

# K124 Der Hall-Effekt in Halbleitern

Michael Günther, Sarah Aretz

17. März 2005

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Phänomenologie</b>	<b>2</b>
1.1	Phänomenologie . . . . .	2
1.1.1	Bändermodell . . . . .	2
1.1.2	Fermi-Statistik, Boltzmann-Verteilung . . . . .	3
1.1.3	Eigen-, Störleitung, effektive Masse . . . . .	4
1.1.4	Streumechanismen . . . . .	4
1.1.5	Temperaturverhalten der Ladungsträgerkonzentration . . . . .	5
1.1.6	Hall-Effekt . . . . .	6
1.1.7	Meßmethode nach van der Pauw . . . . .	7
1.1.8	Thermospannungen . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Versuchsaufbau und Durchführung</b>	<b>8</b>
2.1	Versuchsaufbau . . . . .	8
2.2	Widerstandsmessung . . . . .	9
2.3	Hall-Effekt-Messung . . . . .	10
2.3.1	Messung mit Nullfeld . . . . .	11
2.3.2	Messung ohne Nullfeld . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Versuchsauswertung</b>	<b>12</b>
3.1	Messung bei Raumtemperatur . . . . .	12
3.1.1	Gallium-Arsenid . . . . .	12
3.1.2	Germanium . . . . .	15
3.2	Temperaturabhängige Messung . . . . .	17
3.2.1	Leitfähigkeit . . . . .	19
3.2.2	Ladungsträgerkonzentration . . . . .	20
3.2.3	Beweglichkeit . . . . .	21
3.3	Schlußbemerkung . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Anhang</b>	<b>22</b>

# Kapitel 1

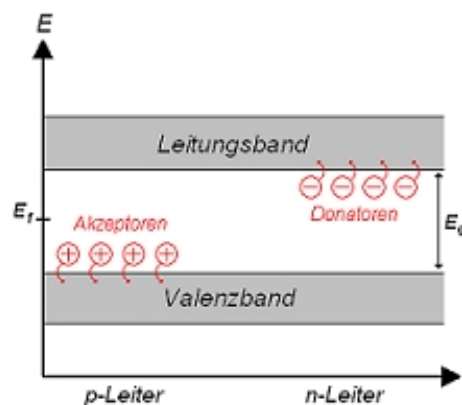
## Einleitung und Phänomenologie

Ziel des Versuches ist es, die Transporteigenschaften und deren Temperaturabhängigkeit der Halbleiter *Ge* und *GaAs* zu untersuchen. Dazu werden Leitfähigkeits- und Halleffekt-Messungen nach der van der Pauw Methode herangezogen.

### 1.1 Phänomenologie

#### 1.1.1 Bändermodell

Halbleiter konnten erst verwirklicht werden, seit es Herstellungsmethoden gibt die Reinheitsgrade von  $10^{-10}$ , d.h. 1 Fremdatom auf  $10^{10}$  Halbleiteratomen, gewährleisten. Anders als in Metallen sind in Halbleitern Leitungs- und Valenzband voneinander getrennt. Die Energie die nötig ist, um ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband zu bringen, nennt man Gap-Energie ( $E_g$ ). Zwischen ihnen liegt das Fermi-niveau mit der Energie  $E_f$ . Dies ist das höchste besetzte Energieniveau im Grundzustand eines Fermionensystems.



Die Leitfähigkeit reiner Halbleiter ist sehr gering und temperaturabhängig. Allerdings steigt sie um viele Größenordnungen, wenn man sie gezielt verunreinigt (dotiert). Dies kann auf zwei Arten geschehen:

**n-Leiter** Baut man in ein Kristallgitter, dessen Atome jeweils 4 Außenelektronen besitzen, Atome mit 5 Außenelektronen (Donatoren) ein, kann das überzählige Elektron leicht aus seiner Schale gelöst werden. Es entsteht ein n-Leiter (negativ). Die Energien dieser Elektronen liegen knapp unterhalb des Leitungsbandes.

**p-Leiter** Baut man jedoch Atome mit nur 3 Außenelektronen ein, entsteht ein Elektronenloch. Dieses verhält sich im Kristall wie eine positive Ladung. Die Energiezustände dieser Defektelektronen liegen knapp oberhalb des Valenzbandes und können aus diesem leicht ein Elektron abziehen (Akzeptor). Es entsteht ein Loch im Valenzband, das sich wie eine positive Ladung verhält.

### 1.1.2 Fermi-Statistik, Boltzmann-Verteilung

Die Besetzung der Energieniveaus ist gegeben durch die Fermi-Dirac-Verteilung. Hierbei unterscheidet man zwischen Elektronen im Leitungsband ( $W_n(E)_f$ ) und Löchern im Valenzband ( $W_p(E)_f$ ):

$$W_n(E)_f = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{k_B T}}}$$

$$W_p(E)_f = 1 - W_n(E)_f$$

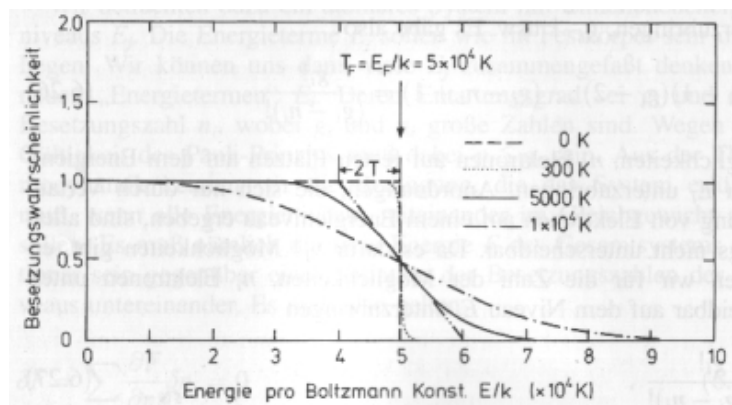
Dabei ist  $W(E)_f$  die Wahrscheinlichkeit, in einem freien Elektronengas der Temperatur  $T$  einen Zustand mit der Energie  $E$  zu besetzen. Für den Grenzfall  $E - E_F \gg k_B T$  erhält man die Boltzmann-Verteilung:

$$W(E)_b = e^{\frac{E-E_F}{k_B T}}$$

Die Zustandsdichte ist die Anzahl der Energiezustände pro Volumeneinheit und Energieintervall:  $D(E) = \frac{1}{V} \frac{dN}{dE}$ . Die Zustandsdichte im Grundzustand für  $T=0$  eines Fermi-Systems ist:

$$D_o(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{E}$$

Für  $T > 0$  ist die Zustandsdichte dann  $D(E, T) = W(E)_f \cdot D_o(E)$ . Die Besetzungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Energie sieht wie folgt aus:



1

<sup>1</sup>Quelle: A. Heldt, Diplomarbeit

### 1.1.3 Eigen-, Störleitung, effektive Masse

Die Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband beträgt z.B. bei Germanium ca. 1eV. Sie kann durch thermische Anregung oder Lichteinfall von Photonen überwunden werden. Diese Eigenleitung ist jedoch bei reinen Halbleitern gering, weswegen sie dotiert werden. Die eingebauten Fremdatome verändern den spezifischen Widerstand erheblich. Schon ein Zusatz von einem Fremdatom auf  $10^6$  Atomen kann die Leitfähigkeit um mehr als einen Faktor 100 erhöhen. Dies wird Störstellenleitung genannt.

Hierbei können Elektronen als freie Teilchen behandelt werden, wenn man ihnen eine geeignete effektive Masse  $m^*$  zuordnet. Dabei wird der Einfluß des periodischen Kristallgitters auf die Bewegung der Elektronen berücksichtigt also die Abhängigkeit der Elektronenenergie von der Wellenzahl (Dispersion).

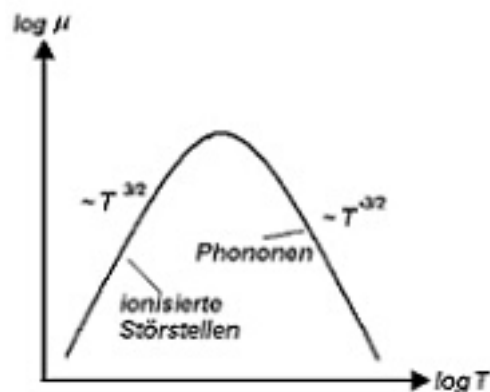
### 1.1.4 Streumechanismen

Der Hall-Streufaktor  $r$  setzt sich aus verschiedenen Streuprozessen zusammen, welche die Beweglichkeit der Elektronen beeinflussen.

**Störstellenstreuung** Dies bezeichnet die Streuung an eingebauten (ionisierten) Fremdatomen. Auch Fehlstellen und Anisotropie an manchen Stellen führen zu unerwünschten Streuungen.

**Thermische Gitterstreuung** Um so höher die Temperatur ist, um so stärker schwingen die Gitteratome im Kristallverband. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit eines Stoßes eines Elektrons an Phononen (thermische Vibrationen). Dabei charakterisiert die mittlere Relaxationszeit  $\tau$  die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Stößen. Bei starken Magnetfeldern durchläuft ein Elektron mindestens eine Kreisbahn bevor es gestreut wird.

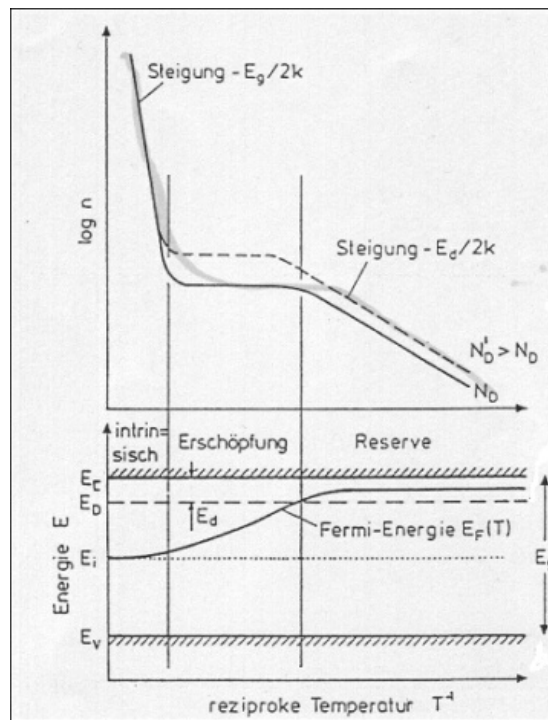
Die verschiedenen Streumechanismen sind temperaturabhängig. Bei kleinen Temperaturen überwiegt die Streuung an ionisierten Störstellen mit der Beweglichkeit  $\mu_{st} \propto T^{3/2}$ . Für höhere Temperaturen dominiert die Phononenstreuung mit  $\mu_{ph} \propto T^{-3/2}$ .



Hieran erkennt man, daß für eine bestimmte Temperatur die Beweglichkeit ein Maximum erreicht.

### 1.1.5 Temperaturverhalten der Ladungsträgerkonzentration

Bei einem Halbleiter kann ein Elektron durch thermische Energie ins Leitungsband gelangen. Daher ist die Ladungsträgerkonzentration streng temperaturabhängig.



2

Hierbei unterscheidet man drei Temperaturbereiche:

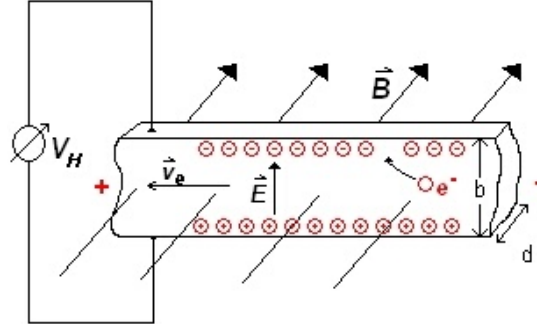
- Im Störstellenreservebereich besitzen noch viele Donatoren ihr Valenzelektron und sind nicht ionisiert. Dies ändert sich jedoch mit steigender Temperatur.
- Im Sättigungsbereich sind alle Valenzelektronen ins Leitungsband gelangt und damit alle Donatoren ionisiert.
- Bei hohen Temperaturen verhalten sich dotierte Halbleiter wie undotierte. Jetzt haben auch die fester gebundenen Elektronen genug Energie, um ins Leitungsband zu gelangen. In diesem intrinsischen Bereich steigt die Ladungsträgerkonzentration sehr stark mit der Temperatur an.

Die Übergangstemperatur der ersten beiden Bereiche hängt hauptsächlich von der Lage des Dotierungsniveaus ab, während der Übergang zum intrinsischen Bereich durch die Gap-Energie bestimmt wird.

<sup>2</sup>Quelle: A. Heldt, Diplomarbeit

### 1.1.6 Hall-Effekt

Der Hall-Effekt tritt auf, wenn man an eine stromdurchflossene Probe ein Magnetfeld senkrecht zur Ebene der Probe anlegt.



Die Elektronen (oder Löcher) werden durch die Lorentzkraft  $F_L = eBv$  zu den Rändern abgelenkt und erzeugen ein elektrisches Querfeld, welches entgegengesetzt zur Lorentzkraft wirkt. Hierbei ist  $v$  die Driftgeschwindigkeit. Das elektrische Feld bleibt konstant, wenn beide Kräfte betragsgleich sind.

$$evB = -eE$$

Die Potentialdifferenz an den Rändern ist die sogenannte Hall-Spannung,  $V_H = -Eb$ , und direkt proportional zum Magnetfeld  $B$  und zur Stromdichte  $j$ .

$$-E = R_H \cdot j \cdot B$$

Dabei ist  $R_H$  der Proportionalitätsfaktor und heißt Hall-Konstante. Mit der Stromdichte  $j = env$  ( $n$  ist die Ladungsträgerkonzentration der Elektronen) folgt dann:

$$R_H = \frac{E}{jB} = -\frac{v}{j} = -\frac{1}{en}$$

Das Vorzeichen der Hall-Konstante gibt dabei Aufschluß darüber, welche Ladungsträger dominieren und damit um welchen Halbleitertyp es sich handelt.

Dies gilt jedoch nur für eine ideale Probe. Bei einer realen Probe muß man den oben erwähnten Hall-Streufaktor  $r$  berücksichtigen, welcher von dem jeweilig vorherrschenden Streuprozess abhängt. Aufgrund der thermischen Geschwindigkeitsverteilung besitzen schnellere Elektronen größere Driftbeweglichkeiten, da die Streuwahrscheinlichkeit abnimmt.

$$R_H = -\frac{r}{en}$$

Da die Leitungs- und Valenzbandstruktur sehr unterschiedlich sind, unterscheiden sich auch die beiden Korrekturfaktoren für n- und p-Halbleiter.

Mit der Hallspannung  $V_H$  und der Stromdichte  $j = \frac{I}{bd}$  folgt für die Hall-Konstante:

$$R_H = \frac{E}{jB} = \frac{d \cdot V_H}{B \cdot I}$$

Sie hat die Dimension einer reziproken Raumladungsdichte und kann direkt über die Hall-Spannung  $V_H$ , die Probendicke  $d$ , den Strom  $I$  und das Magnetfeld  $B$  gemessen werden.

Weiterhin gilt für die mittlere Driftgeschwindigkeit  $v = \mu \cdot E$  mit  $\mu$  als Ladungsträgerbeweglichkeit. Mit Hilfe des spezifischen Widerstandes  $\rho$  erhält man die Leitfähigkeit  $\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{j}{E}$ .

Die Beweglichkeit wird unterschieden in Driftbeweglichkeit

$$\mu = \pm \frac{R_H \cdot \sigma}{r}$$

und Hall-Beweglichkeit

$$\mu_H \equiv |R_H \cdot \sigma|$$

Die Driftbeweglichkeit berücksichtigt die Streuung der Elektronen und ist damit immer kleiner als die Hall-Beweglichkeit.

### 1.1.7 Meßmethode nach van der Pauw

Mit Hilfe des van der Pauw-Theorems läßt sich die Hall-Konstante und der spezifische Widerstand für eine beliebig umrandete Probe bestimmen. Dabei werden jedoch folgende Voraussetzungen gemacht: Sie muß eine flache Scheibenform ohne Löcher besitzen mit einer homogenen Dicke und sie sollte lateral homogen dotiert sein. Zusätzlich müssen die Kontakte am Rand der Probe angebracht und hinreichend klein sein. Die genaue Durchführung dieser Meßmethode ist näher im Versuchsaufbau beschrieben.

### 1.1.8 Thermospannungen

#### Ettinghausen-Effekt

Durch den Hall-Effekt entsteht ein Temperaturgradient in Richtung der Potentialdifferenz. Diese Ettinghausen-Spannung bewirkt eine Verschiebung der Ladungsträger und führt damit ebenfalls zu einer der Hall-Spannung gleichgerichteten Potentialdifferenz.

#### Nernst-Effekt

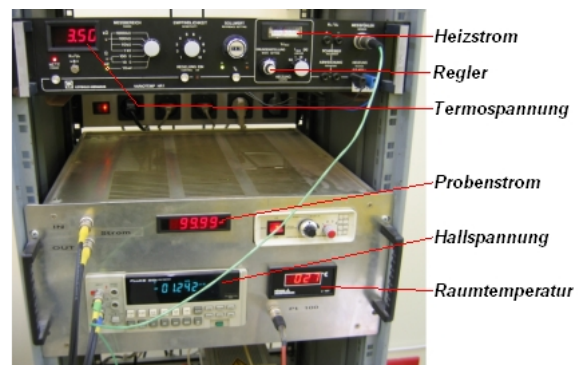
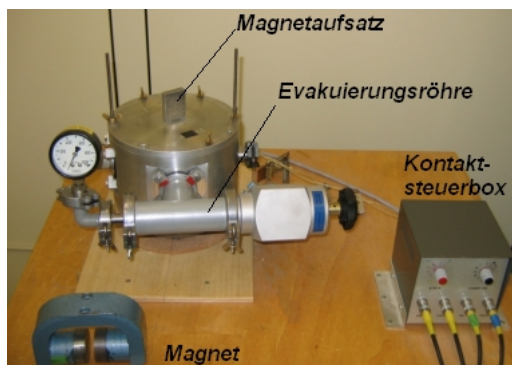
Die Nernst-Spannung kommt durch einen Temperaturgradienten über der Probe zustande und bewirkt ebenfalls eine Verschiebung der Ladungsträger. Sie ist abhängig von der Richtung des Magnetfeldes aber unabhängig von der Stromrichtung.



## Kapitel 2

# Versuchsaufbau und Durchführung

### 2.1 Versuchsaufbau



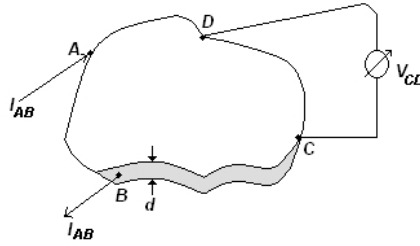
Die zu vermessenden Ge- und GaAs-Platinen werden in eine Vakuumkammer gesetzt, worin die Kontakte für die verschiedenen Schalterstellungen angebracht sind. Ein Permanentmagnet kann von außen separat angebracht und über die Probe gestülpt werden. Dadurch kann man die Richtung des Magnetfeldes beeinflussen und eine Nullfeldmessung durchführen. Der Strom wird durch eine Konstantstromquelle geliefert und die ganze Messung über nicht verändert. Die weiter unten aufgeführten Schalterstellungen können über zwei Drehregler eingestellt werden. Die Raumtemperatur, die gemessenen Spannungen sowie die Temperatur der Probe im zweiten Versuchsteil können ebenfalls an der Apparatur abgelesen werden.

## 2.2 Widerstandsmessung

Die Widerstandsmessung dient dazu, den spezifischen Widerstand und damit auch die Leitfähigkeit des Halbleiters zu ermitteln. Dabei gilt für die zu messenden Widerstände:

$$R_{AB,CD} = \frac{|V_{CD}|}{I_{AB}}$$

Folgende Zeichnung verdeutlicht die Anordnung zur Widerstandsmessung:



Hierbei werden alle Konfigurationen an Kontaktpaaren gemessen. Dabei wird jede Spannungsmessung für beide Stromrichtungen durchgeführt, über die dann gemittelt wird. Dadurch ist es möglich, eventuelle thermische oder Kontaktspannungen zu eliminieren. Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die verwendete Kontaktkonfiguration:

Mess. Nr.	Strom	Spannung	Stromschalter	Spannungsschalter
1	1-2	V1: 3-4	1	1
2	2-1	V2: 3-4	2	1
3	2-3	V3: 4-1	3	2
4	3-2	V4: 4-1	4	2
5	3-4	V5: 1-2	5	3
6	4-3	V6: 1-2	6	3
7	4-1	V7: 2-3	7	4
8	1-4	V8: 2-3	8	4

Kontaktkonfiguration: Widerstandsmessung

Durch Mittelwertbildung erhält man so bei konstantem Strom vier verschiedene Widerstände, z.B.

$$R_{AB,CD} = \frac{|V1 - V2|}{2I}$$

Für den spezifischen Widerstand des Halbleiters folgt dann nach van der Pauw:

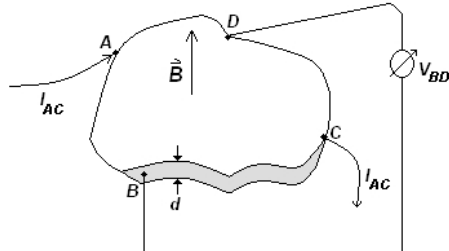
$$\rho_1 = \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot \frac{R_{AB,CD} + R_{BC,DA}}{2} \cdot f \left( \frac{R_{AB,CD}}{R_{BC,DA}} \right)$$

Der Korrekturfaktor  $f$  berücksichtigt Asymmetrien der Probenform und Kontakthanordnungen und kann einer Graphik entnommen werden. Er hängt nur vom Widerstandsverhältnis ab.

Aus den Messungen fünf bis acht lässt sich  $\rho_2$  berechnen. Durch diese Fehlerminimierung ergibt sich der spezifische Widerstand erneut durch Mittelwertbildung, aus welchem dann die Leitfähigkeit durch Kehrwertbildung ermittelt werden kann.

## 2.3 Hall-Effekt-Messung

Bei der Messung der Hall-Konstanten  $R_H$  wird nun über kreuz gemessen, wie folgende Graphik veranschaulicht.



Hier unterscheidet man zwei verschiedene Meßmethoden mit folgender Kontaktkonfiguration:

Mess. Nr.	B-Feldrichtung	Strom	Spannung	Stromschalter	Spannungsschalter
1	+B	2-4	V1: 1-3	9	5
2	+B	4-2	V2: 1-3	10	5
3	+B	1-3	V3: 4-2	11	8
4	+B	3-1	V4: 4-2	12	8
5	-B	2-4	V5: 1-3	9	5
6	-B	4-2	V6: 1-3	10	5
7	-B	1-3	V7: 4-2	11	8
8	-B	3-1	V8: 4-2	12	8
9	0	2-4	V9: 1-3	9	5
10	0	4-2	V10: 1-3	10	5

Kontaktkonfiguration: Hall-Effekt-Messung

### 2.3.1 Messung mit Nullfeld

Da die Kontakte von z.B.  $B$  und  $D$  aufgrund der Probenform normalerweise nicht auf derselben Äquipotentialfläche liegen, kann man auch ohne angelegtes Magnetfeld eine Spannung zwischen ihnen messen. Dieses wird als Nullfeld bezeichnet. Wird nun ein Magnetfeld angelegt, ändert sich diese Potentialdifferenz um z.B.

$$\Delta V_A = V(+I, +B) - V(+I, 0) \equiv V1 - V9$$

Für ein Spannungskontaktpaar ergeben sich damit vier Potentialdifferenzen, die im Idealfall vom Betrag her gleich sein sollten. Wenn man jetzt für jeweils eine Magnetfeldrichtung über die Stromrichtungen mittelt, erhält man zwei Werte für die Hall-Spannung:

$$V_{H+} = \frac{\Delta V_A - \Delta V_B}{2}$$

$$V_{H-} = \frac{\Delta V_C - \Delta V_D}{2}$$

Daraus läßt sich dann die Hall-Konstante berechnen:

$$R_{H\pm} = \frac{d(\pm V_{H\pm})}{B_{\pm} \cdot I}$$

Durch den Vergleich der beiden Werte läßt sich die Abhängigkeit des Betrags der Hall-Konstanten von der Magnetfeldrichtung untersuchen.

### 2.3.2 Messung ohne Nullfeld

Durch eine geeignete Mittelwertbildung ist eine Nullfeldmessung nicht nötig. Wenn man zuerst über die Stromrichtungen mittelt und dann die verschiedenen Magnetfeldrichtungen für ein Spannungskontaktpaar berücksichtigt, erhält man:

$$R_H = \frac{d}{BI} \cdot \frac{[V(+I, +B) - V(-I, +B)] - [V(+I, -B) - V(-I, -B)]}{4}$$

Durch den Mittelwert über beide Spannungskontaktpaare ergibt sich schließlich der tatsächliche Wert für die Hall-Konstante.

Mit Hilfe von  $R_H$  läßt sich die Ladungsträgerkonzentration ermitteln:

$$n = -\frac{1}{eR_H}$$

Und zusammen mit der Leitfähigkeit erhält man die Beweglichkeit:

$$\mu = |R_H \cdot \sigma|$$

Jedoch ist bei beiden Messungen die Ettinghausen-Spannung nicht eliminierbar und geht als systematischer Fehler in die Hall-Konstante mit ein.

## Kapitel 3

# Versuchsauswertung

### 3.1 Messung bei Raumtemperatur

Im ersten Versuchsteil werden beide Halbleiterproben (Ge, GaAs) bei Raumtemperatur untersucht. Für jeden Halbleiter werden dabei die Widerstands- und Halleffekt-Messung in fünf Meßreihen aufgenommen, aus denen dann der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt wird. Die Konstantstromquelle liefert einen Strom von  $I = (100 \pm 0,01) \mu A$  bzw. im zweiten Teil  $I = (100 \pm 0,02) \mu A$  und der Permanentmagnet ein Magnetfeld von  $B = (0,138 \pm 0,001) T$ . Dabei hatten wir eine Raumtemperatur von  $27^\circ C$  mit einem Grad Abweichung. Für die abgelesene Spannung nehmen wir einen Fehler von  $\Delta V = 0,005 mV$  an.

#### 3.1.1 Gallium-Arsenid

Mess. Nr.	Messung1 [mV]	Messung2[mV]	Messung3[mV]
1	-82,391	-82,442	-82,466
2	82,398	82,443	82,466
3	-153,096	-153,163	-153,201
4	153,1	153,165	153,202
5	-82,435	-82,466	-82,487
6	82,423	82,454	82,475
7	-153,045	-153,093	-153,128
8	153,034	153,079	153,113
Messung4[mV]	Messung5[mV]	Mittelwert[mV]	Standardabweichung[mV]
-82,486	-82,503	-82,458	0,044
82,485	82,503	82,459	0,041
-153,231	-153,263	-153,191	0,065
153,233	153,268	153,194	0,065
-82,505	-82,524	-82,483	0,035
82,403	82,511	82,453	0,043
-153,156	-153,186	-153,122	0,055
153,140	153,170	153,107	0,053

Widerstandsmessung: GaAs

Mess. Nr.	Messung1 [mV]	Messung2[mV]	Messung3[mV]
1	70,091	70,107	70,125
2	-70,123	-70,144	-70,161
3	-71,344	-71,362	-71,377
4	71,349	71,368	71,381
5	71,338	71,355	71,368
6	-71,372	-71,389	-71,34
7	-70,111	-70,128	-70,141
8	70,112	70,131	70,144
9	70,722	70,739	70,751
10	-70,759	-70,773	-70,786
Messung4[mV]	Messung5[mV]	Mittelwert[mV]	Standardabweichung[mV]
70,135	70,140	70,120	0,020
-70,168	-70,173	-70,154	0,020
-71,385	-71,390	-71,372	0,019
71,390	71,394	71,376	0,018
71,376	71,380	71,363	0,017
-71,409	-71,415	-71,385	0,030
-70,149	-70,155	-70,137	0,018
70,151	70,159	70,139	0,018
70,759	70,765	70,747	0,017
-70,792	-70,797	-70,781	0,015

Hall-Effekt-Messung: GaAs

Aus der Widerstandsmessung erhält man zunächst folgende Werte für die Widerstände:

	$R[\Omega]$	$\Delta R[\Omega]$
$R_{12,34}$	824,6	0,1
$R_{23,41}$	1531,9	0,2
$R_{34,12}$	824,7	0,1
$R_{41,23}$	1531,1	0,2

Daraus ergeben sich für die spezifischen Widerstände  $\rho_1^s$  und  $\rho_2^s$  mit den Korrekturfaktoren  $f_1 = 0,96$  und  $f_2 = 0,96$ :

$$\rho_1^s = (5127 \pm 107)\Omega; \quad \rho_2^s = (5125 \pm 107)\Omega$$

Damit gilt für den gemittelten spezifischen Widerstand und die Leitfähigkeit:

$$\rho^s = (5126 \pm 76)\Omega$$

$$\sigma^s = (1,95 \pm 0,03) * 10^{-4} \frac{1}{\Omega}$$

Dabei sind die mit  $s$  gekennzeichneten Größen auf die unbekannte Schichtdicke  $d$  der Probe normiert.

Der Korrekturfaktor  $f$  hat aufgrund des Graphen einen Fehler von  $\Delta f = 0,02$ .

Aus der Halleffekt-Messung erhält man mit Nullfeld folgende Hall-Konstanten, Ladungsträgerkonzentrationen und Beweglichkeiten:

$R_{H+}^s = (-45, 435 \pm 0, 490) \frac{m^2}{C}$
$R_{H-}^s = (-44, 203 \pm 0, 484) \frac{m^2}{C}$
$n_+^s = (1, 37 \pm 0, 01) * 10^{17} \frac{1}{m^2}$
$n_-^s = (1, 41 \pm 0, 02) * 10^{17} \frac{1}{m^2}$
$\mu_+^s = (8, 86 \pm 0, 17) * 10^{-3} \frac{m^2}{Vs}$
$\mu_-^s = (8, 62 \pm 0, 16) * 10^{-3} \frac{m^2}{Vs}$

Ohne Nullfeld erhält man folgende Werte:

$R_{H1}^s = (-44, 819 \pm 0, 372) \frac{m^2}{C}$
$R_{H2}^s = (-44, 783 \pm 0, 372) \frac{m^2}{C}$
$R_H^s = (-44, 801 \pm 0, 263) \frac{m^2}{C}$
$n^s = (1, 39 \pm 0, 01) * 10^{17} \frac{1}{m^2}$
$\mu^s = (8, 74 \pm 0, 14) * 10^{-3} \frac{m^2}{Vs}$

Hierbei wurden die Fehler nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung wie folgt berechnet:

$$\Delta R_{12,34} = \sqrt{2 \left( \frac{\Delta V}{2I} \right)^2 + \left( \frac{|V1 - V2|}{2I^2} \Delta I \right)^2}$$

$$\Delta \rho_{1s} = \sqrt{\left( \frac{\pi f}{2 \ln 2} \right)^2 (\Delta R_{12,34}^2 + \Delta R_{23,41}^2) + \left( \frac{\pi}{\ln 2} \frac{R_{12,34} + R_{23,41}}{2} \Delta f \right)^2}$$

$$\Delta \rho^s = \sqrt{\left( \frac{\Delta \rho_1^s}{2} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \rho_2^s}{2} \right)^2}; \quad \Delta \sigma^s = \frac{\Delta \rho^s}{(\rho^s)^2}$$

$$\Delta R_{H\pm}^s = \sqrt{\left( \frac{\Delta V}{BI} \right)^2 + \left( \frac{V_{H\pm}}{B^2 I} \Delta B \right)^2 + \left( \frac{V_{H\pm}}{BI^2} \Delta I \right)^2}$$

$$\Delta R_{H1,2}^s = \sqrt{4 \left( \frac{\Delta V}{4BI} \right)^2 + \left( \frac{R_{H1,2}^s}{B} \Delta B \right)^2 + \left( \frac{R_{H1,2}^s}{I} \Delta I \right)^2}$$

$$\Delta R_H^s = \sqrt{\left( \frac{\Delta R_{H1}^s}{2} \right)^2 + \left( \frac{\Delta R_{H2}^s}{2} \right)^2}$$

$$\Delta n_{(\pm)}^s = \frac{\Delta R_{H(\pm)}^s}{e(R_{H(\pm)}^s)^2}$$

$$\Delta \mu_{(\pm)}^s = \sqrt{(R_{H(\pm)}^s \cdot \Delta \sigma)^2 + (\sigma \cdot \Delta R_{H(\pm)}^s)^2}$$

Am Vorzeichen der Hall-Konstante erkennt man, daß GaAs negativ dotiert ist. Die Meßergebnisse mit und ohne Nullfeld stimmen ganz gut überein. Dabei liegen die Ergebnisse der Messung ohne Nullfeld immer zwischen den beiden ermittelten Werten der Nullfeldmessung.

### 3.1.2 Germanium

Mess. Nr.	Messung1 [mV]	Messung2[mV]	Messung3[mV]
1	-0,102	-0,102	-0,102
2	0,101	0,101	0,101
3	-0,752	-0,753	-0,753
4	0,751	0,752	0,752
5	-0,101	-0,101	-0,101
6	0,101	0,101	0,101
7	-0,727	-0,727	-0,727
8	0,725	0,726	0,727
Messung4[mV]	Messung5[mV]	Mittelwert[mV]	Standardabweichung[mV]
-0,102	-0,102	-0,102	0
0,101	0,101	0,101	0
-0,752	-0,753	-0,753	0,001
0,752	0,752	0,752	0
-0,101	-0,101	-0,101	0
0,101	0,101	0,101	0
-0,727	-0,727	-0,727	0
0,727	0,726	0,726	0,001

Widerstandsmessung: Ge

Mess. Nr.	Messung1 [mV]	Messung2[mV]	Messung3[mV]
1	2,369	2,368	2,372
2	-2,369	-2,371	-2,374
3	-2,388	-2,389	-2,392
4	2,387	2,389	2,392
5	2,358	2,388	2,391
6	-2,372	-2,389	-2,392
7	-2,356	-2,371	-2,375
8	2,355	2,370	2,373
9	2,350	2,374	2,377
10	-2,354	-2,375	-2,379
Messung4[mV]	Messung5[mV]	Mittelwert[mV]	Standardabweichung[mV]
2,374	2,375	2,369	0,001
-2,376	-2,377	-2,370	0,001
-2,393	-2,395	-2,389	0,001
2,393	2,394	2,388	0,001
2,393	2,394	2,373	0,021
-2,394	-2,395	-2,381	0,012
-2,376	-2,378	-2,364	0,011
2,375	2,377	2,363	0,011
2,378	2,308	2,362	0,017
-2,380	-2,382	-2,365	0,015

Hall-Effekt-Messung: Ge



Hierbei wurden nur die ersten beiden Meßreihen zur Mittelwertbildung und Standardabweichung herangezogen, da die Spannungen kontinuierlich anstiegen. Dabei gab es nachher keinen Unterschied mehr zwischen den Spannungen mit und ohne Magnetfeld.

Aus der Widerstandsmessung erhält man zunächst folgende Werte für die Widerstände:

	$R[\Omega]$	$\Delta R[\Omega]$
$R_{12,34}$	1,015	0,035
$R_{23,41}$	7,525	0,035
$R_{34,12}$	1,010	0,035
$R_{41,23}$	7,265	0,035

Daraus ergeben sich für die spezifischen Widerstände  $\rho_1^s$  und  $\rho_2^s$  mit den Korrekturfaktoren  $f_1 = 0,73$  und  $f_2 = 0,74$ :

$$\rho_1^s = (14,128 \pm 0,404)\Omega; \quad \rho_2^s = (13,877 \pm 0,393)\Omega$$

Damit gilt für den gemittelten spezifischen Widerstand und die Leitfähigkeit:

$$\rho^s = (14,003 \pm 0,282)\Omega$$

$$\sigma^s = (0,071 \pm 0,001) * 10^{-4} \frac{1}{\Omega}$$

Aus der Halleffekt-Messung erhält man mit Nullfeld folgende Hall-Konstanten, Ladungsträgerkonzentrationen und Beweglichkeiten:

$R_{H+}^s = (-0,435 \pm 0,362) \frac{m^2}{C}$
$R_{H-}^s = (-0,978 \pm 0,362) \frac{m^2}{C}$
$n_+^s = (14,35 \pm 11,94) * 10^{18} \frac{1}{m^2}$
$n_-^s = (6,38 \pm 2,36) * 10^{18} \frac{1}{m^2}$
$\mu_+^s = (0,031 \pm 0,026) \frac{m^2}{Vs}$
$\mu_-^s = (0,069 \pm 0,026) \frac{m^2}{Vs}$

Ohne Nullfeld erhält man folgende Werte:

$R_{H1}^s = (-0,272 \pm 0,181) \frac{m^2}{C}$
$R_{H2}^s = (-0,906 \pm 0,181) \frac{m^2}{C}$
$R_H^s = (-0,589 \pm 0,128) \frac{m^2}{C}$
$n^s = (10,60 \pm 2,30) * 10^{18} \frac{1}{m^2}$
$\mu^s = (0,042 \pm 0,009) \frac{m^2}{Vs}$

Auch Germanium scheint aufgrund des Vorzeichens der Hall-Konstanten n-dotiert zu sein. Germanium hat einen niedrigeren spezifischen Widerstand und damit eine höhere Leitfähigkeit sowie eine größere Ladungsträgerkonzentration und Beweglichkeit als GaAs. Eigentlich hätten wir vermutet, daß GaAs eine höhere Beweglichkeit besitzt. Vielleicht wurde dieser Halbleiter zusätzlich mit einem anderen Material dotiert.

Bei dieser Probe schwanken die Meßwerte sehr stark. Aber auch hier sieht man, daß die Ergebnisse ohne Nullfeld wieder jeweils zwischen den beiden Werten der Messung mit Nullfeld liegen. Deswegen wird diese Methode zur Bestimmung der temperaturabhängigen Transporteigenschaften im zweiten Teil verwendet.

## 3.2 Temperaturabhängige Messung

Für die temperaturabhängige Messung wurde Germanium gewählt. Um möglichst tiefe Temperaturen zu erreichen, wurde ersteinmal mit Hilfe der Vakuumpumpe die Luft aus dem Kryostaten gepumpt und die Halbleiterprobe mit flüssigem Stickstoff vier Stunden lang gekühlt. Dennoch haben wir leider nur eine Temperatur von  $-110^{\circ}\text{C}$  erreicht. Wahrscheinlich hat die Vakuumpumpe oder die Kühlung nicht hundertprozentig funktioniert.

Wir haben zwölf Meßreihen in einem Temperaturbereich von 163K - 290K aufgenommen. Dabei wurde die Probe kontinuierlich mit einem Heizdraht erwärmt. Aufgrund Zeitmangels wurden nur für die ersten drei Temperaturen jeweils drei Meßreihen aufgenommen und Mittelwert und Standardabweichung bestimmt. Danach haben wir nur noch jeweils eine Meßreihe aufgenommen. Die Auswertung wird genauso wie im ersten Teil durchgeführt. Die Meßwerte mit den jeweiligen Ergebnissen sind im Anhang aufgelistet. Die gemessenen Thermospannungen können dabei anhand einer Tabelle in absolute Temperaturen umgerechnet werden.

### Umrechnung der Thermospannung

Um eine bessere Zuordnung der Thermospannungswerte aus der EMK-Tabelle zu erhalten, wurde der relevante Bereich geplottet und die Werte mit einer polynomischen Funktion 2. Ordnung angenähert.

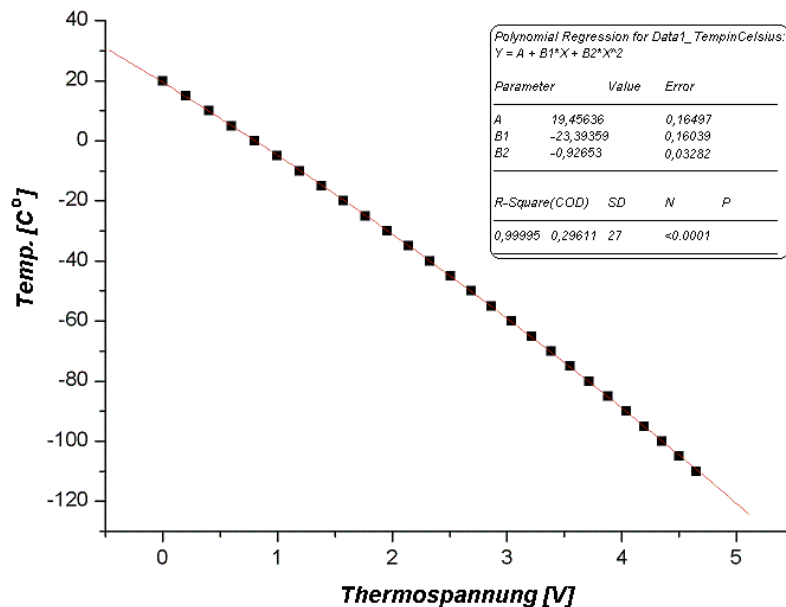


Abbildung 3.1: Plot: Thermospannung - Temperatur

Die resultierende Funktion ist

$$f(x) = A + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2$$

mit den Parametern

$$A = 19,45636 \pm 0,165$$

$$B_1 = -23,39359 \pm 0,160$$

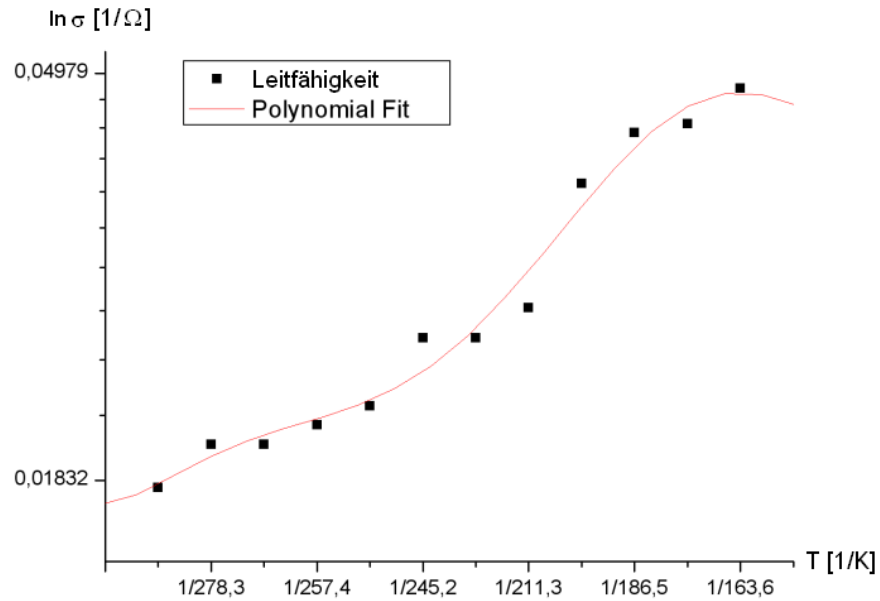
$$B_2 = -0,92653 \pm 0,033$$

Da die angenommenen Temperaturfehler aufgrund von Schwankungen viel größer sind als der Fehler, der durch diesen Fit entsteht, wird dieser hier vernachlässigt. Daraus ergeben sich in unserem Fall folgende Temperaturen:

Thermospannung [V]	$\Delta$ Thermospannung [V]	Temperatur [K]	$\Delta$ Temperatur [K]
0,11	0,01	289,9	19,2
0,59	0,02	278,3	19,0
0,90	0,01	270,6	19,2
1,24	0,03	257,4	18,8
1,53	0,03	254,5	18,8
1,88	0,04	245,2	18,5
2,38	0,03	231,5	19,0
3,09	0,02	211,3	19,0
3,49	0,02	199,5	19,0
3,92	0,92	186,5	19,0
4,28	0,02	175,4	19,0
4,65	0,01	163,6	19,2

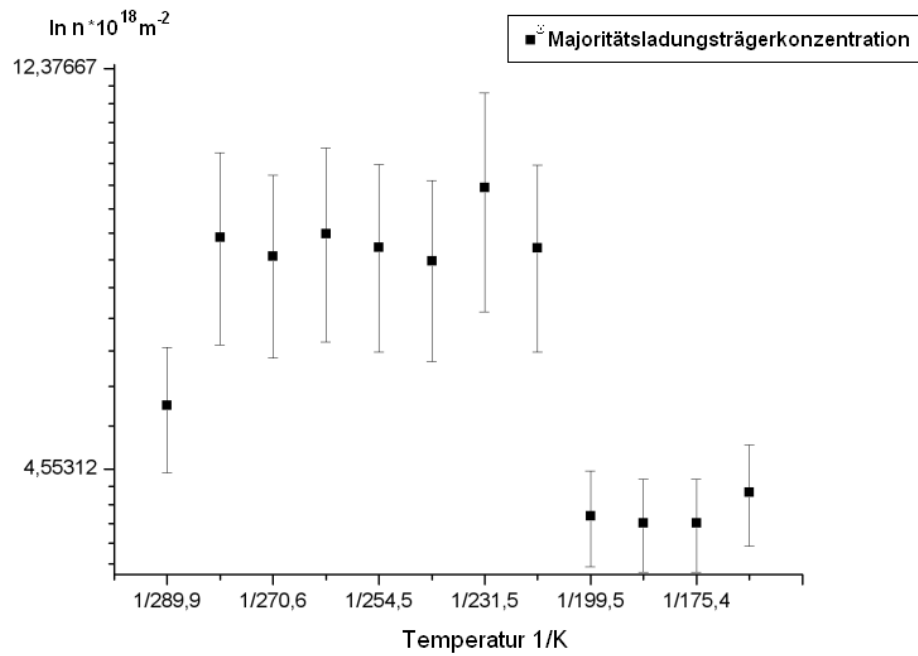
### 3.2.1 Leitfähigkeit

Mit den aus der Widerstands- und Halleffekt-Messung gewonnenen Ergebnissen (siehe Anhang) wird nun  $\ln(\sigma^s)$  gegen  $1/T$  abgetragen.



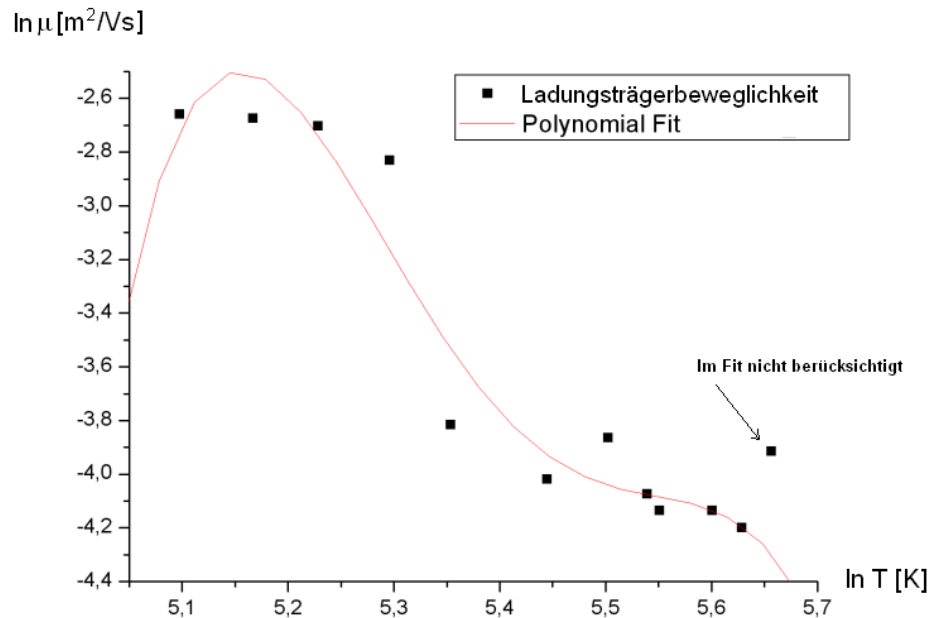
Die gefittete Kurve zeigt ganz gut die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur. Bei höheren Temperaturen nimmt die Leitfähigkeit deutlich ab, während sie bei einer bestimmten Temperatur ein Maximum erreicht bevor sie bei sehr geringen Temperaturen wieder abfällt. Leider war es uns nicht möglich den Halbleiter so stark herunterzukühlen. Deswegen ist anzunehmen, daß das Maximum der Leitfähigkeit (auch wenn der Fit dies andeutet) noch nicht erreicht worden ist.

### 3.2.2 Ladungsträgerkonzentration



Aus dem Verlauf der Kurve erkennt man sehr schön, daß wir im intrinsischen und im Sättigungsbereich gemessen haben. Der Übergang liegt hier etwa zwischen 200K und 215K. Der charakteristische Anstieg im intrinsischen Bereich ist hier leider nicht zu beobachten. Auch der Meßwert bei 289,9K scheint eine Fehlmessung zu sein.

### 3.2.3 Beweglichkeit



Auch hier zeichnet sich der für unseren Meßbereich charakteristische Kurvenverlauf ab. Die Beweglichkeit nimmt mit steigender Temperatur kontinuierlich ab. Obwohl die gefittete Funktion bei ca. 180K ein Maximum impliziert, denken wir nicht, daß es in diesem Temperaturbereich ähnlich wie bei der Leitfähigkeit bereits sichtbar wird. Wie zuvor wurde der Ausreißer ganz rechts im Fit nicht berücksichtigt.

### 3.3 Schlußbemerkung

Ein großer Fehler resultiert daraus, daß wir keine Möglichkeit hatten, den Spannungswert konstant zu halten. Bei 253K z.B. war er drei Minuten lang konstant bei einem Strom des Heizdrahtes von 0,295A. Dann stieg die Temperatur auf einmal, sogar noch bei einer Absenkung des Stromes auf 0,260A. Dies läßt auf eine sehr unregelmäßige Leistungsabgabe schließen. Im Nachhinein halten wir diesen Fehler jedoch für vernachlässigbar, da selbst der größte Temperaturfehler aufgrund der Spannungsschwankungen im Plot zu klein für die Darstellung ist. Dies hätten wir uns vorher überlegen sollen, da wir sehr viel Zeit für das Nachregeln des Heizstromes aufgebracht haben. Ein Thermospannungsfehler von 0,1mV wäre keinesfalls tragisch gewesen.

Weiterhin finden wir es sehr bedauerlich, daß wir nicht in der Lage waren, den vollen Temperaturbereich, der den kompletten Informationsgehalt geliefert hätte, zu vermessen. Weshalb die Vakuumpumpe nicht ihre volle Leistung aufbringen konnte, blieb unklar.

## Kapitel 4

## Anhang

- $T = 4,65 \pm 0,01 \hat{=} (163,6 \pm 19,2) K$

Nr.	$M_1[\text{mV}]$	$M_2[\text{mV}]$	$M_3[\text{mV}]$	$\overline{M}[\text{mV}]$	$\sigma \overline{M}[\text{mV}]$
1	0,062	0,06	0,06	0,06067	$8,16497 \cdot 10^{-4}$
2	0,062	0,06	0,06	0,06067	$8,16497 \cdot 10^{-4}$
3	-0,851	-0,848	-0,848	-0,849	0,00122
4	0,961	0,958	0,957	0,95867	0,00147
5	$-1 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	0
6	$-1 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	0
7	-1,053	-1,051	-1,052	-1,052	$7,07107 \cdot 10^{-4}$
8	0,838	0,837	0,835	0,83667	0,00108

Widerstandsmessung: 163,6 K

Nr.	$M_1[\text{mV}]$	$M_2[\text{mV}]$	$M_3[\text{mV}]$	$\overline{M}[\text{mV}]$	$\sigma \overline{M}[\text{mV}]$
1	0,791	0,794	0,752	0,779	0,01657
2	-1,017	-1,01	-0,982	-1,003	0,0131
3	-0,894	-0,893	-0,85	-0,879	0,01776
4	0,999	0,997	0,969	0,98833	0,01186
5	0,824	0,81	0,842	0,82533	0,01134
6	-1,057	-1,069	-1,049	-1,05833	0,00712
7	-0,847	-0,856	-0,853	-0,852	0,00324
8	0,952	0,959	0,956	0,95567	0,00248
9	-0,069	-0,07	-0,07	-0,06967	$4,08248 \cdot 10^{-4}$
10	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	$3,00463 \cdot 10^{-18}$

Messung der Hallkonstante: 163,6 K

$R_{12,34}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{23,41}$	$(9,040 \pm 0,035)\Omega$
$R_{34,12}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{41,23}$	$(9,445 \pm 0,035)\Omega$
$\rho^s$	$(20,943 \pm 0,079)\Omega$
$R_H^s$	$(-1,450 \pm 0,181)\frac{m^2}{C}$
$\sigma^s$	$(0,048 \pm 0,000)\frac{1}{\Omega}$
$n^s$	$(4,30 \pm 0,54) * 10^{18}\frac{1}{m^2}$
$\mu^s$	$(0,070 \pm 0,009)\frac{m^2}{Vs}$

- $T = 4,28 \pm 0,02 \hat{=} (175,4 \pm 19,0)K$

Nr.	$M_1[\text{mV}]$	$M_2[\text{mV}]$	$M_3[\text{mV}]$	$\overline{M}[\text{mV}]$	$\sigma\overline{M}[\text{mV}]$
1	0,067	0,066	0,052	0,06167	0,00593
2	0,067	0,066	0,052	0,06167	0,00593
3	-0,938	-0,938	-0,937	-0,93767	$4,08248 \cdot 10^{-4}$
4	1,036	1,036	1,034	1,03533	$8,16497 \cdot 10^{-4}$
5	-0,003	-0,003	$-1 \cdot 10^{-3}$	-0,00233	$8,16497 \cdot 10^{-4}$
6	-0,002	-0,002	$-1 \cdot 10^{-3}$	-0,00167	$4,08248 \cdot 10^{-4}$
7	-1,138	-1,137	-1,122	-1,13233	0,00634
8	0,923	0,925	0,932	0,92667	0,00334

Widerstandsmessung: 175,4 K

Nr.	$M_1[\text{mV}]$	$M_2[\text{mV}]$	$M_3[\text{mV}]$	$\overline{M}[\text{mV}]$	$\sigma\overline{M}[\text{mV}]$
1	0,887	0,88	0,881	0,88267	0,00268
2	-1,09	-1,06	-1,08	-1,07667	0,0108
3	-0,985	-0,969	-0,974	-0,976	0,00579
4	1,076	1,056	1,068	1,06667	0,00712
5	0,927	0,923	0,928	0,926	0,00187
6	-1,116	-1,11	-1,115	-1,11367	0,00227
7	-0,926	-0,93	-0,93	-0,92867	0,00163
8	1,018	1,021	1,023	1,02067	0,00178
9	0,899	0,903	0,899	0,90033	0,00163
10	-1,082	-1,088	-1,082	-1,084	0,00245

Messung der Hallkonstante: 175,4 K

$R_{12,34}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{23,41}$	$(9,865 \pm 0,035)\Omega$
$R_{34,12}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{41,23}$	$(10,295 \pm 0,035)\Omega$
$\rho^s$	$(22,846 \pm 0,079)\Omega$
$R_H^s$	$(-1,567 \pm 0,181)\frac{m^2}{C}$
$\sigma^s$	$(0,044 \pm 0,000)\frac{1}{\Omega}$
$n^s$	$(3,98 \pm 0,46) * 10^{18}\frac{1}{m^2}$
$\mu^s$	$(0,0769 \pm 0,008)\frac{m^2}{Vs}$

- $T = 3,92 \pm 0,02 \hat{=} (186,5 \pm 19,0)K$



Nr.	$M_1[\text{mV}]$	$M_2[\text{mV}]$	$M_3[\text{mV}]$	$\overline{M}[\text{mV}]$	$\sigma\overline{M}[\text{mV}]$
1	0,032	0,048	0,042	0,04067	0,00572
2	0,045	0,048	0,044	0,04567	0,00147
3	-0,985	-0,986	-0,985	-0,98533	$4,08248 \cdot 10^{-4}$
4	1,075	1,074	1,072	1,07367	0,00108
5	-0,006	-0,006	-0,005	-0,00567	$4,08248 \cdot 10^{-4}$
6	-0,005	-0,005	-0,005	-0,005	$7,51157 \cdot 10^{-19}$
7	-1,152	-1,148	-1,146	-1,14867	0,00216
8	0,989	0,994	0,994	0,99233	0,00204

Widerstandsmessung: 186,5 K

Nr.	$M_1[\text{mV}]$	$M_2[\text{mV}]$	$M_3[\text{mV}]$	$\overline{M}[\text{mV}]$	$\sigma\overline{M}[\text{mV}]$
1	0,95	0,963	0,961	0,958	0,00495
2	-1,135	-1,135	-1,139	-1,13633	0,00163
3	-1,043	-1,046	-1,046	-1,045	0,00122
4	1,138	1,137	1,137	1,13733	$4,08248 \cdot 10^{-4}$
5	1,006	1,005	1,004	1,005	$7,07107 \cdot 10^{-4}$
6	-1,18	-1,18	-1,18	-1,18	0
7	-1,004	-1,004	-1,004	-1,004	0
8	1,097	1,096	1,096	1,09633	$4,08248 \cdot 10^{-4}$
9	0,981	0,978	0,978 0,979	0,00122	
10	-1,15	-1,154	-1,153	-1,15233	0,00147

Messung der Hallkonstante: 186,5 K

$R_{12,34}$	$(0,025 \pm 0,035)\Omega$
$R_{23,41}$	$(10,295 \pm 0,035)\Omega$
$R_{34,12}$	$(0,005 \pm 0,035)\Omega$
$R_{41,23}$	$(10,705 \pm 0,035)\Omega$
$\rho^s$	$(23,387 \pm 0,079)\Omega$
$R_H^s$	$(-1,567 \pm 0,181) \frac{\text{m}^2}{\text{C}}$
$\sigma^s$	$(0,043 \pm 0,000) \frac{1}{\Omega}$
$n^s$	$(3,98 \pm 0,46) * 10^{18} \frac{1}{\text{m}^2}$
$\mu^s$	$(0,067 \pm 0,008) \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}}$

- $T = 3,94 \pm 0,02 \hat{=} (199,5 \pm 19,0) \text{K}$

Nr.	$M_1[\text{mV}]$
1	0,043
2	0,043
3	-1,093
4	1,185
5	$-1 \cdot 10^{-3}$
6	0
7	-1,263
8	1,101

Widerstandsmessung: 199,5 K

Nr.	$M_1 [\text{mV}]$
1	1,052
2	-1,213
3	-1,134
4	1,217
5	1,098
6	-1,257
7	-1,094
8	1,177
9	1,074
10	-1,233

Messung der Hallkonstante: 199,5 K

$R_{12,34}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{23,41}$	$(11,390 \pm 0,035)\Omega$
$R_{34,12}$	$(0,005 \pm 0,035)\Omega$
$R_{41,23}$	$(11,820 \pm 0,035)\Omega$
$\rho^s$	$(26,304 \pm 0,079)\Omega$
$R_H^s$	$(-1,540 \pm 0,181) \frac{m^2}{C}$
$\sigma^s$	$(0,038 \pm 0,000) \frac{1}{\Omega}$
$n^s$	$(4,05 \pm 0,48) * 10^{18} \frac{1}{m^2}$
$\mu^s$	$(0,059 \pm 0,007) \frac{m^2}{Vs}$

- $T = 3,09 \pm 0,02 \hat{=} (211,3 \pm 19,0) K$

Nr.	$M_1 [\text{mV}]$
1	0,042
2	0,042
3	-1,511
4	1,625
5	-0,014
6	-0,014
7	-1,683
8	1,527

Widerstandsmessung: 211,3 K

Nr.	$M_1 [\text{mV}]$
1	1,513
2	-1,696
3	-1,589
4	1,664
5	1,539
6	-1,715
7	-1,57
8	1,641
9	1,522
10	-1,697

Messung der Hallkonstante: 211,3 K

$R_{12,34}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{23,41}$	$(15,680 \pm 0,035)\Omega$
$R_{34,12}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{41,23}$	$(16,050 \pm 0,035)\Omega$
$\rho^s$	$(35,953 \pm 0,079)\Omega$
$R_H^s$	$(-0,789 \pm 0,181)\frac{m^2}{C}$
$\sigma^s$	$(0,028 \pm 0,000)\frac{1}{\Omega}$
$n^s$	$(7,91 \pm 1,81) * 10^{18}\frac{1}{m^2}$
$\mu^s$	$(0,022 \pm 0,005)\frac{m}{Vs}$

- $T = 2,38 \pm 0,03 \hat{=} (231,5 \pm 19,0)K$

Nr.	$M_1[mV]$
1	0,032
2	0,032
3	-1,63
4	1,745
5	-0,01
6	-0,01
7	-1,777
8	1,677

Widerstandsmessung: 231,5 K

Nr.	$M_1[mV]$
1	1,672
2	-1,813
3	-1,755
4	1,809
5	1,708
6	-1,846
7	-1,751
8	1,807
9	1,714
10	1,854

Messung der Hallkonstante: 231,5 K

$R_{12,34}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{23,41}$	$(16,875 \pm 0,035)\Omega$
$R_{34,12}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{41,23}$	$(17,270 \pm 0,035)\Omega$
$\rho^s$	$(38,689 \pm 0,079)\Omega$
$R_H^s$	$(-0,679 \pm 0,181)\frac{m^2}{C}$
$\sigma^s$	$(0,026 \pm 0,000)\frac{1}{\Omega}$
$n^s$	$(9,19 \pm 2,45) * 10^{18}\frac{1}{m^2}$
$\mu^s$	$(0,018 \pm 0,005)\frac{m}{Vs}$

- $T = 1,88 \pm 0,04 \hat{=} (245,2 \pm 18,8) K$

Nr.	$M_1 [\text{mV}]$
1	0,029
2	0,029
3	-1,412
4	1,481
5	-0,006
6	-0,006
7	-1,947
8	1,85

Widerstandsmessung: 245,2 K

Nr.	$M_1 [\text{mV}]$
1	1,824
2	-1,947
3	-1,884
4	1,933
5	1,851
6	-1,974
7	-1,867
8	1,914
9	1,835
10	-1,958

Messung der Hallkonstante: 245,2 K

$R_{12,34}$	$(0 \pm 0,035) \Omega$
$R_{23,41}$	$(14,465 \pm 0,035) \Omega$
$R_{34,12}$	$(0 \pm 0,035) \Omega$
$R_{41,23}$	$(18,985 \pm 0,035) \Omega$
$\rho^s$	$(37,902 \pm 0,079) \Omega$
$R_H^s$	$(-0,815 \pm 0,181) \frac{m^2}{C}$
$\sigma^s$	$(0,026 \pm 0,000) \frac{1}{\Omega}$
$n^s$	$(7,66 \pm 1,70) * 10^{18} \frac{1}{m^2}$
$\mu^s$	$(0,021 \pm 0,005) \frac{m^2}{Vs}$

- $T = 1,53 \pm 0,03 \hat{=} (254,5 \pm 18,8) K$

Nr.	$M_1 [\text{mV}]$
1	0,029
2	0,029
3	-1,412
4	1,481
5	-0,006
6	-0,006
7	-1,947
8	1,85

Widerstandsmessung: 254,5 K

Nr.	$M_1[\text{mV}]$
1	1,824
2	-1,947
3	-1,884
4	1,933
5	1,851
6	-1,974
7	-1,867
8	1,914
9	1,835
10	-1,958

Messung der Hallkonstante: 254,5 K

$R_{12,34}$	$(0,005 \pm 0,035)\Omega$
$R_{23,41}$	$(19,680 \pm 0,035)\Omega$
$R_{34,12}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{41,23}$	$(19,910 \pm 0,035)\Omega$
$\rho^s$	$(44,865 \pm 0,079)\Omega$
$R_H^s$	$(-0,788 \pm 0,181)\frac{m^2}{C}$
$\sigma^s$	$(0,022 \pm 0,000)\frac{1}{\Omega}$
$n^s$	$(7,92 \pm 1,82) * 10^{18}\frac{1}{m^2}$
$\mu^s$	$(0,017 \pm 0,004)\frac{m}{Vs}$

- $T = 1,24 \pm 0,03 \hat{=} (257,4 \pm 18,8)K$

Nr.	$M_1[\text{mV}]$
1	0,018
2	0,019
3	-2,02
4	2,085
5	-0,01
6	-0,01
7	-2,116
8	2,041

Widerstandsmessung: 257,4 K

Nr.	$M_1[\text{mV}]$
1	2,029
2	-2,119
3	-2,078
4	2,113
5	2,053
6	-2,142
7	-2,061
8	2,093
9	2,039
10	-2,124

Messung der Hallkonstante: 257,4 K

$R_{12,34}$	$(0,005 \pm 0,035)\Omega$
$R_{23,41}$	$(20,525 \pm 0,035)\Omega$
$R_{34,12}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{41,23}$	$(20,785 \pm 0,035)\Omega$
$\rho^s$	$(46,814 \pm 0,079)\Omega$
$R_H^s$	$(-0,761 \pm 0,181)\frac{m^2}{C}$
$\sigma^s$	$(0,021 \pm 0,000)\frac{1}{\Omega}$
$n^s$	$(8,20 \pm 1,95) * 10^{18}\frac{1}{m^2}$
$\mu^s$	$(0,016 \pm 0,004)\frac{m}{Vs}$

- $T = 0,90 \pm 0,01 \hat{=} (270,6 \pm 19,2)K$

Nr.	$M_1[mV]$
1	0,016
2	0,016
3	-2,132
4	2,185
5	-0,009
6	-0,009
7	-2,21
8	2,151

Widerstandsmessung: 270,6 K

Nr.	$M_1[mV]$
1	2,122
2	-2,198
3	-2,169
4	2,197
5	2,148
6	-2,221
7	-2,15
8	2,176
9	2,134
10	-2,206

Messung der Hallkonstante: 270,6 K

$R_{12,34}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{23,41}$	$(21,585 \pm 0,035)\Omega$
$R_{34,12}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{41,23}$	$(21,805 \pm 0,035)\Omega$
$\rho^s$	$(49,165 \pm 0,079)\Omega$
$R_H^s$	$(-0,806 \pm 0,181)\frac{m^2}{C}$
$\sigma^s$	$(0,020 \pm 0,000)\frac{1}{\Omega}$
$n^s$	$(7,75 \pm 1,74) * 10^{18}\frac{1}{m^2}$
$\mu^s$	$(0,016 \pm 0,004)\frac{m}{Vs}$

- $T = 0,59 \pm 0,02 \hat{=} (278,3 \pm 19,0) K$

Nr.	$M_1 [\text{mV}]$
1	0,011
2	0,012
3	-2,208
4	2,265
5	-0,008
6	-0,008
7	-2,289
8	2,249

Widerstandsmessung: 278,3 K

Nr.	$M_1 [\text{mV}]$
1	2,224
2	-2,279
3	-2,267
4	2,288
5	2,246
6	-2,292
7	-2,245
8	2,26
9	2,235
10	-2,28

Messung der Hallkonstante: 278,3 K

$R_{12,34}$	$(0,005 \pm 0,035) \Omega$
$R_{23,41}$	$(22,365 \pm 0,035) \Omega$
$R_{34,12}$	$(0 \pm 0,035) \Omega$
$R_{41,23}$	$(22,690 \pm 0,035) \Omega$
$\rho^s$	$(51,057 \pm 0,079) \Omega$
$R_H^s$	$(-0,770 \pm 0,181) \frac{m^2}{C}$
$\sigma^s$	$(0,020 \pm 0,000) \frac{1}{\Omega}$
$n^s$	$(8,12 \pm 1,91) * 10^{18} \frac{1}{m^2}$
$\mu^s$	$(0,015 \pm 0,004) \frac{m^2}{Vs}$

- $T = 0,11 \pm 0,01 \hat{=} (289,9 \pm 19,2) K$

Nr.	$M_1 [\text{mV}]$
1	0,004
2	0,004
3	-2,375
4	2,405
5	-0,006
6	-0,005
7	-2,414
8	2,393

Widerstandsmessung: 289,9 K

Nr.	$M_1[\text{mV}]$
1	2,382
2	-2,396
3	-2,436
4	2,437
5	2,428
6	-2,442
7	-2,416
8	2,42
9	2,411
10	-2,423

Messung der Hallkonstante: 289,9 K

$R_{12,34}$	$(0 \pm 0,035)\Omega$
$R_{23,41}$	$(23,900 \pm 0,035)\Omega$
$R_{34,12}$	$(0,005 \pm 0,035)\Omega$
$R_{41,23}$	$(24,035 \pm 0,035)\Omega$
$\rho^s$	$(54,320 \pm 0,079)\Omega$
$R_H^s$	$(-1,168 \pm 0,181) \frac{m^2}{C}$
$\sigma^s$	$(0,018 \pm 0,000) \frac{1}{\Omega}$
$n^s$	$(5,34 \pm 0,83) * 10^{18} \frac{1}{m^2}$
$\mu^s$	$(0,021 \pm 0,003) \frac{m^2}{Vs}$