

7.4.1 Elektrische Leitfähigkeit in Ionenkristallen, Kristallen mit kovalenter Bindung und Halbleitern

7.4.1.1 Ionenkristalle

In Ionenkristallen (z. B. NaCl) ist die Energielücke zum Leitungsband so groß, daß nur bei sehr hohen Temperaturen Leitfähigkeit durch die Ionenbewegung nahe der Schmelze (Ionenleitung) eintritt. Oft schmilzt der Kristall sogar vollständig, bevor eine nennenswerte Leitfähigkeit erreicht wird. Für elektromagnetische Strahlung im sichtbaren und infraroten Bereich sind diese Kristalle durchlässig.

7.4.1.2 Kristalle mit kovalenter Bindung, Halbleiter

Das typische Beispiel für den Kristallbau mit kovalenter Bindung ist das Diamantgitter, in dem jedes Kohlenstoffatom, das im freien Zustand vier Elektronen in der L Schale zeigt, in tetraedrischer Umgebung kovalent zu vier Nachbarn gebunden ist.

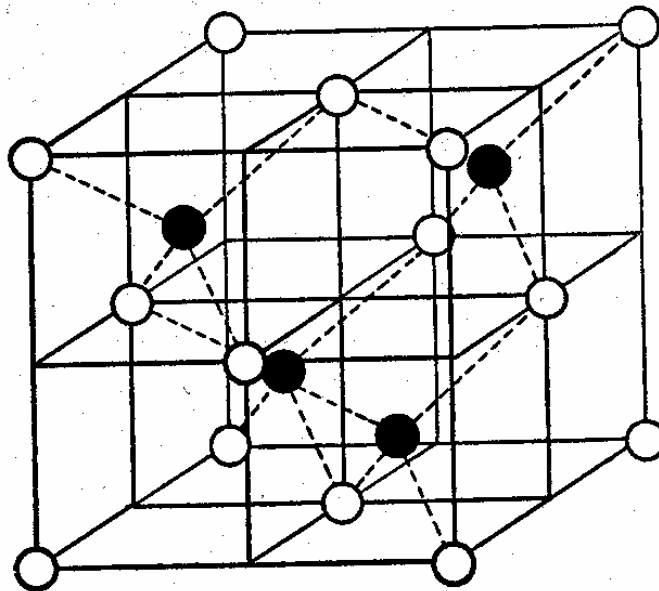


Abbildung 1 Diamantgitter, aus W. Kleber, Einführung in die Kristallographie. Die schwarzen und weißen Kugeln sind gleichwertig, die Richtungen der kovalenten Bindungen sind eingezeichnet.

Auf diese Weise ist der Kohlenstoff von acht Elektronen umgeben, die Edelgaskonfiguration ist erreicht, das Valenzband ist gefüllt und vom Leitungsband durch eine Energielücke getrennt. Ge und Si kristallisieren ebenso, haben aber eine kleinere Bandlücke. Bei sehr großer Bandlücke isolieren diese Materialien vollständig, bei kleinerer Lücke sind sie Halbleiter. Bei Bandabstand $>3,1$ eV sind die Materialien farblos und durchsichtig. Wenn dagegen die Absorptionskante einen Teil des sichtbaren Spektrums absorbiert, dann schimmert der Kristall im reflektierten Licht in dieser Farbe. Im durchfallenden Licht zeigt er die Komplementärfarbe. Oft entsteht die Färbung aber auch durch Streuung an Verunreinigungen. Bei Bandlücke $<1,5$ eV wird das ganze sichtbare Spektrum absorbiert, die Kristalle glänzen Metall ähnlich.

Material	Bandabstand (eV)	Absorption
C (Diamant)	5,4	Im UV Bereich undurchsichtig, aber im sichtbaren Spektrum und IR durchsichtig.
Si	1,17	Im UV und sichtbaren Spektrum undurchsichtig, aber im IR durchsichtig
Ge	0,74	Wie Si

Tabelle 1 Bandlücke und Absorption für einige Halbleiter

7.4.2 Dotierung, Elektronen- und Defektelektronenleitung

Durch Dotierung mit entsprechenden Fremdatomen kann die Leitfähigkeit der Halbleiter gezielt verändert werden.

Dotierung von Silizium mit Phosphor, n-Leitung

Wird z. B. im Si, das selbst 4 Elektronen in der äußersten Schale besitzt, ein Si Atom durch ein Phosphor Atom mit 5 Elektronen in der äußersten Schale ersetzt, dann ist ein Elektron zuviel. Dieses ist nur noch schwach gebunden und kann mit kleinem Energieaufwand in das Leitungsband gehoben werden, wo es zu Stromleitung beiträgt. Phosphor ist ein „Elektronendonator“, der Halbleiter wird „Elektronen-“ oder „n-leitend“.

Dotierung von Silizium mit Bor, p-Leitung

Dotiert man Si dagegen mit Bor mit nur 3 Elektronen in der äußeren Schale, dann fehlt beim Einbau ins Si-Gitter ein Elektron. Mit kleinem Energieaufwand kann ein Elektron aus dem Valenzband den Platz des 4 Elektrons einnehmen. Im Valenzband entsteht dadurch aber eine Lücke, die auch der Stromleitung dient, indem sie sich quasi in Gegenrichtung zum Elektronenfluß bewegt. Bor wird deshalb als „Elektronenakzeptor“ bezeichnet, der Leitungsmechanismus heißt „Defektelektronen-“ oder „p-Leitung“.

7.4.3 Kontakte zwischen p- und n-Leitern

Wenn es an Grenzflächen zwischen zwei Medien Konzentrationsunterschiede gibt, dann versucht die Kinetik der Teilchen durch Temperaturbewegung diese Unterschiede auszugleichen. Es wird besonders interessant, wenn der Konzentrationsausgleich mit dem Aufbau eines Feldes verbunden ist, das seinerseits eine Kraft auf die diffundierenden Teilchen auslöst. Diese Eigenschaft zeigt die Grenzfläche von p und n leitendem Material: Durch den Konzentrationsausgleich zwischen Elektronen und Löchern baut sich zu beiden Seiten der Grenzschicht ein elektrisches Feld auf. Veränderungen in der Grenzschicht spielen deshalb die entscheidende Rolle im Verhalten der Halbleiter.

Das sich einstellende Gleichgewicht der Ladungsträgerdichte hängt ab:

- von den elektrischen Eigenschaften der angrenzenden Materialien
- von Form und Dimension der angrenzenden Bauteile
- von der Temperatur.

Als Folge davon dienen solche Bauteile nicht nur zur Steuerung von Strömen, sondern auch als Sensoren für Temperatur und alle physikalischen Eigenschaften, die im Festkörper auf die Ladungsträgerdichte wirken: Elektrische und elektromagnetische Felder, ionisierende Strahlung, aber auch Kräfte, die den Körper deformieren und so über das Kristallgitter auf die elektronischen Eigenschaften wirken.

Das Zusammenspiel der Diffusion und der durch das innere Feld an der Trennschicht und durch das äußere Feld verursachten Ströme ist nicht leicht zu durchschauen, es kann aus der Diffusionsgleichung und den Besetzungszahlen der Bänder berechnet werden (vgl. z. B. Demtröder, Band 3, S. 440). Das qualitative Verhalten läßt sich zusammenfassen: Ein Bauteil mit einer Kontaktstelle zwischen n- und p-leitendem Material leitet nur in einer Richtung den Strom annähernd nach dem Ohmschen Gesetz, wird in Gegenrichtung gepolt, dann fließt, nahezu unabhängig von der Spannung, nur ein geringer Sperrstrom. Man nennt diese Anordnung deshalb auch „Diode“. Bei zu hoher Spannung in Sperrichtung steigt der Strom plötzlich stark an, die Diode „bricht durch“.

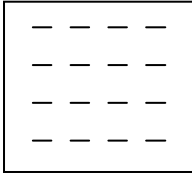
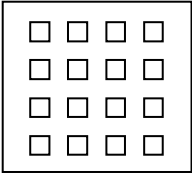
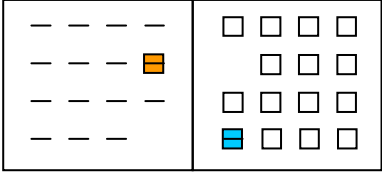
Schema		Anmerkung
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>n-Halbleiter</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>p-Halbleiter</p>  </div> </div>		n-leitender Halbleiter links, p-leitender rechts, beide Teile sind getrennt und elektrisch neutral.
		n-p junction: Ladungsträger können über die Kontaktfläche diffundieren und die beiden Teile unterschiedlich aufladen. Das dabei entstehende elektrische Feld hält die Ladungen in Nähe der Kontaktfläche.

Tabelle 2 n- und p- Halbleiter und, über eine Kontaktfläche verbunden, als „n-p junction“. Auch ohne von außen angelegte Spannung bildet sich ein Potential um die Grenzschicht. Blau: Negative Aufladung, Rot: Positive Aufladung

Bei Kontakt diffundieren Elektronen über die Grenze und rekombinieren mit den Löchern. Die Elektronen bringen Ladung nach rechts, dadurch entsteht ein elektrisches Feld gegenüber der linken Seite, die sich durch die analoge Wanderung der Löcher positiv auflädt. Das Feld hält die Ladungen in Grenznähe, zu beiden Seiten der Grenze nimmt die Anzahl der freien Ladungsträger ab, die Schicht isoliert. Durch Anlegen eines äußeren Feldes kann die Dicke der isolierenden Schicht variiert werden. Die anliegende Spannung steuert deshalb den Strom nicht nur nach dem ohmschen Gesetz. Diese Eigenschaft macht die n-p junction zum fundamentalen Baustein für Anwendung als Verstärker, Sensoren und Bauelemente in logischen Schaltungen.

Für das Verständnis ist wichtig:

- In beiden Teilen gibt es freie Ladungsträger, sie sind also Leiter.
- Die durch Diffusion entstehende Schicht zu beiden Seiten der Kontaktfläche isoliert.
- Die Ladungsträger in beiden Teilen sind von unterschiedlicher Energie. Ihre Energie ist die der Fermikante, die im Donator (n-) Bereich höher liegt als im Akzeptor (p-) Bereich.
- Wird von außen eine Spannung angelegt, dann addiert sich zur Energie der Fermikanten das Potential, das von den über die Kontaktstelle diffundierten Ladungen hervorgerufen wird. Der Ladungstransport endet, wenn die Summe von Fermi Energie und Potential der Ladungen gleich der von außen anliegenden Spannung ist. Deshalb ist die Dicke der isolierenden Schicht durch die angelegte Spannung steuerbar.

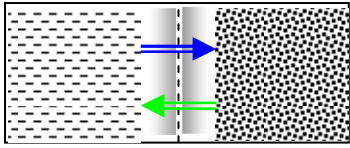
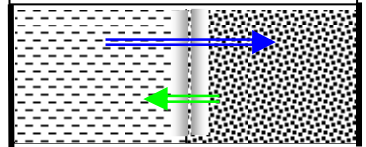
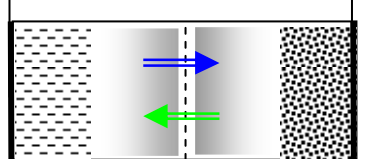
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px; display: flex; justify-content: space-between;"> positiv U_K negativ </div> 	<p>Bei Kontaktierung beider Halbleiter fließt ein Diffusionsstrom der Elektronen bzw. Löcher über die Kontaktfläche. Die sich aufbauende Spannung U_K führt zu einem Feldstrom (Pfeil oben), der den Diffusionsstrom (Pfeil unten) schließlich kompensiert. Durch Rekombination entsteht eine etwa $1 \mu\text{m}$ breite isolierende Schicht ohne bewegliche Ladungsträger.</p>
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px; display: flex; justify-content: space-between;"> negativ U positiv </div>  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px; display: inline-block;">Kleiner Widerstand</div>	<p>Polung in <i>Flußrichtung</i>: Die isolierende Schicht der rekombinierten Ladungsträger wird dünner, ihr Widerstand nimmt ab. Der Feldstrom wird viel größer als der Diffusionsstrom.</p>
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px; display: flex; justify-content: space-between;"> positiv U negativ </div>  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px; display: inline-block;">Hoher Widerstand</div>	<p>Polung in <i>Sperrichtung</i>: Im Material vergrößert sich die Ladung zu beiden Seiten der Kontaktfläche, indem sich der Bereich der rekombinierten Ladungsträger weiter ausdehnt. Die verbreiterte isolierende Schicht ergibt einen hohen Widerstand, es fließt nur der „Sperrstrom“.</p>

Tabelle 3 n- und p- leitendes Material mit einer Kontaktfläche, „n-p junction“. Rot: Positiv geladener Bereich rekombinierter Ladungsträger, blau: negativ geladener Bereich. Die Pfeile in den Diagrammen zeigen die Elektronenströme: Unterer Pfeil (grün) Diffusionsstrom, Oberer Pfeil (blau) Feldstrom. Beide Ströme beziehen sich auf die Elektronen, für die Löcher gelten analoge Bilder mit umgekehrten Vorzeichen.

(Darstellung der Potentiale: http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V7_4An_p_junction.DOC)

Technische Anwendung:

7.4.3.1 Halbleiter-Gleichrichter

Analog der Dioden-Röhre wird nur die positive Halbwelle durchgelassen. Man nennt so ein Element deshalb „Halbleiterdiode“ oder einfach nur „Diode“.

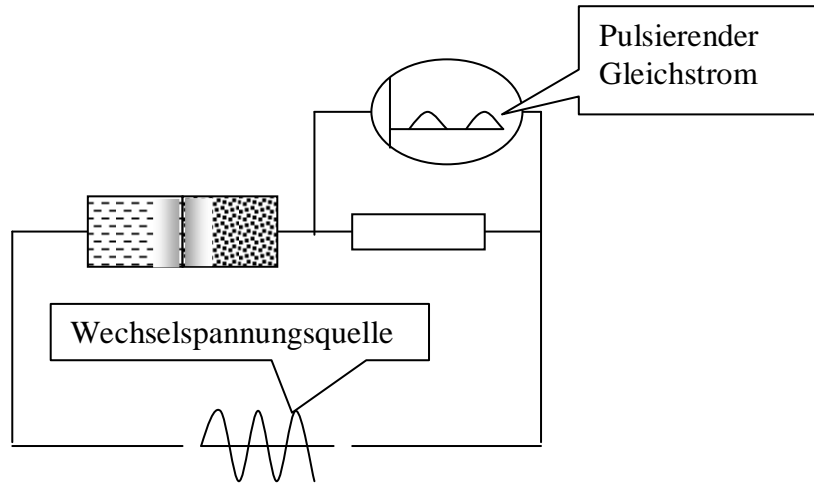


Abbildung 2 Halbleiterdiode als Gleichrichter

7.4.3.2 Photodiode

Wird eine n-p junction mit sichtbarem Licht bestrahlt, dann erhöht sich die Anzahl der freien Ladungsträger, weil diese vom Valenz- ins Leitungsband gehoben werden. Im Schema oben entspricht dieses dem Anwachsen des Feldstroms im Halbleiter ohne äußeres Feld: Durch das Feld in der Grenzschicht werden die Elektronen in das n-leitende Gebiet, die Löcher in das p-leitende abgezogen. Im Vergleich mit der Stromrichtung des Halbleiters mit äußerem Feld fließt der Photostrom in Sperrrichtung. Das Element liefert eine der Intensität entsprechende eine Spannung. Man nennt diese Elektronenanregung „Innerer Photoeffekt“, im Vergleich zum äußeren Photoeffekt, bei dem zuvor gebundene Elektronen im Vakuum oder im Gasraum frei beweglich werden.

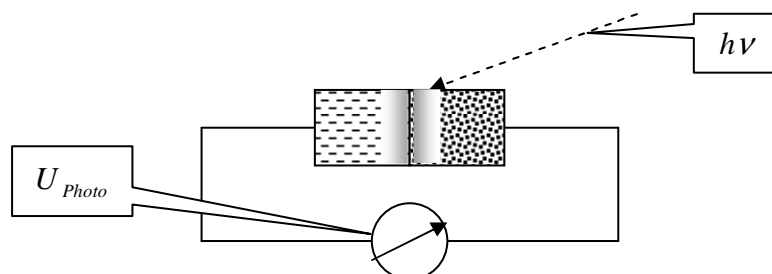


Abbildung 3 Halbleiter als Photodiode

7.4.3.3 Leuchtdiode

Legt man eine Spannung in Flußrichtung, dann erzwingt man die Rekombination der Ladungsträger, weil Elektronen in die p-Schicht wandern und dort mit den Löchern rekombinieren. Bei manchen Halbleitern wird die dabei frei werdende Energie in Form von sichtbarem Licht abgestrahlt. Zur Strombegrenzung wird ein Widerstand in Reihe geschaltet.

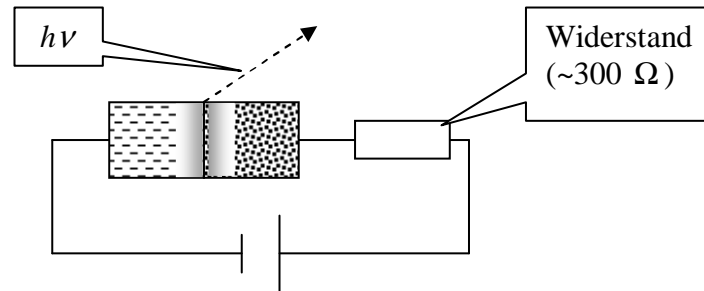


Abbildung 4 Halbleiter als Leuchtdiode

7.4.3.4 Halbleiterzähler

Ein Halbleiterzähler ist eine in Sperrrichtung geschaltete Halbleiterdiode, bei der man darauf achtet, daß die Strahlung bis in den Verarmungsbereich zwischen der p- und n-Schicht gelangen kann. Trifft ein Quant der entsprechenden Energie ein, dann erzeugt es freie Elektronen und Fehlstellen, die kurzzeitig den Widerstand herabsetzen, so daß das Ereignis als Stromimpuls meßbar ist, dessen Intensität der Energie der einfallenden Strahlung entspricht.

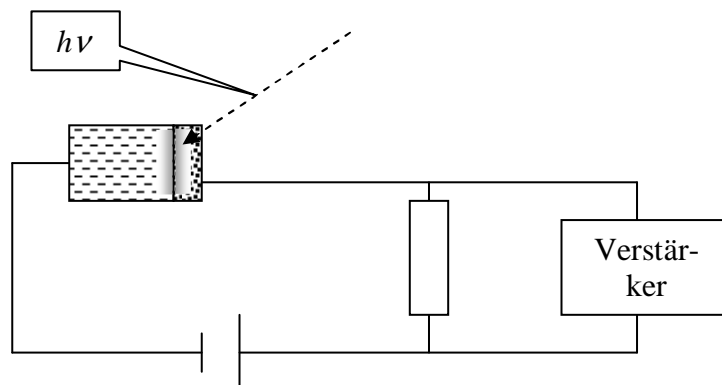


Abbildung 5 Halbleiter als Detektor für ionisierende Strahlung

Versuch 1 Gleichrichter- Diode: Eine Diode wird als Gleichrichter betrieben, man zeigt das durch Umpolung eines Gleichstroms. In der Solarzelle fließt der Strom in Sperrrichtung.

Versuch 2 Photodiode mit Glühlampe und Leuchtdiode. Eine Photodiode wird mit einer Glühlampe und einer Leuchtdiode beleuchtet. Man zeigt, daß die Leuchtdiode- im Gegensatz zur Glühlampe- mit sehr kurzen Pulsen von 0,02 ms ansteuerbar ist.

Versuch 3 Halbleiterzähler. Mit dem Halbleiterzähler wird Uranpechblende vermessen, ein natürliches Uranmineral aus dem Erzgebirge aus Geigers Zeiten. Außerdem von Herrn Gugel selbstgefundene Uranhaltige Minerale aus Menzenschwand im Schwarzwald

7.4.3.5 Der Transistor

Der Transistor besteht aus drei hintereinander geschalteten, verschieden dotierten Halbleiterschichten, die als *Emitter*, *Basis* und *Kollektor* bezeichnet werden. Im pnp Transistor liegt eine n leitende Schicht mit dem „Basis“ Anschluß zwischen zwei p leitenden Halbleitern. In diesem Transistor muß der Emitter positiv gegenüber dem Kollektor sein. Außer den pnp gibt es auch noch npn Transistoren

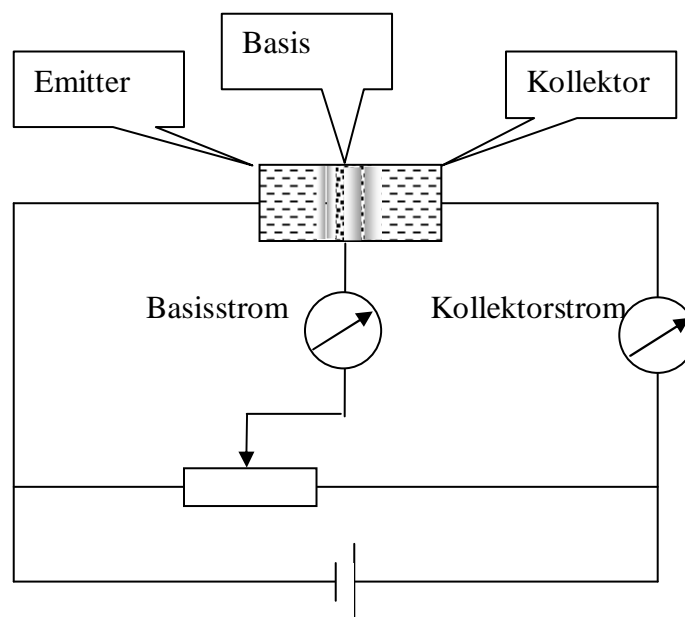


Abbildung 6 Der n-p-n Transistor. Der Übergang Kollektor Basis ist in Durchlassrichtung geschaltet, das Potential an der Basis steuert den viel größeren Kollektorstrom bei sehr kleinem Basisstrom.

Die Basis-Emitter und Basis-Kollektor Übergänge sind ähnlich einer Diode, die eine in Fluß- und die andere in Sperrichtung gepolt. Prüft man sie z. B. mit einem Ohmmeter, dann verhalten sie sich wie Dioden nach folgenden Ersatzschaltbildern, wenn nicht, dann sind sie defekt:

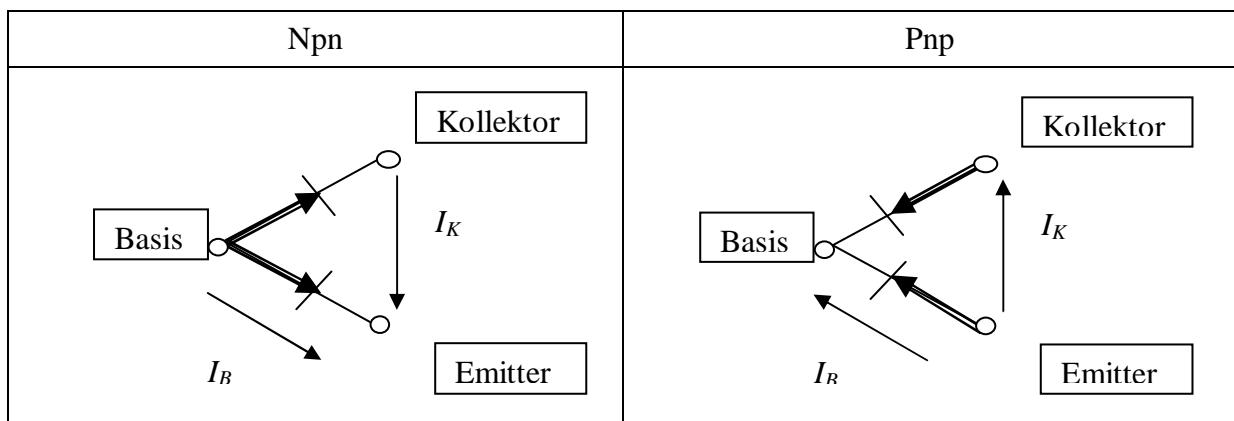


Tabelle 4 Ersatzschaltbilder für npn und pnp Transistoren

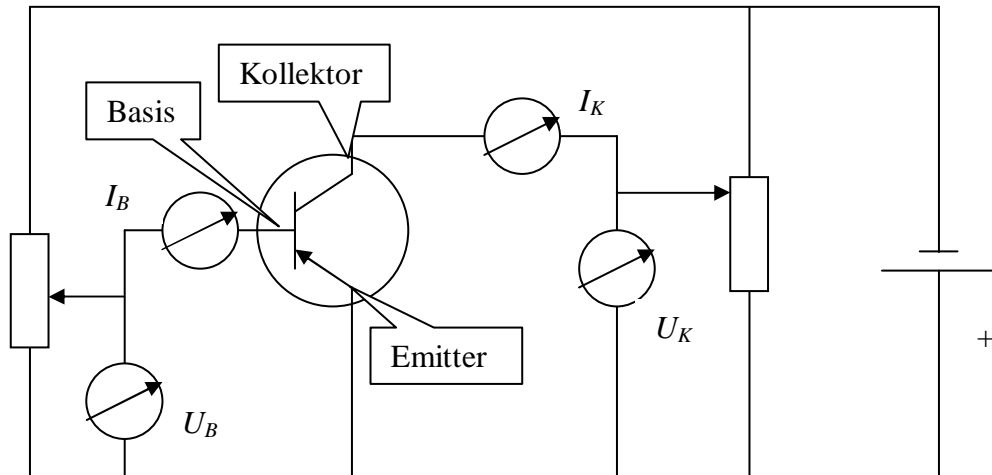


Abbildung 7 Beschaltung eines pnp Transistors zur Messung der Stromverstärkung. Die Spannungen am Kollektor und an der Basis werden mit den entsprechenden Potentiometern eingestellt. Der Transistor leitet, wenn das Potential der Basis zwischen dem von Emitter und Kollektor liegt.

Die Basisschicht im Transistor ist so dünn, daß im pnp Transistor die meisten Defektelektronen durch die Basis vom einen zum anderen p Halbleiter durchwandern, sie verursachen den Kollektorstrom I_K . Beim Durchqueren der Basis rekombinieren einige Defektelektronen mit den Elektronen der n-leitenden Basis, daher fließt ein Basisstrom. I_B . Die Spannung an der Basis beeinflußt die Leitfähigkeit durch diese sehr stark, so daß mit geeigneten Betriebsbedingungen die Stromverstärkung nahezu linear wird. Liegt die Basis auf einem Potential zwischen dem des Emitters und Kollektors, dann gilt angenähert:

$I_K = \beta \cdot I_B$		Kollektorstrom in Abhängigkeit vom Basisstrom
	I_K	Kollektorstrom
	I_B	Basisstrom
	β	Stromverstärkung

Versuch 4 Stromverstärkung (~100-fach) am pnp Transistor in der oben gezeigten Schaltung. Man variiert den Basisstrom und beobachtet den Kollektorstrom.

7.4.3.6 Peltiereffekt am pnp Übergang

Am pnp Übergang eines Halbleiters erwärmt sich die Kontaktfläche, bei der Ladungsträger mit hoher Energie in einen Zustand niedriger Energie getrieben werden, weil die übrige Energie als Wärme frei wird. Das ist bei der Diode in Flußrichtung der Fall, wenn die Elektronen mit hoher Energie aus dem Leitungsband mit den energetisch tiefer liegenden Defektelektronen des Valenzbandes rekombinieren. In Sperrichtung tritt der umgekehrte Effekt ein: Die Elektronen nehmen Energie aus dem mechanischen Schwingungsspektrum (den Phononen) auf, der Kontakt kühlt sich ab. Man bezeichnet dieses als Peltiereffekt am Halbleiter. Mit speziell dotierten Halbleitern (z. B. Selen dotiertes Wismuttellurid) werden Temperaturdifferenzen bis zu 50°C erreicht.

Versuch 5 Peltiereffekt am Halbleiter. Bei Umkehrung der Stromrichtung vertauscht der abkühlende mit dem erwärmenden Pol.

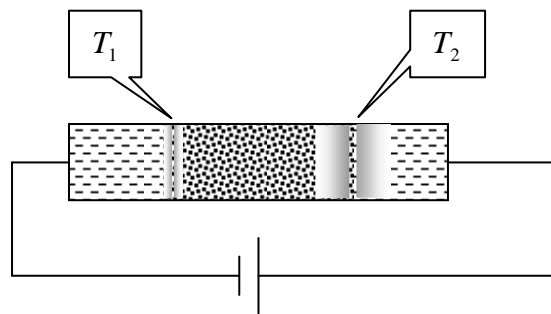


Abbildung 8 Schema eines Peltier Elements: Die beiden in Durchlaß- bzw. Sperrichtung vom Strom durchflossenen Kontaktstellen zeigen unterschiedliche Temperaturen.

7.4.3.7 Ausblick

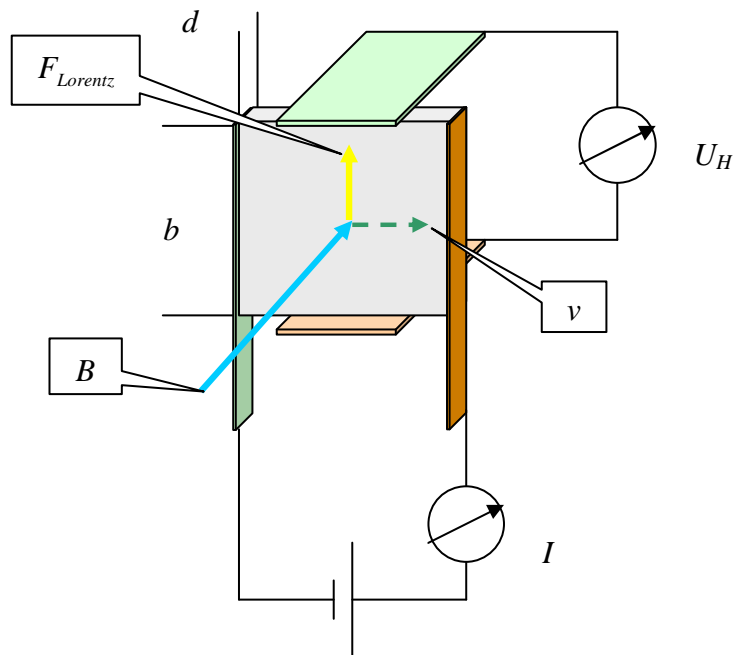
Man kann diesen Abschnitt nicht abschließen ohne darauf hinzuweisen, daß die Halbleitertechnik als Voraussetzung für die globale Kommunikation unsere Gesellschaft nachhaltig prägt. Man kann aus preiswerten Rohstoffen (Si ist nach Sauerstoff das zweithäufigste Element dieser Erde) weitgehend automatisch elektronische Bauelemente für die Kommunikationstechnik und die Datenverarbeitung herstellen, deren Endprodukte für nahezu alle erschwinglich sind. Das Ziel der laufenden Forschung mit Halbleitern ist einerseits die weitere Miniaturisierung. Was Speicherelemente anbetrifft, so ist deren Grenze vermutlich im „Ein-Quanten“ Speicher erreicht, bei dem die Kleinheit der Struktur die elektronische Wellenfunktion auf wenige, steuerbare Möglichkeiten einschränkt.

Große technische Bedeutung haben Halbleiter in der Sensorik. Die preiswerte Computerleistung ermöglicht automatische Steuerung und Regelung in praktisch allen Gebieten, wenn die zu regelnden Größen, z. B. Temperatur, Druck oder Leuchtstärke, als Spannungspegel vorliegen. Die Leitfähigkeit der Halbleiter hängt von vielen Parametern ab, deshalb können durch entsprechende Auswahl von Material, Dicke und Form Sensoren für Temperatur, Druck, Helligkeit usw. optimiert werden. Der Sauerstoffgehalt des Blutes wird bei Operationen z. B. laufend durch Überwachung der Farbe kontrolliert. Dieses geschieht mit einer Leuchtdiode als Lichtquelle und einer Photodiode zum Empfang des vom Blut reflektierten Lichtes, ein Computer überwacht die Werte und gibt Alarm bei Änderung. Datenerfassung im Auto zur Optimierung des Gemischs und der Steuerung der Verbrennung ist die Voraussetzung für die wirksame Reduzierung der Abgase, ohne die jetzt zur Verfügung stehende Halbleitertechnik wäre die gesetzlich vorgeschriebene Emissionsgrenze nicht zu erfüllen.

7.4.4 Der Hall-Effekt

In einem stromdurchflossenen elektrischen Leiter tritt in einem homogenen Magnetfeld, dessen Feldlinien senkrecht zur Stromrichtung verlaufen, eine elektrische Spannung senkrecht zur Stromrichtung und zu den magnetischen Feldlinien auf (E. H. Hall, 1879, Dissertation). Im Strom wirkt auf die Ladungsträger die Lorentzkraft, die dadurch verursachte Ladungstrennung führt zur Hall Spannung. Quantitativ erhält man:

$U_H = R^* \cdot \frac{I \cdot B}{d}$	Hall-Spannung
I	Strom
B	Magnetfeld
D	Stärke des Leiters
$R^* = \frac{1}{n \cdot e_0}$	Hallkonstante
n	Ladungsträgerdichte
Errechnet aus:	
$I = e_0 \cdot v \cdot n \cdot b \cdot d$	Strom durch den Leiter
$b \cdot d$	Querschnitt
$F_{Stat} = e_0 \cdot E_H = e_0 \cdot \frac{U_H}{b}$	Elektrostatistische Kraft auf die Ladungsträger durch das el. Feld der Hall-Spannung
$F_{Lorentz} = e_0 \cdot v \cdot B$	Lorentzkraft durch das Magnetfeld
$e_0 \cdot v \cdot B = e_0 \cdot \frac{U_H}{b}$	Man ersetzt v in der Gleichung für den Strom durch v aus dieser Gleichung und erhält die Hall Spannung



Versuch 6 Messung des Hall-Effekts an einem Metallstück der Stärke d Schaltung gemäß dem Schema oben. Rosa und rot stehen für die positiven Pole, grün für die negativen. (Die Ladung fließt von - nach +, der technische Strom in Gegenrichtung).