

Praktikumsauswertung

Eigenschaften Elektrischer Bauelemente

André Schendel, Silas Kraus
Gruppe Bilder

9. Juli 2012

1 Temperaturabhängigkeit des NTC und PT100

NTC

Die Wheatstonesche Brückenschaltung wurde entsprechend der Schaltskizze in der Vorbereitungshilfe aufgebaut. Als Referenzwiderstand wurde für den NTC ein $1.2k\Omega$ - Widerstand verwendet. Dann wurde die Ofenheizung eingeschaltet und ungefähr in $5K$ - Schritten gemessen. Dazu wurde jeweils der Teilwiderstand a des Potentiometers so eingestellt, dass der Brückenstrom I möglichst verschwand. Dies war durch leichte Werteschwankungen nicht immer ganz möglich, insbesondere, da die Temperatur kontinuierlich auch während dem Ablesen weiter stieg. Die Schwankungen blieben jedoch in einem vertretbaren Rahmen.

Die Messung lieferte folgende Ergebnisse:

Tabelle 1: Messwerte zur Temperaturabhängigkeit des NTC- Widerstands. (a und b sind die Teilwiderstände des Potis. Vergleiche dazu den Schaltplan in der Vorbereitungshilfe.)

T (°C)	T (K)	a (Ω)	b (Ω)	R_x (Ω)	T (°C)	T (K)	a (Ω)	b (Ω)	R_x (Ω)
27	300.5	5840	4160	1684.62	116	389.5	1570	8430	223.49
37	310.5	5405	4595	1411.53	124	397.5	1340	8660	185.68
43	316.5	5178	4822	1288.59	128	401.5	1270	8730	174.57
48	321.5	4922	5078	1163.14	132	405.5	1060	8940	142.28
54	327.5	4620	5380	1030.48	138	411.5	1010	8990	134.82
59	332.5	4339	5661	919.77	142	415.5	930	9070	123.04
66	339.5	3952	6048	784.13	147	420.5	715	9285	92.41
70	343.5	3716	6284	709.61	156	429.5	550	9450	69.84
76	349.5	3423	6577	624.54	166	439.5	515	9485	65.16
80	353.5	3288	6712	587.84	173	446.5	400	9600	50
86	359.5	2970	7030	506.97	178	451.5	420	9580	52.61
91	364.5	2808	7192	468.52	184	457.5	350	9650	43.52
96	369.5	2585	7415	418.34	188	461.5	265	9735	32.67
100	373.5	2415	7585	382.07	196	469.5	240	9760	29.51
106	379.5	2040	7960	307.54	200	473.5	230	9770	28.25
110	383.5	1660	8340	238.85					

Um die Abhängigkeit $R(T) = \alpha * e^{\frac{\beta}{T}}$ bzw. $\ln[R(T)] = \ln(\alpha) + \frac{\beta}{T}$ zu demonstrieren, wurde der Widerstand logarithmiert und über $\frac{1}{T}$ aufgetragen. (siehe Graph auf der nächsten Seite.)

Es zeigt sich, dass die Messkurve in dieser Auftragung nicht exakt linear verläuft, wie erwartet, sondern einen leichten Bogen macht. Ein möglicher Grund dafür ist, dass der Drucktaster zum kurzzeitigen Schließen des Stromkreises defekt war und dauerhaft geschlossen blieb. Er diente eigentlich dazu, eine zusätzliche Erwärmung des Widerstands durch den fließenden Strom zu vermeiden. Dies war so nicht gewährleistet, sodass der Widerstand vermutlich zeitweise wärmer war als die Umgebungstemperatur des Ofens.

Aus der Regressionsgeraden kann abgelesen werden:

$$\beta = 3557(\pm 113), \quad \ln(\alpha) = -3.89(\pm 0.3) \quad \Rightarrow \quad \boxed{\alpha = 0.02 \Omega (\pm 0.74), \quad \beta = 3557 K (\pm 113)}$$

Dies bedeutet eine Abweichung von 98% für α und 34% für β von den Werten im Musterprotokoll. Man beachte, dass der relative Fehler für α um ein Vielfaches größer ist als der Wert selbst. Diese Messwerte sind also für

quantitative Aussagen nicht zu gebrauchen. Da die folgende Messung, bei der der defekte Drucktaster durch ein- und ausstecken kompensiert wurde, sehr gute Ergebnisse lieferte, ist zu vermuten, dass die Selbsterwärmung des Widerstands die Ursache war.

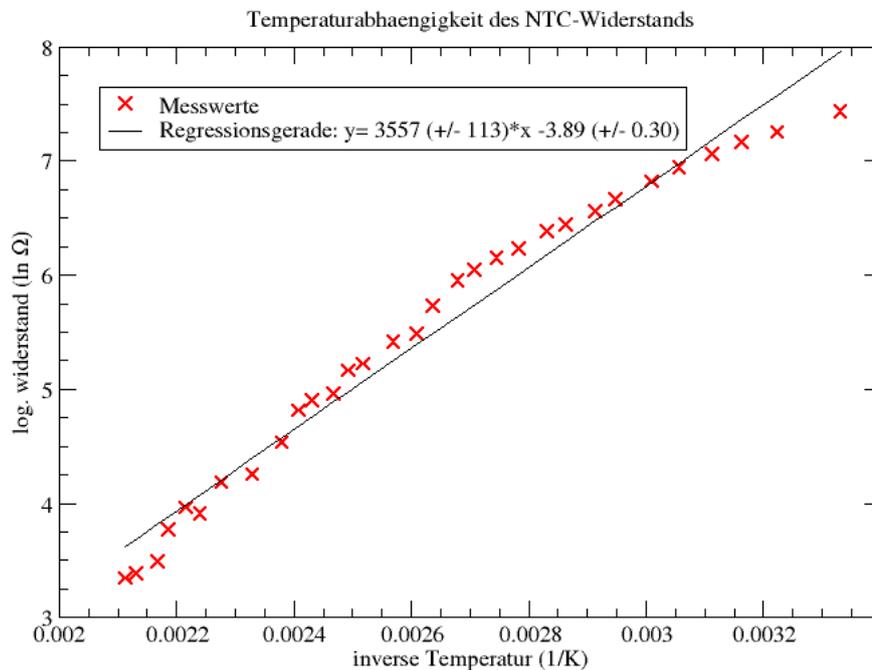


Abbildung 1: Temperaturabhängigkeit des NTC- Widerstands

PT100

Für den PT100- Widerstand (also mit positivem Temperaturkoeffizienten) wurde ein Referenzwiderstand mit 100Ω gewählt. Da der Ofen bereits heiß war, wurde die Messung während des Abkühlens vorgenommen. Um den defekten Tastknopf zu kompensieren, wurde diesmal für jede Messung die Schaltung ein- und ausgesteckt.

Tabelle 2: Messwerte zur Temperaturabhängigkeit des PT100- Widerstands, (a und b sind die Teilwiderstände des Potis. Vergleiche dazu den Schaltplan in der Vorbereitungshilfe.)

T (°C)	T (K)	a (Ω)	b (Ω)	R_x (Ω)	T (°C)	T (K)	a (Ω)	b (Ω)	R_x (Ω)
161	434.5	6035	3965	152.21	95	368.5	5608	4392	127.69
156	429.5	5985	4015	149.07	90	363.5	5580	4420	126.24
149	422.5	5930	4070	145.70	84	357.5	5550	4450	124.72
143	416.5	5885	4115	143.01	79	352.5	5518	4482	123.11
138	411.5	5850	4150	140.96	75	348.5	5495	4505	121.98
134	407.5	5840	4160	140.38	70	343.5	5458	4542	120.17
128	401.5	5810	4190	138.66	65	338.5	5438	4562	119.20
124	397.5	5780	4220	136.97	60	333.5	5405	4595	117.63
119	392.5	5740	4260	134.74	55	328.5	5370	4630	115.98
114	387.5	5728	4272	134.08	50	323.5	5345	4655	114.82
109	382.5	5690	4310	132.02	45	318.5	5310	4690	113.22
103	376.5	5665	4335	130.68	40	313.5	5272	4728	111.51
100	373.5	5640	4360	129.36	35	308.5	5230	4770	109.64

Der Zusammenhang war wie erwartet linear: $R(T) = R_0 + c * T$ (Siehe Graph auf Seite 3)

R_0 und c können hier direkt aus der Regressionsgeraden abgelesen werden:

$$c = 0.317 (\pm 0.005), \quad R_0 = 11.75 (\pm 1.68)$$

Im Musterprotokoll wurden sowohl eine andere Formel als auch ein offenbar ganz anderer Widerstand verwendet. Deshalb liegt hier kein Vergleichswert vor. Die geringen statistischen Fehler lassen aber vermuten, dass die Werte recht zuverlässig sind.

Außerdem sollte der Widerstandswert bei 0°C bzw. 273.15 K berechnet werden, der laut Herstellerangaben 100Ω sein müsste. Die Regressionsgerade ergibt einen Widerstandswert von 98.3Ω , was eine Abweichung von lediglich 1.7% bedeutet. Dies kann als weiterer Hinweis gewertet werden, dass die Ergebnisse relativ genau sind.

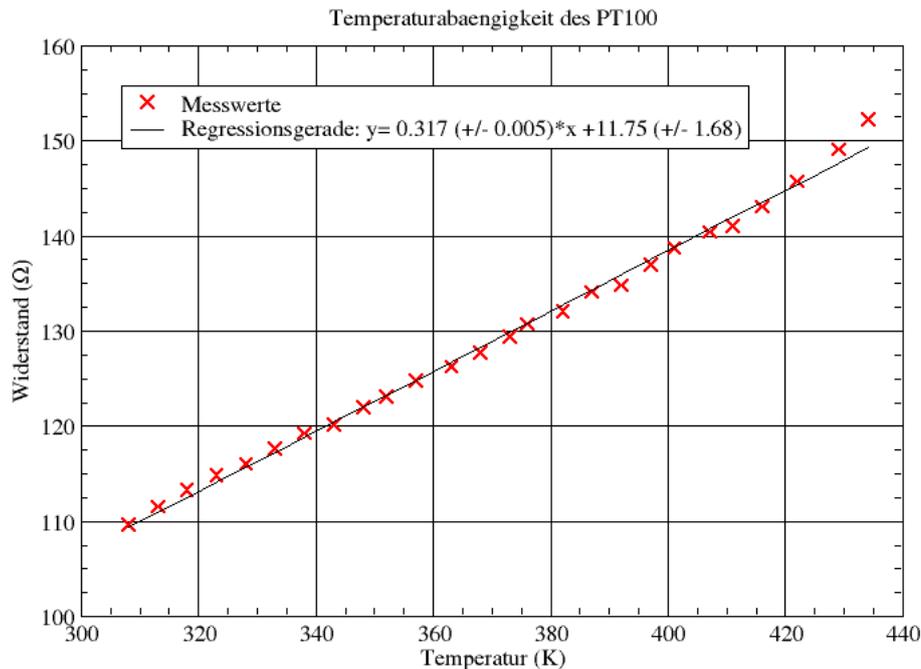


Abbildung 2: Temperaturabhängigkeit des PT100

2 Kennlinien

Die Kennlinien der einzelnen Bauteile wurden jeweils mit dem Oszilloskop angezeigt. Bei allen Bauteilen wurde der 100Ω - Widerstand als Referenzwiderstand verwendet.

Si- Diode

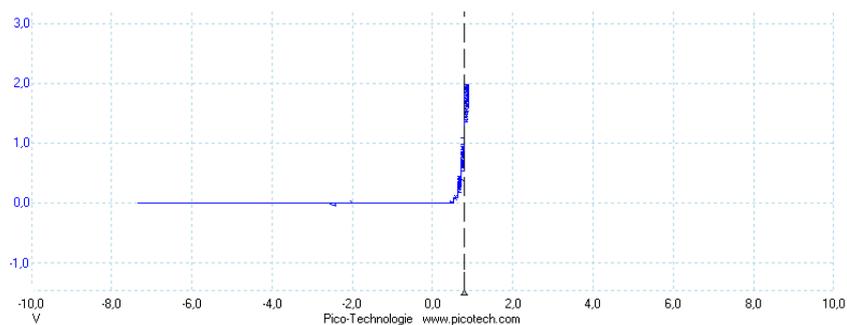


Abbildung 3: Kennlinie der SiD

Die schwarze Senkrechte Linie zeigt die Schwellenspannung, den Schnittpunkt der Tangente mit der x-Achse an:

$$U_{Schw}^{Si} = 830mV$$

Diese Spannung ist notwendig, um das E-Feld der Raumladungszone zu überwinden. Ist sie erst erreicht, steigt der Stromfluss in Durchlassrichtung sprunghaft an. In Sperrichtung (negative x-Achse) wird die Raumladungszone dagegen immer weiter verbreitert und der Stromfluss bleibt 0.

Ge- Diode

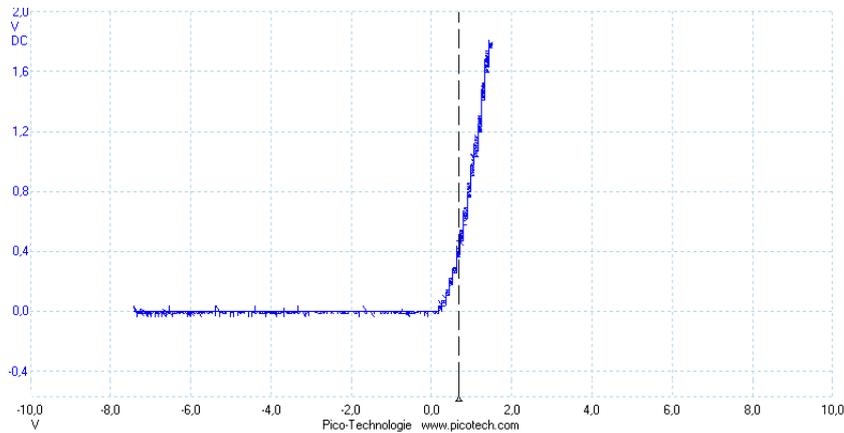


Abbildung 4: Kennline der GED

Die Germanium- Diode verhält sich ähnlich wie die Si- Diode. Sie hat eine niedrigere Schwellenspannung, aber der Strom steigt nicht so sprunghaft an wie bei Silizium.

$$U_{Schw}^{Ge} = 680mV$$

Zener- Diode

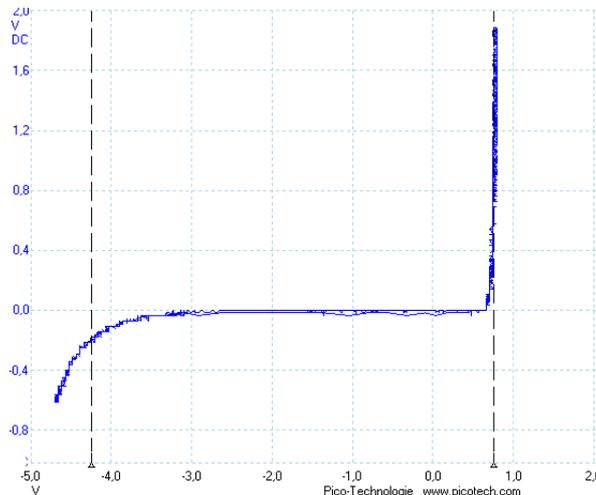


Abbildung 5: Kennlinie der ZED

Die Zenerdiode hat eine noch höhere Schwellenspannung. Außerdem ist es bei ihr möglich, dass bei genügend hoher Spannung in Sperrichtung die Durchbruchspannung erreicht wird und der Strom auch in Sperrichtung zu fließen beginnt. (siehe auch Vorbereitung) Si- und Ge- Diode haben ebenfalls eine Durchbruchspannung, sie werden dabei aber zerstört, während die Zenerdiode auch nach überschreiten der Durchbruchspannung noch funktionsfähig bleibt.

$$U_{Schw}^{ZED} = 766mV, \quad U_{Durch}^{ZED} = -4.249V$$

Varistor

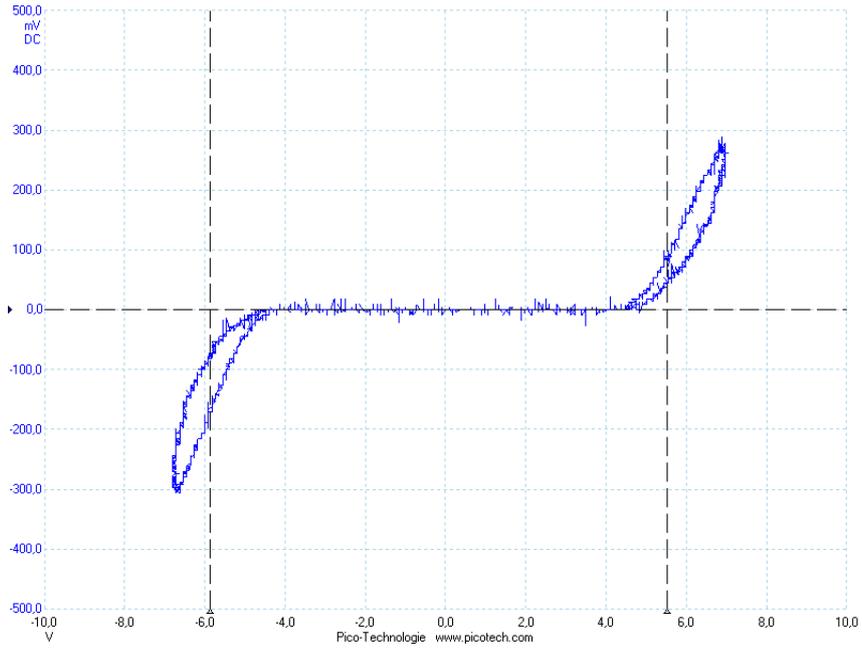
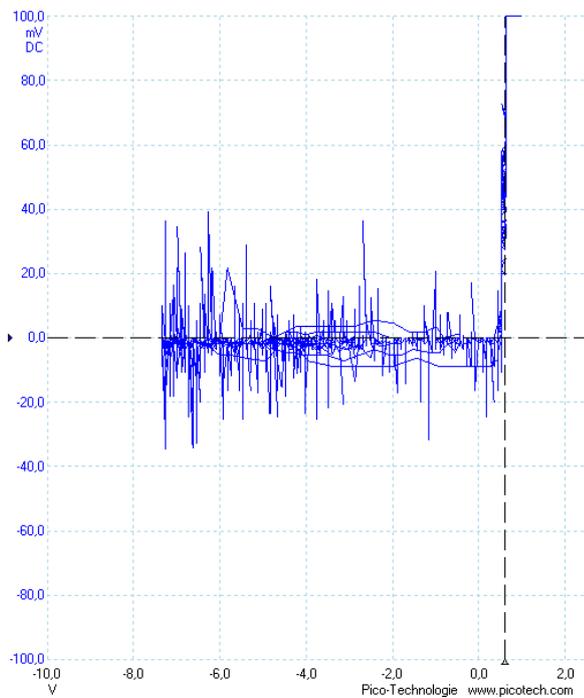


Abbildung 6: Kennlinie des Varistors

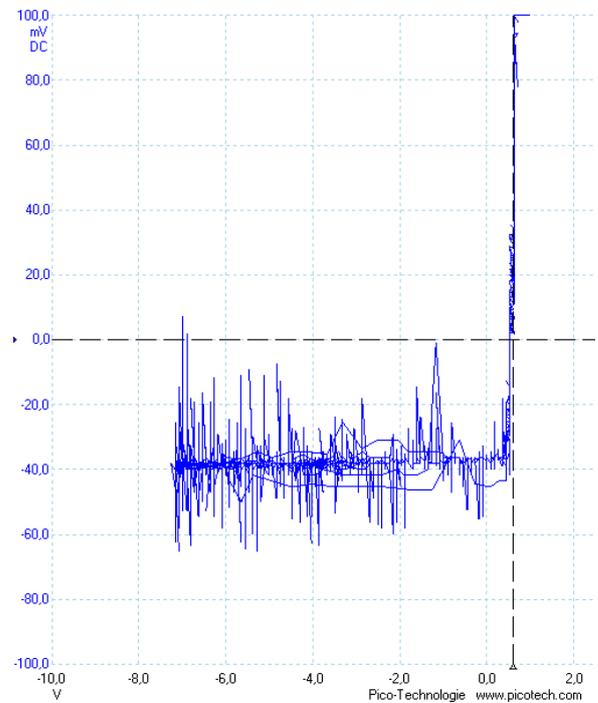
Die Kennlinien des Varistors sind in etwa punktsymmetrisch. Die beiden Schwellenspannungen haben nur leicht unterschiedliche Werte.

$$U_{Schw}^+ = 5.52V, \quad U_{Schw}^- = -5.86V$$

Photodiode



(a) Photodiode ohne Lichteinfall



(b) Photodiode mit Lichteinfall

Das Signal war sehr verrauscht. Dennoch erkennt man eine Schwellenspannung von

$$U_{Schw}^{Photo} = 610mV$$

Wie man außerdem sieht, verhält sich eine Photodiode wie eine gewöhnliche Diode - mit dem Zusatz, dass sie bei Lichteinfall einen zu dessen Intensität proportionalen Strom auch in Sperrichtung durchlässt, weil die eintreffenden Photonen Elektronen aus dem Valenzband lösen und somit einen Stromfluss ermöglichen.

Photowiderstand

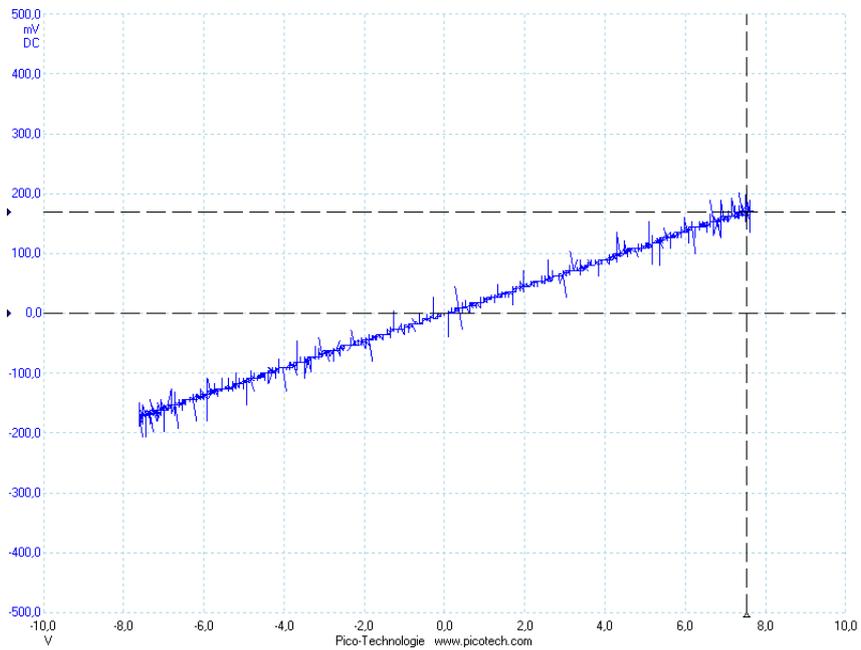


Abbildung 7: Photowiderstand abgedunkelt (x-Achse: U_B , y-Achse: U_A)

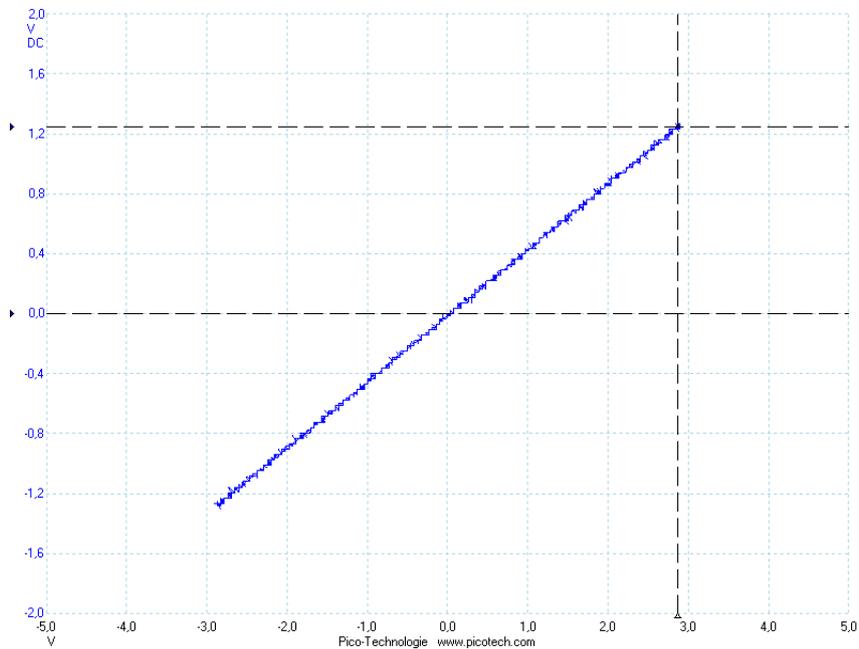


Abbildung 8: Photowiderstand bei Tageslicht (x-Achse: U_B , y-Achse: U_A)

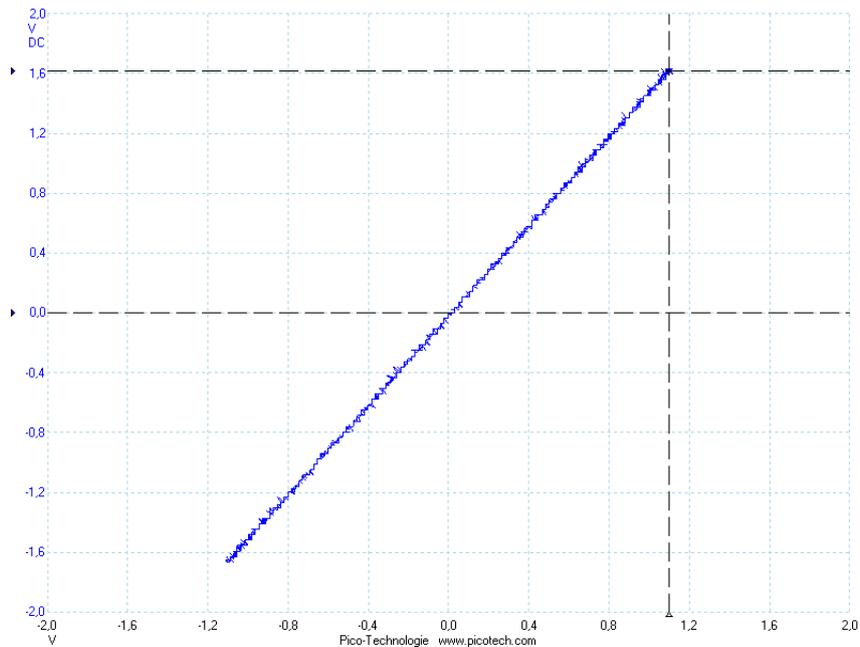


Abbildung 9: Photowiderstand mit Lichteinfall (x-Achse: U_B , y-Achse: U_A)

Der Widerstand des Photowiderstands ist abhängig von der Intensität des Lichteinfalls. Für die drei Fälle ergibt sich mit dem Referenzwiderstand $R_{ref} = 100\Omega$ und der Formel $R = \frac{U_B}{I} = \frac{U_B \cdot R_{ref}}{U_A}$:

$$R_{dunkel} = 4429.41\Omega, \quad R_{normal} = 230.21\Omega, \quad R_{hell} = 68.154\Omega$$

Wie erwartet nimmt der Widerstand bei zunehmender Lichtintensität stark ab.

LEDs

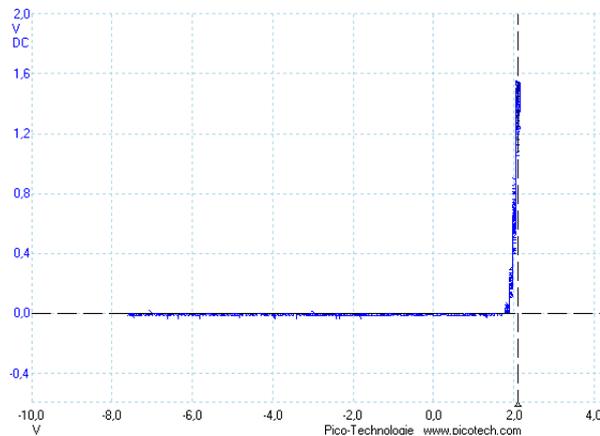


Abbildung 10: Kennlinie der gelben LED

Die LEDs in den Farben rot, gelb, orange und grün (also abnehmende Wellenlänge) haben alle leicht verschiedene Schwellenspannungen:

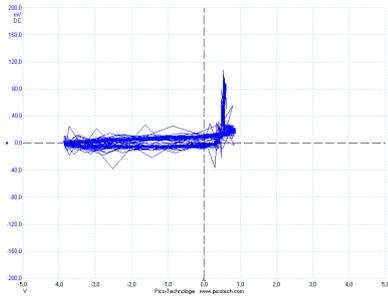
$$U_{Schw}^{rot} = 1.8V, \quad U_{Schw}^{orange} = 1.83V, \quad U_{Schw}^{gelb} = 2.1V, \quad U_{Schw}^{gruen} = 1.98V$$

Erwartet wird, dass mit kürzerer Wellenlänge die Schwellenspannung steigt. Die gelbe LED fällt dabei aus der Reihe. Allerdings ist auf dem obigen Bild zu sehen, dass die schwarze Markierung nicht ganz korrekt angelegt wurde. Tatsächlich schneidet die Tangente die x-Achse bei knapp 1.9V.

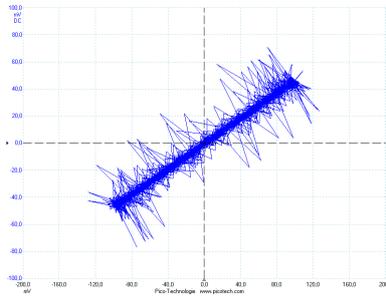
Auf jeden Fall kann man davon ausgehen, dass die Schwellenspannung einer Leuchtdiode wellenlängenabhängig ist.

b): Qualitative Betrachtung bei höherer Frequenz

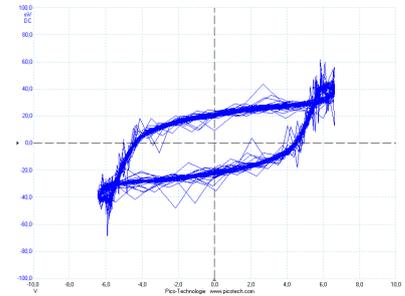
Statt der zuvor verwendeten 100Hz wurde nun ein 10kHz -Signal angelegt. Dabei zeigte sich, dass die Kennlinien aller Bauteile verzerrt und verwaschen wurden. Dies liegt daran, dass die Vorgänge im Halbleiter wie Elektronenübergänge, Ausdehnung der Raumladungszone, Rekombination und Ionisierung eine kurze Zeit brauchen, um sich stationär einzustellen. Bei zu hohen Frequenzen kommt das Bauteil dem Signal nicht hinterher und die Kennlinie verschwimmt.



(a) SID bei 10kHz



(b) Photowiderstand bei 10kHz



(c) Varistor bei 10kHz

3 Phototransistor

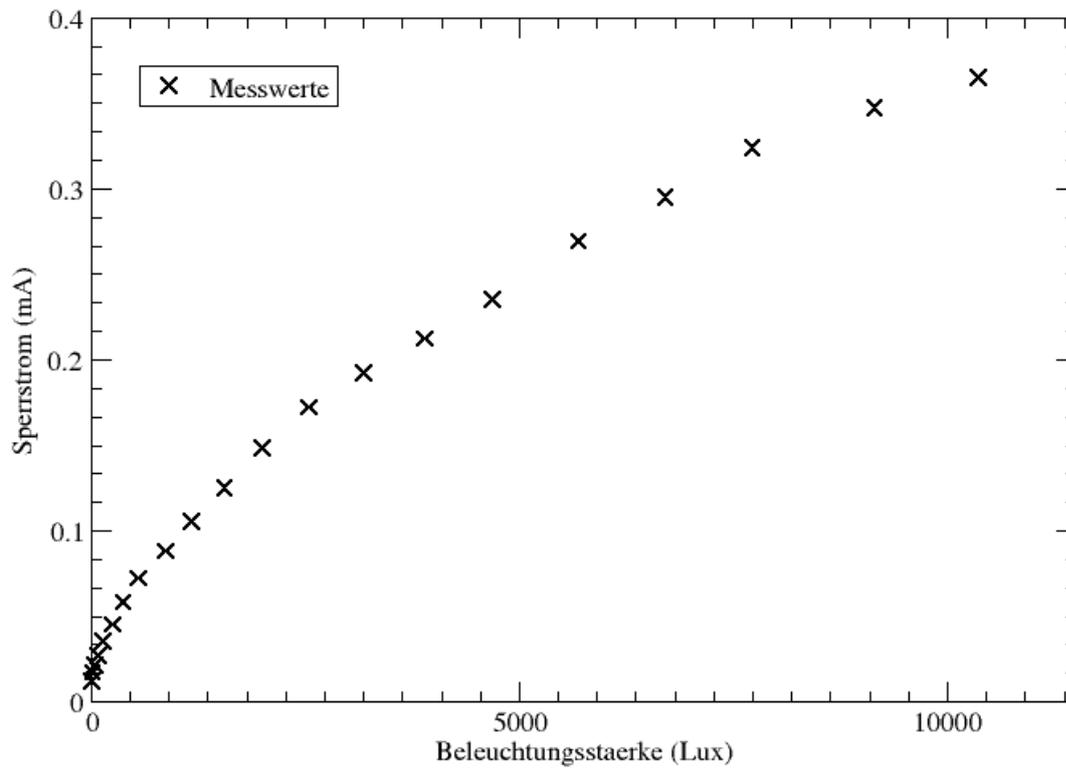
Als nächstes sollte die Abhängigkeit des Sperrstroms I_{Sp} des Phototransistors von der Beleuchtungsstärke E untersucht werden. Dafür wurde wie zuvor Schaltung 2 verwendet.

Unter Zuhilfenahme der Tabelle für die Lichtintensität in Abhängigkeit von der anliegenden Spannung aus der Vorbereitungshilfe konnte die Lichtintensität bestimmt werden, der Sperrstrom liess sich einfach aus der Sperrspannung und dem verwendeten 100Ω Widerstand in der Schaltung berechnen.

Tabelle 3: Messwerte für die Abhängigkeit des Sperrstroms I_{Sp} des Phototransistors von der Beleuchtungsstärke E

Phototransistor				
U_{Lampe} (V)	Sperrspannung U_{Sp} (mV)	Beleuchtungsstärke E (Lux)	Sperrstrom I_{Sp} (mA)	
12.4	-36.5	10365	-0.365	
12	-34.7	9155	-0.347	
11.5	-32.4	7730	-0.324	
11	-29.5	6710	-0.295	
10.5	-26.9	5695	-0.269	
10	-23.5	4695	-0.235	
9.5	-21.2	3905	-0.212	
9	-19.2	3184	-0.192	
8.5	-17.2	2545	-0.172	
8	-14.8	2010	-0.148	
7.5	-12.5	1566	-0.125	
7	-10.5	1177	-0.105	
6.5	-8.8	876	-0.088	
6	-7.2	560	-0.072	
5.5	-5.8	381	-0.058	
5	-4.5	258	-0.045	
4.5	-3.5	148	-0.035	
4	-2.7	84	-0.027	
3.5	-2.1	45	-0.021	
3	-1.7	22	-0.017	
2.5	-1.2	7	-0.012	

Abhaengigkeit des Sperrstroms von der Beleuchtungsstaerke



4 Piezoelement

Die Eigenschaften einer flachen piezoelektrischen Scheibe wurden qualitativ untersucht. Die Anschlüsse wurden auf einen Kanal des Oszilloskops gelegt. Durch antippen mit dem Finger wurde eine mechanische Kraft übertragen und am Oszilloskop angezeigt.

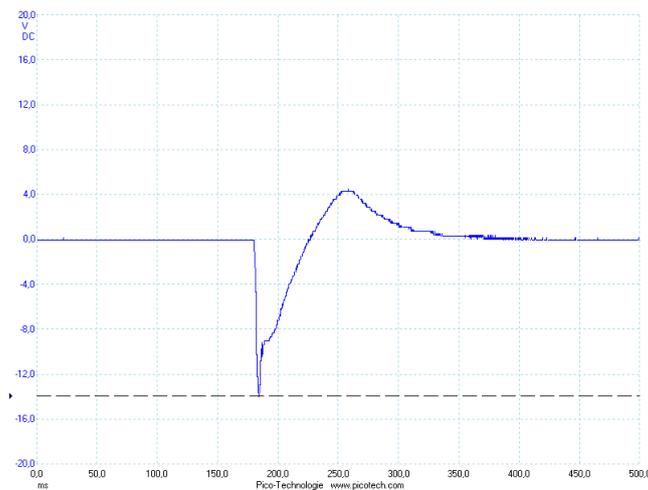


Abbildung 11: Spannungspuls beim Antippen des Piezoelements

Bereits bei sehr leichtem Antippen registrierte das Piezoelement den Impuls zuverlässig und exakt. Im dargestellten Fall erreichte das Signal einen Peak von knapp $-14V$, dafür aber vermutlich nur sehr geringe

Stromstärken. Deutlich zu sehen ist auch das Nachschwingen des Piezoelements nach dem Stoß, was einen leichten Ausschlag in positiver Richtung bewirkt - ein gutes Beispiel für einen gedämpften harmonischen Oszillator im Kriechfall.

Auch ein sinusförmiges Frequenzsignal, das als Summe vieler Einzelimpulse interpretiert werden kann, konnte durch das Piezoelement registriert werden. Dazu wurde über den Frequenzgenerator mit dem Lautsprecher ein Ton verschiedener Frequenzen erzeugt und mit dem Piezoelement am Oszilloskop abgebildet.

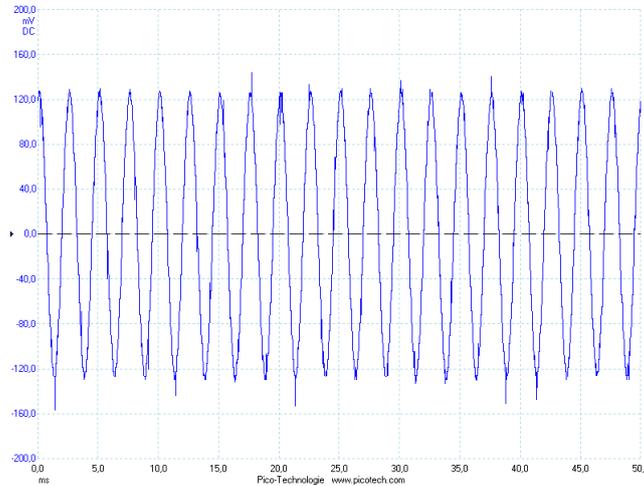


Abbildung 12: 400Hz- Signal, mit dem Piezoelement aufgenommen

Um auch den indirekten piezoelektrischen Effekt zu zeigen, wurde nun anstelle des Lautsprechers das Piezoelement an den Frequenzgenerator angeschlossen und durch die so entstehenden Schwingungen des Materials ein Ton erzeugt. Besonders bei höheren Frequenzen war der Ton deutlich zu hören. Er konnte sogar umgekehrt wieder am Oszilloskop dargestellt werden, indem der Lautsprecher als Mikrophon angeschlossen wurde:

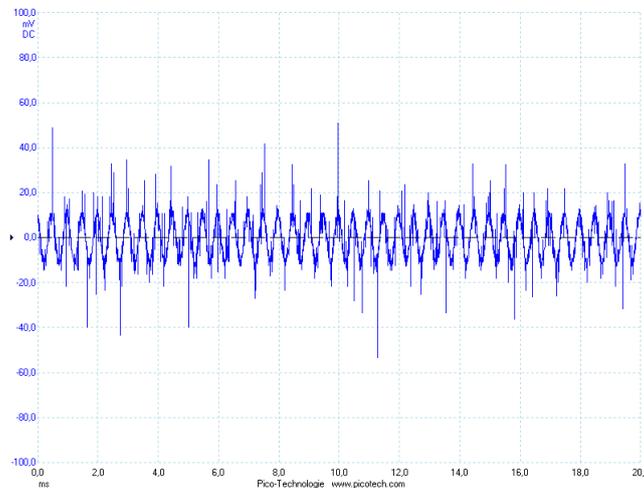


Abbildung 13: Signal des Piezolautsprechers

Das Piezoelement bietet noch weitere “Spielereien”. Beispielsweise kamen wir auf die Idee, aus dem Nachbarversuch “Laser B” eine 1700Hz- Stimmgabel zu leihen und diese auf den Piezolautsprecher zu stellen. Bei Frequenzen signifikant unter- und oberhalb der Resonanzfrequenz geschah nichts. Bei 1700Hz wurde die Stimmgabel jedoch angeregt und erzeugte auch weiterhin einen deutlich hörbaren Ton, nachdem die Amplitude des Generatorsignals heruntergeregelt wurde.

Piezokristalle bieten also vielfältige Anwendungsmöglichkeiten sowohl zur Messung als auch zur Erzeugung von mechanischen Signalen. Insbesondere zur Erzeugung von Ultraschall könnten sie nützlich sein, da ein gewöhnlicher Lautsprecher durch seine Induktivität höherfrequente Signale vermutlich nicht mehr zufriedenstellend erzeugen kann. Vor allem in der ultrahochauflösenden Mikroskopie sind sie als Verschiebeagenten auf atomarer Skala unverzichtbar. In neuester Zeit wird auch immer mehr an der Nutzung von Piezoelementen zur Stromerzeugung für Kleinstgeräte mit ausreichend geringem Stromverbrauch geforscht. Nicht zuletzt befindet sich auch

in jeder handelsüblichen Quarzuhr ein Piezokristall, dessen konstante Schwingungsmoden eine präzise Zeitmessung ermöglichen.

5 Hochtemperatursupraleiter

Die letzte Aufgabe bestand darin, den Effekt der Supraleitung bei sehr niedrigen Temperaturen zu messen. Dafür wurde ein Hochtemperatursupraleiter langsam auf $77K$ herabgekühlt, indem man ihn immer weiter in ein mit flüssigem Stickstoff gefülltes Dewar absenkte. Dabei wurde ständig die Temperatur von einem Thermometer direkt neben dem Supraleiter gemessen. Unter Zuhilfenahme der durch die Vierleiterschaltung mit Multimeter ermittelten Spannungswerte, bei einem konstanten Stromfluss von $2,5mA$, konnte der Widerstandswert des Supraleiters bestimmt und direkt der dabei herrschenden Temperatur zugeordnet werden und im folgenden Diagramm aufgetragen werden.

Tabelle 4: ermittelte Daten für den Widerstand des Supraleiters und die dazu korrespondierende Temperatur

T (C°)	T (K)	U_g (mV)	I const.	R (Ω)
23.6	296.75	1.545	2.5 mA	0.6180
21.2	294.35	1.537		0.6148
15.0	288.15	1.529		0.6116
10.0	283.15	1.523		0.6092
0.0	273.15	1.492		0.5968
-10.0	263.15	1.475		0.5900
-20.0	253.15	1.460		0.5840
-30.0	243.15	1.442		0.5768
-41.2	231.95	1.420		0.5680
-50.0	223.15	1.396		0.5584
-60.0	213.15	1.339		0.5356
-71.5	201.65	1.310		0.5240
-80.0	193.15	1.288		0.5152
-100.0	173.15	1.265		0.5060
-109.0	164.15	1.222		0.4888
-120.0	153.15	1.204		0.4816
-130.0	143.15	1.191		0.4764
-135.0	138.15	1.156		0.4624
-140.0	133.15	1.137		0.4548
-145.0	128.15	1.127		0.4508
-150.0	123.15	1.112		0.4448
-155.0	118.15	1.101		0.4404
-165.0	108.15	1.076		0.4304
-170.0	103.15	1.002		0.4008
-177.0	96.15	0.980	0.3920	
-180.0	93.15	0.955	0.3820	
-185.4	87.75	0.932	0.3728	
-192.0	81.15	0.922	0.3688	
-195.4	77.75	0.903	0.3612	
-198.7	74.45	0.000	0.0000	

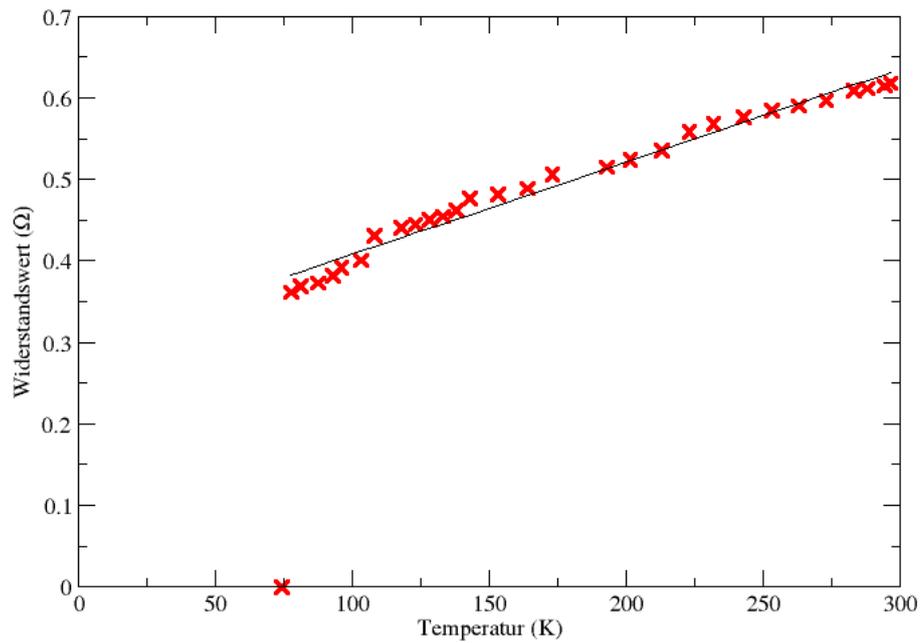


Abbildung 14: Widerstandswert (Ω) des Supraleiters in Abhängigkeit von der Temperatur (K)

Es zeigt sich, dass der Widerstandswert des Supraleiters linear mit der Temperatur verknüpft ist, bis der Widerstandswert schlagartig auf 0Ω abfällt, bei einer hier ermittelten Sprungtemperatur von $74K$. Eigentlich sollte die Sprungtemperatur bei $77K$ liegen. Die Differenz lässt sich wohl aber darauf zurückführen, dass der Supraleiter etwas zu schnell herabgekühlt wurde sowie auf die Tatsache, dass das Thermometer und der Supraleiter wohl nicht gleich schnell abkühlten.