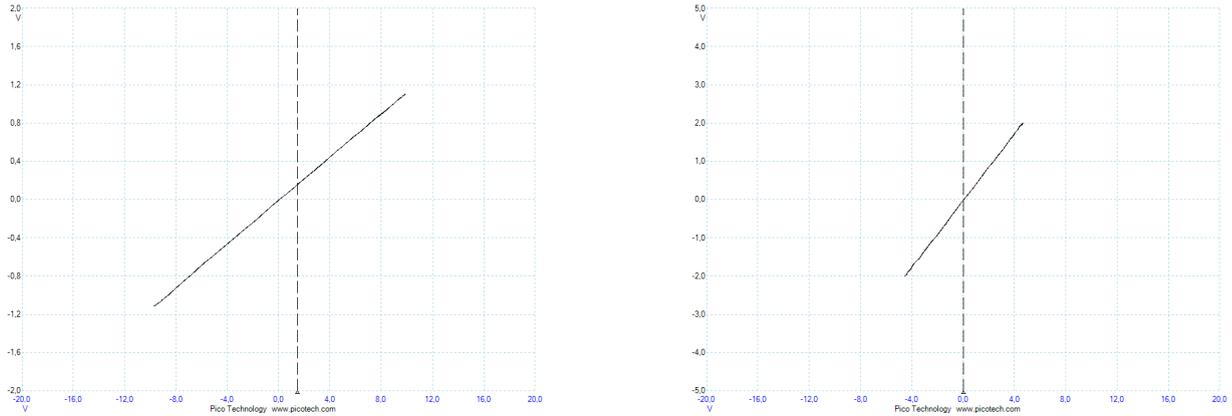


Abbildung 2.11: Kennlinie eines Photowiderstands bei verschiedenen Beleuchtungsstärken (links bei Raumlicht und rechts beleuchtet)

In der Abbildung 2.11 ist gut zu erkennen, dass bei stärkerer Beleuchtung die Steigung der Geraden größer ist als bei Raumlicht.

Es ergeben sich folgende Messwerte und daraus die Widerstände:

Tabelle 2.1: Messwerte und Berechnete Widerstände

Beleuchtung	U_P in V	U_{ref} in V	R in Ω
Raumlicht	4	0,44	909
beleuchtet	4	1,72	233

Wie erwartet, ist der Widerstand bei Beleuchtung deutlich kleiner.

2.1.7 LED

LED's sind Dioden, welche Licht emittieren, wenn sie in Durchlassrichtung geschaltet sind. Ein Teil der Energie geht also in die Photonen gemäß Formel $E = h \cdot f$ über, wobei h das Plank'sche Wirkungsquantum ist. Es ist also zu erwarten, dass die Schwellenspannung mit der Frequenz des Lichts steigt, da mehr Energie also mehr Spannung nötig ist um entsprechende Photonen zu emittieren. Abbildung 2.12, Seite 19 zeigt die gemessenen Kennlinien.

Die gemessenen Schwellenspannungen sind:

Tabelle 2.2: Schwellenspannungen verschiedener LED's

Farbe	U_S in V
rot	1,690
orange	1,735
gelb	1,814
grün	1,789

In der Tabelle 2.2 sind die Farben schon nach aufsteigender Frequenz sortiert. Dabei sind leider gelb und grün nicht wie erwartet, die anderen Werte genügen der Vermutung und steigen mit zunehmender Frequenz. Die Abweichung bei gelb und grün lässt sich vermutlich auf die ungenaue Messung zurückführen.

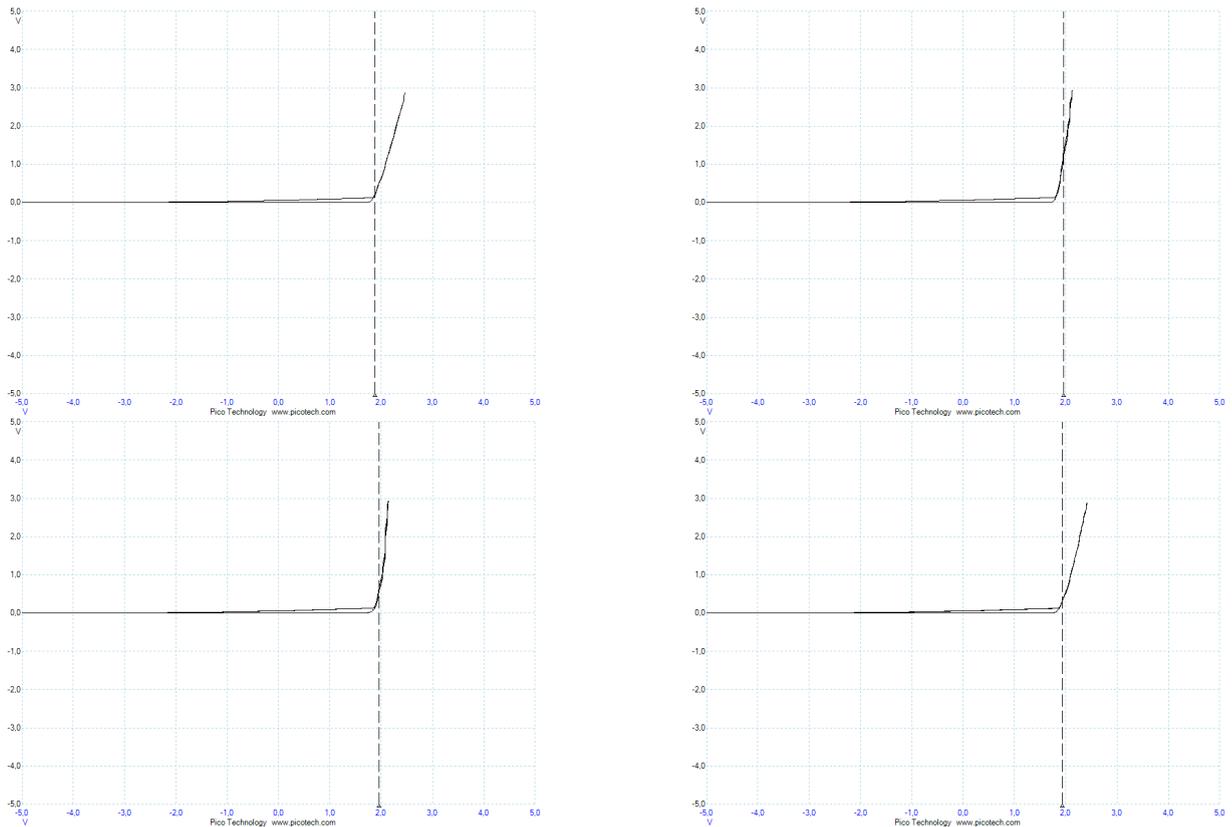


Abbildung 2.12: Kennlinie verschieden farbiger LED's (oben links rot, oben rechts orange, unten links gelb und unten rechts grün)

2.2 Frequenzabhängigkeit verschiedener Bauelemente

Nun soll die Frequenzabhängigkeit der gerade verwendeten Bauelemente qualitativ untersucht werden. Dazu wird die Frequenz von zuvor $f = 100 \text{ Hz}$ auf $f = 10 \text{ kHz}$ erhöht. Aufgrund der Trägheit der Elektronen ist allerdings keine nennenswerte Kennlinien der Bauteile zu erkennen. Für alle Bauelemente ergibt sich beim Picoscope eine waagerechte Gerade.

Weil die Elektronen träge sind und bei hohen Frequenzen nicht die Möglichkeit haben die Sperrschicht abzubauen fließt gar kein Strom (waagerechter Strich). Dieser Versuch zeigt also gut, dass die Elektronen eine endliche Geschwindigkeit haben und Effekte mit Elektronen nicht instantan eintreten.

3. Die Photodiode

Nach der qualitativen Betrachtung der Photodiode in Kapitel 2 wird dies nun qualitativ etwas genauer untersucht. Wie in Abschnitt 2.1.5 beschrieben, handelt es sich bei einer Photo-Diode um eine normale Diode, bei der Licht auf den PN-Übergang fallen kann. Dies führt zu interessantem Verhalten. Treffen Photonen auf die PN-Schicht, lösen diese Elektron aus den Elektronen-Lochpaaren des Übergangs heraus, diese führen zu kombinierter Elektronen-Loch Leitung. Auch außerhalb des Übergangs werden Elektronen durch den Photoeffekt aus einem Bindungszustand in einen leitenden Zustand gebracht.

Sperrt die Diode, werden die Elektronen-Loch Paare durch die Diffusionsspannung beschleunigt und führen so zu einem Sperrstrom entgegengesetzt der Durchlassrichtung.

Im Versuch wird zur Messung des Sperrstromes der gleiche Aufbau wie in Kapitel 2 verwendet, die Schaltung wird wieder bei 100 Hz betrieben. Da die verwendete Photodiode dort allerdings keine nennenswerte Veränderung unter Beleuchtung zeigt (vgl. Abschnitt 2.1.5) wird auf eine Photodiode in Verbund mit einer Lampe zurückgegriffen. Neben den beiden Anschlüssen für die Photodiode verfügt diese über eine Spannungsversorgung für die Lampe, deren Helligkeit von der angelegten Spannung abhängt. Die Umrechnung erfolgt dabei nach einer auf der Praktikumswebsite bereitgestellten Tabelle.

Mit einem Labornetzgerät werden Spannungen zwischen 1 und 13 V in 2 V-Schritten angelegt, die Kennlinie wird jeweils oszillographisch aufgenommen.

Der Sperrstrom ist nur sehr ungenau zu bestimmen und hängt in gewissem Maß auch von der angelegten Spannung ab (zwischen 0 V und der Durchlassspannung wirkt die angelegte Spannung dem Sperrstrom entgegen). Deshalb wird der Strom-Nulldurchgang der Kennlinie am Oszilloskop vermessen (vgl. Tabelle 7.2 im Anhang). Dieser ist offensichtlich auch proportional zum Sperrstrom. Je höher der Sperrstrom, desto schneller gleicht er einen Durchlassstrom aus und bei desto höheren Spannungen erfolgt der Nulldurchgang. Abbildung 3.1, Seite 21 zeigt den Verlauf der Messdaten, dabei ist die Lampenspannung bereits in eine Beleuchtungsstärke umgerechnet.

Die Abbildung zeigt ein Sättigungsverhalten. Während für niedrige Beleuchtungsstärken die Spannung noch sehr steil ansteigt, ergibt sich um 6000 lm eine Maximale Spannung für den Nulldurchgang von ungefähr 550 mV. Dies steht im Widerspruch zur Vermutung dass der Sperrstrom proportional zur Beleuchtungsstärke ist.

Für diesen Sättigungseffekt lassen sich zwei mögliche Ursachen vermuten. Einerseits könnte es sich um eine echte Sättigung des Sperrstroms handeln. Da die Spannung jedoch ungefähr in der Größenordnung der Durchlassspannung einer Diode liegt ist es auch durchaus möglich, dass dies zur Sättigung führt. Ab der Durchlassspannung fließt ein Strom in Gegenrichtung durch die Diode, der deutlich größer ist als der Sperrstrom, insofern ist der Strom ab der Durchlassspannung quasi immer positiv und auch der Nulldurchgang des Stromes ist durch die Durchlassspannung beschränkt.

Die Lichtabhängigkeit der Photodiode lässt sich außerdem auch qualitativ direkt am

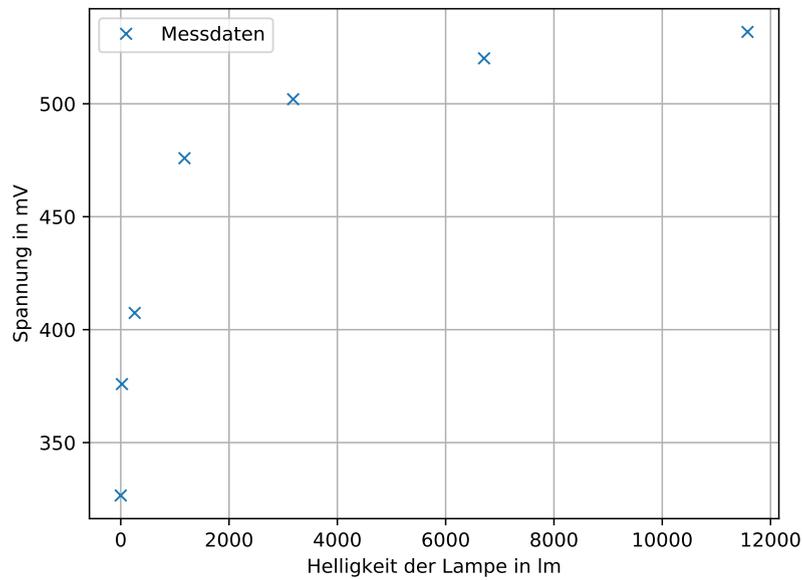


Abbildung 3.1: Nulldurchgang des Stromes für verschiedene Beleuchtungsstärke

Oszilloskop beobachten. Dazu zeigt Abbildung 3.2 die Kennlinie der Photodiode für verschiedene Beleuchtungsstärken.

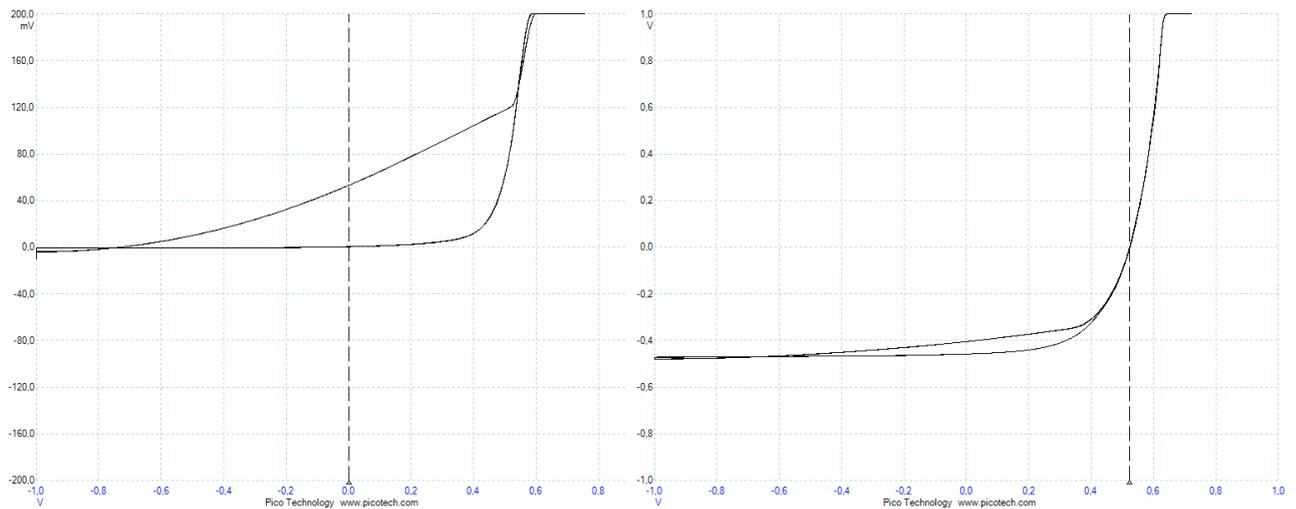


Abbildung 3.2: Oszillographische Darstellung der Kennlinie, ohne Beleuchtung (links) und unter maximale Beleuchtung (rechts)

Die Abbildung zeigt direkt den Unterschied im Sperrstrom. Ohne Beleuchtung (links) fließt im Sperrfall kein Strom, am Vorwiderstand fällt keine Spannung ab. Bei einer Erhöhung der Beleuchtungsstärke (rechts) ist jedoch auch im Sperrfall ein Spannungsabfall von circa $-0,4\text{ V}$ am Vorwiderstand, also ein Sperrstrom von circa -4 mA zu beobachten, die Kennlinie ist nach unten verschoben. Auch hier tritt aufgrund von Trägheit im Bauteil eine Doppellinie auf (vgl. Kapitel 2), der sichtbare Unterschied zwischen den beiden Beleuchtungsstärken ergibt sich jedoch im wesentlichen durch die Wahl der Achsenskalierung.

Nichtsdestoweniger zeigt das Experiment gut das Auftreten eines beleuchtungsabhängigen Sperrstromes und insbesondere den Einfluss von Licht auf die Photodiode, welcher in Abschnitt 2.1.5 nicht beobachtet werden konnte.

4. Piezoelektrischer Effekt

Als ein weiteres elektrische Bauelement wird nun ein Piezoelement untersucht.

In Kristallstrukturen kann der sogenannte piezoelektrische Effekt auftreten. Wirkt eine mechanische Kraft Richtungsabhängig auf den Kristall ein, kommt es zu einer Verformung der Gitterstruktur. Da die Kristallgitter in der Regel aus Ionen aufgebaut sind, kommt es also auch zu einer Ladungsverschiebung. Im Material werden also durch die äußere Krafteinwirkung Dipole erzeugt. Bei geeigneter Kristallanordnung addieren sich die so erzeugten mikroskopischen Dipole zu einer makroskopischen Ladungsverschiebung bezüglich gegenüberliegenden Kristalloberflächen, eine Spannung liegt an. Diese kann nun gemessen werden und führt in Kombination mit Leitern auch zu einem Strom.

Umgekehrt funktioniert der Effekt genauso. Wird eine Spannung an eine Piezokristall angelegt, versucht dieser Dipole im Kristallinneren zu induzieren. Dies führt zu einer Formveränderung des Kristalls, je nach Spannung dehnt dieser sich aus oder zieht sich zusammen.

Im Experiment wird der Piezoelektrische Effekt mittels eines geeigneten Piezoelementes auf drei verschiedenen Arten gemäß Abbildung 4.1 untersucht.

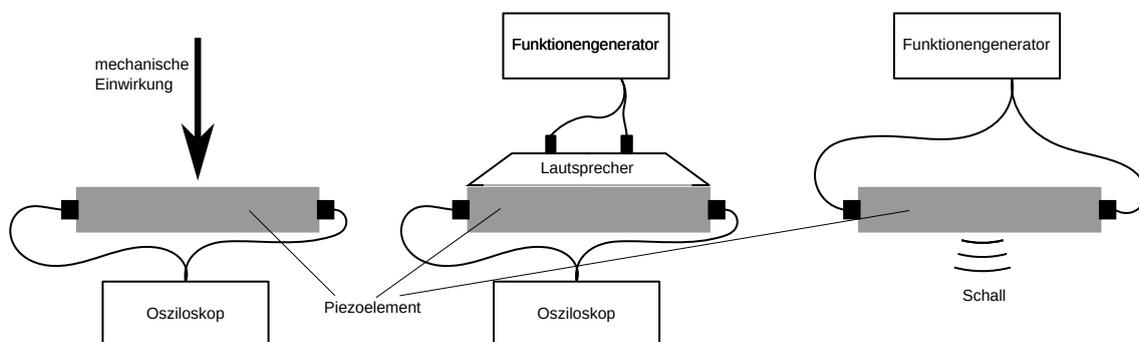


Abbildung 4.1: Experimentelle Aufbauten zur Untersuchung des piezoelektrischen Effektes

In einem ersten Versuch (Abbildung links) wird der Piezokristall an ein Oszilloskop angeschlossen, dieses wird so eingestellt, dass die Zeitachse in der Größenordnung von Sekunden liegt. Durch schlagartige mechanische Beanspruchungen, im Experiment durch kurze Schläge mit der Hand realisiert, wird der Kristall verformt. Eine Spannungsauslenkung wird beobachtet, diese ist in Abbildung 4.2 Seite 23 dargestellt.

In einem zweiten Schritt, wird auf den Piezokristall ein Lautsprecher angebracht. Dieser wird mittels eines Funktionengenerators zum Schwingen gebracht und regt so auch das Piezoelement an. Für verschieden Anregungsfrequenzen wird die Spannungsantwort des Piezoelementes jeweils oszillographisch beobachtet.

Für die langsame Anregung (400 Hz, Bild links) ist im groben Verlauf auch eine langsame Antwortschwingung des Piezoelementes erkennbar. Dies wird allerdings zusätzlich

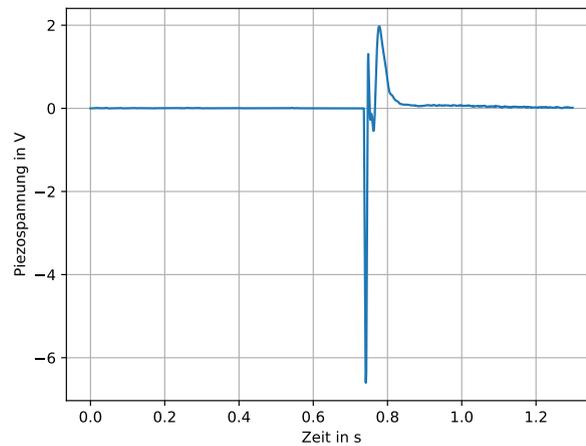


Abbildung 4.2: Piezoelektrischer Effekt bei einmaliger mechanischer Belastung

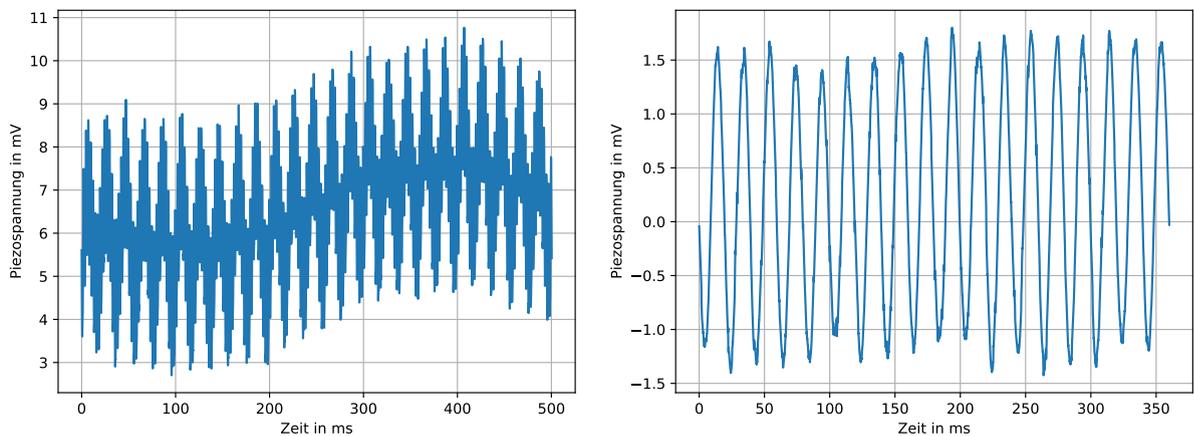


Abbildung 4.3: Anregung eines Piezoelementes mittels eines Lautsprechers bei 400 Hz (links) und bei 10 kHz (rechts)

überlagert durch eine hochfrequente Resonanzschwingung. Für hohe Anregung ist der Piezokristall zu träge für Oberschwingungen, es tritt im wesentlichen nur eine Frequenz in der Spannungsantwort auf. Weiterhin fällt auf, dass die auftretenden Piezospennungen im höherfrequenten Fall deutlich geringer sind. Auch dies lässt sich gut über die Trägheit des Kristalls erklären.

Schlussendlich wird noch der inverse Fall überprüft (vgl. Abbildung 4.1 rechts). Dazu wird der Funktionengenerator direkt an den Piezokristall angeschlossen, ein Ton wird hörbar. Bei einer Änderung der Frequenz ergibt sich auch eine klar zuerkennende Tonhöhenänderung.

5. Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters

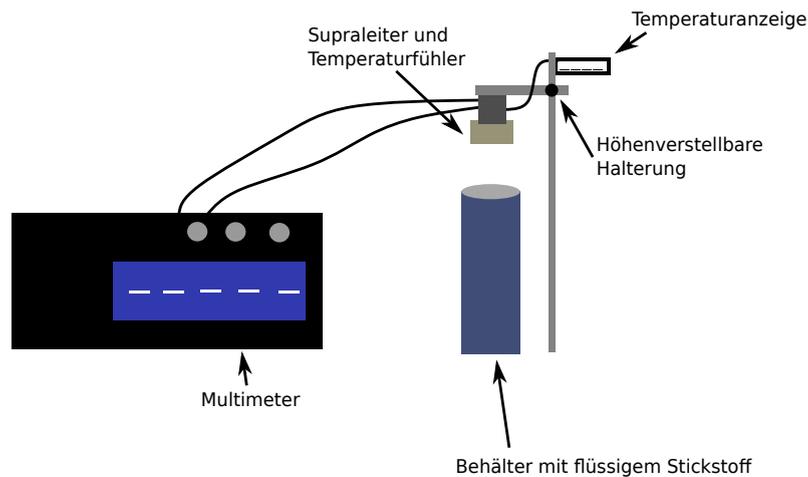


Abbildung 5.1: Aufbau zur Messung der Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters

Schließlich soll die Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters bestimmt werden. Supraleiter sind Stoffe bei denen ab dem Unterschreiten einer gewissen Temperatur der Widerstand gegen Null geht. Diese Temperatur wird als Sprungtemperatur T_C bezeichnet und ist materialspezifisch.

Diese Eigenschaft der Supraleiter entsteht durch die Bildung von sogenannten Cooper-Paaren für Temperaturen kleiner als die Sprungtemperatur. Der Widerstand eines Leiters entsteht durch Gitterschwingungen und der Wechselwirkung von Elektronen und Fehlerstellen in der Kristallstruktur. Durch die Cooper-Paare, welche aus zwei gekoppelten Elektronen bestehen, gibt es keine Wechselwirkung der Elektronen mit dem Gitter und der Widerstand geht gegen Null.

Bei Hochtemperatursupraleitern ist die Sprungtemperatur vergleichsweise hoch.

Um eine Messreihe durchzuführen, wird der Temperaturgradient über einem flüssigen Stickstoffbad benutzt. An einem absenkbaren Gestell ist ein Messapparat angebracht. Über ein Netzteil liegt eine Spannung an. Über ein Multimeter wird der Strom parallel zum Supraleiter gemessen. Des weiteren wird die Temperatur gemessen (siehe Abbildung 5.1). Dabei wird eine Vierleiterschaltung benutzt, um Leiterwiderstände, die das Messergebnis verfälschen könnten zu minimieren. Um die Temperatur von Raumtemperatur beginnend zu erniedrigen, wird das Gestell in Richtung des Stickstoffes herab gesenkt. Bei einer konstanten Spannung wird so anfangs in 10°C -Schritten der Strom gemessen. Fällt der Strom schneller ab, so wird in $1\text{-}2^\circ\text{C}$ -Schritten weiter gemessen.

Dabei ist zu beachten, dass der Apparat nicht direkt bei absenken den flüssigen Stickstoff berührt, da sonst die Abkühlung zu schnell erfolgt und das Messergebnis verfälscht werden würde. Die Messwerte sind in Tabelle 7.3 im Anhang. Da bei sehr niedrigen Temperaturen, die gemessene Temperatur von der tatsächlichen abweicht, wurden mit den gegebenen Temperaturkorrekturen vom Aufgabenblatt (Quelle:[auf19]) eine kubische Spline-Interpolation durchgeführt, um die Temperaturmesswerte zu korrigieren. Wird die Stromstärke über den korrigierten Temperaturen aufgetragen ergibt sich Abbildung 5.2. Um die Sprungtemperatur besser bestimmen zu können wird der letzte Messwert (bei voll eingetauchtem Messgerät) weggelassen. Denn dann wird die Skala deutlich schmaler und da die Temperatur sowieso nur abgelesen werden kann, ist es besser wenn nur der relevante Bereich sichtbar ist.

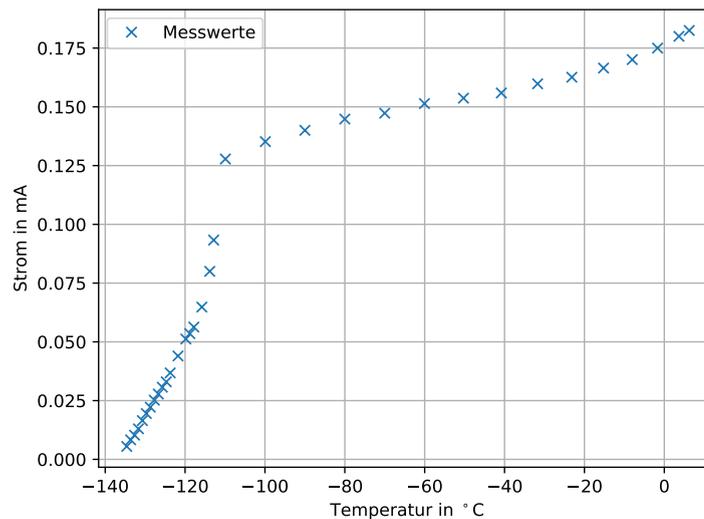


Abbildung 5.2: Die Stromstärke in Abhängigkeit der korrigierten Temperatur.

Es ist sehr gut zu erkennen, dass unter einer bestimmten Temperatur die Stromstärke plötzlich abfällt. Weil die Stromstärke parallel zum Supraleiter gemessen wird, fließt natürlich bei kleiner werdenden Widerstand des Supraleiters immer mehr Strom durch ihn und die gemessene Stromstärke wird kleiner. Da auch im Supraleiter selbst ein Temperaturgradient herrscht und so Bereiche schon einen verschwindenden Widerstand haben und andere nicht, kann die Sprungtemperatur in dieser Messung nicht eindeutig festgelegt werden und der Sprung erfolgt über einen relativ breiten Temperaturbereich. Zudem ist nicht genau bekannt an welcher Stelle die Temperaturmessung relativ zum Supraleiter durchgeführt wird. Deswegen wird die Mitte des stärksten Abfalls als Sprungtemperatur gewählt. Der Abbildung 5.2 zur Folge ergibt sich also für die Sprungtemperatur T_C :

$$T_C = -113^\circ\text{C} \quad (5.1)$$

Da es leider keine Angaben über den Hochtemperatursupraleiter gibt, kann dieser Wert nicht mit einem Literaturwert verglichen werden. Im Allgemeinen erscheint die Größenordnung jedoch relativ zu anderen Hochtemperatursupraleitern plausibel.

6. Fazit

In diesem Versuch können sehr gut die Eigenschaften verschiedener Bauelemente untersucht und analysiert werden. Dabei werden Grundlegende Schaltungen wie die Wheatstonesche Brückenschaltung wiederholt und das Bändermodell kennengelernt.

Mit Dioden wird ein wichtiges Bauteil der modernen Halbleitertechnik untersucht. Der Piezoelektrische Effekt und Supraleitung zeigen tiefer gehende Effekte.

Bauteile mit spezifischen Eigenschaften, wie die Sprungtemperatur bei Supraleitern oder die Spannungsabhängigkeit von Dioden, werden genutzt um komplexere Bauelemente zu entwickeln, weswegen der Versuch zum weiteren Verständnis beiträgt. Nicht zuletzt dadurch, dass bei jeder Messung mit elektrischen Bauelemente, Dinge wie Spannungs- und Temperaturabhängigkeit beachtet werden müssen.

7. Anhang

Tabelle 7.1: Widerstand als Funktion der Temperatur

T in °C	Widerstand des NTC in Ω	Widerstand des PT100 in Ω
26	4525	
30	4155	
40	3464	
50	2854	
60	2322	117
70	1941	119
80	1625	120
90	1331	126
100	1055	131
110	842	133
120	678	135
130	566	138
140	466	140
150	412	144
160	357	147
170	318	149
180	280	152
190	225	155
200	195	159

Tabelle 7.2: Vermessung der Photodiode

Lampenspannung in V	Helligkeit in lm	Nulldurchgang in mV
1	0	326.6
3	22	375.9
5	258	407.4
7	1177	475.9
9	3184	502.0
11	6710	520.11
13	11575	531.8

Tabelle 7.3: Messwerte für Aufgabe 5

T in °C (vor der Korrektur)	I in mA
25,7	0,1825
20,0	0,1800
10,0	0,1750
0,0	0,1701
-10,0	0,1665
-20,0	0,1626
-30,0	0,1598
-40,0	0,1559
-50,0	0,1537
-60,0	0,1514
-70,0	0,1473
-80,0	0,1448
-90,0	0,1400
-100,0	0,1352
-110,0	0,1278
-113,0	0,0933
-114,0	0,0800
-116,0	0,0648
-118,0	0,0563
-119,0	0,0535
-120,0	0,0512
-122,0	0,0440
-124,0	0,0368
-125,0	0,0330
-126,0	0,0307
-127,0	0,0278
-128,0	0,0252
-129,0	0,0222
-130,0	0,0195
-131,0	0,0165
-132,0	0,0130
-133,0	0,0103
-134,0	0,0083
-135,0	0,0055
-198,9	0,0002

Literaturverzeichnis

[auf19] *Eigenschaften elektrischer Bauelemente, Aufgabenblatt*, Juli 2019.

[Ele] Elektronik Kompendium: *Diode/Halbleiterdiode*. <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0201113.htm>, [Online; Stand 16.Juli 2020].

[vor] *Vorbereitungshilfe zum Versuch: Eigenschaften elektrischer Bauelemente*.

[Wik] Wikipedia: *Diode*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Diode>, [Online; Stand 16.Juli 2020].