

Halbleiterphysik

Laborbericht Für Labor Physik und Grundlagen der Elektrotechnik SS 2003

Erstellt von: G. Schley, B. Drollinger
Mat.-Nr.: 290933, 291339
Datum: 08.04.2003

1 Inhalt

1	Inhalt	2
2	Einleitung.....	3
2.1	Halbleiter.....	3
2.2	Bändermodell.....	3
2.3	Dotierung	3
3	Versuche	4
3.1	Eichung des IR-Temperatursensors	4
3.2	Messung des Bandabstandes	6
3.2.1	Aufwärmvorgang.....	6
3.2.2	Abkühlvorgang.....	6
3.2.3	Berechnung des Bandabstandes (Gap-Energie E_g)	6
4	Hystereseeffekte	8
5	Messwerte und Diagramme.....	10
6	Literatur	13

2 Einleitung

2.1 Halbleiter

Unter Halbleitern versteht man die Elemente oder Verbindungen, deren spezifischer Widerstand zwischen dem der Metalle und dem der Isolatoren liegt. Die Leitfähigkeit liegt etwa zwischen 10^{-8} und 10^3 S/cm. Man kann Halbleiter in Ionenhalbleiter und den im folgenden Versuch betrachteten elektronischen Halbleiter einteilen. Bei letzterem erfolgt der Ladungstransport durch Elektronen. Die technisch bedeutendsten Halbleiter sind Silizium (Si), Germanium (Ge) und Galliumarsenid (GaAs).

Das Verhalten der Halbleiter hängt stark von der Temperatur, den Bindungsverhältnissen und damit von der Bänderstruktur ab. Während bei Metallen die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur sinkt, steigt sie in den Halbleitern (siehe 5 Messwerte und Diagramme).

Halbleiter sind den Isolatoren ähnlicher als den Metallen. Bei 0 Kelvin unterscheiden sie sich lediglich durch den Abstand zwischen dem vollbesetzten Valenz- und dem leeren Leitungsband (Gap-Energie).

2.2 Bändermodell

Das Bändermodell wird benutzt, um die Zustände der Elektronen im Festkörper zu beschreiben. In diesem Modell geht man davon aus, dass die Elektronen immer nur bestimmte Energiezustände innerhalb der Bänder annehmen können. Die Zwischenwerte sind verboten.

Die energetisch tiefer liegenden besetzten Bänder heißen Valenzbänder – sie tragen zur chemischen Bindung bei. Die energetisch höher liegenden Bänder sind die Leitungsbander.

In Analogie zum einzelnen Atom werden auch im Halbleiterkristall die energetisch tiefsten Zustände (Valenzbänder) zuerst mit Elektronen besetzt. Die darüberliegenden bleiben frei (Leitungsbander). Durch Zufuhr von Energie (z.B. Temperaturzufuhr, Lichteinfall) wird ein Elektron aus dem Valenzband in ein Leitungsband angehoben und kann sich dort durch den Kristall bewegen, wodurch elektrische Leitung entsteht.

2.3 Dotierung

Das gezielte einbringen von Störstellen bei der Züchtung von Halbleitern heißt Dotierung. Man dotiert um die Eigenschaften des Halbleiters zu verändern. Jedoch wird nur dann von Dotierung gesprochen, wenn die Zahl der Fremdatome (Störstellen) um Größenordnungen kleiner ist, als die der Wirtsgitteratome im Halbleiter.

Beim Einbringen von Donatoren als Störstelle, das sind z. B. Elemente der V. Hauptgruppe, welche ein Bindungselektron mehr besitzen als reines (intrinsisches) Germanium. Das fünfte Valenzelektron wird nicht zur Bindung benötigt und könnte sich deshalb frei durch den Halbleiter bewegen. Das freie Elektron geht keine Bindung mit einem Nachbaratom ein und benötigt deswegen eine relativ geringe Energie um vom

Halbleiter

Valenz- ins Leitungsband zu gelangen. Diese Art von Dotierung wird „n-Dotierung“ genannt.

Dotiert man einen Halbleiter mit einem Akzeptor, z.B. Elemente der III. Hauptgruppe, sind die Verhältnisse umgekehrt. Das fehlende zur Bindung benötigte Valenzelektron wird durch ein Loch „erschaffen“. Diese Dotierung wird „p-Dotierung“ genannt.

Zur Vervollständigung sei noch erwähnt, dass es noch isoelektronische Störstellen gibt, bei denen jedoch nur die optischen Eigenschaften von Interesse sind.

Dotierte Kristalle sind nicht zu verwechseln mit Mischkristallen. Die Mischkristalle bestehen aus Legierungen unterschiedlicher Halbleiter. Dabei liegen die Konzentrationen im Prozentbereich.

3 Versuche

Allgemein gilt: Bei Versuch 1 Eichung des IR-Sensors wurde zur Kontrolle eine zweite Eichung von uns durchgeführt ! Die im folgenden bezeichnete Eichung 2 entspricht der zweiten Messreihe.

3.1 Eichung des IR-Temperatursensors

Die Temperaturmessung sollte mit Hilfe eines IR-Temperatursensors von FLUKE, der für schwarze Emissionsflächen geeicht ist, durchgeführt werden. Da der Germanium-Kristall eine silberne Oberfläche besitzt, musste zuerst eine Temperatureichung durchgeführt werden.

Dazu wurde ein Multimeter an einen Hochlastwiderstand angeschlossen, welches die reale Temperatur des Widerstandes liefert. Ebenfalls wurde an den Hochlastwiderstand eine Stromversorgung angeschlossen. Der IR-Temperatursensor wurde an ein Multimeter angeschlossen, das Spannungen misst, welche vertretend für die Temperatur steht. Nun wurde der IR-Temperatursensor in thermischen Kontakt mit dem Widerstand gebracht. In 5 Schritten wurde der Strom hochgeregelt, bis eine Maximaltemperatur von 100°C erreicht war. Die Temperaturen wurden bei jedem Schritt an beiden Multimetern protokolliert.

Bei jeder Messung wurde darauf geachtet, dass sich das System im thermischen Gleichgewicht befand.

Zur Überprüfung wurde eine Vergleichsmessung der Werte durchgeführt. Aus den Messergebnissen und den dazugehörigen Eichkurven wurden folgende Gleichungen der Geraden ermittelt.

Gleichung für Eichkurve 1 (Abb. 1) : $T_{\text{real}}=0,996 \cdot T_{\text{IR}}+4,690$

Gleichung für Eichkurve 2 (Abb. 2) : $T_{\text{real}}=0,975 \cdot T_{\text{IR}}+2,365$

Beiden Gleichungen ist zu entnehmen, dass die Steigungen identisch sind, im Rahmen der Messgenauigkeit. Sie unterscheiden sich lediglich im Schnittpunkt mit der Y-Achse. Der Grund hierfür kann dadurch entstanden sein, dass der Widerstand nicht wieder

Halbleiter

genau seine Anfangstemperatur (Raumtemperatur) hatte. Auch resultiert die Abweichung durch Messungenauigkeiten.

Mittels Microsoft Excel ermittelte Eichkurven

Abb. 1

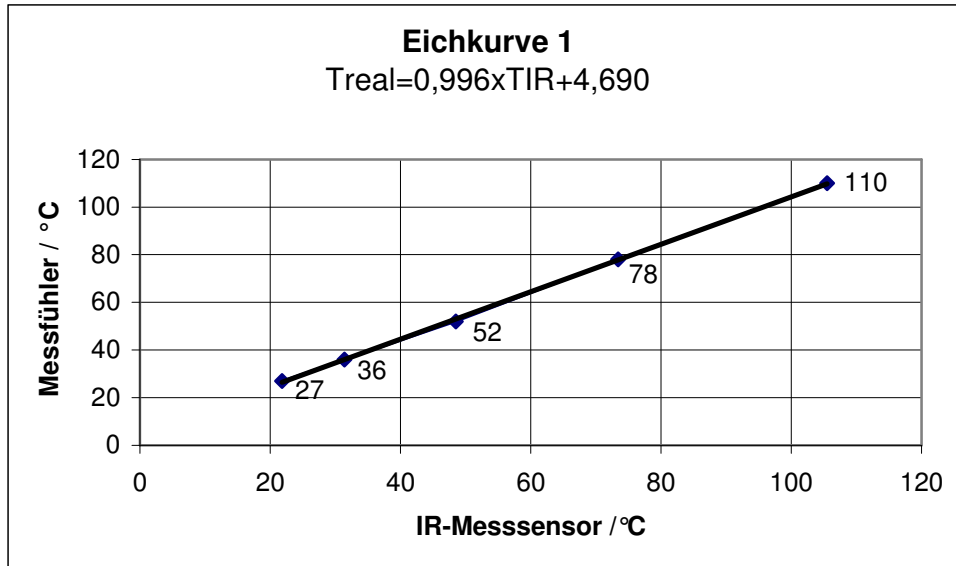
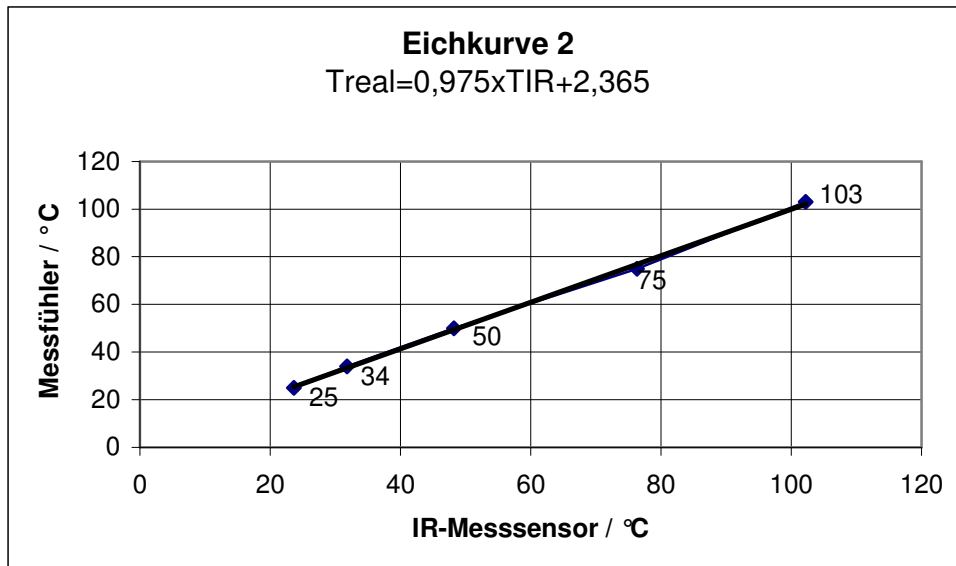


Abb. 2



3.2 Messung des Bandabstandes

3.2.1 Aufwärmvorgang

Im ersten Teil zur „Bestimmung des Bandabstandes“ wurde der Ge-Kristall durch die angelegte Heizspannung (0 – 6 Volt) in 10 Schritten auf ca. 120 °C erhitzt. Bei jedem Schritt wurde die am Kristall anliegende Spannung sowie der Stromfluss - gemessen mittels Multimetern - und die Temperatur - gemessen mittels IR-Sensor - notiert (siehe 5 Messwerte und Diagramme).

3.2.2 Abkühlvorgang

Nachdem 120 °C erreicht waren, wurde die Heizspannung nach 60 Sekunden ausgeschaltet. Während des Abkühlvorgangs wurden bei 22 Messungen wiederum Spannung, Strom und Temperatur notiert (siehe 5 Messwerte und Diagramme), bis der Ge-Kristall wieder nahezu Raumtemperatur hatte.

3.2.3 Berechnung des Bandabstandes (Gap-Energie E_g)

$$k_B = \text{Boltzmannkonstante} = 8,625 \cdot 10^{-5} \frac{eV}{K}$$

a = Steigung der Geraden

Um den Bandabstand zu berechnen muss die Formel $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E_g}{2 \cdot k_B \cdot T}}$ in folgende Geradengleichung $y = a \cdot x + b$ gebracht werden.

$$\text{Hierzu wird die Formel zuerst logarithmiert: } \ln \sigma = \frac{E_g}{2 \cdot k_B \cdot T} + \ln \sigma_0$$

$$\text{Hierbei ist } y = \ln \sigma, b = \ln \sigma_0, x = \frac{1}{T} \text{ und } a = -\frac{E_g}{2k_B}.$$

Mit der Tabellenkalkulation lassen sich die Messwerte einfach in die benötigte Form umrechnen, so dass sie später in obige Formeln eingesetzt werden können.

Mittels Excel kann erneut die Trendlinie und die Regressionsgleichung für die Messwerte bestimmt werden und die Geradengleichungen für die beiden Temperatur-Messreihen in der Form $y = a \cdot x + b$ aufstellen werden.

$$\text{Gleichung für Eichkurve 1 (Abb. 3): } y_1 = -5071,13 \cdot x + 17,86$$

$$\text{Gleichung für Eichkurve 2 (Abb. 4): } y_2 = -5068,80 \cdot x + 18,02$$

Halbleiter

Jetzt lässt sich durch Auflösen der Gleichung $a = -\frac{E_g}{2k_B}$ nach $E_g = -2 \cdot a \cdot k_B$ die Gap-Energie E_g berechnen.

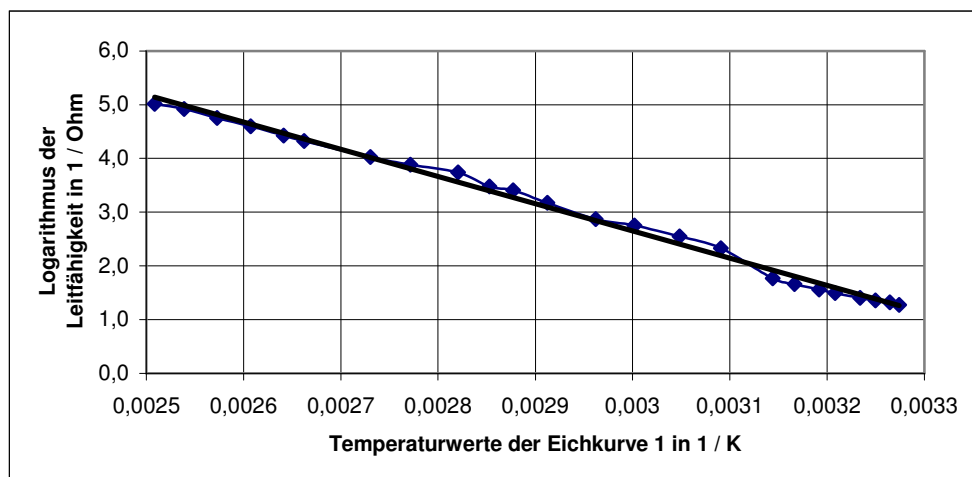
Gap-Energie für Eichkurve 1 : $E_{g1} = -2 \cdot (-5071,13) \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} = 0,8748 \text{ eV}$

Gap-Energie für Eichkurve 2 : $E_{g2} = -2 \cdot (-5068,80) \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} = 0,8743 \text{ eV}$

Im Vergleich mit der im Datenblatt von PHYWE SYSTEME GMBH angegebenen Gap-Energie $E_g = 0,67 \text{ eV}$, fallen beide errechneten Werte etwas zu hoch aus.

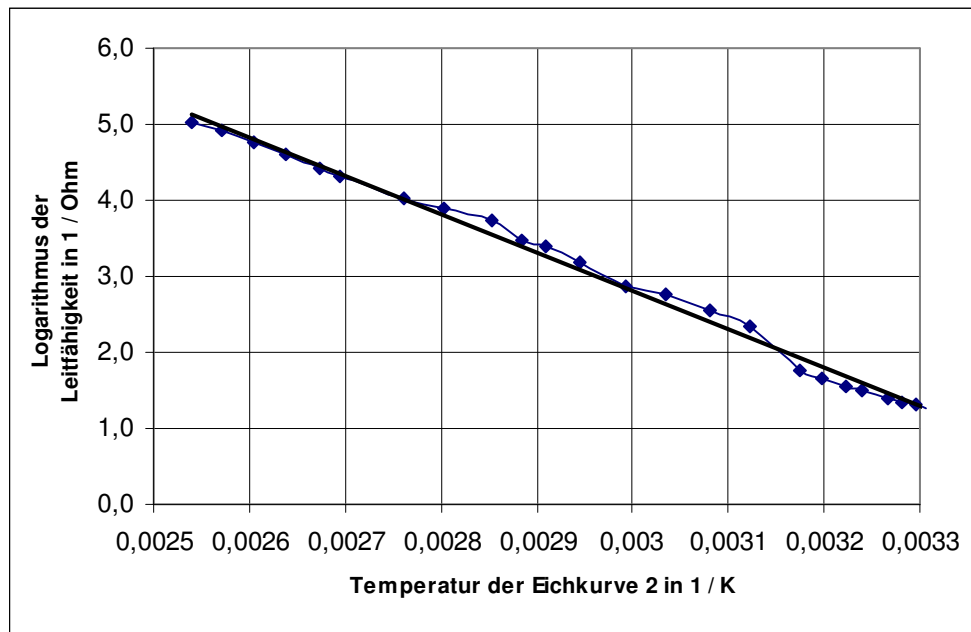
Gründe hierfür liegen in Messungenauigkeiten bedingt durch Toleranzen der Messinstrumente, in Ablesefehlern die dadurch entstehen, dass sich beim Abkühlvorgang im oberen Temperaturbereich die angezeigten Werte sehr schnell änderten, sowie Rundungsungenauigkeiten in den Tabellen. Dazu kam noch, dass wir gezwungen waren mitten in der Messreihe die Batterie am IR-Sensor zu wechseln.

Abb. 3



Halbleiter

Abb. 4



4 Hystereseeffekte

Durch die Aufnahme von thermischer Energie werden die Elektronen in das Leitungsband gehoben. Um nach dem Abkühlvorgang wieder in das Valenzband zu kommen benötigen die Elektronen etwas mehr Zeit und geben bei der Rückkehr ihre Lageenergie in Form von Wärme ab.

Dadurch entsteht bei dem Vorgang ein etwas höherer Leitwert als bei dem Aufwärmvorgang und somit eine Hystereseschleife.

Ein eindeutiger Hystereseeffekt kann den beiden nachfolgenden Diagrammen nicht entnommen werden, da die während des Aufwärmens aufgenommenen Kurven teilweise über und teilweise unter den Abkühlkurven liegen.

Halbleiter

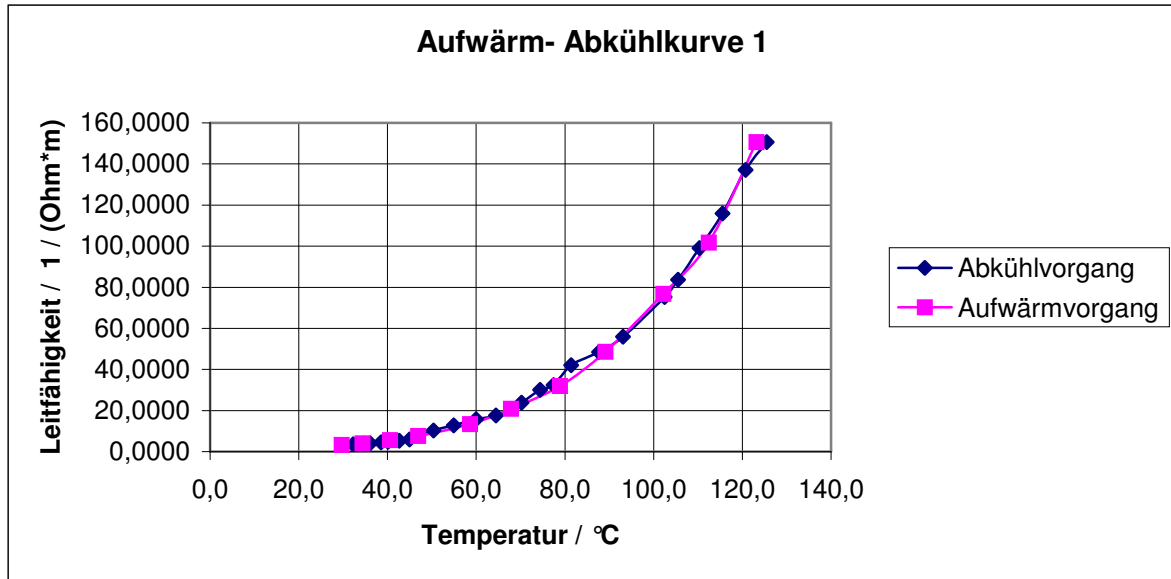


Abb.5

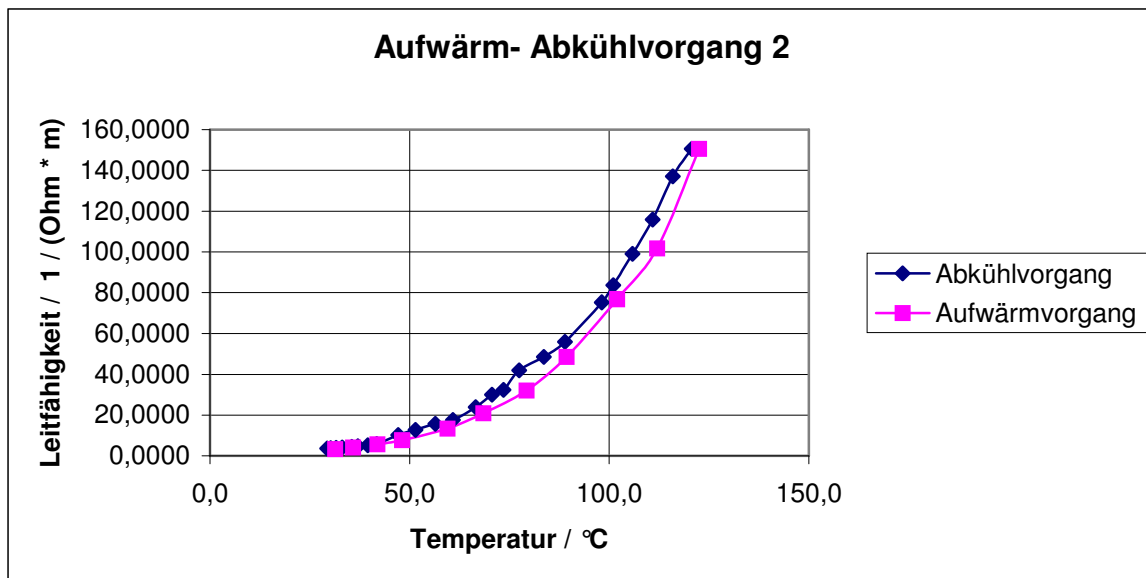
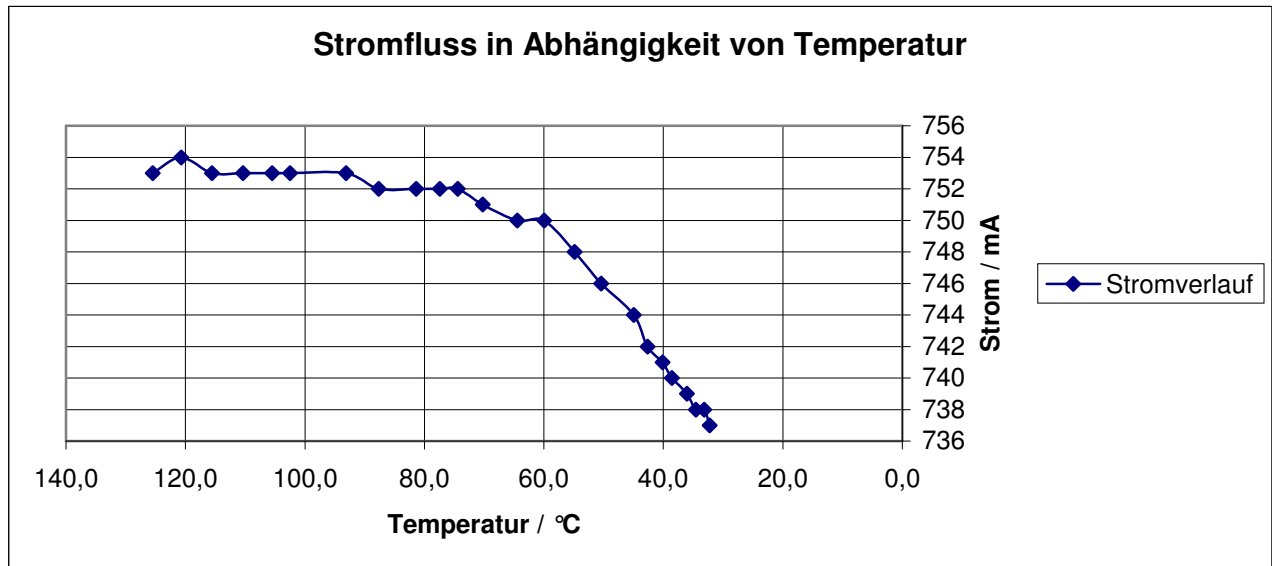


Abb.6

5 Messwerte und Diagramme

Zu 2.1



Zu 3.1

Eichung des IR-Sensors

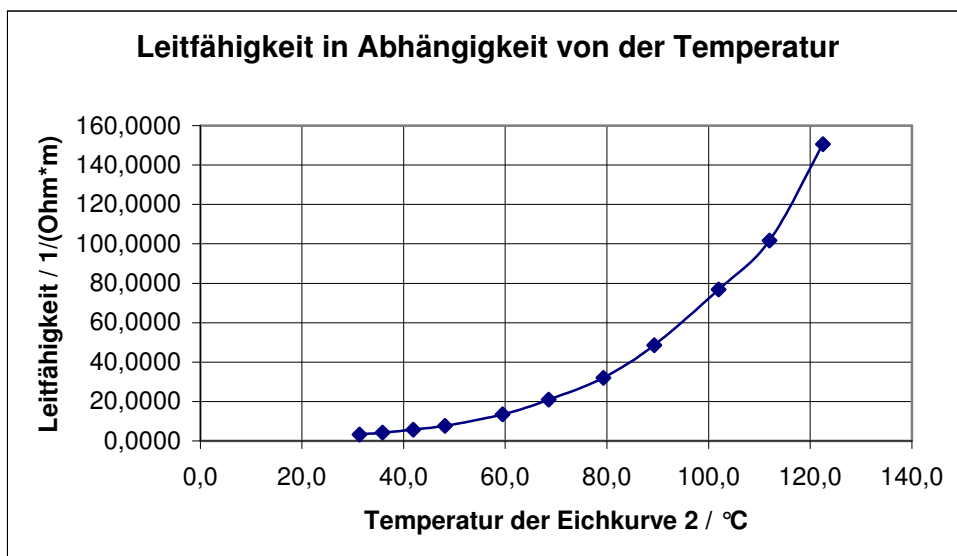
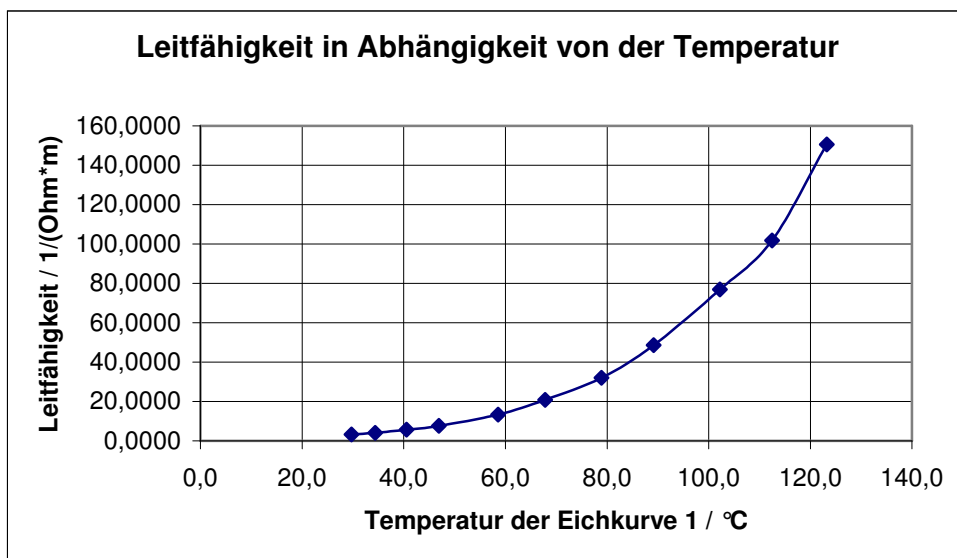
Tir1 / °C	Treal1 / °C	Tir2 / °C	Treal2 / °C
21,8	27	23,6	25
31,4	36	31,8	34
48,5	52	48,2	50
73,4	78	76,3	75
105,5	110	102,2	103

Zu 3.2.1

Uhalbl. / V	Iges / mA	Uheiz / V	Tmess / mV	Treal1 / °C	Treal2 / °C	Leitfähigkeit 1/(Ohm)
0,449	735	0	25,1	29,7	31,3	3,2739
0,359	739	1,4	29,8	34,4	35,9	4,1170
0,262	743	2,1	36,0	40,5	41,9	5,6718
0,195	746	2,5	42,4	46,9	48,1	7,6513
0,112	749	3,1	54,1	58,6	59,5	13,3750
0,072	751	3,5	63,4	67,8	68,5	20,8611
0,047	752	4,1	74,5	78,9	79,3	32,0000
0,031	753	4,6	84,8	89,2	89,3	48,5806
0,020	753	5,3	97,9	102,2	102,0	76,8367
0,015	753	5,5	108,2	112,5	112,0	101,7568
0,010	753	6	119,0	123,2	122,5	150,6000

Halbleiter

Treal1 / K	1/Treal1 / 1/K	Treal2 / K	1/Treal2 / 1/K	ln(Leitf.) / ln(1/Ohm)
302,8	0,00330208	304,5	0,00328448	1,18599479
307,5	0,00325181	309,0	0,00323597	1,41512271
313,7	0,00318780	315,0	0,00317413	1,73549872
320,1	0,00312431	321,3	0,00311272	2,03487322
331,7	0,00301456	332,6	0,00300640	2,59338729
341,0	0,00293267	341,7	0,00292693	3,03788671
352,0	0,00284057	352,4	0,00283741	3,46573590
362,3	0,00276014	362,4	0,00275910	3,88322520
375,3	0,00266419	375,2	0,00266554	4,34168284
385,6	0,00259331	385,2	0,00259632	4,62258523
396,4	0,00252293	395,6	0,00252750	5,01462732



Halbleiter

Zu 3.2.2

Uhalbl. / V	Iges / mA	Tmess / mV	Treal1 / °C	Treal2 / °C	Leitf / 1/(Om)
0,010	753	121,3	125,5	120,6	150,6000
0,011	754	116,5	120,7	116,0	137,0909
0,013	753	111,3	115,5	110,9	115,8462
0,015	753	106,1	110,4	105,8	99,0789
0,018	753	101,2	105,5	101,0	83,6667
0,020	753	98,2	102,5	98,1	75,3000
0,027	753	88,8	93,1	88,9	55,9851
0,031	752	83,3	87,7	83,6	48,5161
0,036	752	77,0	81,4	77,4	42,0112
0,047	752	73,0	77,4	73,5	32,3441
0,050	752	70,0	74,4	70,6	30,0800
0,063	751	65,8	70,2	66,5	23,8413
0,085	750	60,0	64,5	60,9	17,6471
0,096	750	55,5	60,0	56,5	15,6904
0,117	748	50,4	54,9	51,5	12,7536
0,145	746	45,9	50,4	47,1	10,2755
0,254	744	40,4	44,9	41,8	5,8583
0,282	742	38,1	42,6	39,5	5,2624
0,311	741	35,6	40,1	37,1	4,7653
0,333	740	34,0	38,6	35,5	4,4444
0,362	739	31,5	36,1	33,1	4,0829
0,381	738	30,0	34,6	31,6	3,8740
0,393	738	28,6	33,2	30,3	3,7557
0,413	737	27,7	32,3	29,4	3,5690

Treal1 / K	1/Treal1 / 1/K	Treal2 / K	1/Treal2 / 1/K	ln(Leitf) / ln(1/Om)
398,7	0,002508436	393,8	0,002539473	5,01462732
393,9	0,002538883	389,1	0,002570017	4,92064428
388,7	0,002572713	384,0	0,002603946	4,75226305
383,5	0,002607456	379,0	0,002638784	4,59591698
378,6	0,002641065	374,2	0,002672475	4,42684065
375,6	0,002662072	371,3	0,00269353	4,32148013
366,3	0,00273019	362,1	0,002761781	4,02508612
360,8	0,002771566	356,7	0,002803221	3,88189630
354,5	0,00282062	350,6	0,002852335	3,73793561
350,5	0,002852676	346,7	0,002884421	3,47643119
347,6	0,00287720	343,8	0,002908964	3,40386050
343,4	0,002912253	339,7	0,002944034	3,17141811
337,6	0,002962085	334,0	0,002993878	2,87056913
333,1	0,003001939	329,6	0,003033727	2,75304757
328,0	0,003048424	324,7	0,003080193	2,54581540
323,6	0,003090651	320,3	0,00312239	2,32976068
318,1	0,003143879	314,9	0,003175561	1,76785395
315,8	0,003166685	312,7	0,003198337	1,66058935
313,3	0,003191853	310,2	0,003223467	1,56135489
Treal1 / K	1/Treal1 / 1/K	Treal2 / K	1/Treal2 / 1/K	ln(Leitf) / ln(1/Om)

Halbleiter

311,7	0,003208172	308,7	0,003239758	1,49165488
309,2	0,003234006	306,2	0,003265546	1,40680089
307,7	0,003249708	304,8	0,003281217	1,35429163
306,3	0,00326450	303,4	0,003295979	1,32328139
305,4	0,003274081	302,5	0,003305539	1,27228748

6 Literatur

Vorlesungsskript Halbleiter und Elektronik 1 – Prof. Dr. F. Thuselt
Grundlagen der Halbleiter-Elektronik 1 – R. Müller
Datenblatt der Firma PHYWE