



Hall-Effekt

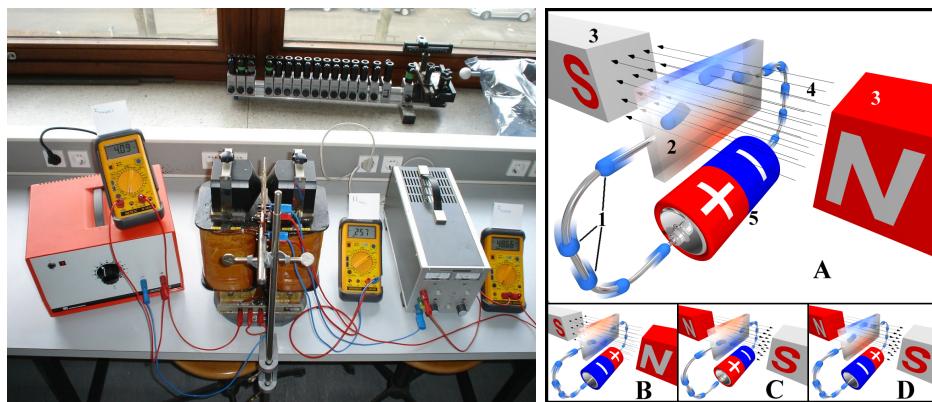


Abbildung 1: links: Versuchsaufbau; rechts: Prinzip des Hall-Effekts, Quelle: [Peo05]

In diesem Experiment werden Sie den HALL-Effekt, mit dem man statische Magnetfelder messen kann, aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln betrachten: Zum einen werden Sie den Zusammenhang zwischen HALL-Spannung und Magnetfeld messen und zum anderen den Unterschied zwischen einer n-und einer p-Leitung kennenlernen. Weiterhin werden Sie eine Möglichkeit beigebracht bekommen, Ladungsträgerdichten verschiedener Materialien zu bestimmen.

Für die Vorbereitung zum Thema Halbleiter und Dotierung bietet der Anhang 3.1 einen fundierten Überblick.

1 Vorbereitung

1.1 Realitätsbezug

Der HALL-Effekt misst primär magnetische Felder. Durch Sekundäreffekte ist es damit möglich, Winkel, Positionen¹, Geschwindigkeiten und Ströme zu bestimmen. Weiterhin

¹Quelle: Yiming Abulizi: Permanentmagnetwerkstoffe. <http://www-user.uni-bremen.de/~gla/b/pdf/permanent.pdf>, Stand: 02.03.07

können mit diesem Effekt auch Ladungsträgerdichten und -beweglichkeiten berechnet werden.

Bei tiefen Temperaturen ist die HALL-Spannung in Abhängigkeit vom Strom quantisiert². Dabei liegt die Genauigkeit, mit der solche Plateaus produziert werden können, bei einem Milliardstel, was dazu führt, dass dieser Effekt weltweit in den Staatsinstituten als Basis für konstante Referenzwiderstände bei Kalibrierungen benutzt wird³.

Diese Anwendungen des Effektes sind hoch technisch. Sie werden im späteren Schulalltag in der (kommerziell vertriebenen) HALL-Sonde vor allem ein einfaches Hilfsmittel sehen, statische Magnetfelder zu messen.

1.2 Eigenrecherche

Da wir hier mit Halbleitern arbeiten, müssen Sie sich bereits im Vorfeld etwas Basiswissen über dieses Material aneignen:

- Bitte informieren Sie sich grob darüber, was Energiebänder sind und wie diese Zustände kommen⁴. Gehen Sie dabei im Speziellen auf den Unterschied zwischen Halbleitern (HL) und Metallen ein⁵.
- Wegen den unterschiedlichen Bänderkonfigurationen haben Metalle und HL sehr unterschiedliche Eigenschaften, Strom zu leiten. Zeichnen und erklären Sie zunächst recht kurz eine Kurve, die die Abhängigkeit der Leitfähigkeit eines Metalls von der Temperatur zeigt⁶ und zeichnen Sie anschließend schematisch eine entsprechende Kurve für einen HL bei Eigenleitung darüber⁷. Betonen Sie dabei die Größenordnung der Ladungsträgerdichten in Metallen und HL.
- Durch sog. Dotierung wird die Leitfähigkeit eines HL enorm verbessert. Informieren Sie sich in diesem Zusammenhang über die n- und p-Dotierung⁸ und gehen Sie dabei sowohl auf die erhöhte Ladungsträgerdichte als auch die Begriffe Majoritäts- bzw. Minoritätsträger ein.

Nun geht es um die Grundlagen zur Magnetfeldmessung:

- Informieren Sie sich, wie sich elektrische Ladungen (in unserem Fall: Elektronen bzw. Löcher) in statischen elektromagnetischen Feldern bewegen⁹. Sie dürfen diesen Teil der Vorbereitung, falls Sie ihn bereits für einen anderen Versuch angefertigt haben, kopieren (für eine spätere Nachbereitung sehr empfehlenswert).

²Quanten-Hall-Effekt

³Quelle: Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Der Quanten-Hall-Effekt. http://www.ptb.de/de/org/2/Inhalte/qhe/_quantenhalleffekt.htm, Stand: 02.03.2007

⁴[Tip94], S. 1356 ff. und [Mes04], S. 857 ff.

⁵[Tip94], Grafik S. 1358 und [Mes04], Grafik S. 860

⁶[Mes04], Grafik S. 327

⁷[Mes04], Grafik S. 866

⁸[Tip94], S. 1359 ff. und [Mes04], S. 864 ff.

⁹[Tip94], S. 813 und S. 627 sowie [Mes04], S. 296

I_M [A]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
B [mT]	9	62	135	210	275	350	420	475	535	590
ΔB [mT]	$\pm 2,1$	$\pm 17,7$	$\pm 18,3$	$\pm 18,7$	$\pm 18,5$	$\pm 42,0$	$\pm 56,3$	$\pm 55,4$	$\pm 55,1$	$\pm 54,5$
I_M [A]	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5
B [mT]	620	655	680	695	705	720	730	740	745	750
ΔB [mT]	$\pm 53,2$	$\pm 52,3$	$\pm 51,3$	$\pm 50,1$	$\pm 49,1$	$\pm 48,3$	$\pm 47,6$	$\pm 47,0$	$\pm 46,3$	$\pm 45,8$

Tabelle 1: Eichtabelle für das B -Feld zwischen den platten Seiten der Polschuhe des Elektromagneten (Typ: LH 514 50), die sich im Abstand von 7 mm gegenüberstehen

- Bearbeiten Sie – wie bei allen anderen Experimenten auch – die grundlegenden Überlegungen aus Aufgaben 2.1 und 2.2 bereits im Vorfeld.

1.3 Das Magnetfeld

In diesem Versuch werden Sie ein Magnetfeld ausmessen. Dieses liefert ein starker Elektromagnet, der mit einem Strom von bis zu 10 A betrieben werden kann. Zur Bestimmung des B -Feldes aus dem Versorgungsstrom I_M können Sie Eichtabelle 1 nutzen, die mit einer geeichten HALL-Sonde speziell für dieses Experiment erstellt worden ist.

1.4 Die Hall-Sonde

Für die Messung stehen Ihnen eine n- und eine p-dotierte Germaniumsonde zur Verfügung. Diese können mit einem maximalen Sondenstrom von 50 mA betrieben werden, der von einem stabilisierten Netzgerät¹⁰ geliefert wird. Um die Hall-Spannung messen zu können, ist ein besonders empfindliches Messgerät mit einem Messbereich von 100 – 300 mV notwendig.

1.5 Der Hall-Effekt

Hier werden die physikalischen Grundlagen der Sonden erklärt, mit denen Sie die Messergebnisse richtig interpretieren können: Die Lorentz-Kraft wirkt auch auf Ladungsträger (LT) in einem Leiter, den sie normalerweise geradlinig durchfließen. Dies bewirkt eine zur Stromrichtung senkrechte Ablenkung der Ladungsträger. In einem Leiter, z.B. einer Platte, deren Fläche senkrecht von einem Magnetfeld durchdrungen wird (Abb. 1 und 2), stellt sich daher an zwei gegenüberliegenden Seiten eine unterschiedliche Ladungsträgerkonzentration ein. Dadurch entsteht eine Querspannung, die man als HALL-Spannung bezeichnet. Diese Spannung zeigt sich durch ein elektrisches Feld, das der Lorentzkraft entgegenwirkt, so dass sich nach kurzer Zeit ein Gleichgewicht der beiden Kräfte einstellt.

¹⁰Konstanter Typ: 24 K 32 R 4 von Gossen

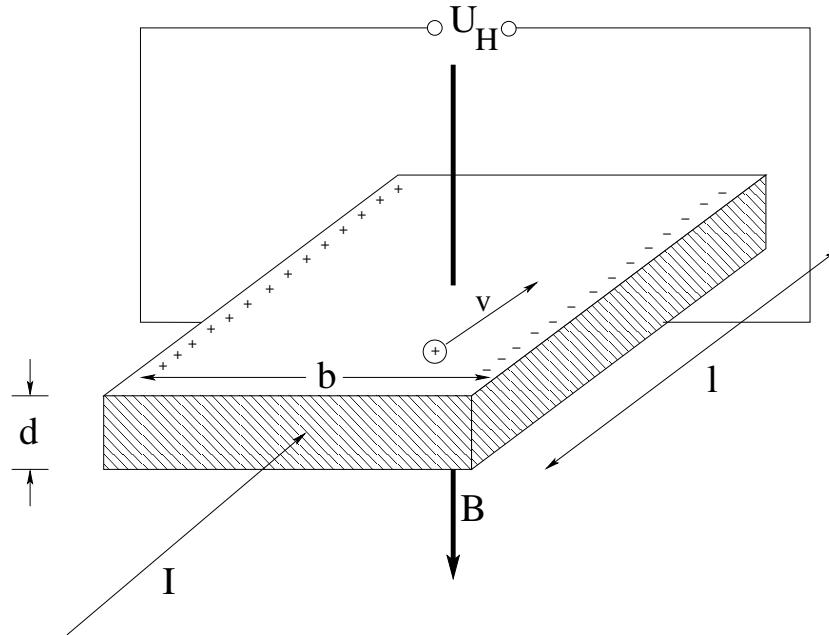


Abbildung 2: Entstehung der HALL-Spannung

Bezeichnungen

- Ist die Ladung q der Ladungsträger $q < 0$, so sind die Elektronen die Majoritätssträger. Man spricht von einem „normalen HALL-Effekt“
- Ist $q > 0$, so tragen hauptsächlich die Löcher zur Leitung bei. Man spricht von einem „anormalen HALL-Effekt“

1.6 Formeln

- Der Zusammenhang zwischen der HALL-Spannung U_H und der Driftgeschwindigkeit v der Ladungsträger lautet:

$$v = \frac{U_H}{B \cdot b}$$

- Der Zusammenhang zwischen der HALL-Spannung U_H und der Beweglichkeit μ der Ladungsträger ist:

$$\mu = \frac{U_H}{E \cdot B \cdot b}$$

wobei zu beachten ist, dass E nicht für das elektrische Feld in HALL-Spannungsrichtung, sondern für das in Sondenstromrichtung steht.

2 Aufgaben

2.1 Formeln

2.1.1 Hall-Spannung

Leiten Sie die Formel für die HALL-Spannung U_H her:

$$U_H = R_H I_S \frac{B}{d}$$

mit $R_H = 1/(nq)$

R_H : HALL-Konstante
 I_S : Sondenstrom
 B : Betrag des Magnetfeldes senkrecht zu I_S

d : Sondendicke
 n : Zahl der Ladungsträger pro Volumen
 q : Ladung der einzelnen Ladungsträger

Hilfestellung:

Ein Strom I ist die Bewegung einer Ladung Q in pro Zeiteinheit t :

$$I = \dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$$

Befinden sich in dem Material N Ladungsträger der Ladung q , so ist natürlich

$$Q = Nq$$

Weiterhin ist es empfehlenswert, mit der Ladungsträger *dichte* n zu rechnen:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N}{lbd}$$

Zusammengefasst erhält man als Zusammenhang zwischen dem Strom I und der Driftgeschwindigkeit v die Beziehung

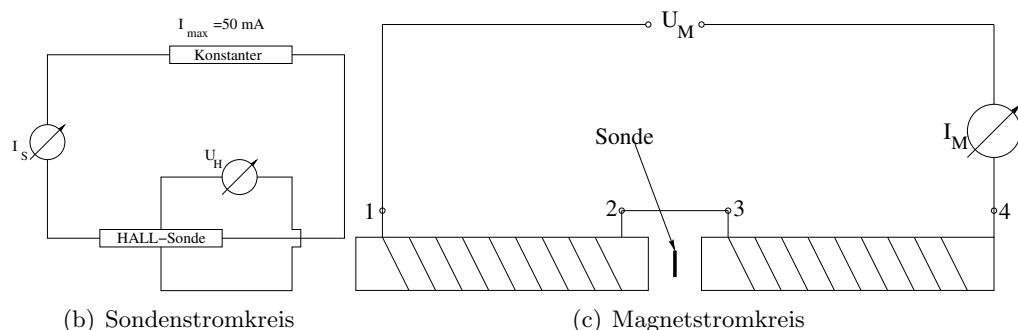
$$\begin{aligned} I &= \dot{Q} = \frac{d}{dt}(qN) = q \frac{d}{dt}(n \cdot V) \\ &= qn \frac{d}{dt}(lbd) \\ &= qnbd \frac{d}{dt}l \\ &= qnbd \cdot v \end{aligned}$$

2.2 Technische Details

Der HALL-Effekt tritt sowohl bei Halbleitern als auch bei Metallen auf. Was könnte der Grund dafür sein, dass hier ein Halbleiter verwendet wird?



(a) Hall-Sonde in Nahaufnahme



(b) Sondenstromkreis

(c) Magnetstromkreis

Abbildung 3: Beschaltung der Sonde und der Magnetfeldspulen. Der Sondenstrom darf nicht größer als 50 mA sein!

2.3 Hall-Spannung U_H in Abhängigkeit vom Magnetfeld B

2.3.1 Wichtige Hinweise

1. Der Konstanter für I_S muss im Strombegrenzungs-Modus betrieben werden. **I_S darf 50 mA nicht überschreiten!**
2. Die Beschaltung der HALL-Sonde ist in Abb. 3(a) und 3(b) zu sehen. Sollte für $B = 0$ eine HALL-Spannung angezeigt werden, so beseitigen Sie diesen Ausschlag durch Drehen am Potentiometer der HALL-Sonde.
3. Die Anschlusspunkte 1, 2, 3 und 4 des Elektromagneten müssen so angeschlossen werden, dass 1 am positiven und 4 am negativen Pol anliegt; 2 und 3 werden miteinander verbunden (siehe Abb. 3(c)). Vor Beginn der Messungen muss der Elektromagnet einmal mit dem Maximalstrom $I_{M,\max} = 9,5$ A betrieben werden. Nun können Sie die angegebene Eichkurve benutzen.

2.3.2 Messung

Nehmen Sie die HALL-Spannung als Funktion der Stärke des magnetischen Feldes B mit der p-und n-dotierten Sonde auf. Halten Sie bei den Messungen den Sondenstrom $I_S = 40$ mA konstant. Wählen Sie für I_M eine Schrittweite von 0,5 A.

Achten Sie beim Wechseln der Sonden darauf, dass die Sonden genau gleich angeschlossen sind und in der gleichen Richtung ins Magnetfeld gebracht werden.

U_H [mV]										
I_M [A]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
B [mT]	9	62	135	210	275	350	420	475	535	590
ΔB [mT]	$\pm 2,1$	$\pm 17,7$	$\pm 18,3$	$\pm 18,7$	$\pm 18,5$	$\pm 42,0$	$\pm 56,3$	$\pm 55,4$	$\pm 55,1$	$\pm 54,5$

U_H [mV]										
I_M [A]	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5
B [mT]	620	655	680	695	705	720	730	740	745	750
ΔB [mT]	$\pm 53,2$	$\pm 52,3$	$\pm 51,3$	$\pm 50,1$	$\pm 49,1$	$\pm 48,3$	$\pm 47,6$	$\pm 47,0$	$\pm 46,3$	$\pm 45,8$

Tabelle 2: Messreihe für die p-dotierte Sonde

2.3.3 Physikalische Grundlagen

Zeichnen Sie für die beiden Sonden eine Skizze, aus der die die HALL-Spannung U_H , der Sondenstrom I_S , die Lorentzkraft F_L , das B -Feld und die Geschwindigkeit v der LT hervorgeht.

U_H [mV]										
I_M [A]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
B [mT]	9	62	135	210	275	350	420	475	535	590
ΔB [mT]	$\pm 2,1$	$\pm 17,7$	$\pm 18,3$	$\pm 18,7$	$\pm 18,5$	$\pm 42,0$	$\pm 56,3$	$\pm 55,4$	$\pm 55,1$	$\pm 54,5$
U_H [mV]										
I_M [A]	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5
B [mT]	620	655	680	695	705	720	730	740	745	750
ΔB [mT]	$\pm 53,2$	$\pm 52,3$	$\pm 51,3$	$\pm 50,1$	$\pm 49,1$	$\pm 48,3$	$\pm 47,6$	$\pm 47,0$	$\pm 46,3$	$\pm 45,8$

Tabelle 3: Messreihe für die n-dotierte Sonde

2.3.4 Auswertung

Stellen Sie den Betrag der HALL-Spannung U_H als Funktion des B -Feldes graphisch dar und tragen Sie exemplarisch einige Fehlerbalken ein¹¹. Erklären Sie den unterschiedlichen Verlauf der beiden Kurven von p- und n-dotiertem Germanium.

2.4 Hall-Spannung U_H in Abhängigkeit des Sondenstroms I_S

Ermitteln Sie die HALL-Spannung U_H als Funktion des Sondenstroms I_S für zwei verschiedene magnetische Feldstärken 655 mT und 475 mT mit den beiden HALL-Sonden. Wählen sie für I_S eine Schrittweite von 5 mA. Stellen Sie die Messwerte graphisch dar und tragen Sie exemplarisch einige Fehlerbalken ein.

I_S [mA]										
U_H [mV]										

Tabelle 4: Messreihe der p-dotierten Sonde für den Spulenstrom $I_M =$

I_S [mA]										
U_H [mV]										

Tabelle 5: Messreihe der p-dotierten Sonde für den Spulenstrom $I_M =$

I_S [mA]										
U_H [mV]										

Tabelle 6: Messreihe der n-dotierten Sonde für den Spulenstrom $I_M =$

¹¹Fehlerbetrachtung für B , Ablesefehler, Messgerättoleranz



Tabelle 7: Messreihe der n-dotierten Sonde für den Spulenstrom $I_M =$

2.5 Ladungsträgerkonzentration, Driftgeschwindigkeit, Fehlerrechnung

2.5.1 Materialgrößen

Berechnen Sie aus den unter 2.4 ermittelten Werten die HALL-Konstante sowie die LT-Konzentration für die zur Verfügung stehenden HALL-Sonden. Bestimmen Sie auch die Driftgeschwindigkeit v der LT. Bestimmen Sie die HALL-Konstanten auch aus den graphischen Darstellungen.

2.5.2 Fehlerrechnung

Berechnen Sie den mittleren Fehler des Mittelwertes für die HALL-Konstante und die Ladungsträgerdichte.

2.5.3 Hinweise

Die Dicke d und die Breite b der HALL-Sonden betragen: $d = 1 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$; $b = 10 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$. Führen Sie auch für die hier angegebenen Fehler eine Fehlerfortpflanzungsrechnung durch!

3 Anhang

3.1 Halbleiter

3.1.1 Das Bändermodell: Leiter, Nichtleiter und Halbleiter

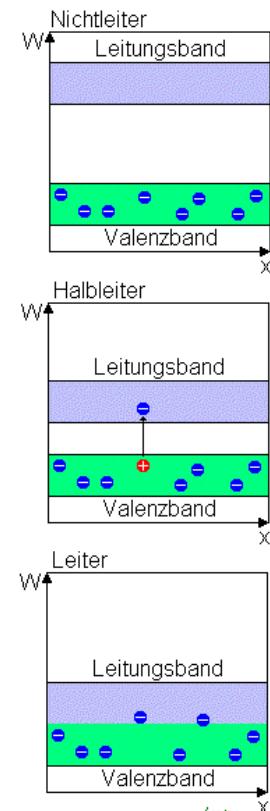


Abbildung 4: Bändermodell mit Leitungsband, verbotener Zone und Valenzband, Quelle: [Hon03a]

Um den Unterschied zwischen der Leitfähigkeit verschiedener Materialien zu erklären, bedient man sich des *Bändermodells*: Elektronen können in einem Festkörper nur bestimmte Energien annehmen. Diese werden als *Energiebänder* bezeichnet. Dabei unterscheidet man zwischen verschiedenen Energiebändern: Das Energieband mit den äußersten vollbesetzten Zuständen nennt man *Valenzband*. Das darüber liegende entweder teilweise gefüllte oder leere Band wird als *Leitungsband* bezeichnet. Elektrischer Strom kann nur dann fließen, wenn das Leitungsband teilweise gefüllt – also weder leer noch voll – ist. Bei Leitern ist das Leitungsband direkt ohne Abstand über dem Valenzband. Dadurch können Elektronen aus dem Valenzband direkt in das Leitungsband übergehen und dort zum Strom beitragen. Bei Halbleitern ist das leere Leitungsband vom voll gefüllten Valenzband durch eine mehr oder weniger breite *verbotene Zone* getrennt (siehe Abb 4). Die Breite E_g dieses sogenannten *Energiegaps*¹² ist maßgebend für die elektrische Leitfähigkeit. Substanzen mit $E_g \leq 3$ eV werden zu den *Halbleitern* gerechnet. Materialien mit größeren Bandabständen zählen zu den *Nichtleitern*.

Zu den Halbleitern (HL) gehören die Elemente der IV. Gruppe (Si, Ge) des Periodensystems bzw. Verbindungen zwischen Elementen der IV. Gruppe (SiC), der III. und V. Gruppe (GaAs, InSb) bzw. der II. und VI. Gruppe (ZnTe, CdSe, HgS).

3.1.2 Dotierte Halbleiter

Der spezifische Widerstand von HL kann erheblich verändert werden durch den Einbau von Fremdatomen. Wird beispielsweise Silicium mit Atomen der V. Gruppe des Periodensystems dotiert¹³, dann bringt jedes Störatom ein Elektron mit, das keine Bindung mit nächsten Nachbarn eingeht und durch geringe Energiezufuhr von seinem Atom

¹²gap (engl): Abstand. Quelle: [Gmb07]

¹³dotieren: in eine Halbleiterkristalloberfläche Ionen eines leitfähigen Materials gezielt einbringen, Quelle: [Lan07]

abgetrennt werden kann. Im Bänderschema sind diese Elektronen energetisch dicht unter der Leitungsbandkante angesiedelt. Betrachtet man die Ionisierungsenergien einiger *Donatoren*¹⁴, so ist ersichtlich, dass bereits bei Raumtemperatur praktisch alle Störstellen ionisiert sind. In diesem Fall beruht die elektrische Leitung vorwiegend auf dem Transport der negativen Elektronen. Der Halbleiter wird deshalb als *n-leitend*¹⁵ oder als *n-Typ* bezeichnet.

Dotiert man jedoch mit Elementen aus der III. Gruppe, so fehlt an jedem Störatom ein Elektron zur Bindung. Bereits durch geringe Energiezufuhr kann dieses lokalisierte *Loch* von einem Elektron des Nachbaratoms ausgefüllt werden. Dadurch wandert das Loch ins Valenzband und kann als freies Loch am Ladungstransport teilnehmen. Die elektrische Leitung beruht also vorwiegend auf der Wanderung der positiven Löcher, man spricht deshalb von *p-Leitung*¹⁶ oder von *p-Typ-Halbleitern*. Da die Störstellen aus der III. Gruppe Elektronen aus dem Valenzband aufnehmen, werden sie *Akzeptoren* genannt.

3.1.3 pn-Übergang

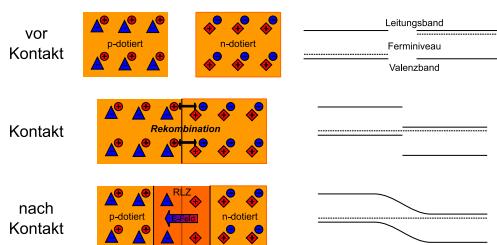


Abbildung 6: pn-Übergang, schematisch, Quelle: [Deg06]

die ionisierten Akzeptoren, die nicht mehr durch die entsprechende Anzahl von Löchern kompensiert wurden, eine *negative Raumladungszone*. Ebenso entsteht im n-Gebiet durch

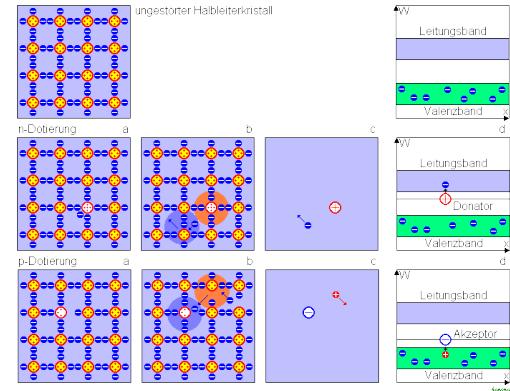


Abbildung 5: Dotierung von HL, Quelle: [Hon03b]

Das Grundelement der meisten Halbleiterbauelemente ist der *pn-Übergang*, in dem p- und n-leitendes Material aneinanderstoßen. Infolge des Konzentrationsunterschiedes an Akzeptoren und Donatoren diffundieren Elektronen aus dem n- ins p-Gebiet und Löcher vom p- ins n-Gebiet und re kombinieren jeweils mit den Überschussladungsträgern¹⁷. Die Übergangszone verarmt an beweglichen Ladungsträgern.

Durch den Abzug der Löcher aus dem p-Gebiet entsteht an dessen Rand durch

¹⁴Elektronen „spender“

¹⁵n wie n-egativ

¹⁶p wie p-positiv

¹⁷Hinweis: Löcher werden auch als Ladungsträger angesehen.

die positiven Donatorenrümpe eine *positive Raumladungszone*. Wegen der positiven und negativen Raumladungszone entstehen ähnlich wie beim Plattenkondensator ein Potentialgefälle und ein elektrisches Feld zwischen dem n- und p-Gebiet. Dabei wird die Potentialdifferenz U_d zwischen n- und p-Gebiet *Diffusionsspannung* genannt, weil sie infolge der Diffusion der beweglichen Ladungsträger entsteht.

Abbildung 6 zeigt anschaulich die Verteilung der Ladungsträger bei einem *pn*-Übergang. Die n-Ecke stellen die ortsfesten ionisierten Akzeptoren und Donatoren dar. Der Bereich rechts symbolisiert das Gebiet der beweglichen Elektronen, der Bereich links das der Löcher. Die Bänderdarstellung rechts zeichnet sich dadurch aus, dass im thermodynamischen Gleichgewicht ohne äußere Spannung das Fermi-Niveau¹⁸ in allen Bereichen auf gleicher Höhe liegt. Die Bandkanten verschieben sich zwischen dem n- und p-Gebiet um den Energiebetrag $e \cdot U_d$.

Legt man nach eine Spannung U in Sperrrichtung¹⁹ an, dann werden die beweglichen Elektronen zum Pluspol und die Löcher zum Minuspol gezogen. Dadurch verbreitert sich die Raumladungszone um $e \cdot U$. Es fließt nur noch ein geringer Sperrstrom, der darauf beruht, dass Minoritäten²⁰ an den Übergang diffundieren und dort von dem starken elektrischen Feld auf die andere Seite befördert werden²¹. Bei großen Sperrspannungen sättigt der Strom und geht in den Sperrsättigungsstrom I_S über.

Bei einer Spannung U in Flussrichtung baut diese die Diffusionsspannung ab, so dass die „Bandverbiegung“ kleiner wird. Die Breite der Raumladungszone wird verringert um den Energiebetrag $e \cdot U$. Die beweglichen Ladungsträger reichern sich in der Verarmungszone an und dringen ins benachbarte Gebiet ein, wo sie mit den dortigen Majoritäten rekombinieren. Der fließende Strom nimmt mit wachsender Spannung stark zu²².

Literatur

- [Deg06] Degreen: *Pn Uebergang*, 2006. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Pn-Uebergang.svg>, Stand: 05.03.2007, Lizenz: cc-by-sa.
- [Gmb07] GmbH, LEO: *Wörterbuch Englisch-Deutsch*, 2007. <http://dict.leo.org/>, Stand: 05.03.2007.
- [Hon03a] Honina: *Bändermodell*, 2003. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:B%C3%A4ndermodell.PNG>, Stand: 05.03.2007, Lizenz: GFDL.
- [Hon03b] Honina: *Halbleiter1*, 2003. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Halbleiter1.PNG>, Stand: 05.03.2007, Lizenz: GFDL.

¹⁸Das Fermi-Niveau ist die höchste Energiekante, die bei einer Temperatur von 0 K noch mit Elektronen besetzt ist.

¹⁹„Sperrspannung“

²⁰Der in einer Zone vorherrschende Ladungsträgertyp (z.B. Elektronen) heißt *Majoritäten*, der jeweils andere (z.B. Löcher) *Minoritäten*.

²¹tunneln. Man spricht hier auch vom *Tunnelstrom*.

²²Eine ausführliche Erklärung findet sich unter http://www.mtm.vu.lt/pfk/funkc_dariniai/diod/ (Stand: 08.03.2007).

- [Lan07] Langenscheidt: *Fremdwörterbuch*, 2007. <http://services.langenscheidt.de/fremdwb/fremdwb.html>, Stand: 08.03.2007.
- [Mes04] Meschede, Dieter: *Gehrtsen Physik*. Springer Verlag, 2004, ISBN 3-540-02622-3.
- [Peo05] Peo: *Hall Effect*, 2005. http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Hall_effect.png, Stand: 05.03.2007, Lizenz: GFDL.
- [Tip94] Tipler, Paul A.: *Physik*. Spektrum Verlag, 1994, ISBN 3-86025-122-8.

