

E 2a „Kennlinien von Widerständen“

Toshiki Ishii (Matrikel 3266690)

27.05.2013

Studiengang Chemie (Bachelor of Science)

Aufgabenstellung

- Aufnahme einer $I(U)$ -Kennlinie (≈ 30 Wertepaare) für Glühlampe, Thermistor und Varistor.
 - Grafische Darstellung der Kennlinien.
 - Berechnung des statischen und differentiellen Widerstandes und grafische Darstellung im $R(I)$ -Diagramm.
 - Diskussion der Bedeutung von statischem und differentiellem Widerstand.
 - Bestimmung des Regelfaktors des Varistors.
- Messung von $R(T)$ (10. . . 20 Wertepaare) für NTC- und PTC-Thermistor sowie Pt-Widerstand.
 - Grafische Darstellung und Diskussion der Verläufe unter physikalischen Gesichtspunkten.
 - Grafische Bestimmung der Aktivierungsenergie des Thermistors.
 - Ermitteln des Temperaturkoeffizienten α des Pt-Widerstandes.
 - Ermitteln des Temperaturkoeffizienten β des PTC-Thermistors.

Zubehör

- Stromversorgungsgerät
- Digitalmultimeter
- Widerstände (Glühlampe, Varistor, PTC- und NTC-Thermistor, Pt1000)
- Thermostat
- Ölbad
- Kabel

Grundlagen

Kirchhoffsche Gesetze

Das erste KIRCHHOFFSCHE Gesetz (Knotensatz) besagt, dass die Summe der aus einem Punkt einer elektrischen Schaltung abfließenden Ladungen gleich der Summe der diesem Punkt zufließenden Ladungen ist. Anders gesagt: Die Summe aller Ströme ist in jedem Punkt einer elektrischen Schaltung null.

Das zweite KIRCHHOFFSCHE Gesetz (Maschensatz) sagt aus, dass sich die Teilspannungen einer Masche (eines Teilstromkreises) gegenseitig aufheben.

Messung von Strom und Spannung

Entsprechend dem Knotensatz verändert ein ideales Strommessgerät allein durch die Messung des Stromes den gemessenen Strom nicht, wenn es in den zu messenden Stromkreis eingefügt wird. Bei paralleler Schaltung des Strommessgerätes hat der Strom zwei Möglichkeiten zu fließen, was den Gesamtwiderstand des Stromkreises verringert und so die Messung verfälscht. Ströme müssen deshalb immer mit einem seriell geschalteten Strommessgerät gemessen werden.

Entsprechend dem Maschensatz sind die Spannungsabfälle für parallel geschaltete Bauelemente gleich. Spannungen müssen deshalb in paralleler Schaltung gemessen werden.

Ideale Strommessgeräte weisen keinen Innenwiderstand, ideale Spannungsmessgeräte einen unendlich hohen Innenwiderstand und führen so zu keinen Verfälschungen der gemessenen Stromkreise. Reale Messgeräte erfüllen diese Kriterien nie vollständig. Es macht deshalb, ob die Spannung über einem Bauteil abgegriffen und in Reihe dazu ein Strommessgerät geschaltet wird (spannungsrichtige Messung) oder ob der durch ein Bauteil fließende Strom direkt gemessen wird und die über beiden Bauteilen zusammen abfallende Spannung gemessen wird (stromrichtige Messung). Generell ist für Bauteile mit einem großen Widerstand die stromrichtige, für Bauteile mit einem kleinen Widerstand die spannungsrichtige Messung zu bevorzugen.

Ohmsche Widerstände

Ein OHMScher Widerstand erfüllt über einen weiten Spannungsbereich (Stromstärkebereich) das OHMSche Gesetz

$$R = \frac{U}{I} ,$$

welches einen Zusammenhang zwischen der an den Widerstand angelegten Spannung um dem durch den Widerstand fließenden Strom herstellt. Dabei ist die Konstante R der OHMSche Widerstand. Er hängt nach

$$R = \varrho \cdot \frac{l}{A}$$

vom spezifischen Widerstand ϱ des Metalls, der Länge der Widerstands l und der Querschnittsfläche A des Widerstands ab.

Widerstandsmessungen

Der Widerstand kann sowohl direkt gemessen als auch indirekt aus anderen experimentellen Daten ermittelt werden. Für die indirekte Bestimmung wird die über einem Bauteil abfallende Spannung U und der durch

das Bauteil fließende Strom I gemessen. Daraus wird mithilfe des OHMSchen Gesetzes der Widerstand R berechnet.

Zur Messung des elektrischen Widerstandes wird ein Widerstandsmessgerät eingesetzt. Die Messgeräte werden gelegentlich auch als „Ohmmeter“ bezeichnet. Dies kann jedoch zu Verwechslungen mit der Einheit Ω m des spezifischen Widerstandes führen, sodass diese Bezeichnung im folgenden nicht verwendet werden wird.

Die Messung des Widerstandes mit analogen Messgeräten ist schwierig. Sowohl Aufbau als auch Bedienung des Messgerätes sind relativ kompliziert und der Messfehler kann je nach Messbedingungen $\pm 10\%$ überschreiten.

Zur Widerstandsmessung werden deshalb heutzutage nur noch digitale Widerstandsmessgeräte (meist kombiniert in einem Digitalmultimeter) eingesetzt. Diese prägen dem zu messenden Stromkreis einen konstanten Strom ein, messen die darüber abfallende Spannung und berechnen aus diesen Daten den Widerstand. Sehr hohe Widerstände können mit einem solchen Gerät nicht gemessen werden, da dann die Konstantstromquelle eine zu hohe Spannung liefern müsste und somit versagt.

$I(U)$ -Kennlinie von Metallen und Halbleitern

Sowohl metallische Leiter als auch Halbleiter sind bei konstanter Temperatur annähernd OHMSche Widerstände. Die Kennlinien sind daher Ursprungsgeraden. Bei hohen Spannungen (und den dadurch verursachten hohen Strömen) kommt es jedoch zu Erwärmung, was den Widerstand und damit auch die Stromstärke beeinflusst. Reale Kennlinien für Metalle knicken deshalb bei der entsprechenden Spannung ab, es kann sogar zu einem negativen differentiellen Widerstand kommen. Bei Halbleitermetallen steigt dagegen die Leitfähigkeit.

$R(I)$ - und $R(T)$ -Kennlinie von Metallen und Halbleitern

Grundsätzlich ist die Abhängigkeit des Widerstandes vom Strom hauptsächlich über die bei hohen Strömen eintretende Erwärmung gegeben.

Im metallischen Leiter steigt mit der Temperatur die Geschwindigkeit der Elektronen, die mittlere freie Weglänge bleibt annähernd konstant. Dies führt zu einer sinkenden mittleren Stoßzeit, sodass höhere Spannungen benötigt werden, um den gleichen Strom fließen zu lassen – der Widerstand nimmt zu. Da metallische Leiter in der Kälte besser leiten, werden sie auch als Kaltleiter bezeichnet.

Im Halbleiter steigt mit der Temperatur die Anzahl der Elektronen, die die FERMI-Energie erreichen. Dadurch entstehen exponentiell mehr Ladungsträger (angeregte Elektronen im Leitungsband, Defektelektronen im Valenzband). Dieser Effekt überkompensiert den auch hier auftretenden Effekt der mit steigender Temperatur sinkenden mittleren Stoßzeit. Der Widerstand eines Halbleiters nimmt deshalb über einen großen Temperaturbereich mit der Temperatur ab. Halbleiter werden deshalb auch als Heißeiter bezeichnet.

Varistoren

Ein Varistor (*voltage dependent resistor*, auch VDR) ist ein Bauteil, das bei niedrigen Spannungen praktisch nicht leitet, ab einer gewissen Spannung jedoch eine sprunghaft ansteigende Leitfähigkeit aufweist. Varistoren bestehen aus gepresstem und gesintertem Halbleiter (beispielsweise SiC oder ZnO, immer dotiert). Aufgrund der Feinkörnigkeit des Materials bilden sich bei niedrigen Spannungen Sperrschichten aus, die eine Leitung sehr schwierig machen. Wird die angelegte Spannung erhöht, wird ein immer stärkeres Feld im Varistor aufgebaut, das den Sperrschichten entgegenwirkt. Bei der Schwellenspannung ist das Feld stark genug, um Ladungstransport über die Sperrschicht hinweg zu ermöglichen, der differentielle Widerstand fällt sprunghaft ab.

Messwerte

Messwerte – $I(U)$ -Kennlinien

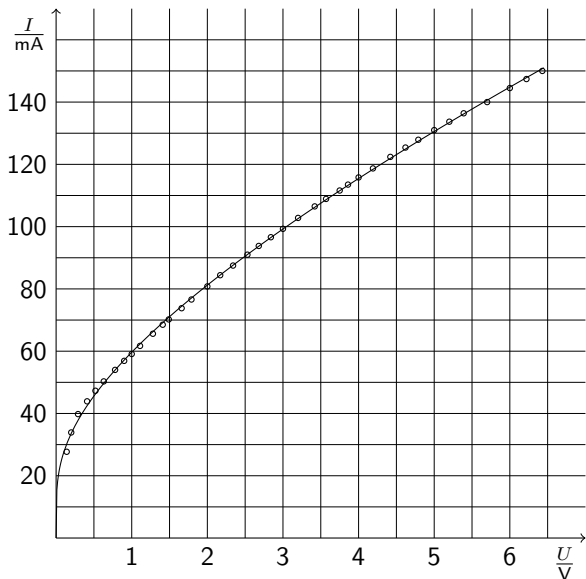
Glühlampe				Varistor				Thermistor			
$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$
0,14	27,7	2,84	96,6	0,10	0,00	12,48	3,30	0,30	0,30	4,63	5,28
0,20	33,9	3,00	99,3	0,76	0,00	13,21	4,01	0,61	0,61	4,81	5,56
0,29	39,8	3,20	102,8	1,49	0,01	12,89	3,72	0,86	0,86	4,94	5,79
0,41	43,9	3,42	106,5	2,16	0,02	13,72	4,61	1,11	1,11	5,11	6,06
0,52	47,3	3,57	108,9	2,68	0,04	14,11	5,10	1,37	1,37	5,25	6,33
0,63	50,3	3,75	111,6	3,49	0,07	14,60	5,77	1,50	1,51	5,38	6,61
0,78	54,0	3,86	113,5	4,14	0,12	15,07	6,45	1,83	1,84	5,55	6,95
0,90	56,9	4,00	115,8	4,70	0,16	15,44	7,03	2,21	2,24	5,70	7,26
1,00	59,1	4,19	118,7	5,11	0,21	15,85	7,74	2,46	2,50	5,84	7,56
1,11	61,7	4,42	122,4	5,80	0,30	16,34	8,66	2,69	2,75	6,00	7,86
1,28	65,6	4,62	125,4	6,77	0,47	16,76	9,49	2,81	2,89	6,16	8,26
1,41	68,5	4,79	127,9	7,45	0,62	17,26	10,62	2,98	3,10	6,30	8,66
1,49	70,2	5,00	131,0	7,93	0,75	17,66	11,62	3,16	3,31	6,46	9,01
1,66	73,8	5,20	133,7	8,84	1,06	17,99	12,52	3,27	3,45	6,58	9,44
1,79	76,6	5,39	136,4	9,54	1,35	18,30	13,35	3,46	3,69	6,78	10,02
2,00	80,8	5,70	140,0	10,23	1,69	18,53	14,05	3,60	3,86	6,95	10,65
2,17	84,4	6,00	144,5	10,89	2,08	18,69	14,56	3,76	4,06	7,03	11,00
2,34	87,5	6,22	147,4	11,58	2,55	18,81	15,03	3,90	4,25	7,23	11,71
2,53	91,0	6,43	150,0					4,05	4,46	7,34	12,29
2,68	93,8							4,20	4,67	7,52	13,15
								4,36	4,89	7,64	14,12
								4,49	5,09	7,74	14,90

Messwerte – $R(T)$ -Kennlinien

ϑ °C	$\frac{R_{1b}}{k\Omega}$	$\frac{R_{2b}}{M\Omega}$	$\frac{R_{3b}}{k\Omega}$	$\frac{R_{4b}}{k\Omega}$	T °C	$\frac{R_{1b}}{k\Omega}$	$\frac{R_{2b}}{M\Omega}$	$\frac{R_{3b}}{k\Omega}$	$\frac{R_{4b}}{k\Omega}$
22,7	2,4131	0,012 65	1,9329	1,0891	57,4	0,6270	21,94	0,6520	1,2225
28,0	1,9255	0,036 97	÷	÷	59,7	0,5814	32,82	0,6215	1,2316
28,1	÷	0,037 46	1,5777	1,1102	62,3	0,5280	÷	0,5774	1,2416
32,0	1,6364	0,0837	1,3791	1,1252	64,5	0,4875	÷	0,5530	1,2506
35,7	1,4120	0,1923	1,2195	1,1393	67,1	0,4495	÷	0,5222	1,2607
37,8	1,3019	0,3073	1,1413	1,1473	70,0	0,4066	÷	0,4858	1,2717
43,9	1,0289	1,260	0,9466	1,1704	72,6	0,375 17	÷	0,4630	1,2813
46,2	0,9438	2,138	0,8799	1,1802	74,8	0,349 17	÷	0,4429	1,2898
49,6	0,8277	4,550	0,8062	1,1934	76,7	0,328 44	÷	0,4265	1,2968
52,2	0,7590	7,94	0,7520	1,2035	78,6	0,310 50	÷	0,4118	1,3038
54,4	0,6998	12,50	0,7088	1,2115	79,6	0,300 15	÷	0,4038	1,3074

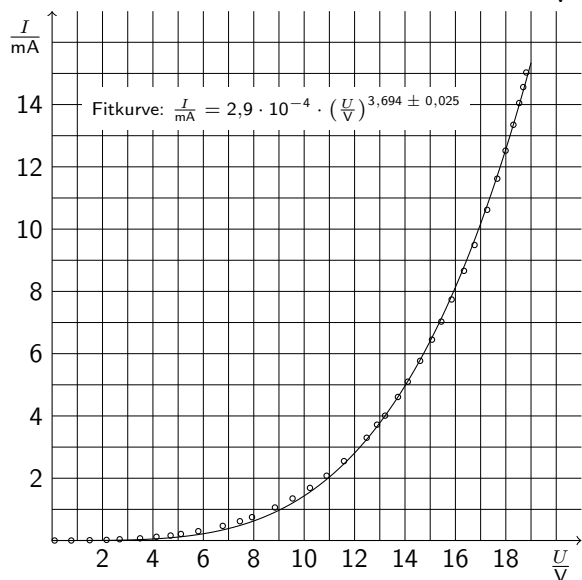
Auswertung

Auswertung – $I(U)$ -Kennlinien



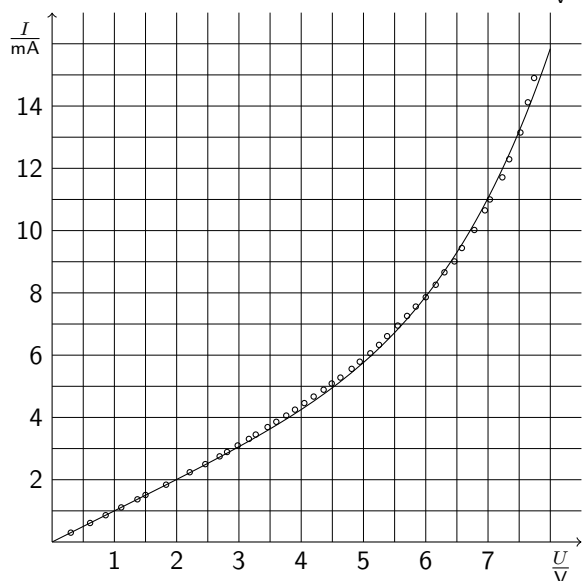
Kennlinie der Glühlampe:

Glühlampen enthalten einen sehr dünnen leitenden Draht, sodass mit dem Anlegen bereits kleiner Spannungen hohe Stromdichten und damit starke Erhitzung verbunden sind. Dies führt dazu, dass der Widerstand anfangs sehr schnell ansteigt. Ab dann führt eine steigende Spannung zu einem nur geringfügig höherem Stromfluss. Bei höheren Spannungen werden dann Wärmestrahlung und Licht abgegeben, was die Erwärmung kompensiert und zu einem annähernd linearen Zusammenhang führt.



Kennlinie des Varistors:

Im Varistor gibt es einen direkten Zusammenhang zwischen anliegender Spannung und fließendem Strom. Dieser gehorcht annähernd einer Potenzfunktion (siehe Fitkurve).



Kennlinie des Thermistors:

Aus der Kennlinie ist zu ersehen, dass es sich um einen NTC-Thermistor handelt. Bei niedrigen Spannungen und Stromstärken verhält dieser sich Thermistor wie ein OHMScher Widerstand. Höhere Ströme führen dann zu einer merklichen Erhitzung, was den Widerstand absenkt, sodass bei gegebener Spannung höhere Ströme fließen.

Auswertung – $R(I)$ -Diagramme

Der statische Widerstand R berechnet sich dem OHMSchen Gesetz gemäß nach

$$R = \frac{U}{I}$$

und gibt das Verhältnis der an ein Bauteil angelegten Spannung U zu dem durch das Bauteil fließenden Strom I an. Der Zusammenhang ist insbesondere bei OHMSchen Widerständen und bei Bauteilen, die sich annähernd wie OHMSche Widerstände verhalten, nützlich. Bei Bauteilen, die sich nicht oder nur sehr schlecht als OHMSche Widerstände beschreiben lassen, ist der Zusammenhang dagegen wenig nützlich, da bei diesen R seinerseits stark von U oder I (je nach Bauteil) abhängt.

Hier ist der differentielle Widerstand aussagekräftiger. Er berechnet sich nach

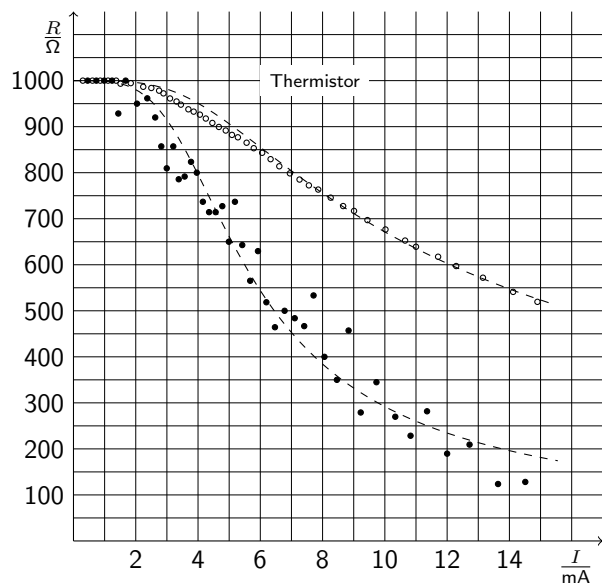
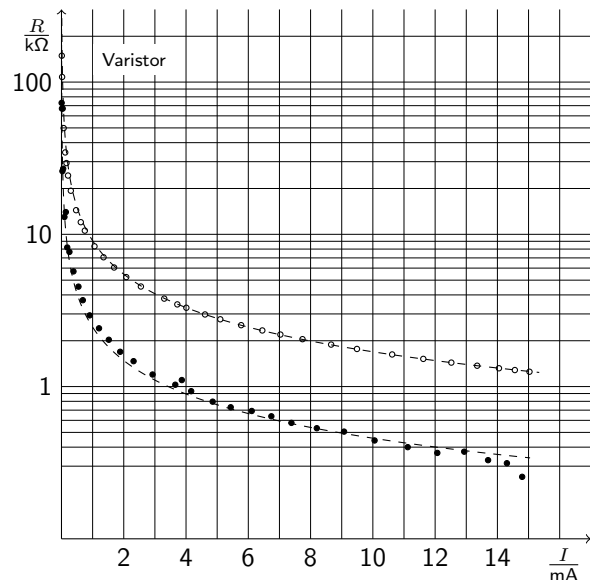
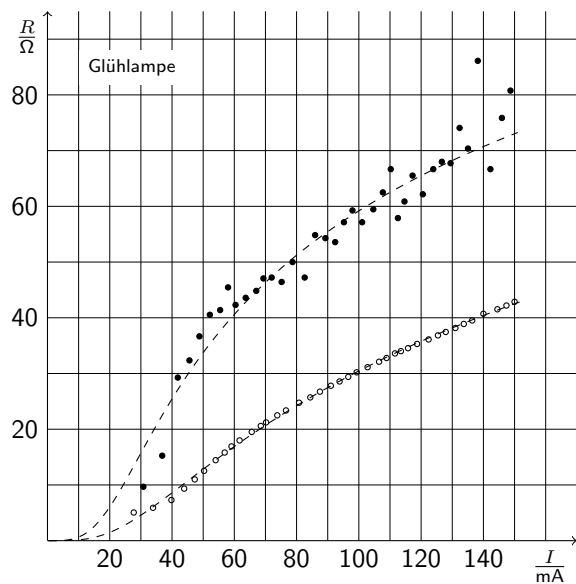
$$R_{diff} = \frac{dU}{dI}$$

und gibt somit die Änderung der über einem Bauteil abfallenden Spannung U zur Änderung des durch das Bauteil fließenden Stromes I an. Der statische Widerstand wurde für alle Messwertpaare aus der Spannung und dem Strom berechnet und im Diagramm als (nicht ausgefüllte) Kreise dargestellt. Der differentielle Widerstand wurde aus jeweils zwei aufeinander folgenden Messwertpaaren nach

$$R_{diff} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

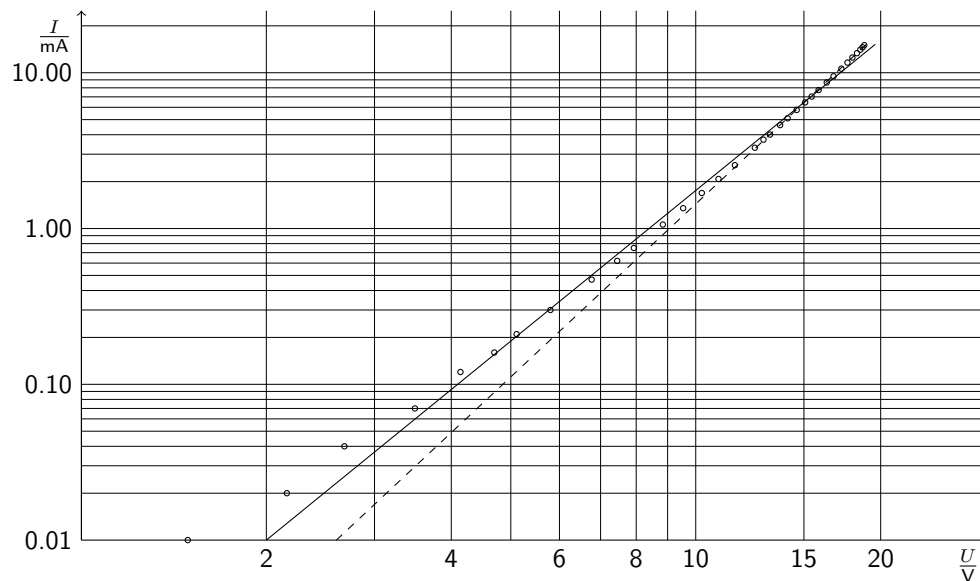
berechnet und im Diagramm in Form von ausgefüllten Kreisen dargestellt. Da die Differenzen zwischen zwei Wertepaaren jeweils relativ klein sind, streuen die Werte relativ stark. Die allgemeine Tendenz ist jedoch zu erkennen.

Statischer und differentieller Widerstand lassen sich auch aus den Fitkurven berechnen (dargestellt als gestrichelte Linien). Die so berechneten Werte weichen stellenweise stark von den praktischen ab und zeigen auf, an welchen Stellen die Fitkurve ungenau ist.



Auswertung – Regelfaktor des Varistors

Es ist für den Varistor die logarithmische Stromstärke gegen die logarithmische Spannung aufgetragen:



Bei der gestrichelten Linie handelt es sich um die Fitkurve aus der Kennlinie, die an die doppelt-logarithmische Darstellung angepasst wurde. Die durchgezogene Linie ist die Fitgerade für die doppelt-logarithmische Darstellung, wobei hier die ersten drei eingezeichneten Wertepaare aufgrund der hohen Unsicherheit der Stromstärkewerte nicht berücksichtigt wurden.

Für die gestrichelte Linie ist der Regelfaktor mit

$$\beta = 0,2707 \pm 0,0018$$

bestimmt (siehe auch Kennlinie).

Für die durchgezogene Linie ergibt sich dagegen

$$\beta = 0,3109 \pm 0,0030$$

Auswertung – $R(T)$ -Kennlinie der NTC-Thermistoren

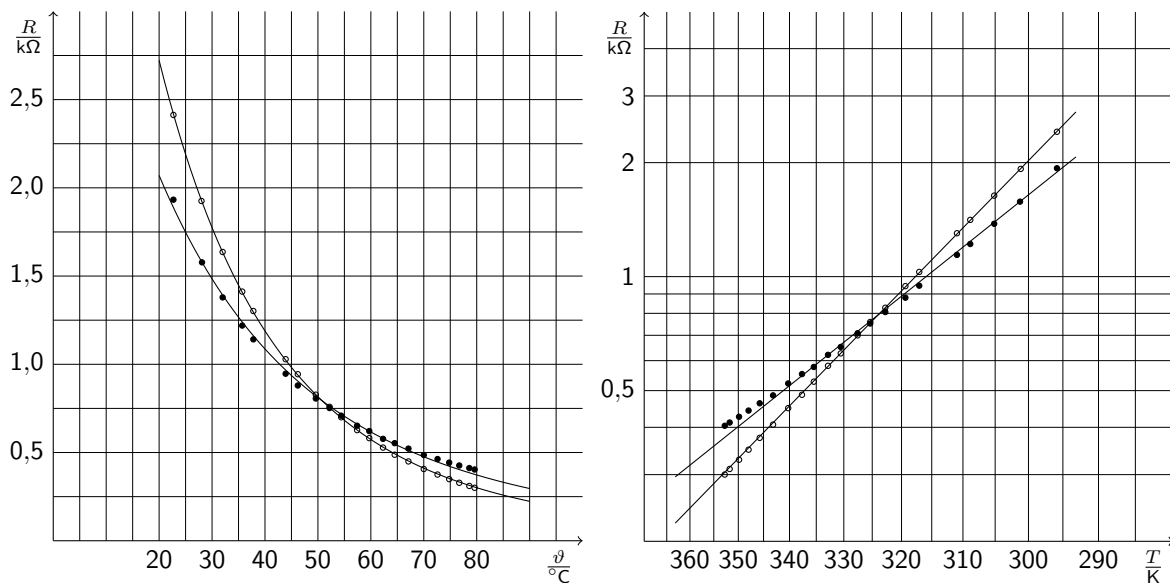
NTC-Thermistoren (*negative temperatur coefficient thermistor*, Heißleiter) sind Bauteile, die aus einem Halbleitermaterial hergestellt sind. Bei Halbleitern liegt die Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband in der Größenordnung der thermischen Energie der Elektronen im Leiter. Bei niedrigen Temperaturen ist das Valenzband vollbesetzt, das Leitungsband praktisch unbesetzt. Mit steigender Temperatur werden mehr Elektronen vom Valenz- in das Leitungsband angeregt. Sowohl die so in das Leitungsband gelangten Elektronen als auch die nun im Valenzband fehlenden Elektronen (Fehlstellen, Defektelektronen) können den elektrischen Strom leiten. Da es sich hierbei um einen thermischen Prozess handelt, lässt sich die Energieverteilung der Elektronen durch die BOLTZMANN-Verteilung beschreiben. Der Anteil der Elektronen, die mindestens die Energie E_A (Aktivierungsenergie, Energie der Bandlücke) tragen, tragen zur Leitfähigkeit κ des Thermistors bei. Dieser Anteil ist proportional zu $e^{-\frac{E_A}{k_B \cdot T}}$, sodass

$$\kappa \propto e^{-\frac{E_A}{k_B \cdot T}}$$

und wegen $R \propto \frac{1}{\kappa}$

$$R \propto e^{\frac{E_A}{k_B \cdot T}}$$

Dargestellt sind die Widerstände der NTC-Thermistoren R1b (Kreise) und R3b (ausgefüllte Kreise) in Abhängigkeit von der Temperatur, links in gewöhnlicher, rechts in linearisierter Darstellung (y -Achse logarithmiert, x -Achse reziprok):



Bei den Kurven handelt es sich um Fitkurven der Form

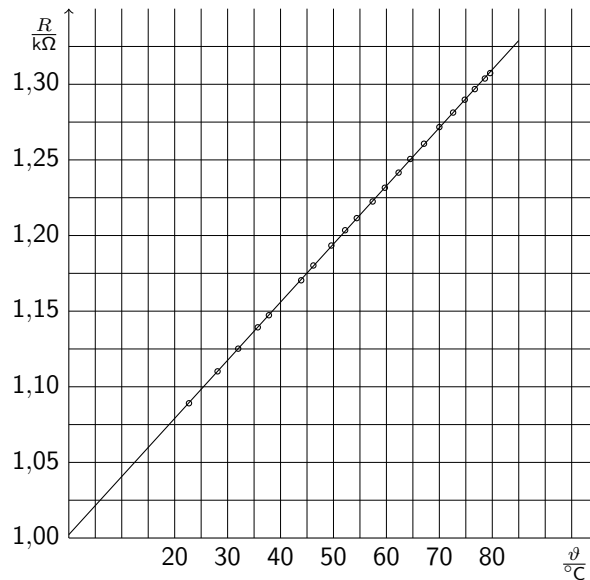
$$R = R_0 \cdot e^{\frac{E_A}{k_B \cdot T}}$$

mit den Parametern

	R_0	E_A
R_{1b}	$(6,34 \pm 0,13) \mu\Omega$	$(0,3277 \pm 0,0006) \text{ eV}$
R_{3b}	$(85,7 \pm 8,7) \mu\Omega$	$(0,2550 \pm 0,0027) \text{ eV}$

Auswertung – $R(T)$ -Kennlinie des Pt-Widerstandes

Beim Pt1000-Widerstand handelt es sich um einen Platin-Widerstand, der bei 0°C einen Widerstand von $1000\ \Omega$ aufweist. Mit steigender Temperatur steigt die thermische Geschwindigkeit der Elektronen im Metall, während die mittlere freie Weglänge nahezu konstant bleibt. Damit sinkt die mittlere Stoßzeit τ , sodass ein äußeres elektrisches Feld (beziehungsweise eine angelegte Spannung) immer schwerer eine gerichtete Bewegung der Ladungsträger (Stromfluss) erzeugen kann. Dies äußert sich im steigenden Widerstand.



Der Platinwiderstand zeigt einen innerhalb der Messgenauigkeit perfekt linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand. Eine Fitkurve der Form

$$R(T) = R(T_0) \cdot \left(1 + \alpha_{T_0} \cdot (T - T_0) \right)$$

liefert die Parameter

- $R(20^\circ\text{C}) = (1079,1 \pm 0,2)\ \Omega$
- $\alpha_{20^\circ\text{C}} = (3,562 \pm 0,006) \cdot 10^{-3}$

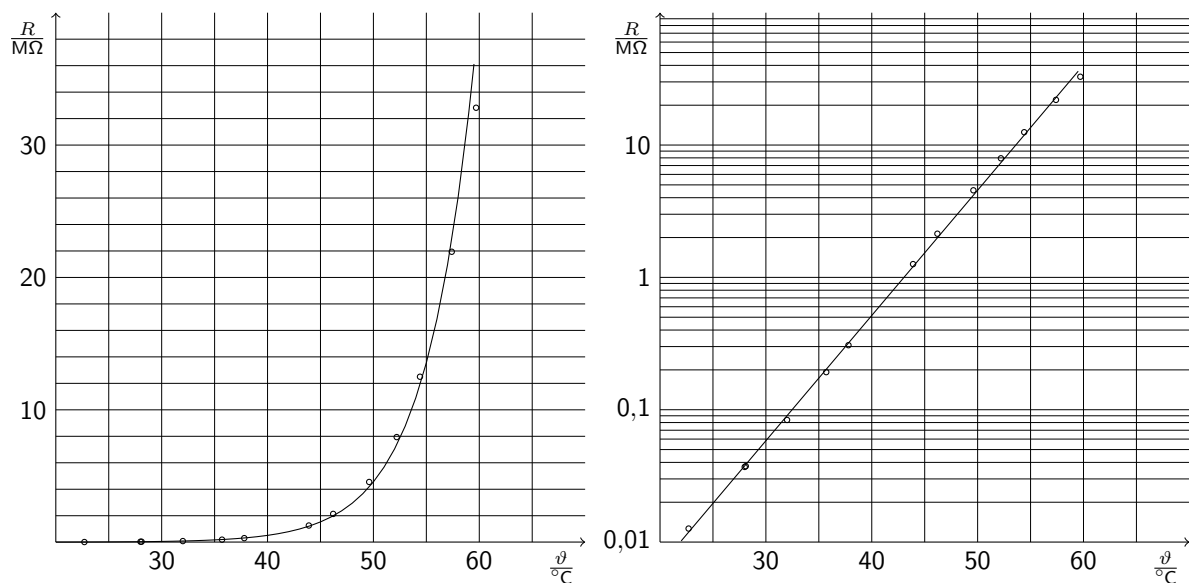
beziehungsweise

- $R(0^\circ\text{C}) = (1002,2 \pm 0,3)\ \Omega$
- $\alpha_{0^\circ\text{C}} = (3,835 \pm 0,007) \cdot 10^{-3}$

Auswertung – $R(T)$ -Kennlinie des PTC-Thermistors

PTC-Thermistoren (*positive temperatur coefficient thermistor*, Kaltleiter) sind Bauteile, die ab einer Referenz-Temperatur einen exponentiell ansteigenden Widerstand aufweisen. BaTiO₃-PTC-Thermistoren werden aus fein gemahlenem BaCO₃ und TiO₂ sowie entsprechenden Dotierungen gepresst und gesintert. An den Grenzen zwischen zwei Kristalliten treten dabei Raumladungszonen (Verarmungszonen) auf, die bei niedrigen Temperaturen (ferroelektrischer Zustand unterhalb der CURIE-Temperatur) durch spontane Polarisierung kompensiert werden. Bei hoher Temperatur (paraelektrischer Zustand oberhalb der CURIE-Temperatur) verschwindet die Polarisierung, was zu einem sehr hohen Widerstand führt. Um die CURIE-Temperatur herum gibt es einen Bereich, in dem die Polarisierung immer weiter zurückgedrängt wird. Dort steigt der Widerstand exponentiell an.

Die $R(T)$ -Linie des PTC-Thermistors ist einmal linear und einmal halb-logarithmisch aufgezeichnet:



Die gezeigte Kurve ist die Fitkurve, wobei in diesem Fall an die linearisierte Darstellung gefittet wurde. Der Anstieg der linearisierten Kurve entspricht dem Temperaturkoeffizienten β aus dem Zusammenhang

$$R(T) = R(T_B) \cdot e^{\beta \cdot (T - T_B)},$$

der

$$\beta = (0,218 \pm 0,002) \text{ K}^{-1}$$

beträgt.

Messunsicherheit

Digitalmultimeter weisen verschiedene Arten von Fehlern auf. Einerseits wird bei der Strommessung ein Spannungssignal erzeugt, wobei der Zusammenhang zwischen fließendem Strom und dem generierten Spannungssignal nicht perfekt linear ist. Darüber hinaus entstehen bei der Anzeige des Wertes Quantisierungsfehler. Insgesamt liegt der Fehler im Bereich von $\pm 1\%$.

Im ersten Versuchsaufbau wurden Strom und Spannung simultan mittels einer spannungsrichtigen Schaltung gemessen, sodass der Strom bei hohen zu messenden Widerständen durch die Spannungsmessung nach oben verfälscht wurde. Dieser Effekt spielt insbesondere beim Varistor eine große Rolle, da durch diesen bei niedriger Spannung sehr kleine Ströme fließen, sodass der gemessene Strom zu einem hohen Anteil aus dem Leckstrom (durch das Spannungsmessgerät) bestand. Diese Wertepaare für kleine Spannungen erhalten bei Anpassung der Ausgleichsgerade in doppelt-logarithmischer Darstellung ein verhältnismäßig hohes Gewicht. In gewöhnlicher Darstellung erhalten sie dagegen aufgrund ihrer niedrigen Größenordnung ein sehr kleines Gewicht. Das Ergebnis der Fitkurve aus der Kennlinie in nicht-logarithmierter Darstellung müsste demzufolge das zuverlässigere sein.

Im zweiten Versuchsaufbau wurde der Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen. Die Temperatur konnte an der Eintauchstelle des Thermometers auf $\pm 0,1\text{ K}$ genau bestimmt werden. Es konnte jedoch nicht garantiert werden, dass die Widerstände die gleiche Temperatur hatten. Insbesondere beim stark temperaturabhängigen PTC-Widerstand hat dies vermutlich zu großen Fehlern bei einzelnen Messwerten geführt.

In allen Versuchen stellten die verwendeten Kabel zusätzliche Widerstände dar, woraus ebenfalls eine leichte Verfälschung resultiert.

Zusammenfassung

1. Die Glühlampe hat bei niedrigen Spannungen (Strömen) einen relativ niedrigen Widerstand ($< 10 \Omega$), der bei höheren Spannungen erst rasch, dann langsamer ansteigt und bei 6 V (140 mA) etwa 40Ω erreicht.

Der Varistor hat bei niedrigen Spannungen einen sehr hohen Widerstand, der bei höheren Spannungen stark abfällt. Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung gehorcht einer Potenzfunktion mit dem Regelfaktor $\beta = 0,2707 \pm 0,0018$.

Der Thermistor verhält sich bei niedrigen Spannungen (Strömen) wie ein idealer OHMScher Widerstand. Sobald die fließenden Ströme für eine Erhitzung ausreichen, sinkt der Widerstand ab, was zu höheren Strömen und damit wieder zu stärkerer Erhitzung führt, bis sich ein Gleichgewicht einstellt.

2. Die Aktivierungsenergie des NTC-Thermistors R1b beträgt $(0,3277 \pm 0,0006)$ eV, die des NTC-Thermistors R3b $(0,2550 \pm 0,0027)$ eV.

Der Pt1000-Widerstand R4b weist eine lineare Abhängigkeit zwischen Temperatur und Widerstand auf. Bei 0°C beträgt der Temperaturkoeffizient $\alpha = (3,835 \pm 0,007) \cdot 10^{-3}$. Nach DIN EN 60751 beträgt der Widerstand eines Klasse-A-Pt1000-Widerstandes bei 0°C $(1000,00 \pm 0,59) \Omega$ und bei 100°C $(1385,06 \pm 1,33) \Omega$, was einem Temperaturkoeffizienten von $(3,85 \pm 0,02) \cdot 10^{-3}$ entspricht und mit dem gemessenen Temperaturkoeffizienten in Einklang steht.

Der PTC-Thermistor R2b weist im gemessenen Temperaturbereich einen exponentiellen Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand auf. Der Temperaturkoeffizient beträgt $\beta = (0,218 \pm 0,002) \text{K}^{-1}$.