

Versuch: P2-52

# Widerstandskennlinien

- Auswertung -

Versuchsdurchführung: Montag, 12. Juni 2006

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstandes</b>	<b>2</b>
1.1	Versuch . . . . .	2
1.2	Anwendungen von NTC-Widerständen . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Widerstände von Metallen und Glühbirnen</b>	<b>4</b>
2.1	I(U)-Abhängigkeit eines Edelmetallwiderstands . . . . .	4
2.2	Kalt- und Betriebswiderstand einer 60 W-Glühbirne . . . . .	4
2.3	Kalt- und Betriebswiderstand einer 50 W-Kohlefadenlampe . . . . .	5
<b>3</b>	<b>I(U)-Abhängigkeit verschiedener Bauteile</b>	<b>5</b>
3.1	Siliziumdiode (SID) . . . . .	5
3.2	Zenerdiode (ZED) . . . . .	6
3.3	Germaniumdiode (GED) . . . . .	7
3.4	Varistor (VDR) . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Punktweise Messung der Varistor-Kennlinie</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Tunneldiode (TUD)</b>	<b>9</b>
5.1	Punktweise Messung der Kennlinie . . . . .	9
5.2	Sprungverhalten des Stromes . . . . .	11
5.3	Oszillographische Darstellung des Sprunges . . . . .	12

# 1 Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstandes

## 1.1 Versuch

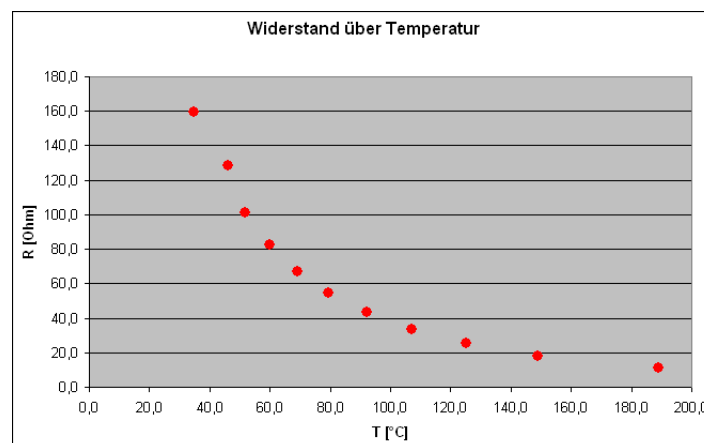
Da Halbleiterdiode, Temperaturmessgerät und Heizofen bereits verschaltet waren, beschränkte sich der Aufbau dieses Versuchs auf den Anschluss der Bauteile an die Wheatstone-Brückenschaltung der vorbereiteten Platine. Die Messung begannen wir bei 35°C „Zimmertemperatur“, was angesichts der Hitze im Praktikumsraum aber realistisch sein kann. Nach dem Tipp des Praktikumsbetreuer versuchten wir nicht, zur gerade aktuellen Temperatur durch die Veränderung des Potentiometers der Wheatstone-Brücke den Widerstandswert herauszufinden, sondern stellen einen festen  $R_{Pot}$ -Wert ein, und notierten bei welcher Temperatur der Stromfluss in der Wheatstone-Brücke bei Null lag. Mit der in der Vorbereitung hergeleiteten Formel für die Wheatstone-Brückenschaltung,

$$R_x = \frac{R_{Pot}}{10 \text{ k}\Omega - R_{Pot}} \cdot R_0 \quad (1)$$

erhalten wir folgende Widerstandswerte  $R_x$  des Halbleiters (wir verwendeten einen Referenzwiderstand von  $R_0 = 101 \Omega$ ):

$R_{Pot} [\Omega]$	$R_x [\Omega]$	T [°C]
6120	159,3	34,8
5599	128,5	46,0
5000	101,0	51,8
4500	82,6	60,0
4000	67,3	69,1
3500	54,4	79,4
3000	43,3	92,1
2500	33,7	107,0
2000	25,3	125,3
1500	17,8	149,1
1000	11,2	189,1

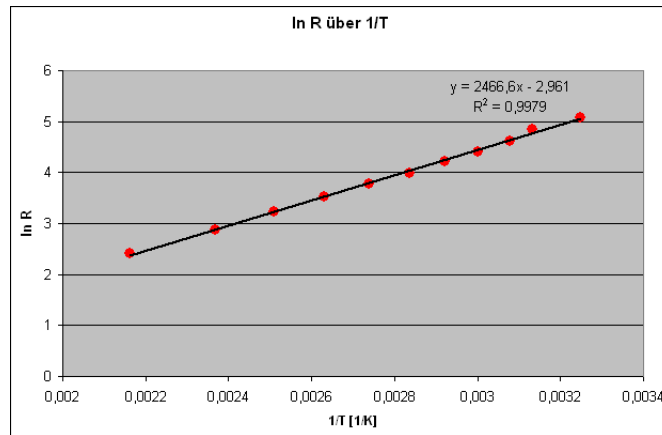
Trägt man nun den Widerstand des Halbleiters  $R_x$  über der Temperatur  $T$  (zunächst in Grad Celsius) auf, so wird der in der Aufgabenstellung genannte exponentielle Zusammenhang der beiden Größen ersichtlich:



Wie in der Vorbereitung theoretisch begründet, ist der Widerstand bei hohen Temperaturen deutlich kleiner, der Halbleiter ist ein Heißleiter. Um nun die Koeffizienten der Formel  $R = a \cdot e^{\frac{b}{T}}$  zu bestimmen (wenn wir jetzt vereinfachend den Widerstand des Halbleiters  $R$  statt  $R_x$  nennen), wenden wir das in der Vorbereitung diskutierte Verfahren an: Die Auftragung von  $\ln R$  über  $\frac{1}{T}$  ergibt einen linearen Zusammenhang, weil durch Logarithmieren folgt:

$$\ln R = \frac{b}{T} + \ln a \quad (2)$$

$b$  entspricht gerade der Steigung,  $\ln a$  dem y-Achsenabschnitt dieser Auftragung. Die Formel der Ausgleichsgeraden ist im folgenden Schaubild zu finden, wobei die Temperatur  $T$  in Kelvin umgerechnet wurde:



Wir lesen also ab:

$$b = 2466,6 \text{ K} \quad (3)$$

$$\ln a = -2,961 (\ln \Omega) \quad (4)$$

$$\Rightarrow a = 0,052 \Omega \quad (5)$$

Dank des guten Korrelationskoeffizienten der Ausgleichsgerade von  $R^2 = 0,9979$  können wir davon ausgehen, dass die Temperaturabhängigkeit unseres Halbleiterwiderstandes durch folgendes Gesetz recht gut beschrieben wird:

$$R = 0,052 \Omega \cdot e^{\frac{2466,6 \text{ K}}{T}} \quad (6)$$

## 1.2 Anwendungen von NTC-Widerständen

- **Temperaturmessung:** Hat man wie im obigen Versuch die Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstandes bestimmt, so kann man ihn zur Temperaturmessung einsetzen. Konkret auf unseren Heißleiter bezogen würde man (6) nach  $T$  auflösen und erhielte folgende Formel, mit der man durch Messung des Widerstandes direkt die Temperatur herausbekommt:

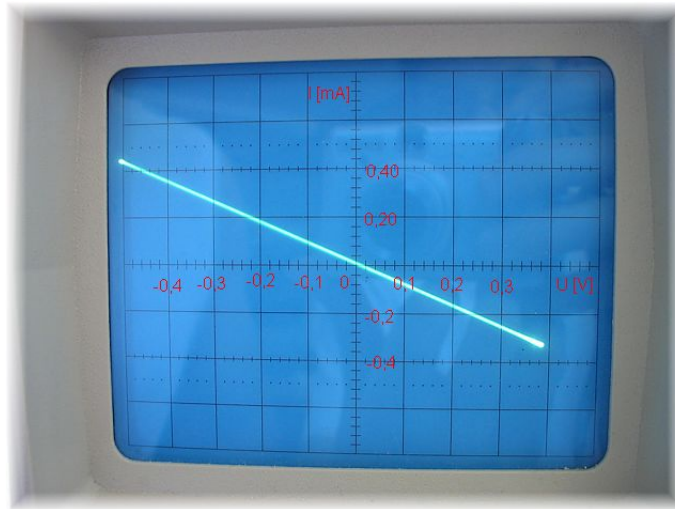
$$T = \frac{2466,6 \text{ K}}{\ln R - \ln(0,052 \Omega)} \quad (7)$$

- **Füllstandsanzeige:** Taucht der NTC-Widerstand teilweise in eine Flüssigkeit ein, so nimmt der eingetauchte Teil deren Temperatur an. Bei einer Änderung des Füllstandes ändert sich auch der Anteil des NTC-Widerstandes, der die Temperatur der Flüssigkeit hat, was sich gemäß obigem Gesetz in einer Widerstandsänderung niederschlagen müsste.
- **Strombegrenzung:** Parallelgeschaltet zu einem Bauteil kann ein NTC-Widerstand dieses vor zu hohem Stromfluss schützen: wird der Strom nämlich zu groß, so erwärmt sich der NTC stark, was seine Leitfähigkeit deutlich absenkt. Der Großteil des Stromes fließt dann durch ihn an, nicht durch das gefährdete Bauteil.

## 2 Widerstände von Metallen und Glühbirnen

### 2.1 I(U)-Abhängigkeit eines Edelmetallwiderstands

In die Halbwellenschaltung des Versuchsaufbaus bauten wir zunächst den Edelmetallwiderstand ein und schalteten das Oszilloskop so, dass sich die  $I$  über  $U$ -Kennlinie direkt ergibt. Da das Oszilloskop nur Spannungen anzeigen kann, legten wir die Spannung über einen in die Schaltung eingebauten  $101\Omega$ -Widerstand auf den Kanal, der die  $y$ -Auslenkung regelte. Per Ohm'schem Gesetz ermittelten wir die zugehörigen Ströme  $I = \frac{U}{R}$ , so dass wir das Oszilloskopbild mit den korrekten Achsenbeschriftungen ergänzen können:



Betrachtet man den Schnittpunkte des Oszilloskopbilds mit den Geraden  $I = 0,4\text{mA}$  und  $I = -0,2\text{mA}$ , so erhalten wir folgende Steigung  $m$ , die - wie in der Vorbereitung gezeigt - gerade dem reziproken Widerstand  $\frac{1}{R}$  entspricht:

$$m = \frac{0,6 \text{ mA}}{0,69 \text{ V}} \quad (8)$$

$$= 8,696 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\Omega} \quad (9)$$

$$\Rightarrow R = 115 \Omega \quad (10)$$

Bei zunehmender Erwärmung mittels eines Föns verringerte sich die Steigung der Geraden. Dies entspricht angesichts der Relation  $m = \frac{1}{R}$  einer Vergrößerung des Widerstands, wie wir es für ein Metall erwartet hatten (Begründung siehe Vorbereitung). Die Temperaturabhängigkeit war aber lange nicht so stark ausgeprägt wie beim speziell darauf ausgelegten Halbleiter aus Aufgabe 1. Deshalb verzichteten wir auf weitergehende quantitative Untersuchungen, da ja auch keine Möglichkeit zum Messen der Temperatur gegeben war.

### 2.2 Kalt- und Betriebswiderstand einer 60 W-Glühbirne

Mit dem auf „ $\Omega$ “ gestellten Multimeter lassen sich bequem Widerstände messen - der dafür benötigte Messstrom wird vom Gerät selbst erzeugt. Insofern belief sich der Versuchsaufbau lediglich auf das Anschließen der Glühbirne an das Messgerät. Dieses zeigte einen Kaltwiderstand von

$$R_{\text{kalt}} = 64,05 \Omega \quad (11)$$

an, was deutlich unter dem in der Vorbereitung errechneten theoretischen Betriebswiderstand von

$$R_{\text{Betrieb}} = 807 \Omega \quad (12)$$

liegt. Wie schon im ersten Teil dieser Aufgabe wird also deutlich: Metalle sind Kaltleiter, bei höheren Temperaturen vergrößert sich der Widerstand, da die stärkeren Molekularbewegungen Elektronenstöße hervorrufen, die den Stromfluss hemmen.

## 2.3 Kalt- und Betriebswiderstand einer 50 W-Kohlefadenlampe

Die gleiche Untersuchung wie in Teil 2.2 ließen wir im Anschluss einer Kohlefadenlampe zuteil werden. Das Ohmmeter zeigte einen Kaltwiderstand von

$$R_{kalt} = 1.689,6 \Omega \quad (13)$$

an, also in der Größenordnung des Faktors 2 von

$$R_{Betrieb} = 968 \Omega, \quad (14)$$

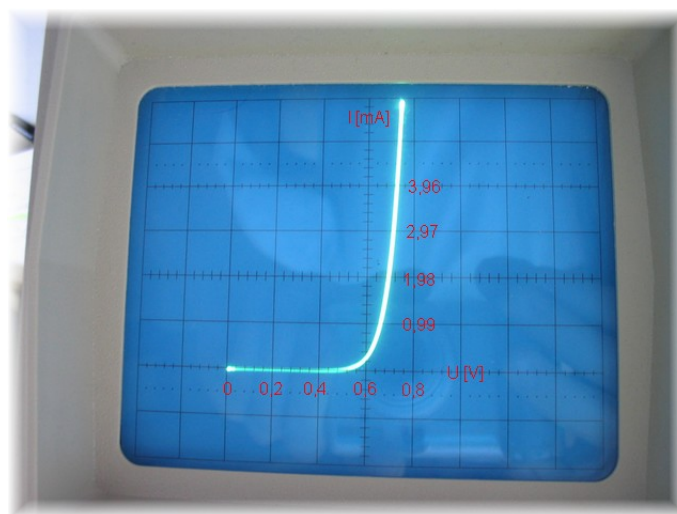
der in der Vorbereitung diskutiert wurde. Es bestätigt sich: Kohlenstoff ist ein Heißeiter, bei niedrigen Temperaturen ist sein Widerstand groß. Ergänzend zur Begründung aus der Vorbereitung, warum eine Kohlefadenlampe bei gleicher elektrischer Leistung dunkler als die Wolfram-Glühbirne erscheint, sei kurz erwähnt: theoretisch ließe sich die Kohlefadenlampe aufgrund des höheren Schmelzpunkts von Kohlenstoff mit einer höheren Temperatur als das Wolfram-Glühwendel betreiben. Da aber die Sublimationsneigung von Kohlenstoff schon bei niedrigen Temperaturen deutlich höher ist, müssen kleiner Spannungen verwendet werden, um die Wendel nicht zu zerstören.

## 3 I(U)-Abhängigkeit verschiedener Bauteile

### 3.1 Siliziumdiode (SID)

In der Halbwellenschaltung aus Aufgabe 2.1 ersetzten wir nun den Edelmetallwiderstand durch eine Siliziumdiode. Den Abgriff des Oszilloskops behielten wir bei, so dass sich wieder direkt ein I über U-Schaubild auf dem Bildschirm zeigte. Leider musste die Invertierung des Signals (bzw. des Fotos) im Nachhinein auf dem Computer vorgenommen werden, da das Oszilloskop aus technischen Gründen in beiden Richtungen nach unten gerichtete Kurven (siehe Messprotokoll) darstellte. Wie erwartet erhielten wir bei der Siliziumdiode:

- **Sperrrichtung:** kein Strom erkennbar, trotz starker Spannungserhöhung konnte ein Durchschlag nicht erreicht werden.
- **Durchlassrichtung:** kein Strom bis zur Schwellenspannung von 0,6 V, dann rascher Anstieg. Das Bild auf dem Oszilloskop entspricht (invertiert) genau dem erwarteten Kennlinienverlauf einer Diode in Durchlasspolung:



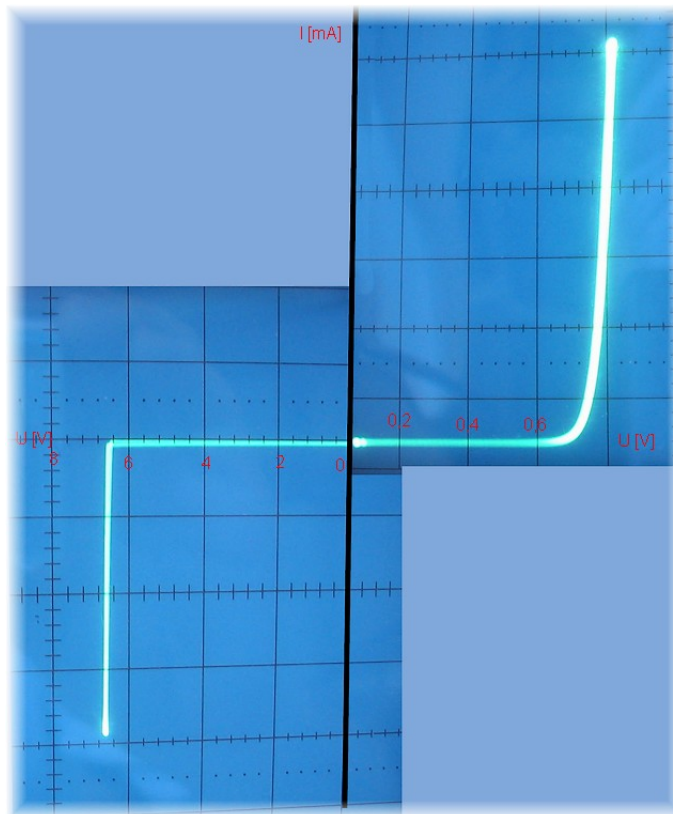
Der Strom wurde wieder aus den Oszilloskopeinstellungen und dem Abgriff über dem 101 $\Omega$ -Widerstand zurückgerechnet.

### 3.2 Zenerdiode (ZED)

Anschließend setzten wir an Stelle der Siliziumdiode die Zenerdiode in unsere Schaltung ein. Auch hier bestätigten sich erfreulicherweise unsere Erwartungen:

- **Durchlassrichtung:** Ähnliches Bild wie bei der Siliziumdiode, ab einer Schwellenspannung von  $\approx 0,6\text{ V}$  ist einer starker Anstieg des zuvor nicht messbaren Stroms ersichtlich.
- **Sperrrichtung:** Bei kleinen Spannungen wie bei der Siliziumdiode kein Strom, nach Überschreiten der Durchbruchspannung (in unserem Fall ca.  $6,5\text{ V}$ ) allerdings sofortiges, auf dem Oszilloskopbild fast rechtwinkliges Anwachsen des Stroms.

In folgendem zusammengesetzten Bild (Durchlass- und Sperrrichtung mussten ja mit der Halbwellenspannung einzeln gemessen werden) sieht man sehr schön die Kennlinie unserer Zenerdiode, aus der man gut Durchbruchspannung und Schwellenspannung ablesen kann:

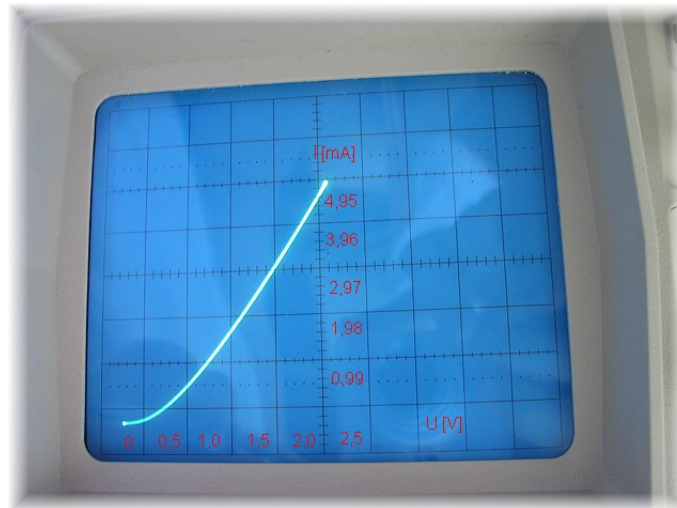


Die Skala der x-Achse (Spannung) ist aufgrund unterschiedlicher Messbereiche bei den Messungen der beiden Richtungen nicht linear! Für das Bild waren wieder mehrere Fotospiegelungen erforderlich, da die Versuchsanordnung nur das Aufnehmen der Kennlinien erlaubt, wie sie im Original in unserem Messprotokoll zu finden sind.

### 3.3 Germaniumdiode (GED)

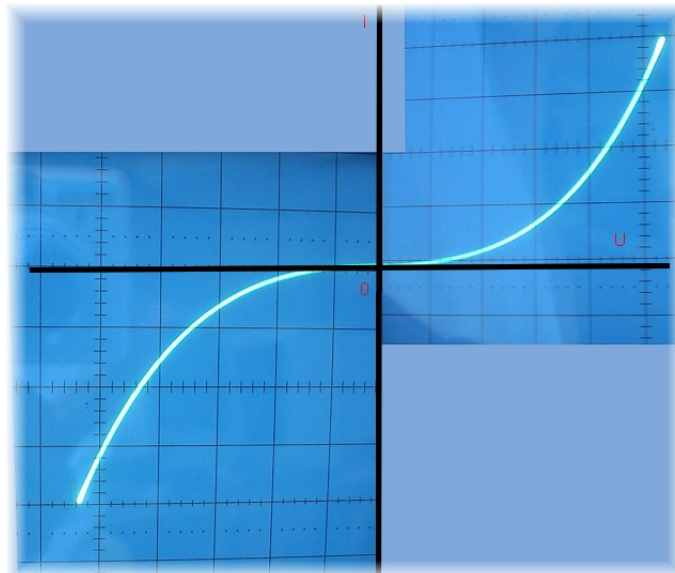
Wie erwartet entsprach der Verlauf der Germaniumdioden-Kennlinie in etwa dem der Siliziumdiode.

- **Sperrrichtung:** Wie bei der Siliziumdiode konnten wir in Sperrrichtung keinen Strom feststellen, die Durchschlagsspannung blieb mit unserer Apparatur unerreichbar.
- **Durchlassrichtung:** Im Vergleich zur Siliziumdiode etwas langsames Anwachsen des Stroms ab der Schwellenspannung, die allerdings schon bei  $\approx 0,2 \text{ V}$  erreicht ist. Im Bild:



### 3.4 Varistor (VDR)

Wie in der Vorbereitung hergeleitet, erwarten wir theoretisch eine zum Ursprung punktsymmetrische Kennlinie. Der Widerstand des Varistors nimmt also in beiden Polungen bei steigender Spannung gleich stark ab. Im Versuch bestätigte sich dies: für beide Polungen des Varistors erschien das gleiche Bild auf dem Oszilloskop. Grafisch invertiert und zusammengesetzt erhalten wir demnach (jetzt nur qualitativ, da ein Varistor ja keine saubere Schwellenspannung hat):

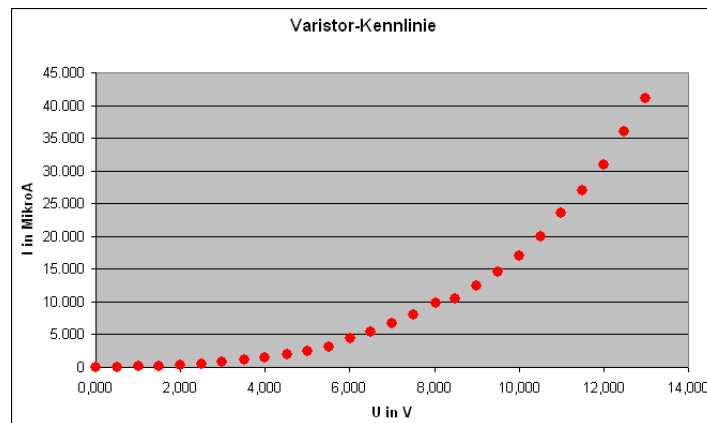


## 4 Punktweise Messung der Varistor-Kennlinie

Deutlich zeitaufwendiger als in Aufgabe 3.4 war die Messung der Varistor-Kennlinie „zu Fuß“ nur mit Strom- und Spannungsmessgerät. Dafür konnten deutlich exaktere Werte gewonnen werden:

U [V]	I [ $\mu$ A]	U [V]	I [ $\mu$ A]
0,000	0	6,993	6.700
0,504	44	7,503	8.100
1,005	110	8,042	9.900
1,500	210	8,497	10.500
1,986	350	8,998	12.500
2,490	530	9,495	14.500
2,991	760	10,000	17.000
3,500	1.100	10,505	20.000
3,997	1.450	10,998	23.500
4,526	1.950	11,505	27.000
5,005	2.500	12,005	31.000
5,500	3.150	12,483	36.000
6,021	4.400	12,999	41.000
6,496	5.400		

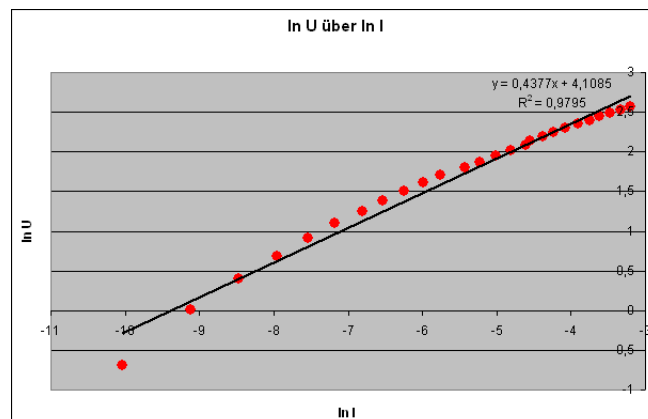
Aufgetragen im Schaubild liegt auch hier sofort die Vermutung nahe, dass zwischen  $I$  und  $U$  ein exponentieller Zusammenhang bestehen muss. Da das gleiche Bauteil eingesetzt wurde, erhielten wir genau den gleichen Verlauf wie in der oszillographischen Messung aus Teilaufgabe 3.4 - da die Messung lediglich in eine Richtung durchgeführt wurde allerdings nur die „halbe“ Kurve.



Mit dem Ansatz  $U = c \cdot I^b$  aus der Vorbereitung müsste sich durch logarithmische Auftragung eine Bestimmung der Koeffizienten  $c$  und  $b$  vornehmen lassen:

$$\ln U = b \cdot \ln I + \ln c \quad (15)$$

Zur Transformation der Kurve in Geradenform tragen wir also  $\ln U$  über  $\ln I$  auf:





Zumindest näherungsweise lässt sich eine Ausgleichsgerade bestimmen, der Korrelationskoeffizient ist mit  $R^2 = 0,9795$  aber nicht ganz so gut wie im ersten Versuch. Da  $b$  gerade die Steigung und  $\ln c$  der y-Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden ist, ergeben sich die Variablen zu:

$$b = 0,4377 \quad (16)$$

$$\ln c = 4,1085 \quad (17)$$

$$\Rightarrow c = 61 \quad (18)$$

Insgesamt lautet also die Formel für die Kennlinie:

$$U(I) = 61 \cdot I^{0,4377} \quad (19)$$

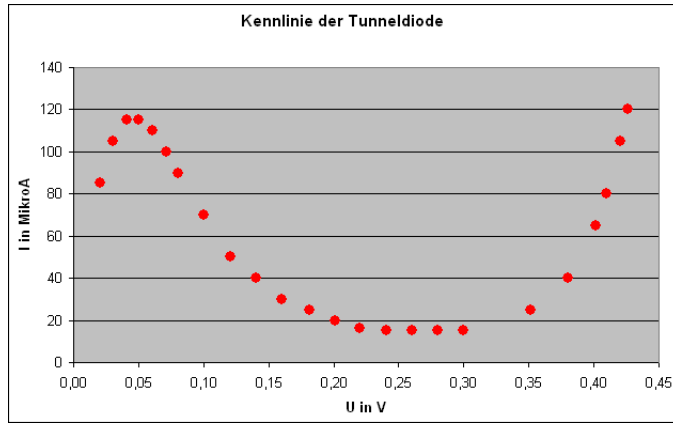
## 5 Tunneldiode (TUD)

### 5.1 Punktweise Messung der Kennlinie

Letztendlich entspricht der Schaltplan zur punktweisen Messung der Tunneldioden-Kennlinie genau dem in Aufgabe 4. Um die Tunneldiode aber vor zu großen Spannungen zu schützen, wurde die extra für die Tunneldiode eingerichtete, heruntergeregelte Tunneldioden-Spannungsteilerschaltung der Versuchsplatine verwendet. Wieder mit Strom- und Spannungsmessgerät nahmen wir die folgenden Messwerte auf:

U [V]	I [ $\mu A$ ]	R [ $\Omega$ ]	$dR = \frac{dU}{dI}$ [ $\Omega$ ]
0,02	85	240	485
0,03	105	287	1.080
0,04	115	356	
0,05	115	435	-2.140
0,06	110	552	-1.070
0,07	100	714	-940
0,08	90	898	-985
0,10	70	1436	-1.015
0,12	50	2416	-1.970
0,14	40	3513	-1.960
0,16	30	5337	-4.200
0,18	25	7244	-4.000
0,20	20	10055	-4.725
0,22	16	13750	-20.300
0,24	15	16020	
0,26	15	17380	
0,28	15	18680	
0,30	15	19980	5.210
0,35	25	14072	1.880
0,38	40	9500	860
0,40	65	6177	573
0,41	80	5126	400
0,42	105	4001	380
0,43	120	3548	

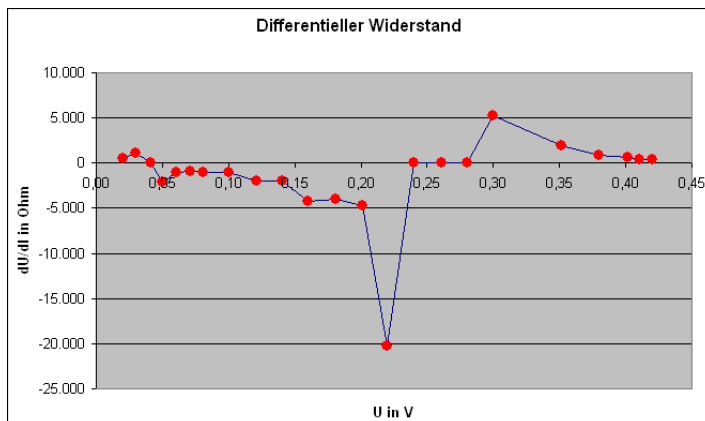
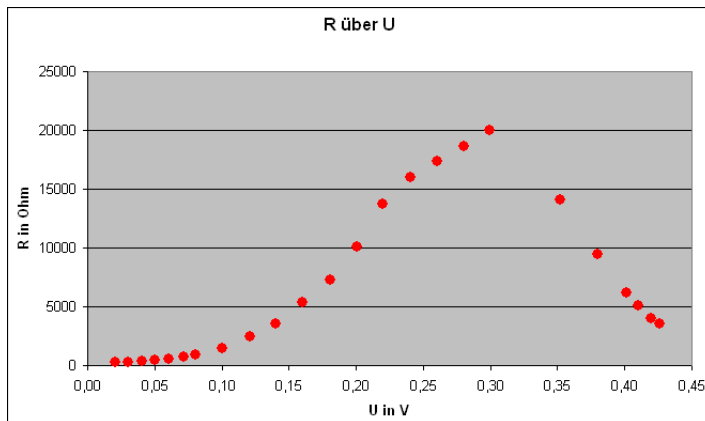
Der jeweilige Widerstand  $R$  wurde per Ohm'schem Gesetz als Quotient von  $U$  und  $I$  berechnet, der differentielle Widerstand  $dR$  als Quotient  $\frac{\Delta U}{\Delta I}$  zweier benachbarter Punkte.  $I$  über  $U$  aufgetragen ergibt in geradezu bestechender Qualität die Kennlinie der Tunneldiode, wie sie in der Vorbereitung skizziert und theoretisch begründet wurde:



Beim Betrachten des Schaubilds können wir leicht herauslesen:

- Höckerspannung: 0,05 V
- Höckerstrom:  $\approx 120\mu A$
- Talspannung:  $\approx 0,3 V$
- Talstrom:  $15\mu A$

Die Angaben des Aufgabenblatts stimmen mit dem Ergebnis unserer Messung also recht gut überein! Mit den oben berechneten Werten lassen sich außerdem ein  $R(U)$ - sowie ein  $dR(U)$ -Schaubild plotten:



## 5.2 Sprungverhalten des Stromes

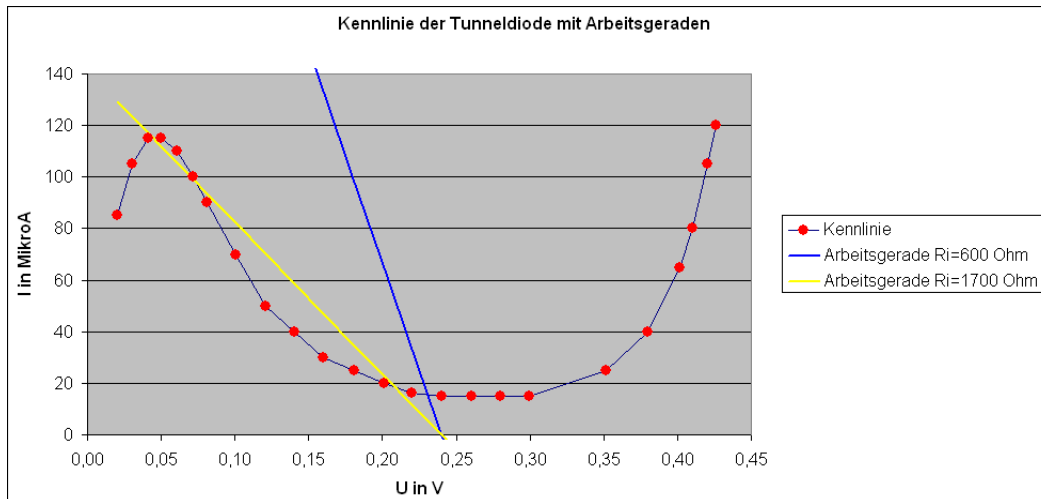
Nachdem wir das Strommessgerät auf den  $100\mu A$ -Bereich gestellt hatten, beobachteten wir qualitativ eine ähnliche Kurve wie in 5.1, stellten aber fest, dass - wie in der Vorbereitung vorhergesagt - die Stromanzeige erhebliche Sprünge machte. Dies liegt daran, dass der Strom über die Arbeitsgerade „abkürzen“ kann, falls diese die Messkurve mehr als einmal schneidet. Bei steigender Spannung beobachteten wir zwei Sprünge:

1. Außerhalb des Messbereichs (bei Durchlaufen des Höckers) zurück auf  $90\mu A$
2.  $65\mu A$  auf  $49\mu A$

Beim Herunterregeln der Spannung waren ebenfalls zwei Sprünge beobachtbar:

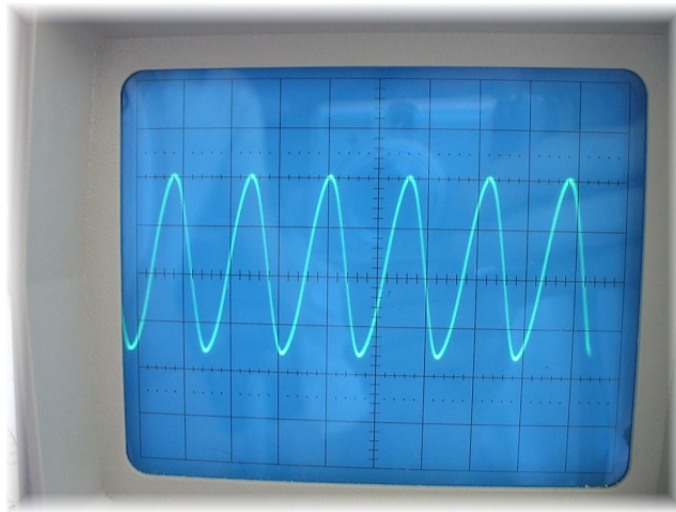
1.  $55\mu A$  auf  $70\mu A$
2. Sprung außerhalb des Messbereichs, deshalb keine Werte

Stellvertretend seien in folgendem Schaubild die Arbeitsgeraden für eine Spannung am Spannungsteiler von  $U_0 = 240\text{ mV}$  eingezeichnet (siehe auch Vorbereitung). Man erkennt sehr schön, dass die  $R_i = 1700\ \Omega$ -Arbeitsgerade, die dem  $100\mu A$ -Messbereich entspricht, die Kennlinie dreimal schneidet - der Strom kann also zweimal abkürzen. Für gleiches  $U_0$  schneidet die  $R_i = 600\ \Omega$ -Kennlinie ( $300\mu A$ -Messbereich) nur einmal - die Kennlinie wird also sauber und ohne Sprünge wiedergegeben.



### 5.3 Oszillographische Darstellung des Sprunges

In der Vorbereitung haben wir begründet, warum sich durch den Einbau einer Spule an den Sprungstellen eine Schwingung ergeben muss. Diese ließ sich auch im Versuch nachweisen: bei der  $47\mu H$ -Spule ermittelten wir per Oszilloskop eine Periodendauer von  $T = 0,32\mu s$ , also eine Frequenz von  $f = 3,125\text{ MHz}$ . Der Schirm zeigte dabei folgendes Bild:



Nach dem Austausch der Spule mit einer  $330\mu H$ -Spule ermittelten wir eine Periodendauer von  $T = 0,9\mu s$ , bzw. eine Frequenz von  $f = 1,11\text{ MHz}$ . Wieder erhielten wir für einen geeigneten Spannungswert eine fast sinusförmige Schwingung:

