Fachhochschule Jena University of Applied Sciences Jena	**Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik** Laborpraktikum Werkstoffe der Elektrotechnik Prof. Dr. H. Kahnt

Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Metallen und Halbleitern

Studiengang: KMT		Datum: 13.04.2010
Set: 2.08	Platz: 2	
Teilnehmer: Michael Goldbach, Jürgen Döffinger		i.O. 18.7.

Zielstellung

- Ermittlung der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines Platindrahtes (Widerstandstemperaturfühler PT100) und eines Halbleiterwiderstandes (NTC-Thermistor aus Übergangsmetalloxiden)
- Bestimmung des Temperaturkoeffizienten des spezifischen Widerstandes α_T von Platin
- Bestimmung der Aktivierungsenergie der Leitfähigkeit des Halbleiterwiderstandes

1. Begriffe und Formelzeichen

spezifische Leitfähigkeit κ, Aktivierungsenergie der Leitfähigkeit E_a, Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstandes α_T

2. Versuchsvorbereitung

2.1. Wiederholen Sie die Vorlesung zu den o.g. Themen, insbesondere den Abschnitt 'Leitfähigkeit von Metallen und Halbleiterwerkstoffen'. Machen Sie sich mit den in Punkt 1. angegebenen Begriffen und Formelzeichen vertraut. Machen Sie sich die Zusammenhänge zwischen den angegebenen Größen klar.

2.2. Beantworten Sie folgende Kontrollfragen:

- Erklären Sie mit Hilfe des Bändermodells den Unterschied zwischen der Leitfähigkeit von Metallen und Halbleitern.
- Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit, Ladungsträgerbeweglichkeit und Ladungsträgerkonzentration.
- Wie kann man die Leitfähigkeit von Metallen und Halbleitern beeinflussen?
- Was versteht man unter der Aktivierungsenergie der Leitfähigkeit von Halbleitern?

2.3. Nennen Sie charakteristische Eigenschaften eines PT100-Widerstandes und eines NTC-Thermistors.

3. Versuchsdurchführung und -auswertung

3.1. Messungen

Bauen Sie die Meßanordnung nach Bild 1 auf. Machen Sie sich mit der Bedienung des Thermostaten vertraut. Fertigen Sie zur Erfassung der Meßwerte und davon abgeleiteter Größen eine Tabelle entsprechend dem folgenden Muster an:

				PT 100	NTC		
Nr.	T [°C]	T [K]	$10^3/T$ [K^{-1}]	R [Ω]	R [Ω]	κ [$\Omega^{-1}cm^{-1}$]	lg κ

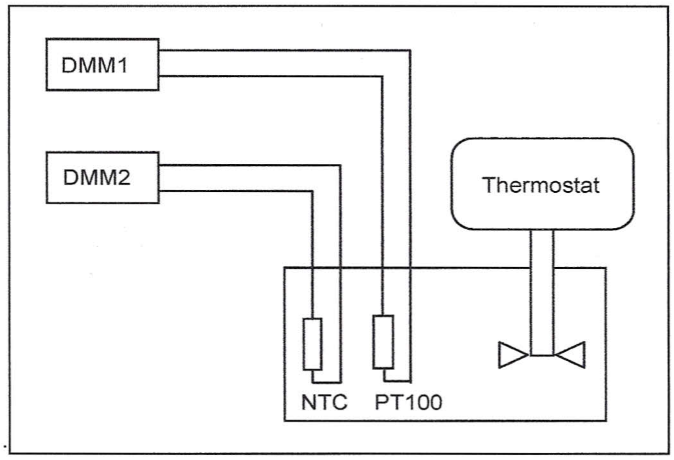


Bild 1: Meßaufbau

DMM1, DMM2: Digitalmultimeter mit Widerstandsmeßbereich
NTC: Halbleiterwiderstand, $\varnothing$=5 mm, l=2 mm
PT100: Platinwiderstand

Messen Sie die Widerstandswerte des Halbleiter- und des Platinwiderstandes im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 90 °C in Schritten von 5 K. Beachten Sie dabei, daß nach Erreichen der Solltemperatur des Wasserbades noch eine Zeit von 5-10 Minuten vergeht, bevor die Probentemperatur angeglichen ist.

Stellen Sie nach Abschluß Ihrer Messungen die Solltemperatur des Thermostaten auf 20 °C ein!

3.2. Auswertung Halbleiterwiderstand

Zunächst ist aus den gemessenen Widerstandswerten die spezifische Leitfähigkeit zu berechnen:

$$\kappa = \frac{1}{R} * \frac{l}{A} \qquad /1/$$

Für die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit des Halbleiters gilt der Modellansatz:

$$\kappa = \kappa_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k * T}\right) \qquad /2/$$

mit:

κ spezifische Leitfähigkeit
l Länge in cm
κ_0 präexp. Faktor in $\Omega^{-1}cm^{-1}$
E_a Aktivierungsenergie in eV

A	Fläche in cm^2	k	Boltzmannkonstante
T	absolute Temperatur in K		$k=8{,}617 \cdot 10^{-5}$ eV/K

Zur Bestimmung von E_a und κ_0 aus den Meßwerten, d.h. $\kappa(T)$, ist es zweckmäßig, Gleichung /2/ zu linearisieren. Durch Logarithmieren und Umformen erhält man:

$$\lg \kappa = \lg \kappa_0 - \frac{E_a * \lg e}{k} * \frac{1}{T}$$ /3/

Das entspricht einer Geradengleichung der Form y=a+bx mit:

$$y = \lg \kappa$$ /4/

$$a = \lg \kappa_0$$ /5/

$$b = -\frac{E_a * \lg e}{k}$$ /6/

$$x = \frac{1}{T}$$ /7/

Stellen Sie $\lg \kappa = f(10^3/T)$ in einem geeigneten Koordinatensystem dar. Bestimmen Sie die Aktivierungsenergie der Leitfähigkeit E_a und den präexponentiellen Faktor κ_0 aus Ihren Meßwerten!

3.2. Auswertung Platinwiderstand

Stellen Sie die Temperaturabhängigkeit des Widerstands in einer linearen Darstellung grafisch dar. Allgemein wird die Temperaturabhängigkeit beschrieben durch den Ansatz:

$$R(T) = R(T_0)*[1 + \alpha_T(T - T_0)]$$ /8/

T_0: Bezugstemperatur, ist mit T_0=0 °C vorgegeben

Ermitteln Sie α_T und R(0 °C).

4. Bedienung des Thermostaten

Nach dem Einschalten des Gerätes wird nach einiger Zeit die Isttemperatur der Badflüssigkeit angezeigt. Die Temperatur kann durch Eingabe eines neuen Sollwertes geändert werden.

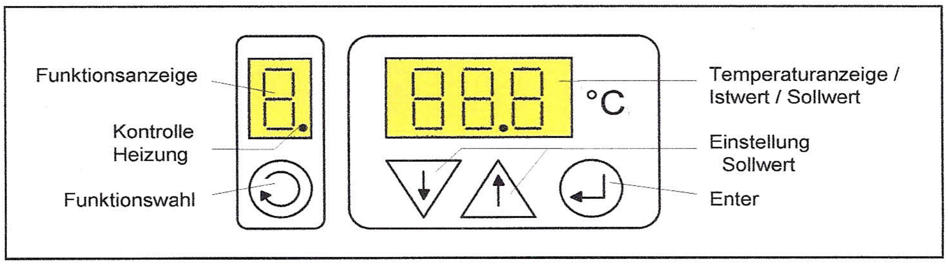


Bild 2: Bedienfeld Thermostat

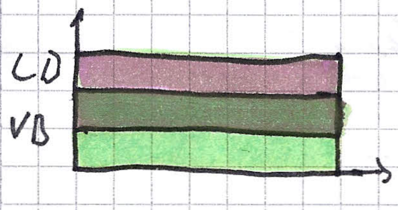
Dazu wählen Sie mit der Funktions-Wahl-Taste die Funktion "S" (Sollwert) an. In der Temperatur-Anzeige erscheint der momentan eingestellte Wert. Dieser kann über die Tasten " ↑ " oder " ↓ " auf den gewünschten Wert eingestellt werden. Der neue Wert muß mit der Taste " ↵ " (Enter) bestätigt werden. Nach einigen Sekunden schaltet die Temperaturanzeige auf den Istwert zurück. Die Temperatur der Badflüssigkeit wird auf den neu eingestellten Sollwert erhöht.

Wird der neu eingestellte Sollwert nicht mit der Taste " ↵ " bestätigt, so schaltet die Temperaturanzeige auch wieder auf den Istwert zurück, der davor eingestellte Sollwert bleibt jedoch erhalten.

2. 2.

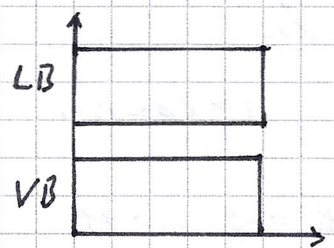
Im Metall befindet sich eine hohe Konzentration an frei beweglichen Elektronen. Das Valenzband eines Metalles ist nur teilweise besetzt, somit ist ein Bewegung der freien Elektronen möglich. Da die Beweglichkeit und die Anzahl an freien Ladungsträgern hoch ist, ist gemäß Gleichung

$\varkappa = q \cdot n \cdot \mu$ auch die Leitfähigkeit hoch.



- Überlappung der Bänder führt zu freien Elektronen

Im Halbleiter ist zwischen dem Leiterband und dem Valenzband eine Lücke, welche aber sehr klein ist. Kleine, groß? (Sie brauchen einen Referenzwert!)



Dies führt dazu dass zunächst keine freien Elektronen vorhanden sind. Führt man nun Energie hinzu z.B. Licht, Wärme können sich einzelne ~~Leute~~ Elektr. aus dem Valenzband lösen und in das Leitungsband übergehen. Womit im Valenzband eine Lücke entsteht. Diese versuchen nun die Elektronen im Valenzband zu schließen, was zu einem „wandern" des Loches (positive Ladung) führt.

Diese „Lochwanderung" kann als positive bewegliche Ladung aufgefasst werden.

Durch Dotierung kann dieser Effekt auch herbeigeführt werden. bzw. verstärkt werden.

Des Weiteren ist bei den Halbleitern zwischen Eigenleiter und Störstellenleiter zu unterscheiden.

Bei den Eigenleiter kommt die Leitfähigkeit durch Leitungspaarbildung zustande.
Bei thermischen Gleichgewicht gilt.
$p_0 = n_0 = n_i$ (n_i - Inversionsdichte).

Womit sich für die Leitfähigkeit

$\varkappa = q\,(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$.

Beim Störstellenleiter ergibt sich die Leitfähigkeit durch das einbringen von Fremdatomen (Dotierung), wodurch sich eine wesentliche Erhöhung der Leitfähigkeit ergibt. Es gilt $n \gg p$ $n = const$.

Woraus sich die Leitfähigkeit $\varkappa = q \cdot n \cdot \mu$ ergibt.

Um die Leitfähigkeit eines Halbleiters zu erhöhen ist also das Verfahren der Dotierung anzuwenden.
Für Metalle ist das absenken der Temperatur eindeutig das bessere erforderlich um die Leitfähigkeit zu erhöhen.

Die notwendige Energie um ein Elektron vom Valenzband ins Leitungsband zu bringen nennt man Aktivierungsenergie.

2.3.

NTC:

(Negativ Temperatur Coéfficient)

- Bessere Leitfähigkeit bei hohen Temperaturen als bei tiefen Temperaturen
- sind Halbleiter
- üblicher Einsatzbreich zwischen -80°C und +250°C
- nichtlinear

PT 100:

- ist ein PTC (Positiv Temperatur Coefficient)
- besteht aus Platin
- dient als Temperaturfühler im Bereich von -200 °C bis 850°C
- wird durch R_0 bei $T=0°C$ charakterisiert (hier 100Ω)
- wird in verschiedene Genauigkeitsklassen eingeteilt

3.2. Auswertung Halbleiterwiderstand

$l = 2\,mm = 0{,}2\,cm$

$d = 5\,mm = 0{,}5\,cm$

$A = \frac{\pi}{4} d^2 =$

$$\varkappa = \frac{1}{R} \cdot \frac{l}{A} = \frac{1}{R} \cdot \frac{0{,}2\,cm \cdot 4}{\pi \cdot d^2} = \frac{1}{R} \cdot \frac{0{,}2\,cm \cdot 4}{\pi \cdot (0{,}5\,cm)^2}$$

$$\underline{\varkappa = \frac{1}{R} \cdot 1{,}019\,\frac{1}{cm}}$$

$$\lg \varkappa = \lg \varkappa_0 - \frac{E_a \cdot \lg e}{k} \cdot \frac{1}{T}$$

$$\lg \varkappa_0 = \frac{E_a \cdot \lg e}{k} \cdot \frac{1}{T} + \lg \varkappa$$

$$\varkappa_0 = 10^{\left(\frac{E_a \cdot \lg e}{k} \cdot \frac{1}{T} + \lg \varkappa\right)}$$

$$\lg \varkappa_1 = \lg \varkappa_0 - \frac{E_A \cdot \lg e}{k} \cdot \frac{1}{T_1} \qquad \Big| \; -$$

$$\lg \varkappa_2 = \lg \varkappa_0 - \frac{E_A \cdot \lg e}{k} \cdot \frac{1}{T_2}$$

$$\lg \varkappa_1 - \lg \varkappa_2 = - \frac{E_A \cdot \lg e}{k} \cdot \frac{1}{T_1} + \frac{E_A \cdot \lg e}{k} \cdot \frac{1}{T_2}$$

$$\lg \varkappa_1 - \lg \varkappa_2 = \frac{E_A \cdot \lg e}{k} \cdot \left(- \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right)$$

$$\frac{\left(\lg \varkappa_1 - \lg \varkappa_2 \right) \cdot k}{\lg (e) \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} = E_A$$

$$E_A = \frac{k \cdot \left[\lg \left(13{,}96 \cdot 10^{-3}\ \Omega^{-1} cm^{-1} \right) - \lg \left(15{,}88 \cdot 10^{-3}\ \Omega^{-1} cm^{-1} \right) \right]}{\lg (e) \cdot \left(\frac{1}{363{,}15\,K} - \frac{1}{358{,}15\,K} \right)}$$

Die Werte sollten auch weiter auseinander liegen!

$$\underline{\underline{E_A \approx 0{,}303\ eV}}$$ ✓

$$\lg(\varkappa) = \lg(\varkappa_0) - \frac{E_A \cdot \lg e}{k \cdot T}$$

$$\lg(\varkappa) + \frac{E_A \cdot \lg(e)}{k \cdot T} = \lg(\varkappa_0)$$

$$\varkappa_0 = 10^{\left(\lg(\varkappa) + \frac{E_A \cdot \lg(e)}{k \cdot T}\right)}$$

$$\varkappa_0 = 10^{\left[\lg(15{,}98 \cdot 10^{-3}\ cm^{-1}\Omega^{-1}) + \frac{0{,}303\,eV \cdot \lg(e)}{k \cdot 363{,}15\,K}\right]}$$

$$\underline{\underline{\varkappa_0 = 256{,}31\ \frac{1}{\Omega\, cm}}}$$ ✓

+25%

3.2. Auswertung Platinwiderstand

$$R(T) = R(T=0°) \cdot (1 + \alpha\,(T - T_0)) \quad | \; T_0 = 0°C \qquad R(T=0°) = R_0$$

$$R_1 = R_0\,(1 + \alpha T_1) \qquad T_1 = T - T_0 = 23°C - 0°C = 23K$$

$$R_2 = R_0\,(1 + \alpha T_2) \qquad T_2 = T - T_0 = 30°C - 0°C = 30K$$

$$R_0 = \frac{R_1}{(1 + \alpha T_1)} \qquad R_0 = \frac{R_2}{(1 + \alpha T_2)}$$

$$R_0 = R_0$$

$$\Downarrow$$

$$\frac{R_1}{(1 + \alpha T_1)} = \frac{R_2}{(1 + \alpha T_2)}$$

$$R_1 + \alpha T_2 R_1 = R_2 + \alpha T_1 R_2$$

$$R_1 - R_2 = \alpha T_1 R_2 - \alpha T_2 R_1$$

$$R_1 - R_2 = \alpha\,(T_1 R_2 - T_2 R_1)$$

$$\alpha = \frac{R_1 - R_2}{(T_1 R_2 - T_2 R_1)}$$

$R_1 = 109{,}5\,\Omega$

$R_2 = 112{,}2\,\Omega$

$T_1 = 23\,K$

$T_2 = 30\,K$

$$\alpha = \frac{109{,}5\,\Omega - 112{,}2\,\Omega}{23\,K \cdot 112{,}2\,\Omega - 30\,K \cdot 109{,}5\,\Omega}$$

$$\underline{\underline{\alpha \approx 3{,}833 \cdot 10^{-3}\,\frac{1}{K}}}$$

$R(T) = R(0) \cdot (1 + \alpha\,(T - T_0))$ $\quad | R(T = 0\,°C) = R_0$

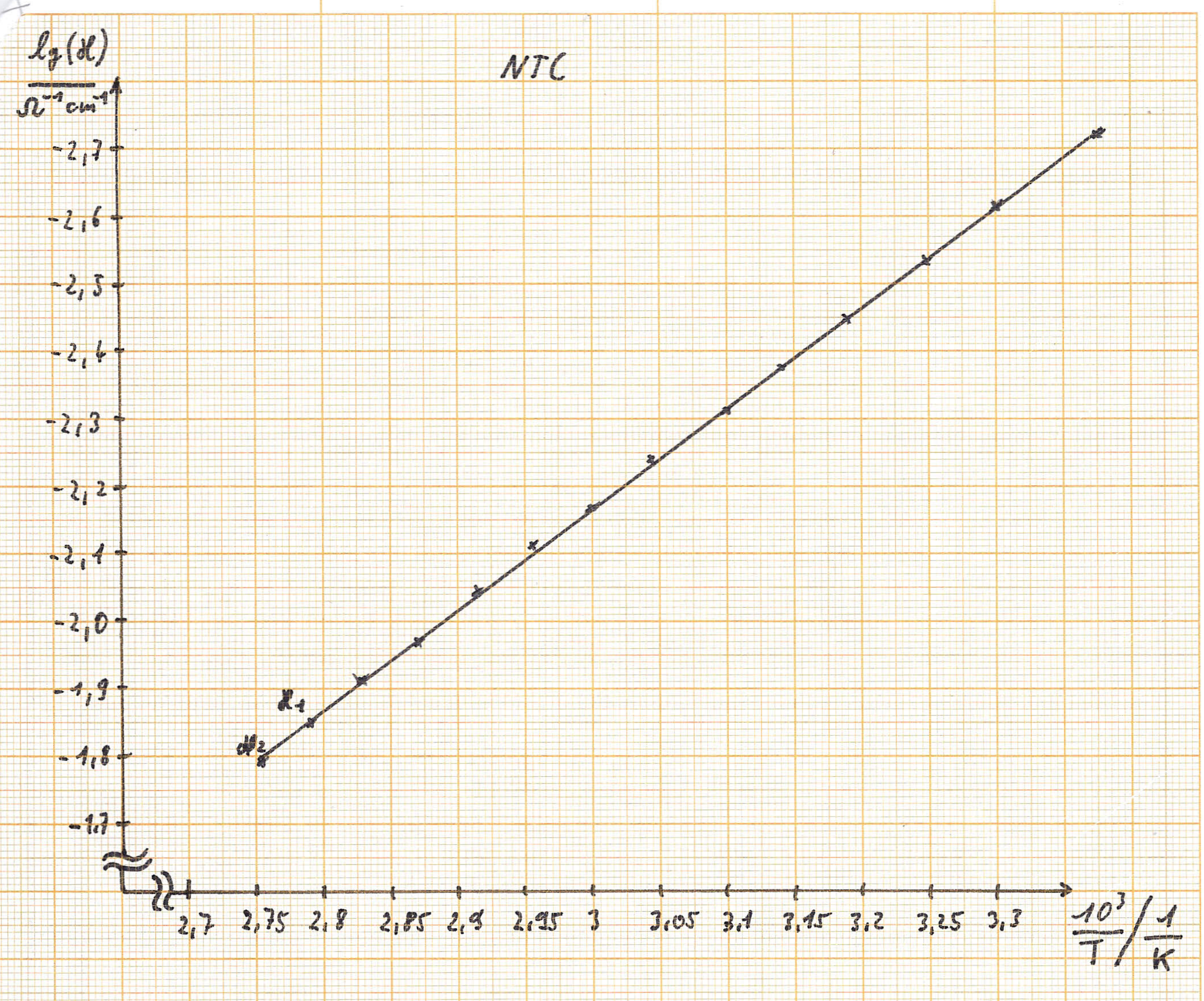
$| T_0 = 0\,°C$

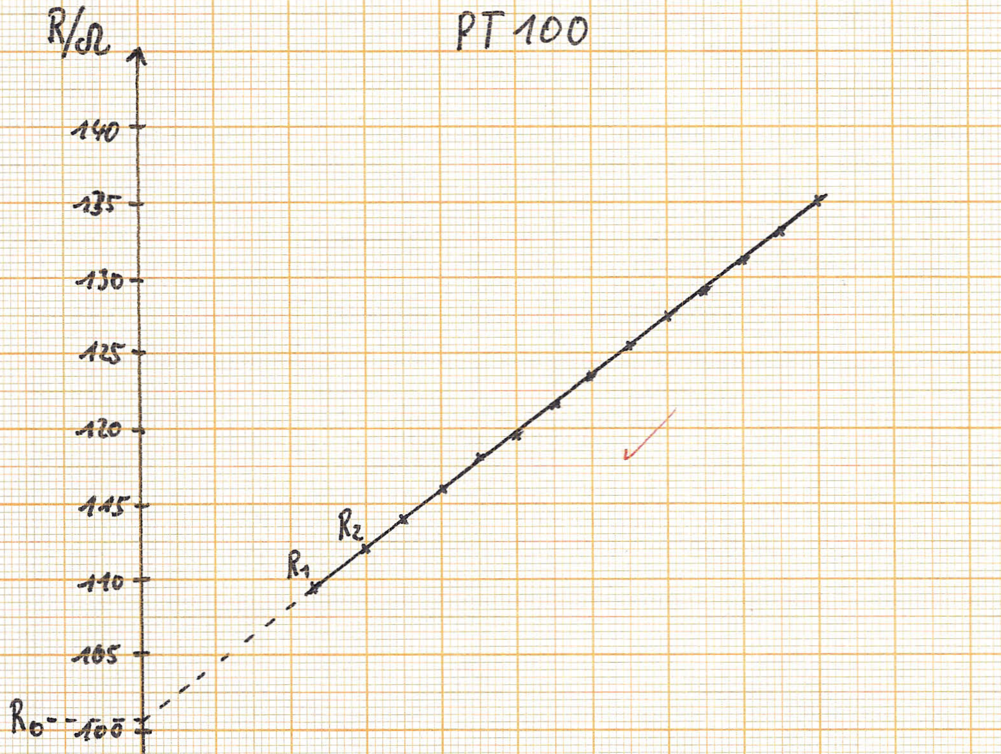
$$R_0 = \frac{R}{1 + \alpha T}$$

$$R_0 = \frac{109{,}5\,\Omega}{1 + 3{,}833 \cdot 10^{-3}\,\frac{1}{K} \cdot 23\,K}$$

$R_0 = 100{,}628\ldots\,\Omega$

$\underline{\underline{R_0 \approx 101\,\Omega}}$ ✓


NTC
lg(κ) / Ω⁻¹cm⁻¹
-2,7
-2,6
-2,5
-2,4
-2,3
-2,2
-2,1
-2,0
-1,9
-1,8
-1,7
κ1
κ2
2,7
2,75
2,8
2,85
2,9
2,95
3
3,05
3,1
3,15
3,2
3,25
3,3
10³/T / 1/K


PT 100
R/Ω
140
135
130
125
120
115
110
105
100
R0
R1
R2
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
T/°C

				PT 100	NTC		
Nr.	T [°C]	T [K]	$10^3/T$ [1/K]	R [Ω]	R [Ω]	$\varkappa$ [1/(Ωcm)]	lg $\varkappa$
1	23	296,15	3,377	109,5	536,00	$1,90 \cdot 10^{-3}$	−2,721
2	30	303,15	3,299	112,2	412,00	$2,47 \cdot 10^{-3}$	−2,607
3	35	308,15	3,245	114,1	347,37	$2,934 \cdot 10^{-3}$	−2,533
4	40	313,15	3,192	115,9	292,65	$3,482 \cdot 10^{-3}$	−2,459
5	45	318,15	3,143	117,9	247,00	$4,126 \cdot 10^{-3}$	−2,385
6	50	323,15	3,100	119,8	208,73	$4,88 \cdot 10^{-3}$	−2,312
7	55	328,15	3,047	121,8	177,40	$5,744 \cdot 10^{-3}$	−2,241
8	60	333,15	3,002	123,7	151,80	$6,713 \cdot 10^{-3}$	−2,173
9	65	338,15	2,957	125,6	130,24	$7,824 \cdot 10^{-3}$	−2,107
10	70	343,15	2,914	127,5	112,07	$9,093 \cdot 10^{-3}$	−2,041
11	75	348,15	2,872	129,4	96,88	$10,52 \cdot 10^{-3}$	−1,978
12	80	353,15	2,832	131,4	83,93	$12,14 \cdot 10^{-3}$	−1,916
13	85	358,15	2,792	133,3	72,99	$13,96 \cdot 10^{-3}$	−1,855
14	90	363,15	2,754	135,2	63,77	$15,38 \cdot 10^{-3}$	−1,796
15							
16							
17							
18							
19							
20							