

Elektrische_Bauelemente

May 13, 2024

1 Fakultät für Physik

1.1 Physikalisches Praktikum P2 für Studierende der Physik

Versuch P2-50, 51, 52 (Stand: April 2023)

[Raum F1-17](#)

Name: Vrkic Vorname: Tin E-Mail: uyvpq@student.kit.edu

Name: Nock Vorname: Mika E-Mail: uttzi@student.kit.edu

Gruppennummer: Mo32

Betreuer: Finn Rosumek

Versuch durchgeführt am: 22.04.24

Beanstandungen:

Testiert am: _____ Vermerk: _____

2 Elektrische Bauelemente

2.1 Motivation

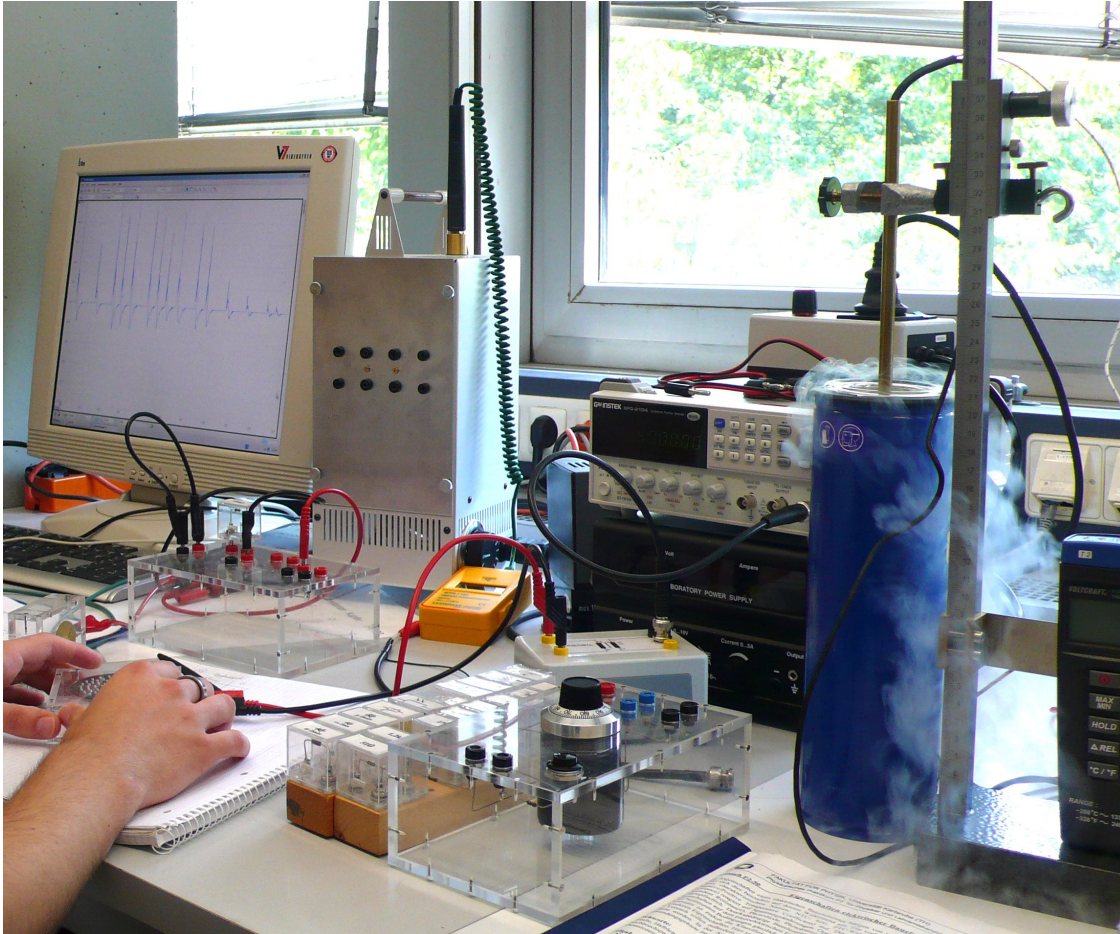
Die Eigenschaften eines elektrischen Bauelements hängen von vielen physikalischen Größen ab. Häufig wirkt sich dies besonders auf dessen Widerstand aus. Die vorherrschende Abhängigkeit gibt dem Bauteil seinen charakteristischen Namen: [NTC-](#) bzw. [PTC-Widerstände](#) weisen eine Temperaturabhängigkeit (Negative/Positive Temperature Coefficient) auf. [Der VDR-Widerstand](#) (Varistor, Voltage Dependent Resistance) reagiert auf Spannungsänderungen. Optoelektrische Bauteile wie [Fotowiderstand](#) (LDR, Light Dependent Resistance), [Fotodiode](#) und [Fototransistor](#) 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 die Klassifizierung in Leiter, Halbleiter und Nichtleiter (Isolatoren) und die Untersuchung der besonderen Eigenschaften. Hier spielen Halbleiterbauelemente auf Grund ihrer Vielfalt die größte Rolle.

2.2 Lernziele

- Sie lernen die Eigenschaften verschiedener elektrischer Bauelemente kennen.
- Sie lernen die Messmethoden zur Untersuchung der jeweiligen Eigenschaften kennen.
- Machen Sie sich zudem mit den beobachteten Effekten und deren praktischen Anwendungsgebieten vertraut und diskutieren Sie diese in Ihrer Versuchsauswertung.

2.3 Versuchsaufbau

Einen Aufbau mit dem Sie diesen Versuch durchführen könnten sehen Sie im Folgenden abgebildet: ([Link](#))



Die wichtigsten Elemente des Versuchsaufbaus sind:

- Zwei Versuchsboxen, zur Widerstandsmessung mit Hilfe der [Wheatstoneschen Brückenschaltung](#) und zur Kennlinienaufnahme.
- Ein Tisch-Multimeter (Keithley, Modell 2100, 7-1/2-Digit).
- Ein USB-Oszilloskop (PicoScope 2000) mit Computer.
- Ein Ofen mit Leistungsregelung, bestückt mit Kupferspule, Konstantandrahtspule, NTC und PT100 und einem eingebauten NiCr-Ni-Thermoelement mit passendem Messinstrument.
- Ein Frequenzgenerator (GW-Instek SFG-2104).
- Ein Trenntransformator.
- Verschiedene Bauelemente als Steckeinheiten: Widerstände 1, 33, 51, 100 (2×), 680, 1200 Ω , je 1% Toleranz, Si-Diode, Ge-Diode, Zener-Diode, Varistor, Fotodiode, Fotowiderstand, Lumineszenzdioden LED (grün, gelb, orange, rot).
- Eine Taschenlampe zur Beleuchtung.
- Eine Experimentierleuchte mit Fotodioden-Aufsatz und Netzgerät (EA-PS-2016).
- Ein Piezoelement (Resonanzfrequenz 2,9 kHz) in Gehäuse, Lautsprecher.
- Ein Supraleiter in Gehäuse mit Absenkvorrichtung, ein Dewargefäß, eine Vierleitermessschaltung mit Konstantstromquelle ($I_{\text{const}} = 63 \text{ mA}$) und Steckernetzgerät.
- Flüssigstickstoff.

2.4 Wichtige Hinweise

- Sie benötigen einen USB-Stick zur Datensicherung.
- Das Gehäuse des Ofens für Aufgabe 1 erhitzt sich stark! Vermeiden Sie daher jeglichen Kontakt mit der Oberfläche.
- [Flüssigstickstoff](#), wie Sie ihn für Aufgabe 5 verwenden, kann schwere Kälteverbrennungen verursachen! Tragen Sie daher stets Handschuhe und Schutzbrille tragen, wenn Sie damit umgehen.

```
[1]: # importieren aller benötigten Module
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import kafe2
import pathlib
import pandas as pd
from uncertainties import ufloat
```

```
[2]: # erstellen einer Funktion für kafe2 Fits
```

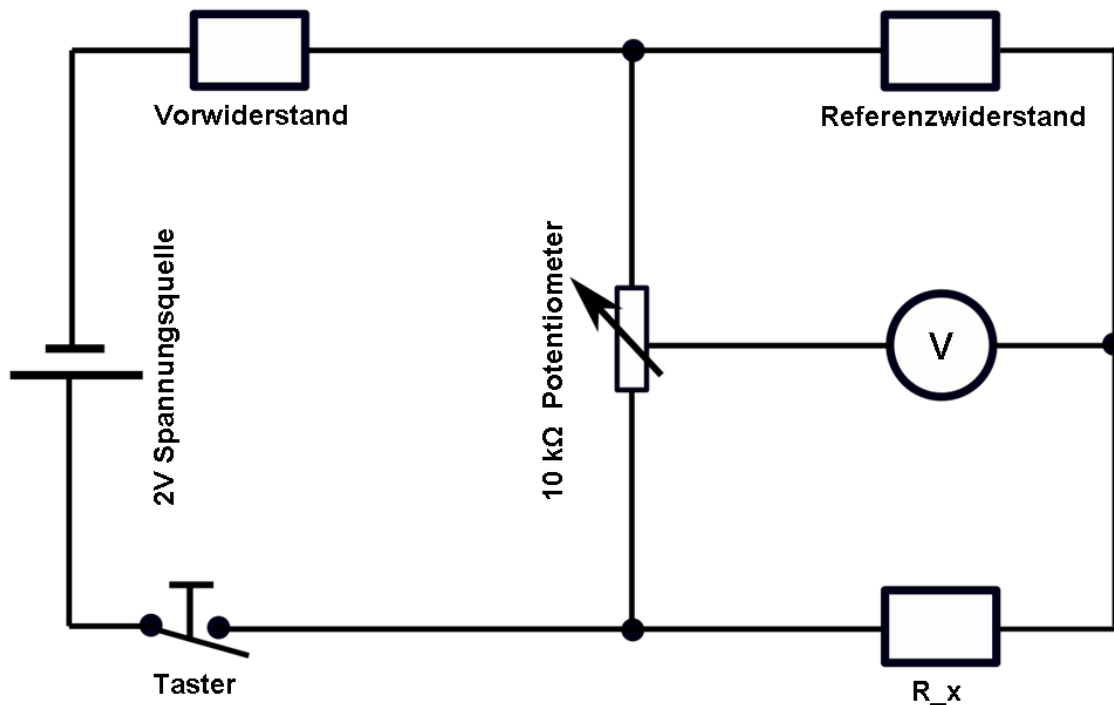
```
def fit_funktion(xy_data, model_function, xy_error, xy_label, title,
                 constraint=[]):
    xy_data = kafe2.XYContainer(xy_data[0], xy_data[1])
    xy_data.label = title
    fit = kafe2.XYFit(xy_data = xy_data, model_function = model_function)
    fit.add_error(axis = 'x', err_val = xy_error[0])
    fit.add_error(axis = 'y', err_val = xy_error[1])
    for i in range(len(constraint)):
        fit.add_parameter_constraint(name = constraint[i][0], value =
        constraint[i][1], uncertainty = constraint[i][2])
    fit.do_fit()
    plot = kafe2.Plot(fit)
    plot.x_label, plot.y_label = xy_label[0], xy_label[1]

    return fit.parameter_values, fit.parameter_errors, plot
```

2.5 Durchführung

2.5.1 Aufgabe 1: Wheatstonesche Brückenschaltung

Messen Sie mit Hilfe der [Wheatstoneschen Brückenschaltung](#) die Temperaturabhängigkeit des Widerstands ($R(T)$) verschiedener Bauteile im Bereich von Zimmertemperatur bis $\approx 150^\circ\text{C}$. Eine Schaltskizze der Wheatstoneschen Brücke finden Sie im Folgenden abgebildet: ([Link](#))



- Messen Sie dazu mit Hilfe der Versuchsbox nacheinander den Widerstand von NTC und PT100 in Abhängigkeit von der jeweiligen Temperatur. Als Spannungsquelle dient Ihnen hierzu das Netzgerät, das eine Gleichspannung von $U = 2\text{ V}$ liefert. Um die Erwärmung des Widerstands durch den Messstrom selbst gering zu halten, sollten Sie diesen (durch Betätigung des Tasters) jeweils nur kurzzeitig einschalten. Als Brückeninstrument dient das Multimeter im mA(DC)-Bereich. Wählen Sie den Referenzwiderstand in der gleichen Größenordnung, wie das zu messende Bauteil. (Überprüfen Sie den angegebenen Wert mit dem Multimeter.) 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 der Gleichung

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

zu bestimmen. Diskutieren Sie in Ihrer Versuchsauswertung, wie man NTC-Widerstände zur Temperaturmessung, Füllstandsanzeige und Strombegrenzung verwenden kann.

- Für den PT100 gilt der funktionale Zusammenhang:

$$R(T) = R_0 + c \cdot T.$$

Bestimmen Sie die Konstante c und überprüfen Sie den Widerstand R_0 bei 0°C . Diskutieren Sie auch hier mögliche Einsatzgebiete.

```
[3]: # Temperaturmessreihe und eingestellter Widerstand am Potentiometer
# 1kOhm Referenzwiderstand
T_NTC = np.array([24,35,45,55,66,75,87,96,105,116,125,134,144]) + 273.15 #in K
R_POT_NTC = np.array([841,807,772,742,691,654,581,556,512,471,449,388,338]) * 10
    ↪ 10 #in Ohm

# 1000Ohm Referenzwiderstand
T_PTC = np.array([148,134,123,114,106,95,84,74,67,63,59]) + 273.15 #in K
R_POT_PTC = np.array([598,591,584,580,576,569,563,558,553,551,549]) * 10 #in Ohm

[4]: # Modellfunktion des NTC
def model_NTC(T,a,b):
    return a * np.exp(b/T)

[5]: # Modellfunktion des PTC
def model_PTC(T,R_0,c):
    return R_0 + c*T

[6]: # Berechnen der Widerstände und der dazugehörigen Unsicherheiten
R_NTC = []
R_NTC_std = []
R_PTC = []
R_PTC_std = []

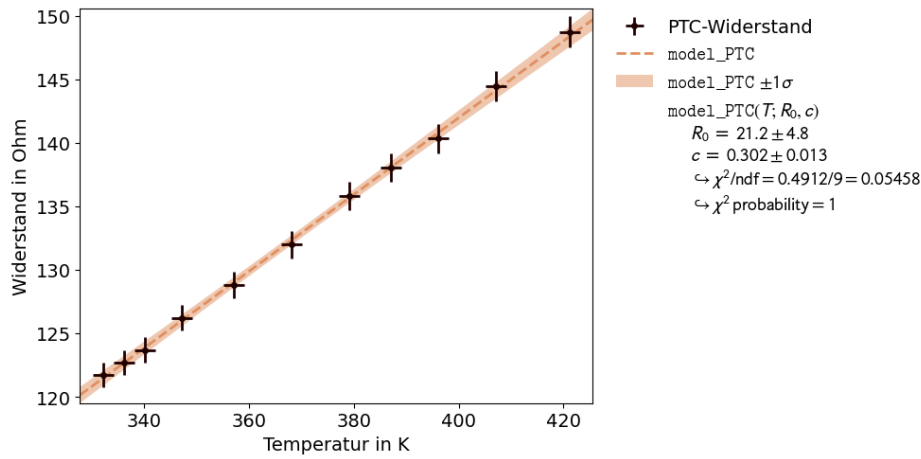
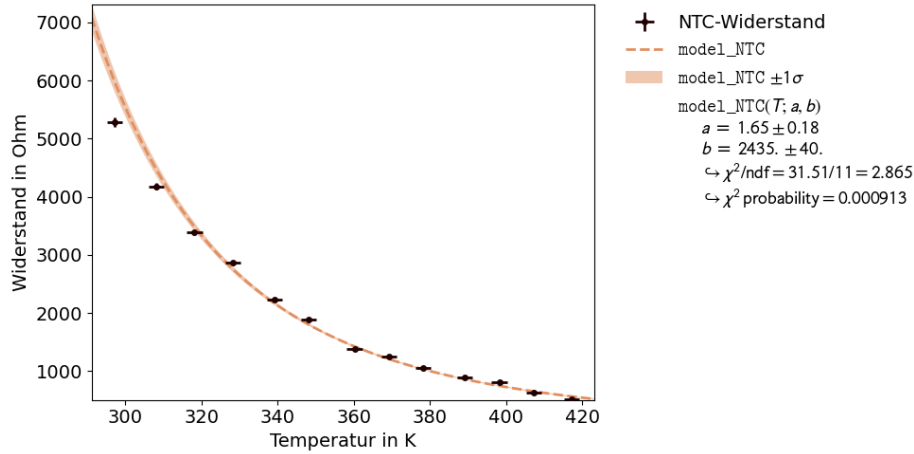
for R in R_POT_NTC:
    R = ufloat(R,20)
    R_sin = R / (10000-R) * 1000
    R_NTC.append(R_sin.n)
    R_NTC_std.append(R_sin.s)

for R in R_POT_PTC:
    R = ufloat(R,20)
    R_sin = R / (10000-R) * 100
    R_PTC.append(R_sin.n)
    R_PTC_std.append(R_sin.s)

[7]: # erstellen der Fit und anzeigen
plot_NTC = fit_funktion([T_NTC,R_NTC], model_NTC, [2,R_NTC_std], ['Temperatur_
    ↪ in K','Widerstand in Ohm'], 'NTC-Widerstand', constraint=[]) [2]
plot_PTC = fit_funktion([T_PTC,R_PTC], model_PTC, [2,R_PTC_std], ['Temperatur_
    ↪ in K','Widerstand in Ohm'], 'PTC-Widerstand', constraint=[]) [2]

plot_NTC.plot()
plot_PTC.plot()

plt.show()
```



In den oben gezeigten Graphen sind die Widerstandskurven des NTC und des PTC in Abhängigkeit von der Temperatur zu sehen. Die Widerstände wurden hierbei über eine Wheatstonesche Messbrücke aufgenommen, da diese besonders Präzise ist und auf kleine Änderungen des Widerstandes reagiert. Die aufgenommenen Widerstände werden mithilfe der Formel

$$R_x = \frac{R_{pot}}{10k\Omega - R_{pot}} \cdot R_{ref}$$

umgerechnet, wobei es sich beim Referenzwiderstand um $1k\Omega$ beziehungsweise $0.1k\Omega$ handelt. Für den NTC-Widerstand ergibt sich hierbei $a = 1.65 \pm 0.18\Omega$, $b = 2437 \pm 40K$ und für den PTC-Widerstand $c = 0.302 \pm 0.013\Omega K^{-1}$, $R_0 = 21.2 \pm 4.8\Omega$, wobei beide Fits im Rahmen der Unsicherheiten liegen. Die Unsicherheiten stammen einerseits aus der Genauigkeit des Temperaturmessgeräts und wurde hier auf $2K$ gesetzt und andererseits aus Ableseunsicherheit des Potentiometers, welche sich auf ca. 20Ω beläuft.

Beide Widerstände können zur Temperaturmessung verwendet werden, indem man bei einer angelegten Spannung, den Strom durch den Widerstand bestimmt und über eine zuvor er-

stellte Eichkurve einen Wert ermittelt. Ebenso lässt sich mithilfe dieser Temperaturmessmethode eine Füllstandsanzeige entwickeln, bei der mehrere, übereinanderliegende, Widerstände über die Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit die Pegelhöhe bestimmen. Die Strombegrenzung könnte realisiert werden, indem man einen PTC vorschaltet. Dieser würde bei einer zu hohen Stromstärke seinen Widerstand erhöhen und somit den Strom, der über ein BAuteil fließt begrenzen.

2.5.2 Aufgabe 2: Kennlinien

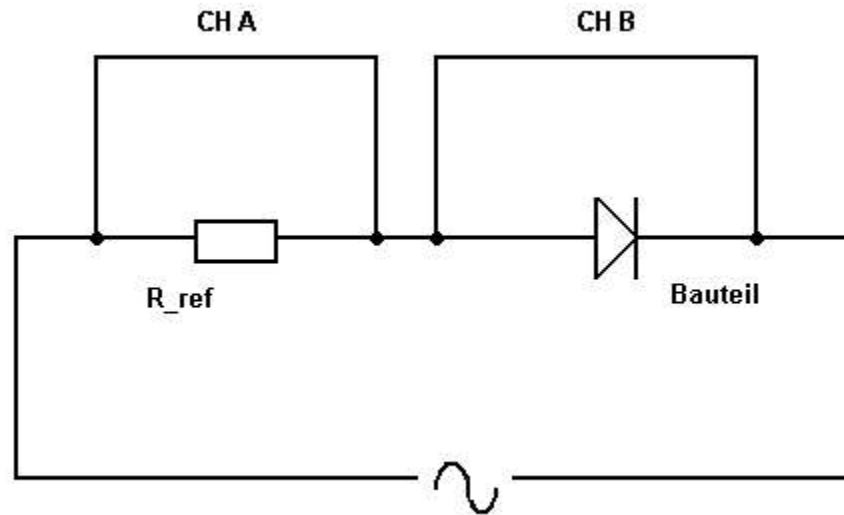
Überlegen Sie sich zur Vorbereitung auf diesem Versuch Antworten zu den folgenden Fragen und fertigen Sie entsprechende Schaltskizzen an:

- Wie können Sie eine Spannungsstabilisierung mit Hilfe einer Zenerdiode realisieren?
 - Wird die Zenerdiode parallel mit dem Verbraucher, der geschützt werden soll, in Sperrrichtung geschaltet, so fließt bei einer Spannung unter der sog. Zenerspannung kein oder nur wenig Strom durch die Diode. Durch die Dotierung kann diese Zenerspannung sehr präzise eingestellt werden. Übersteigt die anliegende Spannung diese Zenerspannung, kommt es zum sog. Lawinendurchbruch. Der Strom durch die Diode steigt sehr schnell stark an. Damit kann der Verbraucher vor zu hohen Spannungen geschützt werden, indem eine auf den Verbraucher abgestimmte Zenerdiode verwendet wird.
- Wie können Sie den Varistor als Schutz gegen induzierte Spannungen an geschalteten Induktivitäten verwenden?
 - Wie auch die Zenerdiode kann ein Varistor parallel mit einem zu schützenden Verbraucher geschaltet werden. Ungewollte Induktionsspannungen können schnell hohe Werte erreichen und damit Verbraucher zerstören. Der Varistor wird bei hohen Spannungen aber niederohmig, wodurch dann ein Strom durch den Varistor fließt, statt durch den Verbraucher.

Aufgabe 2.1 Nehmen Sie die Kennlinien folgender Bauteile am USB-Oszilloskop auf:

- Si-Diode (SID)
- Ge-Diode (GED)
- Zener-Diode (ZED)
- Varistor (VDR)
- Fotodiode
- Fotowiderstand
- LED (in vier verschiedenen Farben).

Verwenden Sie dafür die Versuchsbox mit der folgenden Schaltskizze, an die Sie das Eingangssignal über den Trenntransformator in Form einer sinusförmigen Wechselspannung (mit der Frequenz $\nu = 100 \text{ Hz}$) angelegen: ([Link](#))



Gemäß der Schaltung werden über einem Widerstand (mit $R = 100\ \Omega$) 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 die folgenden Eigenschaften:

- Die SID, GED und ZED auf ihre jeweilige Schwellenspannung und ggf. auch Zenerspannung.
- Das Verhalten der Fotodiode bei verschiedenen Beleuchtungen (z.B. durch die Smartphone-Lampe).
- Das Verhalten des Fotowiderstands bei verschiedenen Beleuchtungen.
- Die Verschiedenfarbigen 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 Fotowiderstand aus der Steigung der Kennlinien den jeweiligen Widerstandswert. Schließen Sie auf typische Eigenschaften der Bauteile und leiten Sie daraus mögliche Anwendungen ab.

```
[8]: si_kennl = pd.read_csv(f"{str(pathlib.Path().resolve())}/Messungen/2.1/Si_Kennl.
    ↪ csv", delimiter=";", decimal=".")
ge_kennl = pd.read_csv(f"{str(pathlib.Path().resolve())}/Messungen/2.1/Ge_Kennl.
    ↪ csv", delimiter=";", decimal=".")
ze_kennl = pd.read_csv(f"{str(pathlib.Path().resolve())}/Messungen/2.1/Ze_Kennl.
    ↪ csv", delimiter=";", decimal=".")
vari_kennl = pd.read_csv(f"{str(pathlib.Path().resolve())}/Messungen/2.1/
    ↪ Vari_Kennl.csv", delimiter=";", decimal=".")
foto_kennl_licht = pd.read_csv(f"{str(pathlib.Path().resolve())}/Messungen/2.1/
    ↪ Fotodiode_Kennl_Licht.csv", delimiter=";", decimal=".")
foto_kennl_finger = pd.read_csv(f"{str(pathlib.Path().resolve())}/Messungen/2.1/
    ↪ Fotodiode_Kennl_Finger.csv", delimiter=";", decimal=".")
```

```

si_kennl_diode = np.array(si_kennl["Kanal B"][1:], dtype=np.float32)
si_kennl_ref = np.array(si_kennl["Invertieren A"][1:], dtype=np.float32) * 10**(-3)

ge_kennl_diode = np.array(ge_kennl["Kanal B"][1:], dtype="float32")
ge_kennl_ref = np.array(ge_kennl["Invertieren A"][1:], dtype=np.float32) * 10**(-3)

ze_kennl_diode = np.array(ze_kennl["Kanal B"][1:], dtype=np.float32)
ze_kennl_ref = np.array(ze_kennl["Invertieren A"][1:], dtype=np.float32) * 10**(-3)

vari_kennl_diode = np.array(vari_kennl["Kanal B"][1:], dtype=np.float32)
vari_kennl_ref = np.array(vari_kennl["Invertieren A"][1:], dtype=np.float32) * 10**(-3)

foto_kennl_licht_diode = np.array(foto_kennl_licht["Kanal B"][1:], dtype=np.float32)
foto_kennl_licht_ref = np.array(foto_kennl_licht["Invertieren A"][1:], dtype=np.float32) * 10**(-3)

foto_kennl_finger_diode = np.array(foto_kennl_finger["Kanal B"][772:968], dtype=np.float32)
foto_kennl_finger_ref = np.array(foto_kennl_finger["Invertieren A"][772:968], dtype=np.float32) * 10**(-3)

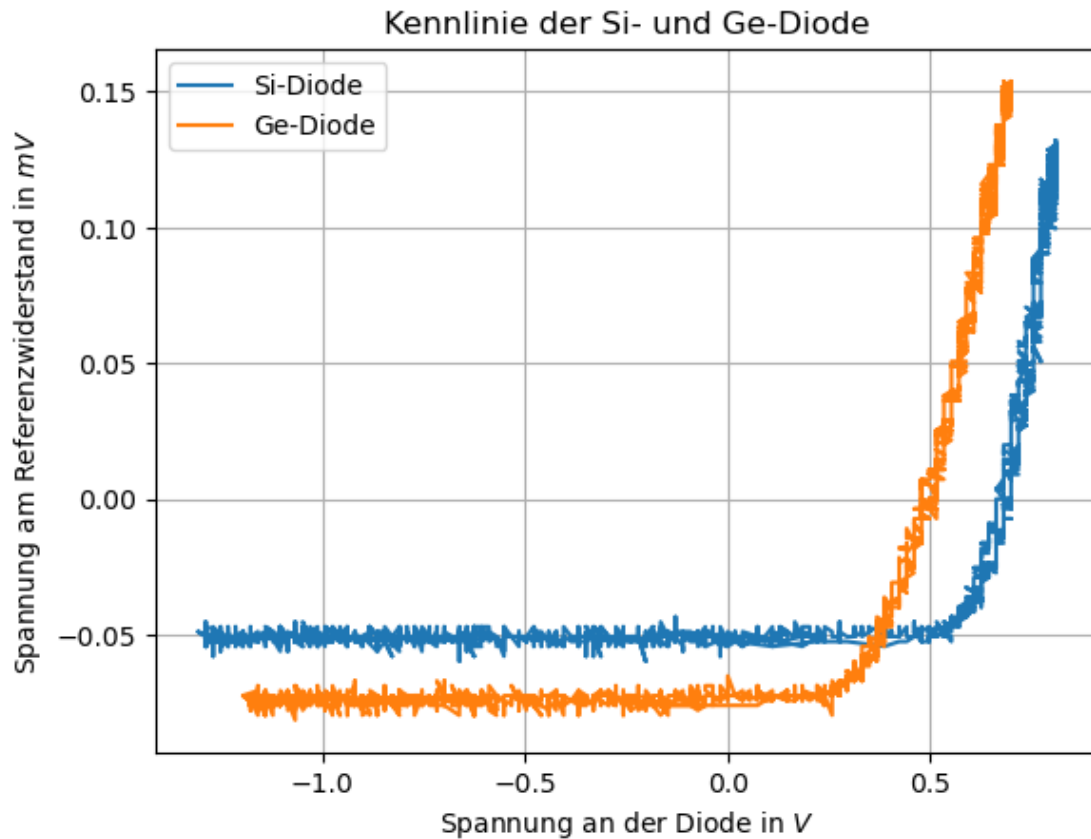
```

```

[9]: fig, ax1 = plt.subplots()

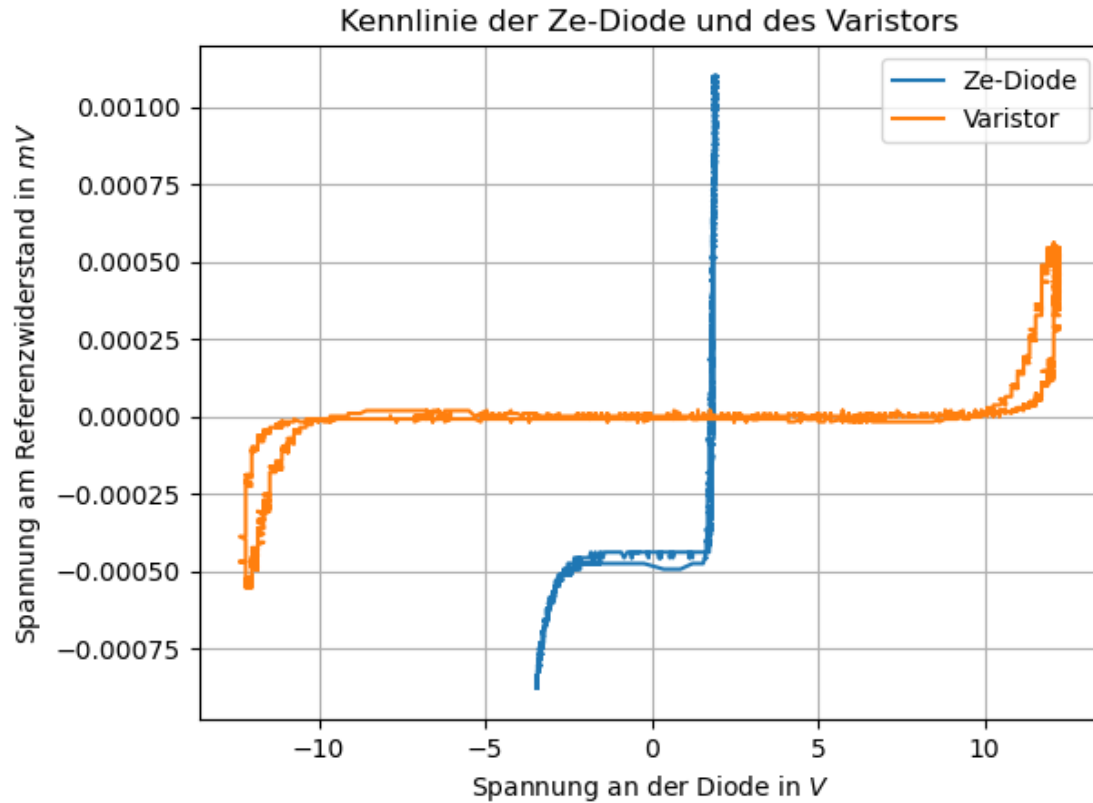
ax1.plot(si_kennl_diode, si_kennl_ref, label="Si-Diode")
ax1.plot(ge_kennl_diode, ge_kennl_ref, label="Ge-Diode")
ax1.grid()
ax1.set(xlabel=f"Spannung an der Diode in $V$", ylabel=f"Spannung am Referenzwiderstand in $mV$", title="Kennlinie der Si- und Ge-Diode")
ax1.legend()
plt.show()

```



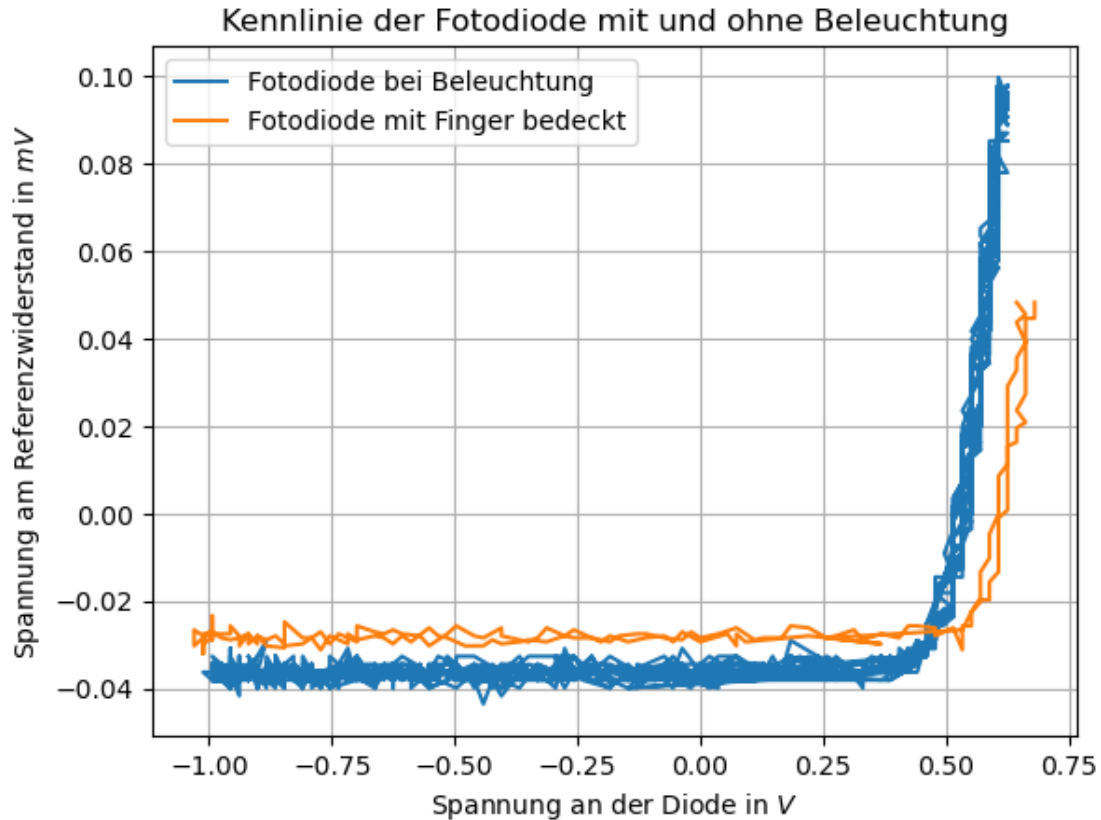
```
[10]: fig, ax2 = plt.subplots()

ax2.plot(ze_kennl_diode, ze_kennl_ref, label="Ze-Diode")
ax2.plot(vari_kennl_diode, vari_kennl_ref, label="Varistor")
ax2.grid()
ax2.set(xlabel="Spannung an der Diode in $V$", ylabel="Spannung am_\n
↳Referenzwiderstand in $mV$", title="Kennlinie der Ze-Diode und des_\n
↳Varistors")
ax2.legend()
plt.show()
```



```
[11]: fig, ax3 = plt.subplots()

ax3.plot(foto_kennl_licht_diode, foto_kennl_licht_ref, label="Fotodiode bei_
↳Beleuchtung")
ax3.plot(foto_kennl_finger_diode, foto_kennl_finger_ref, label="Fotodiode mit_
↳Finger bedeckt")
ax3.grid()
ax3.set(xlabel="Spannung an der Diode in $V$", ylabel="Spannung am_
↳Referenzwiderstand in $mV$", title="Kennlinie der Fotodiode mit und ohne_
↳Beleuchtung")
ax3.legend()
plt.show()
```



Für die Silizium-Diode wurde mithilfe der Pioscope-Software eine Schwellenspannung von 0.5668 V bestimmt, für die Germanium-Diode eine Schwellenspannung von 0.2698 V und für die Zener-Diode 1.681 V . Zusätzlich wurde für die Zener-Diode die sog. Zener-Spannung zu -2.591 V bestimmt, bei der es zum Lawinendurchbruch kommt. Der Varistor ist symmetrisch was die Schwellenspannung angeht, diese liegt bei $\pm 10.55\text{ V}$.

Mit der Foto-Diode wurden zwei Kennlinien aufgenommen: zunächst wurde sie mit einem Finger bedeckt, dann mit einer Handy-Taschenlampe. Ebenfalls mit der Picoscope-Software wurden dann jeweils Schwellenspannung und der Spannungswert der Horizontalen ("Null") bestimmt.

- Schwellenspannung mit Finger: $U_{S,Fi} = 525.9\text{ mV}$
- Schwellenspannung bei Beleuchtung: $U_{S,Li} = 398.9\text{ mV}$
- "Null" mit Finger: $U_{N,Fi} = -28.05\text{ mV}$
- "Null" bei Beleuchtung: $U_{N,Li} = -35.68\text{ mV}$

Im folgenden sind die Kennlinien eines Foto-Widerstands zu sehen. Im ersten Bild wieder bei Beleuchtung mit einer Handy-Taschenlampe, im zweiten bei Raumlicht. Mithilfe der Picoscope-Software wurde jeweils ein Messpunkt auf der Geraden genommen, aus dem sich leicht die Steigung der Geraden berechnen lässt (bezogen auf den Nullpunkt, da beide Geraden durch $(0,0)$ gehen).

- Steigung der Kennlinie des Fotowiderstands bei Beleuchtung: $m = 2.49$
- Steigung der Kennlinie des Fotowiderstands bei Raumlicht: $m = 0.194$

Mit dieser Steigung und dem Referenzwiderstand erhält man den Widerstand bei verschiedenen

Beleuchtungen: $R_{Ph} = \frac{R_{ref}}{m}$, wobei $R_{ref} = 100 \Omega$

- Widerstand bei Beleuchtung: $R_{Ph} = \frac{100 \Omega}{2.49} \approx 40.2 \Omega$

- Widerstand bei Raumlicht: $R_{Ph} = \frac{100 \Omega}{0.194} \approx 515.5 \Omega$

Da der Widerstand antiproportional zur Spannung ist, kann man den Widerstand so berechnen.



Schließlich wurden noch verschiedenfarbige LEDs auf Schwellenspannung und den Zusammenhang mit der Frequenz des emittierten Lichts untersucht:

Farbe	Rot	Orange	Gelb	Grn
Schwellenspannung	2.009 V	2.111 V	2.159 V	2.186 V

Von Rot nach Grün steigt die Schwellenspannung also mit der Frequenz des emittierten Lichts. Dieser Zusammenhang war auch zu erwarten, da rotes Licht die niedrigste, grünes Licht die höchste Energie hat.

```
[12]: U_Si = 0.5668
      U_Ge = 0.2698
      U1_Ze = 1.681
      U2_Ze = -2.591
      U_VDR = 10.55
      # Photodiode zuerst mit Finger und dann mit Taschenlampe
      U_Foto_Schwelle_Finger = 525.9*10**(-3)
      U_Foto_Null_Finger = -28.05*10**(-3)
      U_Foto_Schwelle_Licht = 398.9*10**(-3)
      U_Foto_Null_Licht = -35.68*10**(-3)
      # Photowiderstand gleich mit Diode
      R_Foto_Raum = 104.7 / 540.5
      R_Foto_Licht = 176.1 / 70.73
      U_rot = 2.009
      U_orange = 2.111
      U_gelb = 2.159
      U_grün = 2.186
```

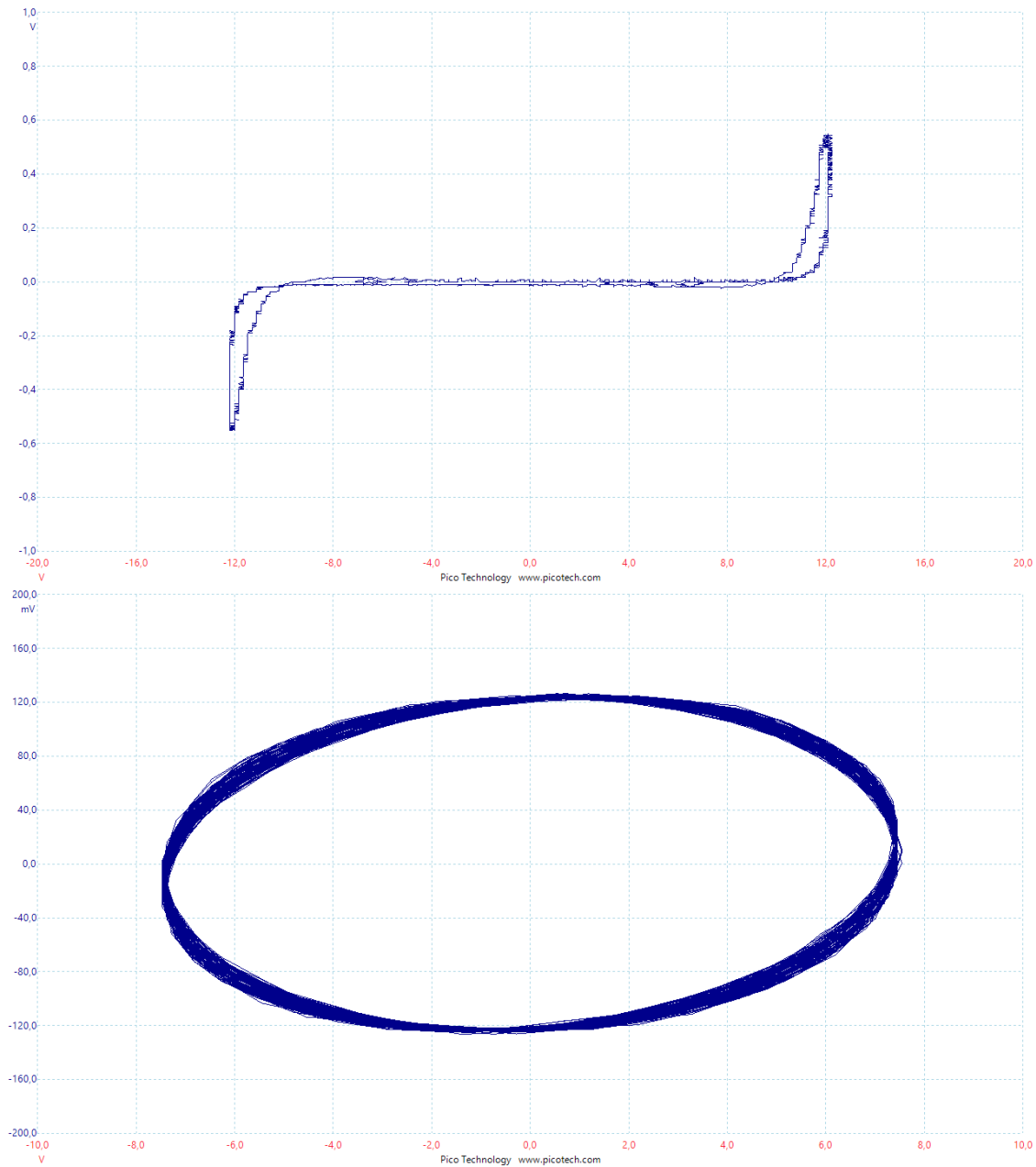
Aufgabe 2.2 Untersuchen Sie qualitativ die Frequenzabhängigkeit einiger Bauelemente bei Frequenzen von $\nu = 0,1 \text{ kHz}$ bis 10 kHz .

Für diese Aufgabe wurden die Si-Diode und der Varistor untersucht.

Die Kennlinie der Si-Diode wurde für zwei Frequenzen, $\nu = 100 \text{ Hz}$ und $\nu = 3 \text{ kHz}$ aufgenommen. Man sieht im Vergleich der beiden Kennlinien sehr deutlich, dass zu höheren Frequenzen der Spannung hin die Kennlinie zunehmend hysteresisch verläuft, d.h. dass der Spannungsverlauf an der Diode beim Anstieg der Eingangsspannung anders verläuft als beim Sinken. Die Schleife im Sperrbereich der Diode ist dadurch sehr klar zu erkennen:



Diesen Effekt sieht man beim Varistor noch um einiges stärker. Dazu wurde seine Kennlinie für zwei Frequenzen $\nu = 100\text{ Hz}$ und $\nu = 10\text{ kHz}$ aufgenommen. Bei 100 Hz zeigt sich noch die normale Kennlinie eines Varistors, bei 10 kHz ist sie praktisch nicht mehr zu sehen, sondern ein ovaler Graph.



2.5.3 Aufgabe 3

Nehmen Sie die Kennlinie einer Fotodiode bei verschiedenen Beleuchtungsstärken auf und entnehmen Sie dieser jeweils den Sperrstrom. Verwenden Sie hierzu die Schaltung aus Aufgabe 2 aus bei $\nu = 10$ Hz, sowie die regulierbare Experimentierleuchte mit Fotodioden-Aufsatz. Beginnen Sie bei einer Lampenspannung von $U = 2$ V als niedrigste Stufe der Beleuchtung und beobachten Sie die Veränderung der Kennlinie bei zunehmender Spannung (in Schritten von 1 V) und Beleuchtungsstärke. Stellen Sie in der Auswertung den Zusammenhang zwischen Sperrstrom und Beleuchtungsstärke graphisch dar.

Hinweis: Die Umrechnungstabelle zwischen Lampenspannung und Beleuchtungsstärke finden Sie

unter `params/Umrechnung_Lampenspannung.csv`.

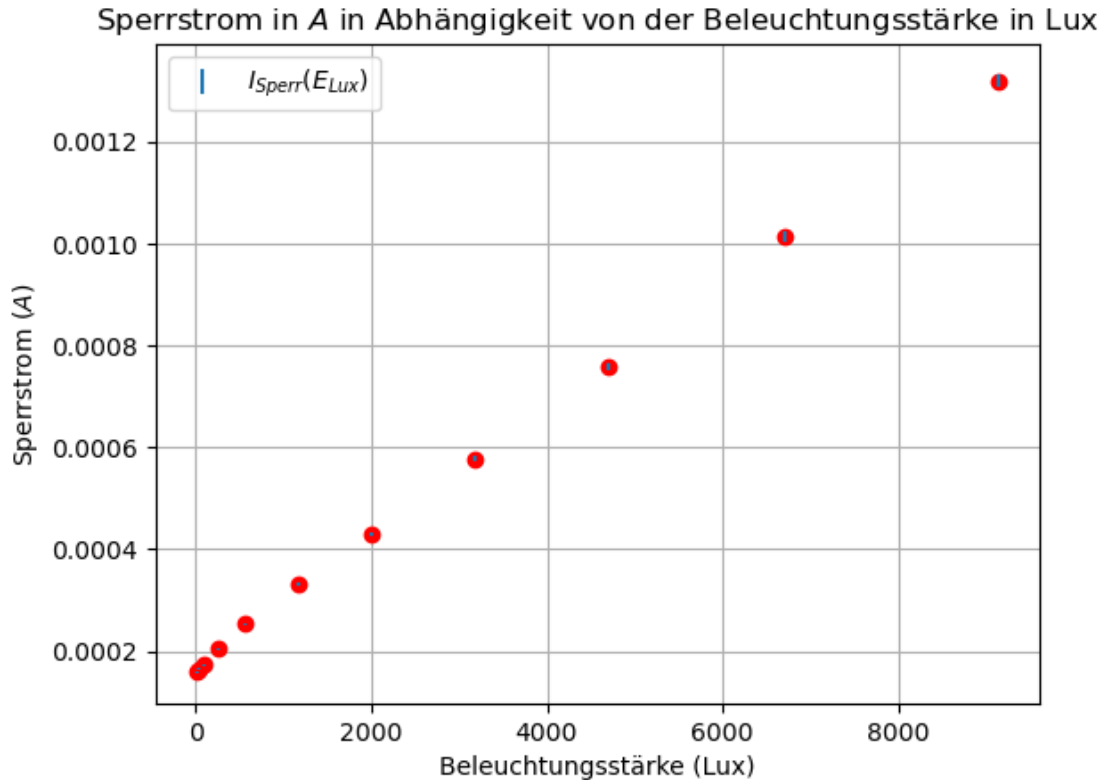
```
[49]: # Beleuchtungsspannung in Beleuchtungsstärke umrechnen und
# Abweichung der Spannung von der 0 mit Ohmschem Gesetz und 100Ohm
# Referenzwiderstand in Sperrstrom umrechnen

# Lampenspannung
U_Lampe = np.array([2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]) #in V
# Beleuchtungsstärke in lux
lux = np.array([2, 22, 84, 258, 560, 1177, 2010, 3184, 4695, 6710, 9155])

# Abweichung der Horizontalen der Kennlinie von der 0
U_Abw = np.array([-15.9, -16.43, -17.37, -20.42, -25.35, -33.33, -42.96, -57.
#75, -75.82, -101.4, -131.9]) * (-10**(-3)) #in mV
U_Abw_std = 10**(-4) #V
R_ref = 100 #Ohm
R_ref_std = 1 #Ohm

I_Sperr = U_Abw / R_ref
I_Sperr_std = np.sqrt( (U_Abw_std / R_ref)**2 + (U_Abw * R_ref_std /
#R_ref**2)**2 )

fig4, ax4 = plt.subplots()
ax4.plot(lux, I_Sperr, "ro")
ax4.errorbar(lux, I_Sperr, yerr=I_Sperr_std, fmt="none",
#label="$I_{Sperr}(E_{Lux})$")
ax4.grid()
ax4.set(xlabel="Beleuchtungsstärke (Lux)", ylabel="Sperrstrom ($A$)",
#title="Sperrstrom in $A$ in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke in Lux")
ax4.legend()
plt.show()
```

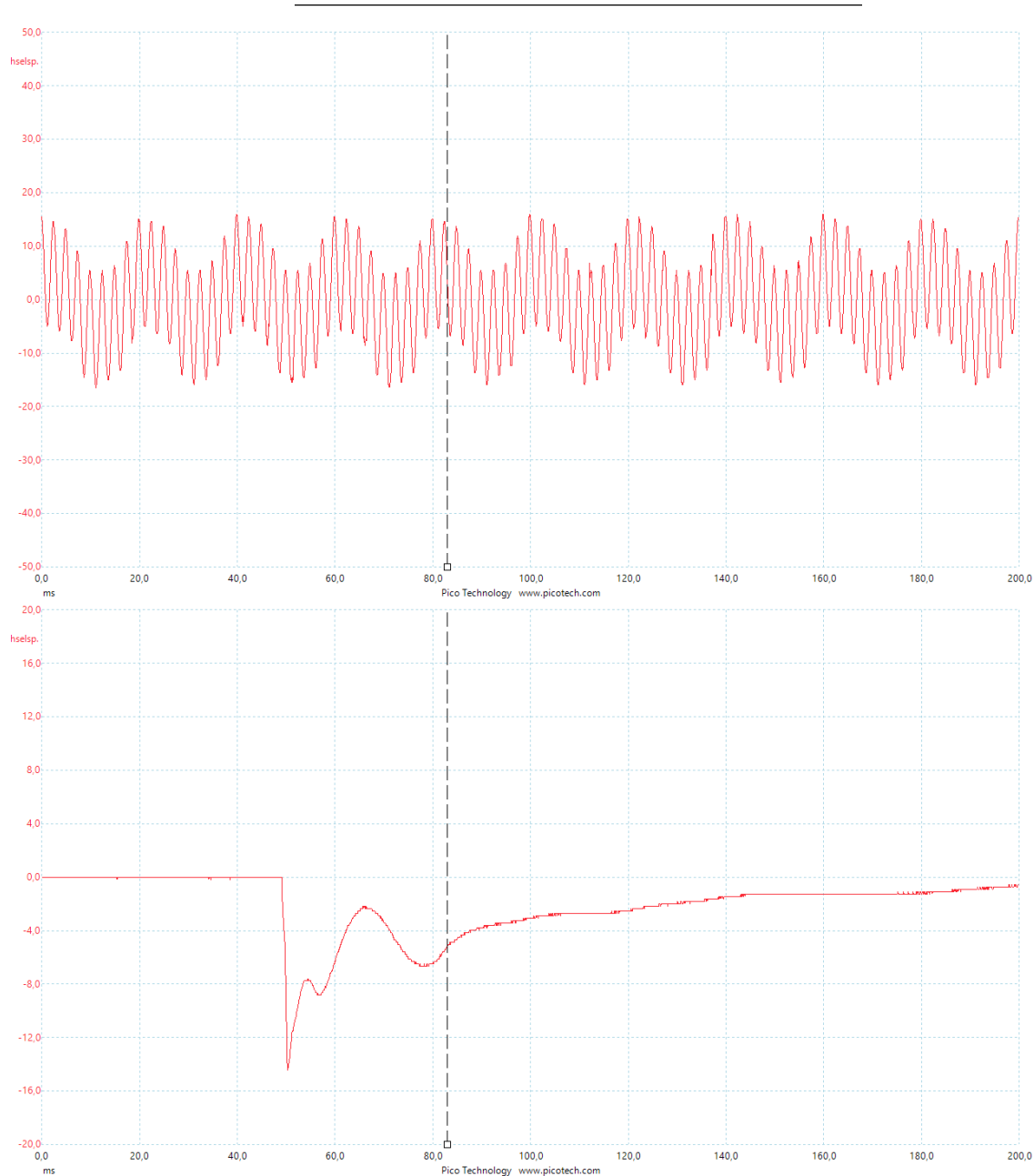


Mit steigender Beleuchtungsstärke steigt der Betrag des Sperrstrom scheinbar linear. Eigentlich war aber ein logarithmischer Zusammenhang erwartet worden, der sich am Anfang etwas ankündigt, dann aber zu einem linearen übergeht. Das könnte daran liegen, dass mit dem PicoScope fälschlicherweise im AC-Modus statt im DC-Modus gemessen wurde, wodurch auch ohne Beleuchtung bereits ein Sperrstrom gemessen wird. Die Unsicherheit auf die Messung der Abweichung der Spannung von der 0 wird auf etwa 0.1 mV geschätzt, die auf den Widerstand auf 1Ω . Durch die Umrechnung der Spannung in den Sperrstrom wird der Fehler auf letzteres aber so klein, dass die Errorbars in blau kaum mehr zu sehen sind.

2.5.4 Aufgabe 4: Piezoelektrischer Effekt

Untersuchen Sie den piezoelektrischen Effekt am Piezoelement. Gehen Sie dabei wie folgt vor:

- Beobachten Sie den direkten piezoelektrischen Effekt am USB-Oszilloskop, indem Sie manuell verschiedene Drücke auf das Piezoelement 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 die Funktion des Piezoelements als Lautsprecher. Schließen Sie es hierzu direkt an den Frequenzgenerator an.
- Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen und diskutieren Sie Anwendungen des piezoelektrischen Effekts.



Da unser Piezoelement zum Zeitpunkt der Versuchs kaputt war, konnten wir diesen Versuch nicht durchführen. Jedoch haben wir uns mit der nebensitzenden Gruppe zusammengetan und somit trotzdem Ergebnisse erhalten.

In der oberen Grafik ist das Signal eines Piezoelementes zu sehen, das durch ein Lautsprechersignal angeregt wird. Es zeigt sich jedoch eine zweite Frequenz, die auf die Netzspannung zurückzuführen ist. In der zweiten Grafik ist ein Signal zu sehen, das durch einen leichten Schlag auf das Element entsteht.

Der indirekte piezoelektrische Effekt wurde beobachtet, indem eine Wechselspannungsquelle an den Kristall angeschlossen wurde, was zu Schwingungen des Selben führt und so einen hörbaren Ton

verursacht. Dieser was auchnoch aus einiger Distanz wahrnehmbar.

2.5.5 Aufgabe 5: Hochtemperatursupraleiter

Bestimmen Sie die Sprungtemperatur eines Hochtemperatursupraleiters. Gehen Sie dabei wie folgt vor:

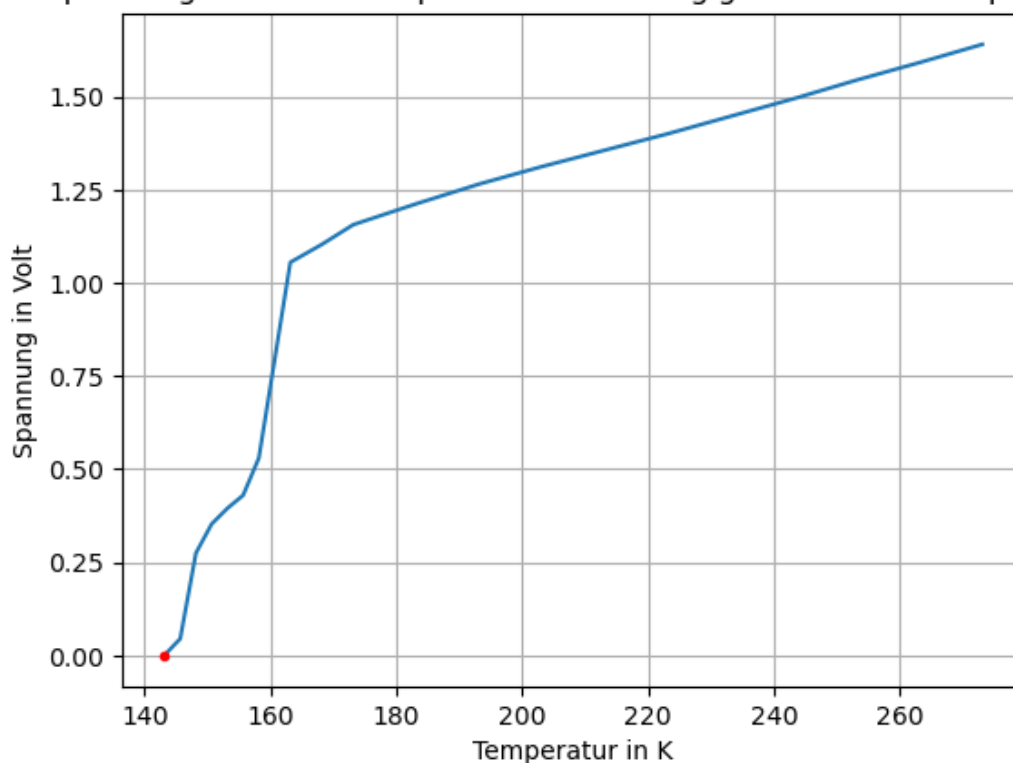
Messen Sie den Spannungsabfall am Hochtemperatursupraleiter mit Hilfe der fertig aufgebauten Vierleiterschaltung ($I_{\text{const}} = 63 \text{ mA}$) und des Multimeters. Kühlen Sie die Probe von Raumtemperatur auf $T = 77 \text{ K}$ ab. Nutzen Sie hierfür den Temperaturgradienten über dem Stickstoff-Bad. Nehmen Sie eine Messreihe aus U_{gem} und zugehöriger Temperatur T (in Schritten von 5 K) auf. Beschreiben Sie das Verhalten des Hochtemperatursupraleiters.

- Tragen Sie zur Auswertung den Widerstand $R = U_{\text{gem}}/I$ 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 im Datenblatt angegebenen Tabelle [params/Temperatur_Korrektur.csv](#) vom wahren Wert abweicht. Für die Beurteilung der Sprungtemperatur beachten Sie, dass am Ort von Temperatursensor und Supraleiter ein hoher Temperaturgradient vorliegt.

```
[ ]: # T =  
      ↪ [0, -11, -20, -30, -40, -50, -60, -70, -80, -90, -95, -100, -105, -110, -115, -120, -125, -130, -135]  
# U = [1.201, 1.160, 1.128, 1.091, 1.057, 1.020, 0.984, 0.951, 0.916, 0.882, 0.860, 0.  
      ↪ 835, 0.813, 0.798, 0.773, 0.745,] #in V  
values = [(273.15, 1.64), (263.15, 1.591), (253.15, 1.544), (243.15, 1.494), (233.15, 1.  
      ↪ 447), (223.15, 1.4), (213.15, 1.356), (203.15, 1.312), (193.15, 1.265), (183.15, 1.  
      ↪ 212), (173.15, 1.156), (168.15, 1.103), (163.15, 1.055), (158.15, 0.53), (155.65, 0.  
      ↪ 430), (153.15, 0.395), (150.65, 0.353), (148.15, 0.275), (145.65, 0.045), (143.15, 0.  
      ↪ 001)]  
T = [x[0] for x in values]  
U = [x[1] for x in values]  
  
plt.plot(T,U)  
  
plt.xlabel('Temperatur in K')  
plt.ylabel('Spannung in Volt')  
plt.title('Spannung über einen Supraleiter in Abhängigkeit von der Temperatur')  
plt.grid()  
plt.plot(143,0,'r.')  
  
plt.show()
```

Spannung über einen Supraleiter in Abhängigkeit von der Temperatur



In diesem Versuch waren unsere eigenen Messdaten unzuverlässig, da ab einem bestimmten Punkt die gemessene Temperatur immer weiter stieg, obwohl der Supraleiter bereits sehr dicht über dem flüssigen Stickstoff hing. Als wir versuchten, diesen tiefer zu hängen, berührte er jedoch die Flüssigkeit und wurde zu kalt. Über den ganzen Versuch hinweg konnten wir diese Kombination aus Problemem nicht lösen und müssen deshalb mit den Daten einer anderen Gruppe arbeiten.

Man erkennt im Graphen der Spannung mehrere Abfälle, jedoch erkennt man deutlich den Punkt, ab dem das Material supraleitend wird. Dieser Punkt ist ca. bei $143 \pm 2K$, mit einer Ablesunsicherheit der Temperatur von $1K$. Die Unsicherheit der Spannung entsteht daraus, dass die Temperatur kontinuierlich sinkt und beläuft sich auf ca. $10mV$.

In diesem Fall wird eine Vierleiterschaltung verwendet, da diese besonders bei der Messung von kleinen Widerständen, beziehungsweise Spannung, Vorteile bieten.