

---

**Modernisierung einer  
Hall-Effekt-Messapparatur  
mit *LabVIEW*<sup>TM</sup>**

---

Bachelorarbeit in Physik

von

Torsten Benjamin Slawski

angefertigt im

Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Universität Bonn

Juli 2011



**1. Gutachter:** Privatdozent Dr. Reiner Vianden

**2. Gutachter:** Professor Dr. Karl Maier

*„Es ist ein Beweis hoher Bildung, die größten Dinge auf die einfachste Art zu sagen.“*

**Ralph Waldo Emerson**



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2. Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1. Hall-Effekt . . . . .	3
2.2. Die van-der-Pauw-Methode . . . . .	5
2.3. Hall-Koeffizienten mit der van-der-Pauw-Methode . . . . .	7
2.4. Flächengrößen . . . . .	7
<b>3. Versuchsaufbau und Programmfunktion</b>	<b>9</b>
3.1. Versuchsaufbau . . . . .	9
3.2. Steuerprogramm Hall_rho.exe . . . . .	11
<b>4. Testmessungen</b>	<b>15</b>
4.1. Probenpräparation . . . . .	15
4.2. Messungen und Auswertung . . . . .	18
<b>5. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>21</b>
<b>A. Hall_rho.exe CD-ROM</b>	<b>23</b>



# 1. Einleitung und Motivation

In der zunehmend immer vernetzteren Welt ist der schnelle Austausch von Daten von tiefgehender Bedeutung. Die Technologie, die dies ermöglicht, beruht größtenteils auf Halbleitern, die sind daher für Industrie und Wissenschaft ein interessantes Ziel der Forschung.

Eine Standardmethode zur Untersuchung von Halbleitern stellen Hall-Effekt-Messungen dar. Sie ermöglicht es wichtige Größen, wie die Ladungsträgerart und -konzentration sowie in Kombination mit Widerstandsmessungen die Majoritätsladungsträgerbeweglichkeit von Halbleitern zu charakterisieren.

Das Ziel der Arbeit ist die Modernisierung einer Hall-Effekt-Messanlage. Für Hall-Effekt-Messungen ist das Variieren vieler Parameter notwendig, weswegen die Ansteuerung bisher über ein auf *DOS*-basierendes Programm und die Datenernahme mit Disketten erfolgt. In der heutigen Zeit gelten Diskettenformate als überholt und sie behindern den Datenfluss zwischen den Rechnern. Deswegen soll die Ansteuerung der Apparatur über ein *USB*-Interface erfolgen. Dieses erlaubt es, mit den meisten modernen Rechnern zu kommunizieren.

Ein neues Mess- und Steuerprogramm wird mit der graphischen Programmiersprache *LabVIEW<sup>TM</sup>* geschrieben. Diese erfordert zunächst eine intensive Einarbeitung, hat aber den Vorteil, dass sie explizit für die Ansteuerung von Messgeräten entwickelt wurde.

Nach der Entwicklung des Steuerprogramms wird seine Funktionstüchtigkeit in Vergleichsmessungen zu dem ursprünglichen Versuchsaufbau getestet. Dazu müssen Proben zugeschnitten und geikontaktiert werden.





## 2. Theoretische Grundlagen

### 2.1. Hall-Effekt

Der Hall-Effekt ist ein galvanomagnetischer Effekt, der 1879 von Edwin Hall entdeckt wurde. Er bildet die Grundlage für wichtige Messmethoden zur Charakterisierung von Halbleitern.

Im Folgenden wird das Prinzip des Hall-Effekts an einem vereinfachten Modell anlehnend an die Literatur [2], [3], [4] kurz erläutert. Eine quaderförmige Probe, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, werde in x-Richtung von einem elektrischen Strom  $\vec{I} = I \vec{e}_x$  durchflossen. Liegt gleichzeitig in z-Richtung ein homogenes Magnetfeld  $\vec{B} = B_z \vec{e}_z$  an, wirkt senkrecht auf die mit der Driftgeschwindigkeit  $\vec{v}$  bewegten Ladungsträger der Ladung  $q$  eine Lorentzkraft in negative y-Richtung:

$$\vec{F}_L = q (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

$$\vec{F}_L = -q v_x B_z \vec{e}_y \quad (2.2)$$

Die Ladungsträger werden zum unteren Rand der Probe abgelenkt, wo es zu einem Ladungsträgerüberschuss kommt. Am oberen Rand tritt eine Ladungsträgerverarmung auf. Für positive Ladungsträger (Löcherleitung), wie in Abbildung 2.1 dargestellt, bedeutet dies eine positive Raumladung am unteren Probenrand und eine negative Raumladung in der Zone der Ladungsträgerverarmung am oberen Rand.

Es bildet sich ein elektrisches Feld  $\vec{E}$  in y-Richtung aus, in dem die Ladungsträger eine der Lorentzkraft entgegengesetzte elektrostatische Kraft  $\vec{F}_{el}$  erfahren. Dabei stellt sich ein Gleichgewicht zwischen  $\vec{F}_{el}$  und  $\vec{F}_L$  ein, so dass der Strom wieder ungestört durch die Probe fließen kann.

$$\vec{F}_{el} = q E_y \vec{e}_y \quad (2.3)$$

$$q E_y = q v_x B_z \quad (2.4)$$

Die aus  $E_y$  resultierende Hall-Spannung  $V_H$  ist mittels hochohmiger Messgeräte nachweisbar:

$$V_H = R_H \frac{I B}{d} \quad (2.5)$$

Dabei ist  $d$  die Probendicke parallel zum Magnetfeld und  $R_H$  die materialspezifische Hall-Konstante, auch Hall-Koeffizient genannt. Aus dem Vorzeichen der Hall-Spannung beziehungsweise des Hall-Koeffizienten lassen sich Rückschlüsse auf die Ladungsträgerart der Probe ziehen. Negative Ladungsträger würden aufgrund der entgegengesetzten Driftgeschwindigkeit in dieselbe Richtung wie positive abgelenkt. Für sie sind folglich die Vorzeichen für die Raumladungen

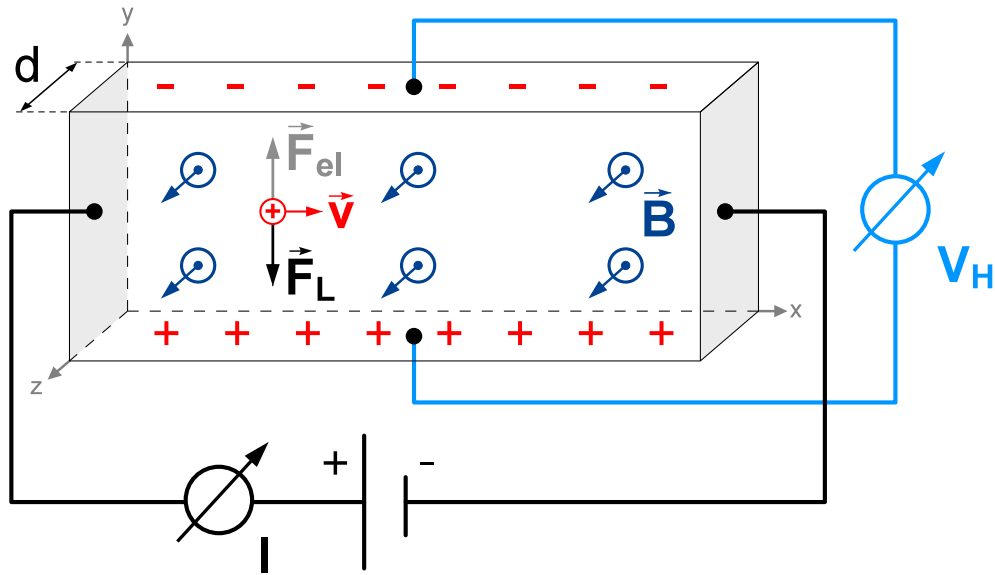


Abbildung 2.1.: Vereinfachte Darstellung des Halleffekts. In einem stromdurchflossenen Leiter, wirkt aufgrund eines senkrecht zum Strom stehendes Magnetfeldes  $\vec{B}$  eine Lorentzkraft  $\vec{F}_L$  auf die Ladungsträger. Die Ladungsträger driften in Richtung der Lorentzkraft, so dass ein elektrisches Feld entsteht, das diese kompensiert  $F_{el} = -F_L$ . Es resultiert die Hall-Spannung  $V_H$ .

und damit des elektrischen Feldes vertauscht. Die Orientierung von Strom und Magnetfeld wird per Konvention so gewählt, dass für die Vorzeichen gilt:

- positive Ladungsträger (p-Leitung)  $V_H, R_H > 0$ ,
- negative Ladungsträger (n-Leitung)  $V_H, R_H < 0$ .

Für Elektronenleitung lässt sich mit der Stromdichte  $j_x = -n e v$  ein Zusammenhang zwischen Hall-Koeffizient und der Elektronenkonzentration  $n$  finden. Analoges gilt für Löcherleitung mit der Löcherkonzentration  $p$ , wobei  $e$  die Elementarladung ist:

$$\begin{aligned}
 R_H &= -\frac{1}{n e} && \text{(Elektronenleitung)} \\
 R_H &= \frac{1}{p e} && \text{(Löcherleitung)}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Mit Hilfe des spezifischen Widerstandes  $\rho$ , den man aus einer Widerstandsmessung der Probe erhalten kann, lässt sich die Ladungsträgerbeweglichkeit  $\mu$  ermitteln:

$$\mu = \left| \frac{R_H}{\rho} \right|. \tag{2.7}$$

Die oben genannten Gleichungen stellen ein vereinfachtes Modell dar und gelten

nur unter der Annahme der gleichen Driftgeschwindigkeit aller Ladungsträger. Bei endlichen Temperaturen besitzen die Ladungsträger eine thermische Geschwindigkeitsverteilung. Da die Streuwahrscheinlichkeit gewöhnlich mit der Energie abnimmt, haben schnellere Ladungsträger eine größere Beweglichkeit [4]. Dies macht eine Mittelung über die Driftgeschwindigkeiten erforderlich, die mit Hilfe des numerischen Hall-Streukoeffizient  $r_H$  in die Gleichungen (2.6) eingeführt wird:

$$\begin{aligned} R_H &= -\frac{r_H}{n e} && \text{(Elektronenleitung)} \\ R_H &= \frac{r_H}{p e} && \text{(Löcherleitung)} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Eine tiefergehende Behandlung findet sich in der Literatur [2],[4]. Der Hall-Streukoeffizient wird in der Praxis häufig nicht berücksichtigt, da er meist weniger als 20% von eins abweicht [4]. Die Hall-Streukoeffizienten werden daher im Folgenden der Arbeit auf eins gesetzt.

## 2.2. Die van-der-Pauw-Methode

Leo J. van der Pauw veröffentlichte 1958 Arbeiten [5, 6], nach der einfache Probenformen für Widerstands- und Hall-Effekt-Messungen verwendet werden können, wenn sie folgende Voraussetzungen erfüllen:

- planparallele Form
- einfach zusammenhängende Fläche ohne Löcher
- homogene Dicke
- homogene Dotierung
- hinreichend kleine, am Rand positionierte Kontakte

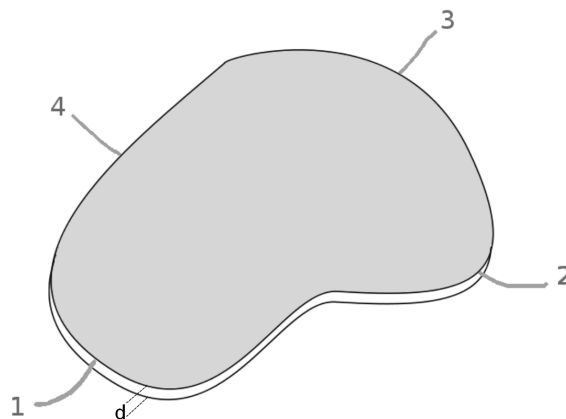


Abbildung 2.2.: Probenform zur Widerstandsmessung nach van der Pauw.

## 2. Theoretische Grundlagen

---

In Abbildung 2.2 ist eine mögliche Probenform mit den Kontakten 1,2,3 und 4 dargestellt.

Van der Pauw definiert Widerstände der Form:

$$R_{12,34} = \frac{|V_{34}|}{I_{12}}, \quad R_{23,41} = \frac{|V_{41}|}{I_{23}}, \quad \dots \text{ usw.} \quad (2.9)$$

dabei ist  $V_{34}$  die Potentialdifferenz zwischen dem Kontakt 3 und 4 und  $I_{12}$  der Strom, welcher von Kontakt 1 nach Kontakt 3 fließt.

Nach dem van-der-Pauw-Theorem lässt sich folgende Beziehung mit dem spezifischen Widerstand  $\rho$ , der Probendicke  $d$  und den gerade definierten Widerständen finden:

$$\exp\left(-\pi \frac{d}{\rho} R_{12,34}\right) + \exp\left(-\pi \frac{d}{\rho} R_{23,41}\right) = 1. \quad (2.10)$$

Dies ist für den spezifischen Widerstand  $\rho$  nicht analytisch lösbar. Es ergibt sich eine numerisch zu lösende Gleichung für  $\rho$ : [1]

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln(2)} \frac{R_{12,34} + R_{23,41}}{2} f\left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}\right). \quad (2.11)$$

Der van-der-Pauw-Faktor  $f\left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}\right)$  hängt nur von dem Verhältnis der Widerstände ab und berücksichtigt die Proben- und Kontaktgeometrie. Aus Gleichung (2.10) und (2.11) ergibt sich:

$$\cosh\left(\frac{\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}} - 1}{\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}} + 1} \frac{\ln(2)}{f}\right) = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{\ln(2)}{f}\right). \quad (2.12)$$

Zur numerischen Lösung werden folgende Substitutionen eingeführt

$$z = \exp\left(\frac{\ln(2)}{f}\right); \quad k := \frac{Q-1}{Q+1}; \quad Q := \begin{cases} \frac{R_{12,34}}{R_{23,41}} & \text{für } R_{12,34} \geq R_{23,41} \\ \frac{R_{23,41}}{R_{12,34}} & \text{für } R_{12,34} < R_{23,41} \end{cases}.$$

Mit deren Hilfe lässt sich die Gleichung (2.12) vereinfachen zu

$$z = z^k + z^{-k}. \quad (2.13)$$

Der Wert von  $k$  ergibt sich aus den Widerstandsmessungen über die Probe.  $z$  wird unter Vorgabe, des Anfangswertes 2, iterativ korrigiert bis die Abweichung zwischen Eingangs- und Ausgangswert innerhalb der gewünschten Präzision liegt. Nach  $f = \frac{\ln 2}{\ln z}$  entspricht  $z = 2$  einer 4-fachsymmetrischen Probe, daher weisen sowohl die Kontakte als auch die Probe Symmetrie auf. Bei symmetrischen Proben gibt  $f$  folglich einen Hinweis über die Qualität der Kontakte.

## 2.3. Hall-Koeffizienten mit der van-der-Pauw-Methode

Nach van der Pauw lassen sich auch die Hall-Koeffizienten bei beliebig geformten Proben mit oben genannten Voraussetzungen bestimmen. Dazu reicht eine einfache Messung der Form  $R_H = d \frac{V_{24}}{I_{13}B_z}$  nach Gleichung (2.5) nicht aus. Da die Kontakte 2 und 4 im Allgemeinen nicht auf der gleichen Äquipotentialfläche liegen, misst man neben der Hall-Spannung  $V_H$  eine Spannungskomponente  $V_O$ :

$$V_{24} = V_H + V_O + V_X . \quad (2.14)$$

Zusätzlich treten noch weitere thermische, thermo- und galvanomagnetische Störspannungen  $V_X$  auf, wie:

- Seebeck-Spannung  $V_S$
- Nernst-Spannung  $V_N$
- Rigi-Leduc-Spannung  $V_R$
- Eittingshausen-Spannung  $V_E$  .

Die Ursachen dieser Effekte werden von Nathusius [7] kurz aufgeführt und werden in der Literatur [8] näher behandelt.

Durch eine geeignete Wahl von Messungen und anschließender Mittelung lassen sich diese Spannungen bis auf die Eittingshausenspannung  $V_E$  eliminieren. Dies wird in Tabelle 2.1 veranschaulicht, die die Richtung der verschiedenen Spannungen bei verschiedenen Messkonfigurationen auflistet. Da  $V_E$  stets in die gleiche Richtung wie die Hallspannung zeigt, geht es als systematischer Fehler in die Hall-Spannungsmessungen ein.

Messung	Strom $I$	Magnetfeld $B$	$V_H$	$V_O$	$V_S$	$V_E$	$V_N$	$V_R$
1	+	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	-	-	+	-	+	+
3	+	-	-	+	+	-	-	-
4	-	-	+	-	+	+	-	-

$$\frac{1}{4}[V_1 - V_2 - (V_3 - V_4)] \quad : \quad V_H \quad 0 \quad 0 \quad V_E \quad 0 \quad 0$$

Tabelle 2.1.: Auftretende thermische, thermo- und galvanomagnetische Störspannungen in Abhängigkeit der Polarität von Strom und Magnetfeld. Die letzte Zeile gibt eine Vorschrift zur Mittelung der einzelnen Messungen an, so dass nur  $V_H$  und  $V_E$  erhalten bleiben [3].

## 2.4. Flächengrößen

Häufig ist die genaue Schichtdicke  $d$  der Proben unbekannt. Insbesondere bei dotierten Proben ist die elektrisch leitende Schicht vor allem auf die Oberflächenschicht begrenzt und von der Dotierungsmethode und -energie abhängig.

## 2. Theoretische Grundlagen

---

Daher werden Flächengrößen definiert, die unabhängig von der Schichtdicke sind:

**spezifischer Flächenwiderstand:**

$$\rho_S = \frac{\rho}{d} = \frac{\pi}{\ln(2)} \frac{R_{12,34} + R_{23,41}}{2} f\left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}\right) \quad (2.15)$$

**Flächenhallkonstante:**

$$R_{HS} = \frac{R_H}{d} = \frac{U_H}{I_x B_z} \quad (2.16)$$

**Flächenladungsträgerdichte:**

$$n_S = n d = \frac{1}{R_{HS} e} \quad (2.17)$$

**Ladungsträgerbeweglichkeit:**

$$\mu_S = \frac{|R_{HS}|}{\rho_S} = \mu . \quad (2.18)$$

### 3. Versuchsaufbau und Programmfunktion

Die Hall-Effekt-Messapparatur wurde von Guido Rohrlack während seiner Diplom- und Doktorarbeit [1, 2] aufgebaut und detailliert beschrieben. Im Rahmen der Diplomarbeit [3] von Thomas Gerschke wurde sie für Hochtemperatur-Messungen ausgerüstet. Die wesentliche Änderung, die während der vorliegenden Arbeit vorgenommen wird, betrifft die Ansteuerung der Geräte. Die festinstallierte  *GPIB*-Kontrollkarte wird durch ein  *USB-GPIB*-Kontrollinterface ersetzt. Hierfür wird ein neues Steuerprogramm mit der Programmiersprache  *LabVIEW™* entwickelt.

#### 3.1. Versuchsaufbau

Der Aufbau der Messapparatur ist in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt. Die Ansteuerung der Stromquelle  *KEITHLEY 220* sowie des digitalen Spannungsmessgerätes  *KEITHLEY 196* erfolgt über ein  *Agilent 82357B USB-GPIB*-Kontrollinterface. Dieses gestattet es, die Geräte an einen Rechner über  *USB*-Kabel anzuschließen und mit Hilfe des Programms **Hall\_rho.exe** zu steuern.

Mittels des Messstellenumschalters ist es möglich, zwischen den Kontakten auf der Probe umzuschalten. Es werden jeweils acht Konfigurationen für die Widerstands- beziehungsweise Hall-Effekt-Messung verwendet, um über deren Mittelung Störspannungen zu eliminieren. In Tabelle 3.1 und 3.2 sind die Beschaltungen, die für die Messung im Programm verwendet werden, eingetragen.

Abbildung 3.1 zeigt eine schematische Darstellung der Beschaltung, die der dritten Zeile in Tabelle 3.1 entspricht. Zum Einhalten der Vorzeichenkonventionen werden die Messdaten bei der Berechnung auf ein rechtshändiges System transformiert. Daher wird angenommen, dass für die Probe Gleichungen folgender Form allgemein erfüllt sind:  $U_{13,24}^+ = -U_{13,42}^+$ . Die Indizes geben die Kontaktbelegung für den Strom und für die Spannungsmessung an, vergleiche Tabelle 3.1.

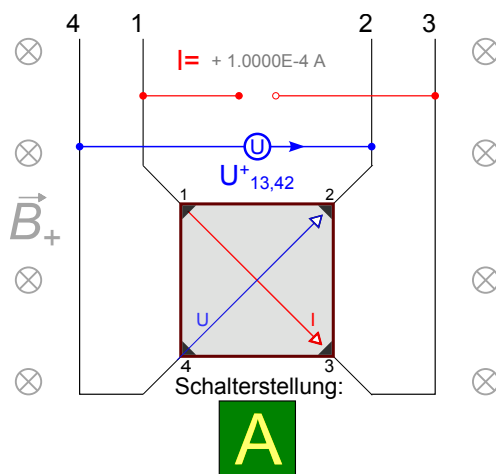


Abbildung 3.1.: Schematische Probenbeschaltung bei einer Hall-Effekt-Messung.

### 3. Versuchsaufbau und Programmfunktion

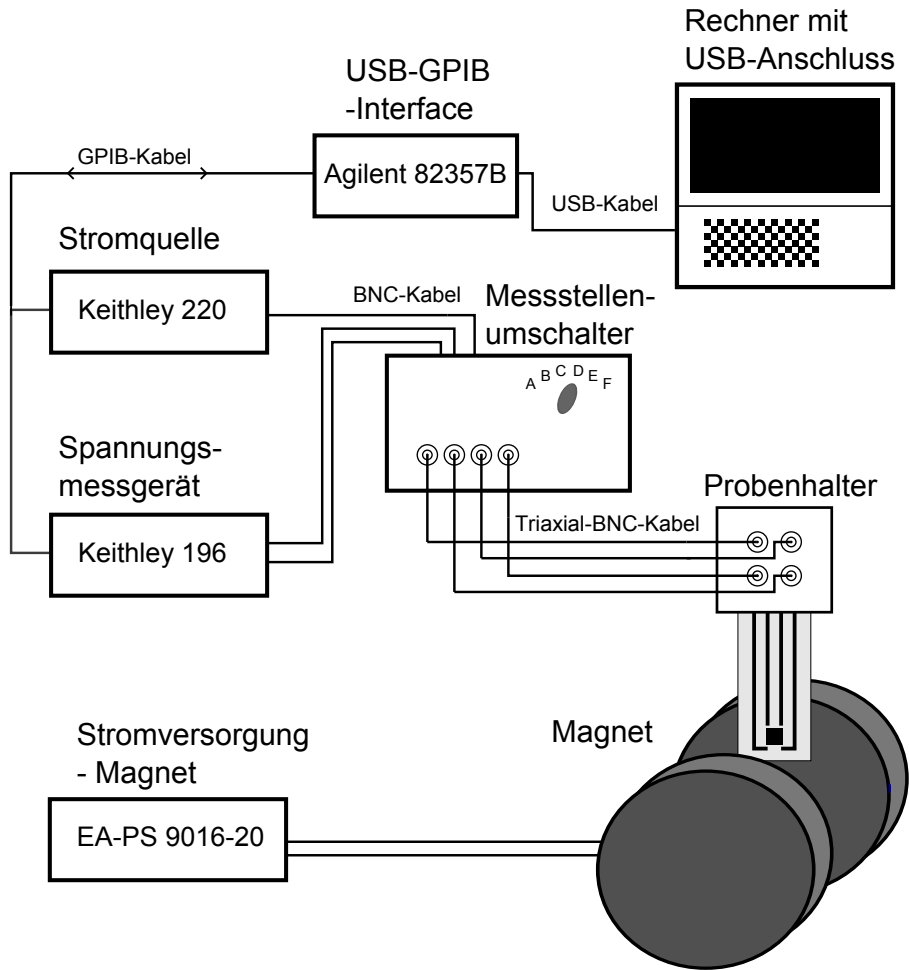


Abbildung 3.2.: Schematischer Aufbau der Messapparatur

Schalterstellung	Magnetfeldpolung	Vorzeichen Strom $I$	Kontaktbeschaltung		Bezeichnung
			Strom $I$	Spannung $U$	
B	+	+	2 → 4	3 → 1	$U_{24,31}^+$
B	+	-	4 → 2	3 → 1	$U_{42,31}^+$
A	+	+	1 → 3	4 → 2	$U_{13,42}^+$
A	+	-	3 → 1	4 → 2	$U_{31,42}^+$
B	-	+	2 → 4	3 → 1	$U_{24,31}^-$
B	-	-	4 → 2	3 → 1	$U_{42,31}^-$
A	-	+	1 → 3	4 → 2	$U_{13,42}^-$
A	-	-	3 → 1	4 → 2	$U_{31,42}^-$

Tabelle 3.1.: Messkonfiguration für die Hall-Effekt-Messung bei Schaltkastenstellung „+“. Die Magnetfeldpolung bezieht sich auf die Richtung des Stromes im Magneten.



Schalter- stellung	Vorzeichen Strom $I$	Kontaktbeschaltung		Bezeichnung
		Strom $I$	Spannung $U$	
D	+	1 → 2	3 → 4	$U_{12,34}$
D	-	2 → 1	3 → 4	$U_{21,34}$
E	+	3 → 4	2 → 1	$U_{34,21}$
E	-	4 → 3	2 → 1	$U_{43,21}$
F	+	3 → 2	4 → 1	$U_{12,34}$
F	-	2 → 3	4 → 1	$U_{12,34}$
C	+	1 → 4	3 → 2	$U_{12,32}$
C	-	4 → 1	3 → 2	$U_{41,32}$

Tabelle 3.2.: Messkonfiguration für die Widerstandsmessung bei Schaltkastenstellung „+“.

## 3.2. Steuerprogramm Hall\_rho.exe

Die Aufnahme der Messdaten sowie Berechnungen erfolgen mit dem Programm **Hall\_rho.exe**. Es wurde in der Entwicklungsumgebung *LabVIEW<sup>TM</sup>* von National Instruments erstellt. Die Funktionsweise und ein typischer Ablauf sollen im Folgenden näher beschrieben werden:

### 0: Vorbereitung

Vor dem Starten des Programms sind Stromquelle, Spannungsmessgerät sowie Messstellenumschalter einzuschalten. Damit die Stromquelle erfolgreich angesprochen werden kann, muss die grüne Kontrolllampe des *USB-GPIB*-Kontrollinterface leuchten.

### 1: Messeinstellungen

Beim Start von **Hall\_rho.exe** erscheint zunächst der Reiter mit den Messeinstellungen im Vordergrund, siehe Abbildung 3.3.

Im Messmenü ① lässt sich zwischen drei Modi wählen:

Bei dem **Widerstand**-Modus folgt man den acht Messkonfigurationen aus Tabelle 3.2 und der spezifische Flächenwiderstand wird mit Hilfe der van-der-Pauw-Faktoren bestimmt. Im Modus **Halleffekt** werden die 8 Messkonfigurationen aus Tabelle 3.1 zur Bestimmung des Hallkoeffizienten sowie der Ladungsträgerbeweglichkeit verwendet. **Halleffekt und Widerstand** kombiniert die beiden gerade genannten Modi. Zusätzlich zu den genannten Größen wird die Ladungsträgerbeweglichkeit vom Programm errechnet.

In das Feld ② wird der gewünschte Messstrom eingetragen. Als Sicherheitsmaßnahme ist die Eingabe auf maximal 1000  $\mu\text{A}$  begrenzt, wenn Feld ③ nicht aktiviert (grün) ist. Durch Betätigen der Taste ③ lässt sich diese Begrenzung ausschalten und der Strom kann frei bis zur maximalen Ausgabe der Stromquelle von 0.1 A geregelt werden.

### 3. Versuchsaufbau und Programmfunktion

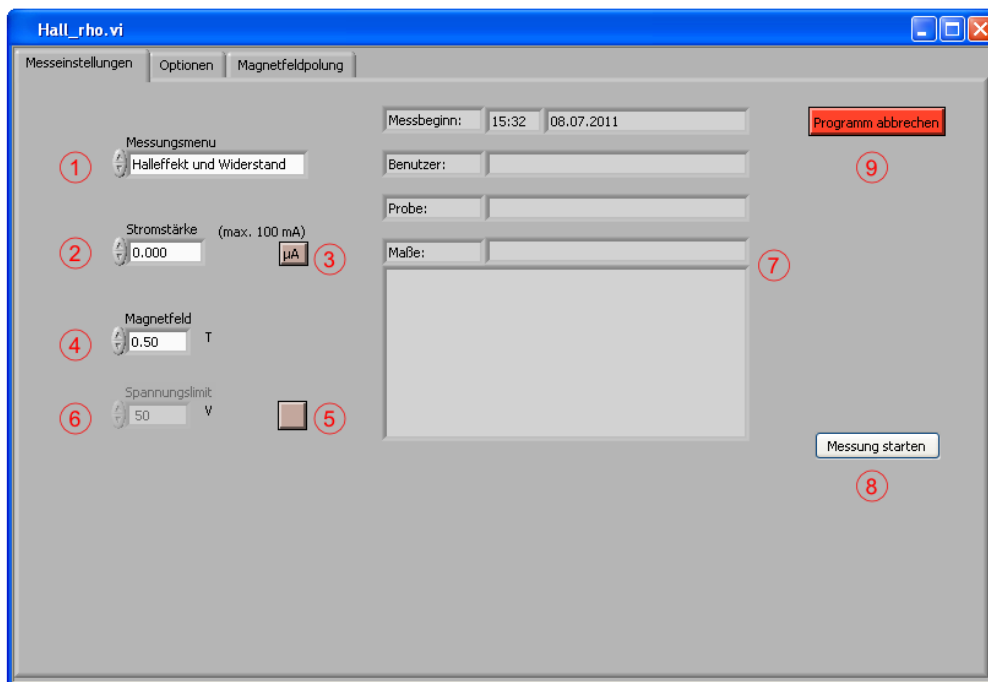


Abbildung 3.3.: Ausschnitt der Bedienoberfläche von **Hall\_rho.exe**

Für die Modi mit Hall-Effekt-Messung muss in Feld ④ das Magnetfeld angegeben werden. In der bestehenden Konfiguration liefert der Magnet bei 10 A etwa 0.5 T.

Feld ⑥ zeigt die Spannungsbegrenzung der Stromquelle an. Es ist standardmäßig gesperrt und hat einen Wert von 50 V. Mit Hilfe der Taste ⑤ lässt es sich bei Bedarf freischalten und die Spannungsbegrenzung im Intervall zwischen 1–105 V wählen. Wenn die Spannungsbegrenzung während der Messung anschlägt, tritt eine „Overlimit“-Warnung auf. In diesem Fall kann die Begrenzung auch während der Laufzeit geändert werden.

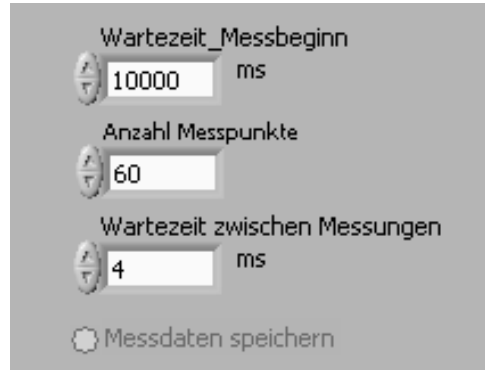
Die Maske im rechten Teil des Reiters ⑦ dient der Dokumentation der Messung. Informationen zu Experimentator und der gemessenen Probe helfen auch nach längerer Zeit die Messdaten richtig zuzuordnen. Die Daten in diesen Feldern werden beim Speichern der Messdatendatei angefügt.

Die Taste ⑧ **Messung Starten** übernimmt die Einstellungen und sperrt die Felder mit Ausnahme der Maske. Stromstärke und Spannungslimit werden der Stromquelle übergeben und der Reiter **Schalterstellung**, siehe Abbildung 3.5, wird aufgerufen.

Bei Aktivierung der Taste **Programm abbrechen** ⑨ sendet das Programm der Stromquelle einen Ausgabestopp-Befehl zu und beendet dann die Ausführung des Programms. Diese Taste findet sich überall im Programm wieder, um einen

Programmabbruch und das Schnellabschalten der Stromquelle jederzeit möglich zu machen.

Im Reiter **Optionen** befinden sich weitere wichtige Einstellmöglichkeiten für die Datennahme. So lässt sich die Zeit zwischen Aktivieren der Stromquelle und Auslesen der ersten Spannungsmessung einstellen, um zum Beispiel kapazitär bedingte Schwankungen zu unterbinden. Die Anzahl der Messpunkte, die für den Mittelwert registriert werden, können angegeben werden und es gibt die Möglichkeit, ein Zeitintervall zwischen den einzelnen Messpunkten einzustellen.



Durch Aktivieren des Kontrollkästchens **Messdaten speichern**, werden die Daten jedes Messpunktes der Messdatei angehängt.

Abbildung 3.4.: Ausschnitt des Reiters **Optionen**

## 2: Schalterstellungen

Innerhalb dieses Reiters **Schalterstellungen**, siehe Abbildung 3.5, wird der eigentliche Messvorgang koordiniert.

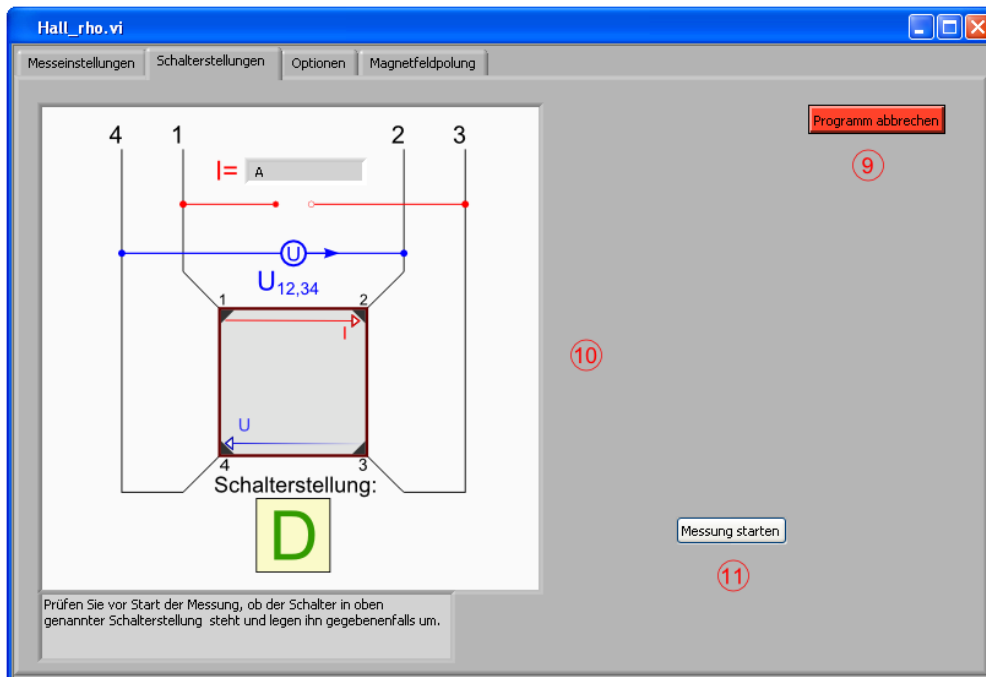


Abbildung 3.5.: Ausschnitt der Bedienoberfläche von **Hall\_rho.exe**

### 3. Versuchsaufbau und Programmfunktion

---

Das Bild ⑩ in Abbildung 3.5 zeigt die Schaltkonfiguration an, die gemessen werden soll. Die Schalterstellung muss vom Benutzer entsprechend am Messstellungsumschalter umgelegt werden. Bei der Hall-Effekt-Messung wird, wenn das Magnetfeld eingeschaltet beziehungsweise umgepolt werden muss, durch den Aufruf des Reiters **Magnetfeldpolung** darauf aufmerksam gemacht.

Mit **Messung starten** ⑪ wird der Strom aktiviert und die Messung gestartet. Nach Beenden der Messung werden die Messwerte in einer Tabelle neben dem Bild angezeigt. Zusätzlich werden der Mittelwert, die Standardabweichung und die prozentuale Abweichung der Standardabweichung vom Mittelwert berechnet und ausgegeben.

Der Benutzer kann mit der nächsten Messungskonfiguration durch Betätigen der eingblendeten Taste **Weiter** fortfahren. Bei beispielsweise hohen Schwankungen, kann alternativ mit der eingblendeten Taste **Wiederholen** die Messung erneut gemessen werden.

Ist beim Wechsel der Messkonfiguration eine Veränderung einer Schalterstellung nötig, so wird der Benutzer visuell darauf aufmerksam gemacht, indem der Kasten mit der Schalterstellung von gelb zu grün beziehungsweise von grün zu gelb springt.

Nachdem alle Messkonfigurationen des entsprechenden Modus gemessen wurden, werden die Daten noch einmal zusammengefasst und in einem Reiter dargestellt.

#### 3: Messergebnisse

Neben einer Tabelle mit den Mittelwerten aus den Messkonfigurationen berechnet das Programm mit Hilfe der in Kapitel 2 dargelegten Gleichungen den van-der-Pauw-Faktor und den spezifischen Flächenwiderstand, beziehungsweise den Flächenhallkoeffizienten, die Flächenladungsträgerdichte und die Ladungsträgerbeweglichkeit. Die Ergebnisse für die Flächenladungsträgerdichte gelten nur, wenn keine gemischte Leitung vorliegt. Weiterhin wurden die Hall-Streukoeffizienten in den Berechnungen vernachlässigt.

Die Werte der letzten Messung werden in der Datei „LastMeasurement.txt“ automatisch gespeichert. Zusätzlich lässt sich die Messung mit der Taste **Speichern** an einem vom Benutzer definierten Ort speichern.

Durch Drücken der **Nicht Speichern**-Taste gelangt man zurück zu den Messeinstellungen und kann eine neue Messung starten. Die Einstellungen für die vorige Messung bleiben dabei erhalten, so dass eine einfache Mehrfachmessung möglich ist.

#### 4: Beenden

Bei Schließen des Programms wird die Stromquelle auf 0.00 A gesetzt und die Ausgabe deaktiviert. Es bleibt die in **0: Vorbereitung** aufgeführten Schritte in umgekehrter Richtung auszuführen.

## 4. Testmessungen

Um das neue Programm **Hall\_rho.exe** zu testen, werden Vergleichsmessungen zwischen diesem und dem alten Programm **HALLCHR** vorgenommen. Dazu müssen zunächst Hall-Proben zugesägt, mit Kontakten versehen und auf eine Hall-Platine aufgebracht werden.

### 4.1. Probenpräparation

Als Probenmaterial dient mit Silizium (Si) dotiertes Galliumnitrid (GaN), das von Oliver Ambacher und Klaus Köhler am IAF<sup>1</sup> in Freiburg hergestellt worden ist. Die Daten für das für die Proben verwendete Material stehen in Tabelle 4.1.

Probe	Epitaxie-Nummer	$d$	$n(Si)$
#1	GN4876	900 nm	$3,7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
#2	GN4877	900 nm	$1,1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
#3	GN4885	970 nm	$9,2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Tabelle 4.1.: Das Probenmaterial besteht aus dem Substrat Saphir, auf dem eine 2  $\mu\text{m}$  GaN Zwischenschicht aufgewachsen ist. Daran schließt sich die mit Silizium dotierte GaN der Dicke  $d$  und mit der Dotierungsdichte  $n(Si)$  an.

Im ersten Arbeitsschritt werden die Proben mit Hilfe einer Diamantdrahtsäge auf die Maße 6 mm  $\times$  6 mm zugeschnitten. Anschließend wird sie mit Ethanol und Azeton gereinigt.

Um die Proben auf das Aufdampfen der Kontakte vorzubereiten und die Oxidschicht zu entfernen, schließt sich ein Ätzvorgang an.

Die Proben werden je  $1\frac{1}{2}$  Minuten in 37 prozentige Salzsäure (HCl) und, nach kurzem Eintauchen in destilliertes Wasser, weitere  $1\frac{1}{2}$  Minute in 10 prozentige Kalilauge (KOH) eingetaucht und dabei bewegt. Anschließend wird die Probe erneut in destilliertes Wasser eingetaucht. Ein Indiz für eine erfolgreiche Reinigung ist, wenn das Wasser an der Oberfläche der Probe abperlt.

Die Kontakte werden mit Hilfe einer Bedampfungsanlage im Vakuum aufgedampft. Eine Aluminium-Maske beschränkt den bedampften Bereich auf die gewünschte Größe und Position. Die verwendeten Kontaktmaterialien beeinflussen maßgeblich den Kontaktwiderstand der Probe. Da ohmsche Kontakte gewünscht sind, sollte die Bandstruktur der Probe an die Kontaktmaterialien

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik

#### 4. Testmessungen

---

angepasst sein, um möglichst kleine Potential-Barrieren auszulösen. Fehrer [10] führt für n-dotiertes GaN einige Metallkombinationen mit ihren zugehörigen Widerständen auf. Die Kontakte der ersten Probe bestehen aus einer 20 nm dicken Titanschicht (Ti) überzogen mit 300 nm Gold (Au). Für die zweite und dritte Probe wurde an Stelle des Titans Chrom (Cr) der gleichen Schichtdicke aufgedampft.

Das van-der-Pauw-Theorem fordert kleine, am Rand liegende Kontakte. Diese werden in der Praxis durch Proben in Kleeblatt-Form realisiert. Durch Einschnitte in die Probe wird der Weg zwischen Kontakt und ungestörter Probenfläche vergrößert. Damit werden die Fehler, die durch die endliche Ausbreitung der Probe und ihrer Kontakte entstehen, verringert. Bei den vorliegenden Proben reicht es, die elektrisch leitfähigen GaN-Schichten mit einem Diamantritzer zu entfernen, da Saphir ein Isolator ist. Jeweils mittig wird die Probe mit dem Diamanten 2 mm weit von den Seitenkanten zum Zentrum hin eingeritzt. Dabei ist darauf zu achten, die GaN-Schicht in der Probenmitte nicht zu beschädigen.

Die Probe wird auf einer Hall-Platine aufgeklebt und die aufgedampften Kontakte mittels Leitsilber mit den Leiterbahnen verbunden. Nachdem sich das Trägermittel des Leitsilbers verflüchtigt hat, werden die Widerstände der einzelnen Kontaktpaare per Digitalmultimeter überprüft.

Für Probe #1 haben sich Kontaktwiderstände im  $k\Omega$  bis  $M\Omega$ -Bereich ergeben. Bei genauer Betrachtung der Kontakte, siehe Abbildung 4.1, ist zu erkennen, dass sich die Goldschicht teilweise von der Probenoberfläche gelöst hat. Das verringert die vergleichsweise kleine Kontaktfläche eines Viertelkreises mit einem Radius von 1,2 mm je Kontakt weiter. Die Kontaktschichten wurden nicht erhitzt und so konnte kein Einlegieren stattfinden, dies könnte einerseits den Ablösevorgang begünstigt und andererseits den Kontaktwiderstand insgesamt verschlechtert haben.

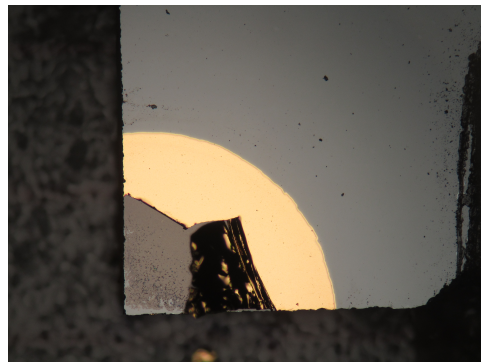


Abbildung 4.1.: Teilaufnahme von Probe #1: Der Ti/Au-Kontakt ist teilweise von der Probe abgelöst.

Um den Kontaktwiderstand zu senken, werden die Kontakte mit Hilfe von GaIn überkontaktiert. Das verwendete Mischverhältnis beträgt 8,3 mg Gallium zu 2,3 mg Indium. Bei Raumtemperatur ist das GaIn flüssig und lässt sich mit einem Pinsel auftragen. Die Kontaktwiderstände sind dadurch auf etwa  $200\ \Omega$  gesenkt worden. In Abbildung 4.2 ist die Probe dargestellt. Es lassen sich gut die Einritzungen an den Seitenmitten erkennen. Um einem Ablösen der Kontakte vorzubeugen, wird für Probe #1 und #2 der Ritzvorgang zeitlich vor dem Ätzen ausgeführt. Zudem wird Chrom anstatt Titan verwendet, da es als robustes



Abbildung 4.2.: Bild der kontaktierten Probe #1 auf einer Hall-Platine. Die GaIn-Kontakte und Einritzungen sind deutlich zu erkennen.

Trägermaterial bekannt ist und auch unlegiert einen akzeptablen spezifischen Kontaktwiderstand aufweist [10]. Sowohl Probe #2 als auch #3 weisen nicht für alle Kontakte gleich große Kontaktflächen auf. Wahrscheinlich ist die Maske für das Bedampfen verrutscht.

Da die Widerstände für die Kontaktpaare auch bei diesen Proben im  $k\Omega$ -Bereich gelegen haben, sind sie ebenfalls mit GaIn überkontaktiert worden. Dies deutet darauf hin, dass die aufgedampften Kontakte allgemein zu klein dimensioniert sind.

Das geeignete Kontaktieren von Nitrid-Halbleitern für Hall-Proben stellt allgemein noch eine Herausforderung dar. Da es bei den Testmessungen weniger um die absoluten Messergebnisse als um den Vergleich der Ergebnisse für die Apparatur mit neuer und alter Ansteuerung geht, werden die Proben mit der oben beschriebenen ungewissen Kontaktierungsweise verwendet.

## 4.2. Messungen und Auswertung

Die Proben werden bei einem Strom von  $I = 100 \mu\text{A}$  und einem Magnetfeld von  $B = 0.5 \text{ T}$  bei Raumtemperatur vermessen. Bei **Hall\_rho.exe** wird über 60 Messpunkte pro Messkonfiguration gemittelt, die 10 Sekunden nach Aktivierung der Stromquelle aufgezeichnet werden.

Probe	$f$	$\rho_S$ [ $\Omega/\square$ ]	$R_{HS}$ [ $\text{cm}^2/(\text{A s})$ ]	$n_S$ [ $1/\text{cm}^2$ ]	$\mu_H$ [ $\text{cm}^2/(\text{V s})$ ]
#1	1,000	85,0	$-2,23 \cdot 10^4$	$2,80 \cdot 10^{14}$	261,8
#2	0,985	189,5	$-7,17 \cdot 10^4$	$8,70 \cdot 10^{13}$	378,4
#3	0,991	37,0	$-7,74 \cdot 10^3$	$8,06 \cdot 10^{14}$	209,3
#1	1,000	85,1	$-2,22 \cdot 10^4$	$2,81 \cdot 10^{14}$	261,0
#2	0,985	189,3	$-7,16 \cdot 10^4$	$8,72 \cdot 10^{13}$	378,3
#3	0,991	37,0	$-7,69 \cdot 10^3$	$8,12 \cdot 10^{14}$	207,6

Tabelle 4.2.: Ergebnisse der Testmessungen, oben für **HALLCHR**, unten für **Hall\_rho.exe**.

Die Abweichungen zwischen den Werten der alten und der neuen Ansteuerung aus Tabelle 4.2 betragen weniger als 1% und liegen im Bereich der statistischen Schwankungen einzelner Messdurchläufe einer Ansteuerung. Es werden folglich keine systematischen Fehler durch die Modernisierung in den Versuchsaufbau eingebaut.

Die Werte des van-der-Pauw-Faktors für Probe #2 ( $f = 0.985$ ) und #3 ( $f = 0.991$ ) weichen leicht von 1 ab, was sich gut mit den unsymmetrischen Cr/Au-Kontakten deckt.

Köhler et al. haben Messungen zu dem gleichen Probenmaterial veröffentlicht [9]. Zum Vergleich der Messwerte werden die Ergebnisse der Testmessungen für die reziproken spezifischen Flächenwiderstand mit roten Kreuzen in einen der Veröffentlichung [9] entnommenden Graphen eingezeichnet, siehe Abbildung 4.3. Analog werden die Ergebnisse der Ladungsträgerbeweglichkeit mit roten Kreuzen in Abbildung 4.4 in den Graphen von Köhler et al. eingezeichnet.

Die Werte für den reziproken spezifischen Widerstand weisen gute Übereinstimmungen mit den von Köhler et al. gemessenen Daten auf.

Die Ergebnisse für die Beweglichkeiten weichen dagegen alle nach oben ab. Bei den Werten der Testmessung handelt es sich streng genommen um die sogenannte Hall-Beweglichkeit, die um den Hall-Streukoeffizienten von der Ladungsträgerbeweglichkeit abweicht. Berücksichtigt man weiter, dass die verwendeten Kontaktierungen der Proben weitere Ungewissheiten bergen, lassen sich diese Abweichungen nach oben erklären.



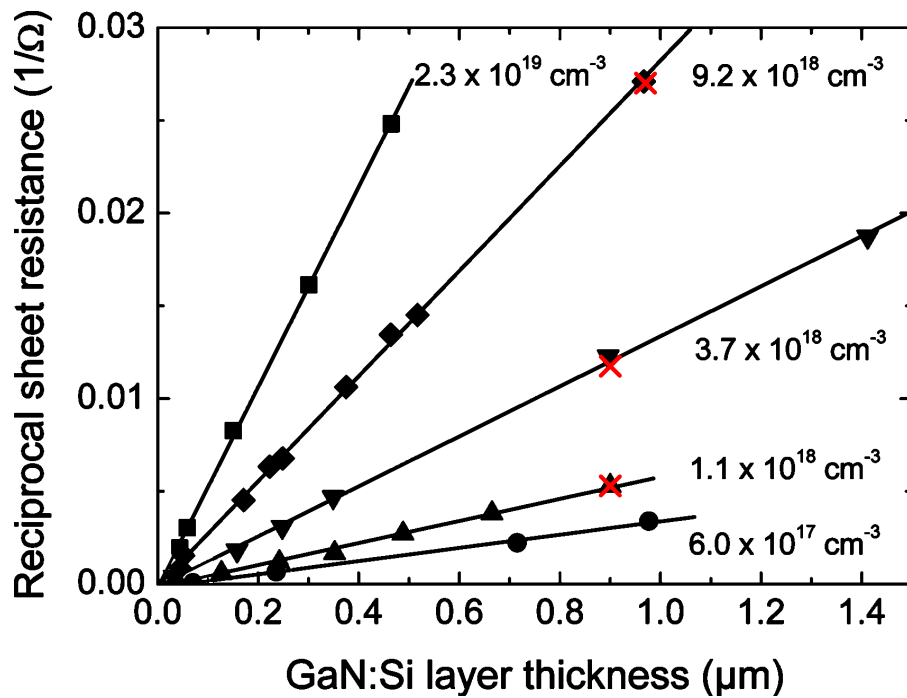


Abbildung 4.3.: Reziproker Flächenwiderstand gegen Si-Dotierungskonzentration. Graphik und schwarze Datenpunkte sind aus [9] entnommen. Rote Datenpunkte sind Ergebnisse der Testmessungen.

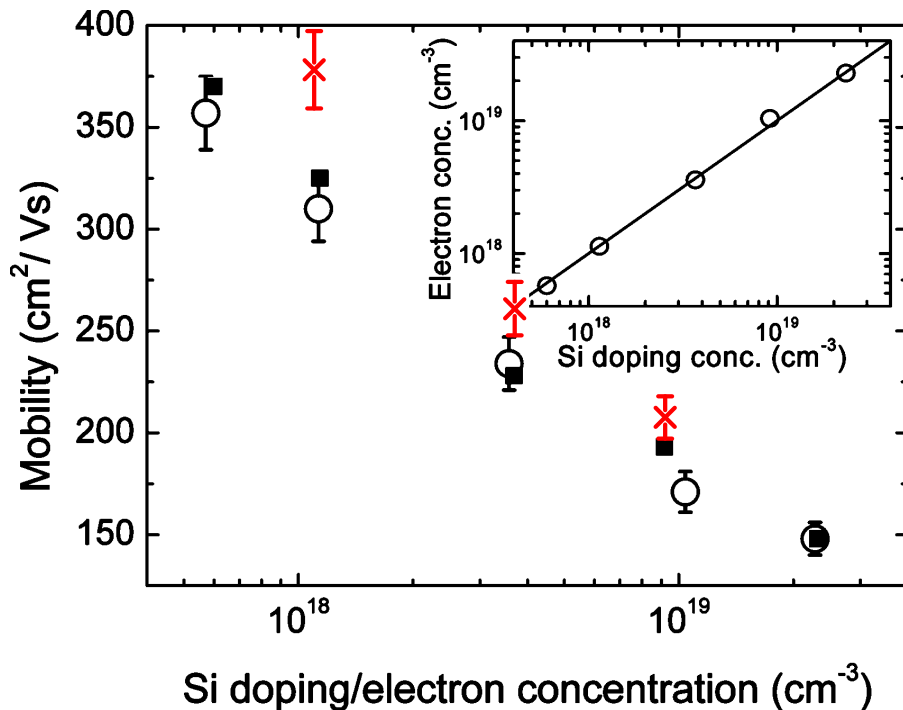


Abbildung 4.4.: Beweglichkeit gegen Si-Dotierungskonzentration. Graphik und schwarze Datenpunkte sind aus [9] entnommen. Rote Datenpunkte sind Ergebnisse der Testmessungen.



## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Nach Einarbeitung in die Programmiersprache *LabVIEW* wurde damit erfolgreich das Mess- und Steuerprogramm **Hall\_rho.exe** entwickelt. Die Funktionstüchtigkeit des Steuerprogramms sowie des verwendeten *USB-GPID*-Kontrollinterface wurde in Testmessungen belegt. Die Messungen haben keine signifikante Abweichung der Messergebnisse gegenüber der alten Ansteuerung gezeigt.

Der Vergleich der Messergebnisse mit veröffentlichten Werten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

Bei der Kontaktierung wurde eine Kombination aus GaIn- und aufgedampften Kontakten verwendet. Eine weitere Untersuchung von GaIn-Kontakten in Verbindung mit Leitsilberkontaktierung erscheint interessant.

Bei den Arbeiten an der Apparatur wurde ein alter defekter Messstellenumschalter von Christop von Nathusius [7] gefunden, der ein Rechner gesteuertes Schalten ermöglicht hat. Mit einem derartigen Messstellenumschalter und einer ansteuerbaren Stromquelle, die es ermöglichen würde das Magnetfeld in reproduzierbaren Hystereseschlaufen zu fahren, wäre eine vollautomatisierte Hall-Effekt-Messapparatur möglich. Diese würde in Verbindung mit einem entsprechenden Steuerprogramm, zum Beispiel Langzeitmessungen von radioaktiv implantierten Proben erlauben.



## A. Hall\_rho.exe CD-ROM

Das Mess- und Steuerprogramm **Hall\_rho.exe** wurde im Rahmen dieser Bachelorarbeit erstellt. Da es mit der graphischen Programmiersprache *LabVIEW<sup>TM</sup>* geschrieben wurde, existiert kein Quellcode in Textform. Die beiliegende CD-ROM enthält neben der Quelldatei, das kompiliertes Programm. Das Programm benötigt eine *LabVIEW<sup>TM</sup>*-Laufzeitumgebung, daher befindet sich eine weitere Programmversion auf der CD-ROM, die diese zusätzlich installiert.



# Literaturverzeichnis

- [1] Guido Rohrlack *Ein Halleffektmeßplatz zur Charakterisierung von Halbleitern*, Univerität Bonn, 1992
- [2] Guido Rohrlack *Halleffektmessungen an Halbleitern dotiert mit Radioisotopen*, Univerität Bonn, 1996
- [3] Thomas Gerschke *Aufbau eines Hochtemperatur-Halleffekt-Messplatzes zur Untersuchung von Ionenleitern*, Univerität Bonn, 2005
- [4] P. Blood, J. W. Orton *The Electrical characterization of semiconductors: majority carriers and electron states*, Academic Press Limited, 1992
- [5] L. J. van der Pauw *A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape*, Philips Res. Rep. 13, 1958
- [6] L. J. van der Pauw *A Method of Measuring the Resistivity and Hall Coefficient on Lamellae or Arbitrary Shape*, Philips Technical Review, 1958
- [7] Christoph von Nathusius *Halleffektmessung an Halbleitern Automatisierung eines Meßplatzes*, 1995
- [8] K. Seeger *Semiconductor Physics*, Springer Verlag, 1973
- [9] K. Köhler, J. Wiegert, H. P. Menner, M. Maier, L. Kirste *The surface Potential of GaN:Si*, Jornal of Applied Phisics 103, 2008
- [10] M. Fehrer *Untersuchung der elektrischen Eigenschaften breitlückiger Halbleiterstrukturen für optoelektrische Anwendungen*, Universität Bremen, 1999





# Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Privatdozent Reiner Vianden für die Möglichkeit diese Arbeit in seiner Arbeitsgruppe zu schreiben und seine freundliche Unterstützung.

Ich danke Herrn Professor Karl Maier für seine Bereitschaft meine Arbeit, trotz wohlverdientem Ruhestand, zu begutachten.

Der gesamten Arbeitsgruppe möchte ich für die freundliche Aufnahme und Atmosphäre danken, sowie für die reichhaltigen Erfahrungen, die ich in ihr sammeln durfte. Insbesondere möchte ich Christian Karrasch nennen und danken, dafür dass er mich unter seine Fittiche genommen hat und stets meinen Ideen aufgeschlossen gegenüberstand.

Ich danke Bert Kann für seine „Kontaktfreudigkeit“, das Aufdampfen der Metallkontakte und kurzweilige Gespräche.

All denjenigen, die hier nicht explizit aufgeführt sind und die mich unterstützt haben, sei natürlich auch ausdrücklich gedankt.



Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Bonn, den 22. Juli 2011

Unterschrift

