

**Physikalisches Praktikum****Transistorkennlinien 1 (TRA 1)****Ausarbeitung von:**

Manuel Staebel – 2236632

Michael Wack – 2234088

**1. Messungen, Diagramme und Auswertungen**

Der Versuch TRA 1 soll uns durch das Aufstellen verschiedener charakteristischer Kennlinien die grundlegenden Eigenschaften eines Transistors verdeutlichen. Im Versuch wurde ein pnp-Transistor verwendet. Folgende Kennlinien sollten durch Messreihen bestimmt werden:

- Ausgangskennlinie
- Eingangskennlinie
- Steuerkennlinie
- Didenkennlinie

Zwei Schaltungen standen zur Bestimmung der ersten drei Kennlinien zur Verfügung. Wir entschieden uns für die spannungsrichtige Messung, da das Digitalmultimeter beim Messen der Spannung einen im Verhältnis zur Schaltung sehr grossen Innenwiderstand von  $10\text{ M}\Omega$  besitzt. Aus

$$I = \frac{U}{R}$$

ergibt sich, daß bei einer maximal gemessenen Spannung von 3V durch das Meßgerät höchstens  $0,3\text{ }\mu\text{ A}$  fließen. Durch die Ablesegenauigkeit bedingt wurden die Meßwerte mit einer Genauigkeit von bestenfalls  $1\text{ }\mu\text{ A}$  aufgenommen. Aus diesem Grund ist bei den Meßwerten eine Berücksichtigung dieses Fehlers nicht nötig.

**1.1 Ausgangskennlinien**

Gemessen wurden drei verschiedene Ausgangskennlinien  $I_C = f(U_{CE})_{I_B}$ , wobei der Basisstrom  $I_B$  während der Versuche jeweils auf  $I_B = 0,1\text{ mA}$ ,  $0,3\text{ mA}$  und  $0,5\text{ mA}$  konstant gehalten wurde.  $U_{CE}$ , die Spannung zwischen Kollektor und Emitter, wurde in festgelegten Intervallen erhöht und dazu der entsprechende Kollektorstrom  $I_C$  notiert.

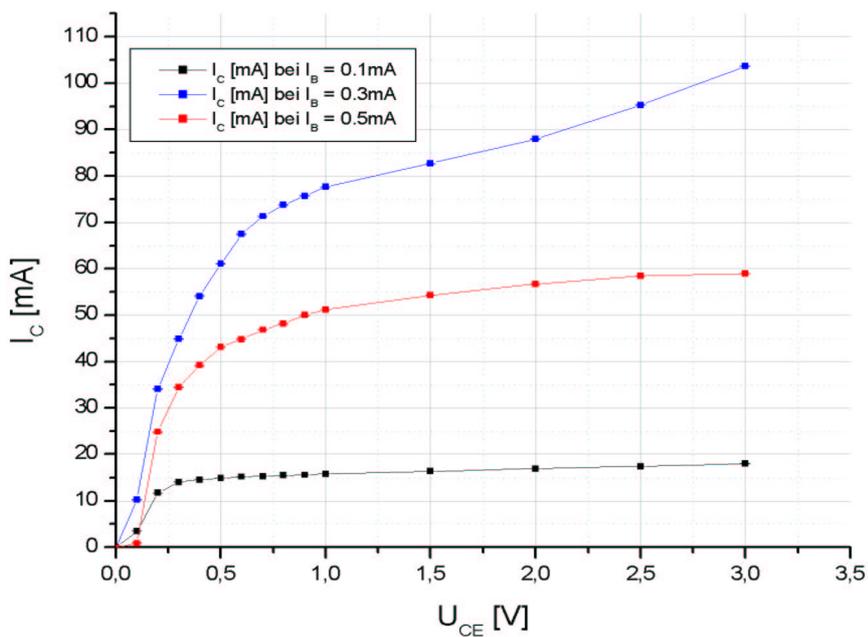


Abbildung 1 Ausgangskennlinien

Ermittlung des Stromverstärkungsfaktors B:

$$B = \frac{I_C}{I_B}$$

aus den drei Ausgangskennlinien für  $U_{CE} = 3V$ .

$I_C$	18,05 mA	59 mA	103,7 mA
$I_B$	0,1 mA	0,3 mA	0,5 mA
$B$	180,5	196,7	207,4

Daraus ergibt sich der Mittelwert  $\bar{B} = \frac{1}{3} (180,5 \text{ mA} + 196,5 \text{ mA} + 207,4 \text{ mA}) = 194,9 \text{ mA}$  .

Die Standardabweichung beträgt  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_1^3 (B_i - \bar{B})^2} = \sqrt{103,2 + 1,7 + 78,5} = 13,5$  .

Die Varianz (Vertrauensniveau: 68,26% für n=3):  $u = 0,76 \sigma = 10,3$

Der Stromstärkefaktor ergibt sich somit zu  $B = (194,9 \pm 13,5)$  bei einer Reproduzierbarkeit von 68,26%.

### 1.2. Eingangskennlinien

Bei der Messung der Eingangskennlinie  $I_B = f(U_{BE})_{U_{CE}}$  wird der Basisstrom  $I_B$  in Abhängigkeit von der Basis-Emitterspannung  $U_{BE}$  gemessen. Dabei wird die Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  jeweils konstant auf  $U_{CE} = 0 \text{ V}$  bzw.  $U_{CE} = 3V$  gehalten.

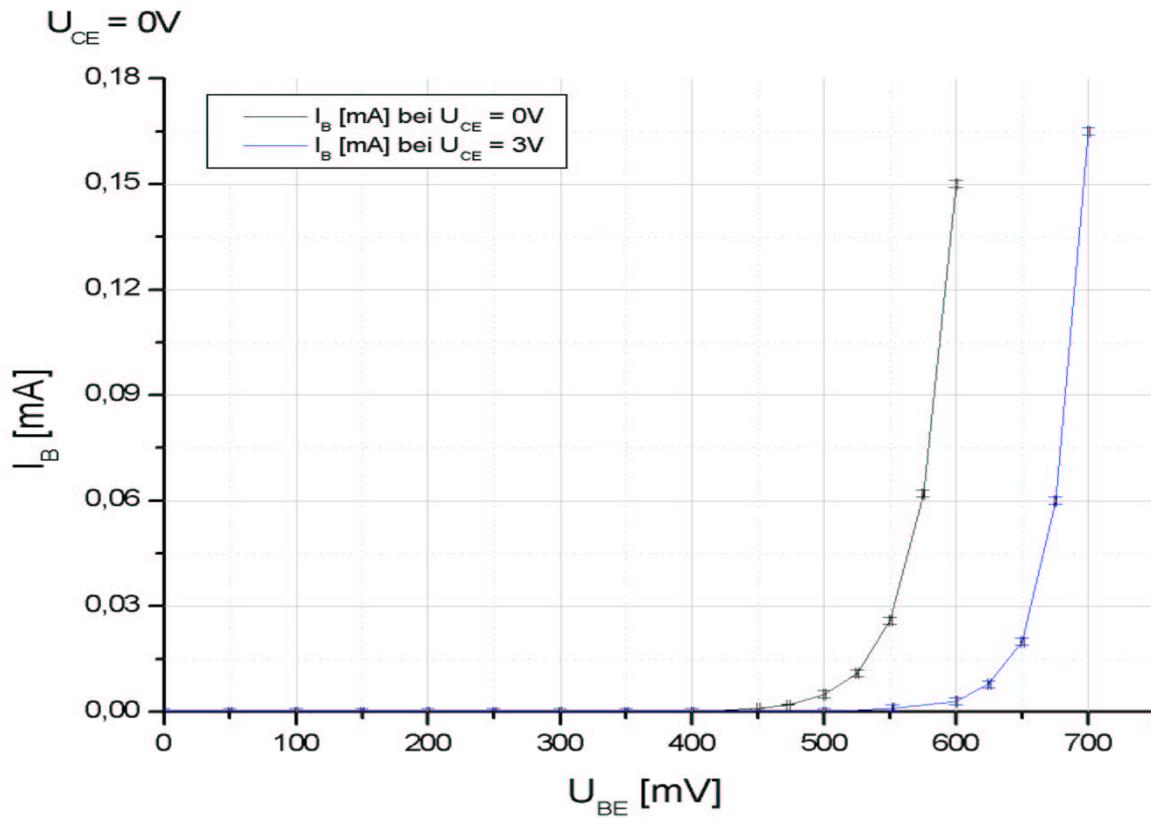


Abbildung 2 Eingangskennlinien

Um die Betriebstemperatur des Transistors sowie die Größenordnung seines Sperrstroms zu ermitteln, stellen wir die Eingangskennlinie bei  $U_{CE} = 0V$  auf halblogarithmischer Skala dar:

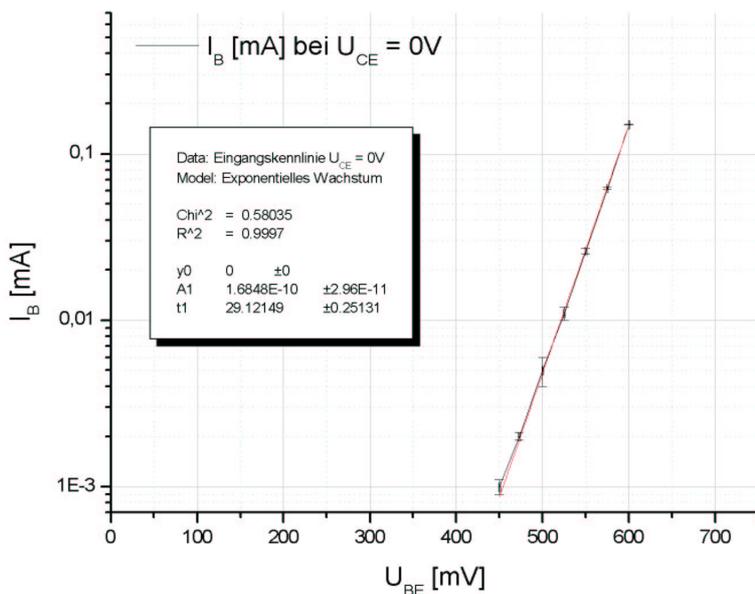


Abbildung 3 Eingangskennlinie (halblogarithmisch)

Der Graph wurde mit der Mathematiksoftware Origin von Microcal erzeugt. Ebenso wurde durch das Programm Punkte auf der

Geraden durch die Meßwerte ermittelt. Da es sich um eine Gerade handelt, können wir zwei beliebige Punkte auf der Gerade zur Bestimmung der Steigung auswählen. Bei der Berechnung der Steigung rechnen wir die Einheiten der x-Achse von [mV] auf [V] zurück, die Differenz der y-Werte bleibt sich – bedingt durch den Logarithmus – gleich, egal in Welcher Einheit man rechnet. Mit den Punkten (450;  $\ln 8,66 \cdot 10^{-4}$ ) und (600;  $\ln 0,15$ ) ergibt sich die Steigung:

$$m = \frac{\ln 0,15 - \ln 8,66 \cdot 10^{-4}}{0,60 - 0,45} = 34,4$$

Da die Ausgleichsgerade auf halblogarithmischem Papier einer Exponentialfunktion auf „normalem“ Papier entspricht, gilt folgende Beziehung:

$$I_B = c \cdot e^{m \cdot x}$$

Daraus läßt sich die Konstante c errechnen:

$$c = \frac{I_B}{e^{m \cdot x}}$$

Wir setzen das Wertepaar (0,60; 0,15) ein und erhalten  $c = 1,6 \cdot 10^{-10}$ .

Die Basis–Emitter–Strecke ist eine in Durchlassrichtung betriebene Diode. Unsere Aufgenommene Eingangskennlinie entspricht deshalb praktische einer Diodenkennlinie. Für eine Diodenkennlinie gilt folgende Beziehung:

$$I = I_S e^{\frac{e \cdot U}{k \cdot T}} \Rightarrow I_S = c$$

Daraus folgt:  $\frac{e}{k \cdot T} = m \Rightarrow T = \frac{e}{k \cdot m} = \frac{1}{8,617 \cdot 10^{-5} \cdot 34,4} = 337 \text{ K} = 64^\circ \text{ C}$

Für die Betriebstemperatur des Transistors erhalten wir einen ungefähren Wert von  $T = 64^\circ \text{ C}$ .

Der Sperrstrom für den Transistor kann mit einem Wert in der Größenordnung von  $I_S = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ mA}$  angegeben werden.

### 1.3 Steuerkennlinien

Zur Bestimmung der Steuerkennlinie  $I_C = f(U_{BE})_{U_{CE}}$  wird der Kollektorstrom  $I_C$  in Abhängigkeit von der Basis–Emitter–Spannung  $U_{BE}$  gemessen. Dabei bleibt die Kollektor–Spannung  $U_{CE}$  konstant bei 3V.

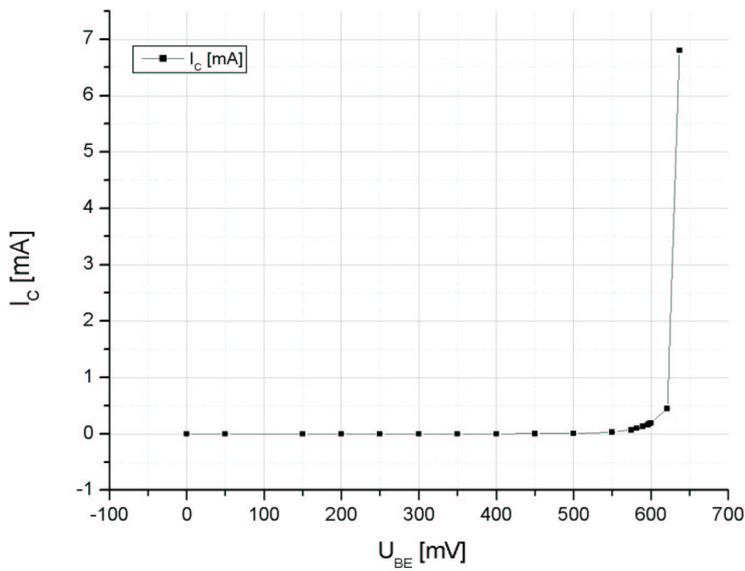


Abbildung 4 Steuerkennlinie

1.4 Diodenkennlinie der Basis-Emitter-Strecke

Bei der Messung der Diodenkennlinie  $I_B = f(U_{BE})$  der Basis-Emitter-Strecke wird der Basisstrom  $I_B$  in Abhängigkeit von der Basis-Emitter-Spannung  $U_{BE}$  gemessen.

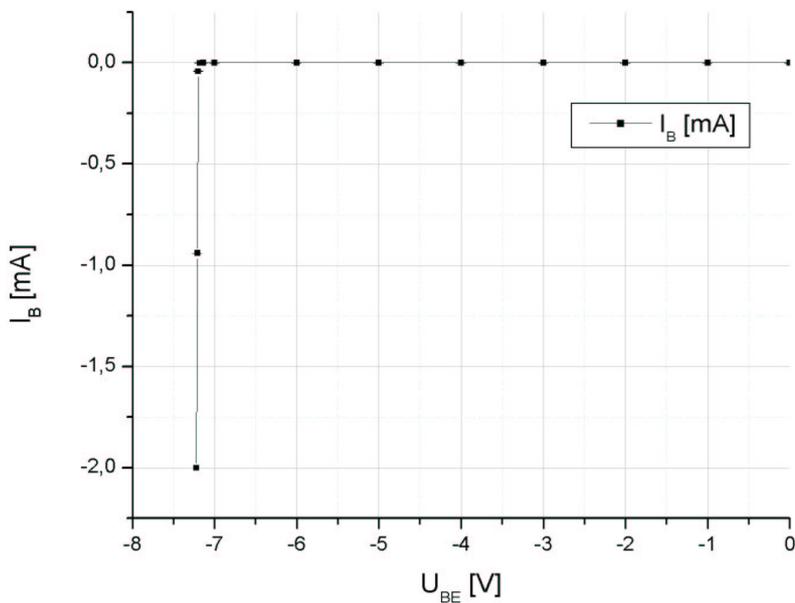


Abbildung 5 Diodenkennlinie (Basis-Emitter-Strecke)

Die Diodenkennlinie kann in Durchlaßrichtung mit den Werten der Meßreihe „Eingangskennlinie  $U_{CE} = 0V$ “ weitergeführt werden (positive Spannung  $U_{BE}$ ).

## 2. Fragen

### 2.1 Was versteht man unter einem Halbleiter?

Halbleiter sind eine durch ihren spezifischen elektrischen Widerstand gekennzeichnete Klasse der Festkörper. Sie umfassen bei Zimmertemperatur den weiten Widerstandsbereichbereich von  $10^{-3}$  bis  $10^{-9} \Omega \text{ cm}$  und liegen somit zwischen den Metallen (Leitern) und Isolatoren (Nichtleitern). Der Ladungstransport erfolgt durch Elektronen bzw. Defektelektronen (Löcher). Bei einer Temperatur von  $T = 0 \text{ K}$  leiten sie im Gegensatz zu Metallen nicht. Sie sind durch einen negativen Temperaturkoeffizienten gekennzeichnet, d.h. der elektrische Widerstand (eines ungestörte Halbleiters) nimmt mit steigender Temperatur ab.

Die Eigenschaften von Halbleitern werden durch das Modell der Energiebänder erklärt.

### 2.2 Was besagt das Bändermodell?

Die Elektronen eines Festkörpers können in fest gebundene Schalen-, schwach gebundene Valenz- und freie Elektronen gegliedert werden. Normalerweise können gebundene Elektronen nur bestimmte diskrete Energieniveaus einnehmen. Durch die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Atomen, spalten diese Energieniveaus mit zunehmender Anzahl der Atome immer mehr auf. Aufgrund der sehr großen Anzahl von Atomen in interessierenden Volumina bilden sich ganze Bereiche zulässiger Energien, die sogenannten Bänder. Diese Bänder sind durch „verbotene“ Energiezonen von einander getrennt.

Für die Funktionsweise eines Transistors sind nur das Valenz- und das energetisch höhere Leitungsband von Bedeutung. Zwischen diesen beiden Bändern laufen in einem Halbleiter zwei Vorgänge ab: die Generation von Leitungselektronen (durch thermische Anregung werden Elektronen vom Valenz- in das Leitungsband gehoben) und die Rekombination von Elektronen (Rückfall eines Elektrons vom Leitungs- in das Valenzband). Diese beiden Vorgänge kann man durch das Dotieren (Einbringen von höher- oder niederwertigen Fremdatomen = Elektronendonatoren und -akzeptoren) des Halbleiters entscheidend beeinflussen und somit die Arbeitsweise des Transistors gezielt steuern.

### 2.3 Was versteht man unter Eigen- und Störstellenleitung?

Falls durch thermische Energie Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben werden, entsteht dadurch eine „Lücke“ im Valenzband, die durch ein anderes Valenzelektron aufgefüllt wird, wodurch wieder eine Lücke entsteht. Je nach Betrachtungsweise wandern also Elektronen von Loch zu Loch, oder es wandert das Loch von Elektron zu Elektron. Dies nennt man Eigenleitung.

Wird das Gitter durch fünfwertige Atome (Donatoren; z.B. Phosphor, Arsen) verunreinigt (dotiert), so ist ein Valenzelektron nicht durch Bindungen abgesättigt. Die Energieniveaus dieser Atome liegen in der „verbotenen Zone“, jedoch ist der Abstand zum untersten Niveau des Leitungsbandes nur von der Größenordnung 0,01 eV. Das zusätzliche Valenzelektron kann also leicht abgelöst und ins Leitungsband gehoben werden. In diesem Fall sind die freien Ladungsträger negativ geladene Teilchen und man spricht von „n-Leitung“. Dotiert man mit dreiwertigen Fremdatomen (Akzeptoren; z.B. Bor, Indium) fehlt ein Valenzelektron, das leicht aus einer benachbarten Bindung ergänzt werden kann. Dabei entsteht ein negativ geladenes Ion und ein positiv geladenes „Loch“. Da der Ladungstransport durch positiv geladene Löcher erfolgt, spricht man von p-Leitung. Diesen Vorgang nennt man Störstellenleitung.

### 2.4 Welche Eigenschaften hat ein pn-Übergang?

In der Praxis bezeichnet man einen pn-Übergang als Diode. Im Inneren des p- und des n-Bereichs herrscht Ladungsgleichgewicht. Durch die Grenzschicht hindurch bildet sich aufgrund des Elektronenkonzentrationsgefälles ein Diffusionsstrom aus. Dadurch gelangen überschüssige Elektronen aus dem n-Bereich in den p-Bereich, um die Löcher aufzufüllen. Der Bereich, in den die Ladungsträger hinein diffundieren, heißt Sperrschicht. Dadurch wird das, der Diffusion entgegenwirkende, elektrische Feld zwischen n- und p-Bereich immer stärker, bis sich schliesslich ein Gleichgewicht einstellt und die Diffusion stoppt. Wenn man dieses Gleichgewicht stört, indem man durch das Anlegen einer Spannung zusätzliche Elektronen in den n-Bereich schafft und die in den p-Bereich diffundierten Elektronen absaugt, kann der Diffusionsstrom frei fließen und die Diode schaltet durch. Wird die Spannung umgekehrt angelegt, so wird das Gegenfeld verstärkt und die Diffusion noch stärker behindert und die Diode sperrt. Nur der sehr kleine Sperrstrom (wegen der immer vorhandenen Minoritätsladungsträger) kann fließen. Bei zu starker Sperrspannung werden Elektronen durch die Spannung so stark beschleunigt, sodass genug Energie vorhanden ist, dass neue Valenzelektronen in das Leitungsband gehoben werden, die wiederum andere Elektronen durch Stöße ins Leitungsband heben können. Dieser Lawineneffekt bewirkt den Durchbruch der Diode und es fließt ein großer Strom.

### 2.5 Was ist ein bipolarer Transistor? Wie ist seine Funktionsweise?

Ein bipolarer Transistor bezeichnet einen Transistor an dem sowohl positive als auch negative Ladungsträger am Stromtransport beteiligt sind. Daneben existieren auch noch unipolare Transistoren, sogenannte Feldeffekttransistoren (FETs). Ein Transistor ist ein aus zwei pn-Übergängen bestehender Halbleiter, von denen einer in Durchlass-, der andere in Sperrrichtung betrieben wird. Je nach Anordnung der Schichten spricht man von npn- oder pnp-Transistor. Bei einem npn-Transistor fließt bei der Emitterschaltung der kleine Steuerstrom von der Basis zum Emitter in Durchlassrichtung des pn-Übergangs (Basis positiv, Emitter negativ). Der Kollektor-Basis-Übergang sperrt jedoch. Durch den Basisstrom gelangen viele freie Elektronen vom Emitter in die Basis und werden dort „abgesaugt“. Es entsteht also ein Konzentrationsgefälle der Elektronen in der Basis vom Emitter zum Kollektor. Können die Elektronen vom Emitter bis zum Kollektor diffundieren, werden sie dort abgesaugt und es kann ein Strom fließen. Ist dagegen die Basis negativ gegenüber dem Emitter gepolt, ist die Emitter-Basis-Diode ebenfalls in Sperrrichtung und es kann deshalb kein Strom fließen.

## 2.6 Welche Grundschaltungen des Transistors gibt es? Welche Eigenschaften haben sie?

Die Grundschaltungen werden nach dem Anschluss benannt, der auf dem für Eingangs- und Ausgangskreis gemeinsamen Potential liegt. Dementsprechend gibt es folgende drei Grundschaltungen:

Schaltung	Eigenschaften
Emitterschaltung	Der Kollektorstrom wird über den Basisstrom gesteuert. Die Stromverstärkung ist sehr groß. Je nach Lastwiderstand erhält man auch eine Spannungsverstärkung und somit eine große Leistungsverstärkung.
Basisschaltung	Da der Kollektor- und der Emitterstrom nahezu identisch sind, erhält man keine Strom-, wohl aber eine große Spannungsverstärkung.
Kollektorschaltung	Bei der Kollektorschaltung erhält man keine Spannungsverstärkung, wohl aber eine Stromverstärkung, die etwa der bei der Emitterschaltung entspricht.

## 2.7 Welcher Wellenlänge entspricht die Energielücke in Si und Ge, wenn in einer lichtemittierenden Diode die Lichtemission durch Band-Band-Übergänge erfolgt? Welche Energielücke muß der Halbleiter haben?

$$\Delta E_g = \frac{c \cdot \hbar}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{c \cdot \hbar}{\Delta E_g}$$

$c$  = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $3,0 \cdot 10^8$  m/s)

$\hbar$  = Plank-Konstante

$\Delta E_g$  = Energielücke des entsprechenden Elements

Mit  $\Delta E_g(\text{Si}) = 1,12 \text{ eV}$  und  $\Delta E_g(\text{Ge}) = 0,67 \text{ eV}$  ergeben sich folgende Werte:

$$\lambda_{\text{Si}} = 1107 \text{ nm} \quad \lambda_{\text{Ge}} = 1850 \text{ nm}$$

Der sichtbare Bereich des Lichtes erstreckt sich ca. 400nm bis 700nm, d.h. die den Energielücken entsprechenden Wellenlängen von Silizium und Germanium befinden sich weit im Infrarotbereich.

Um sichtbares Licht (700nm bis 400nm) zu emittieren, müßte der Halbleiter eine Energielücke zwischen  $\Delta E_g = 1,78 \text{ eV}$  und  $\Delta E_g = 3,10 \text{ eV}$  haben.