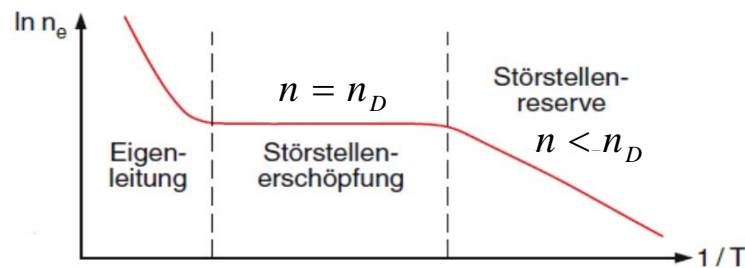
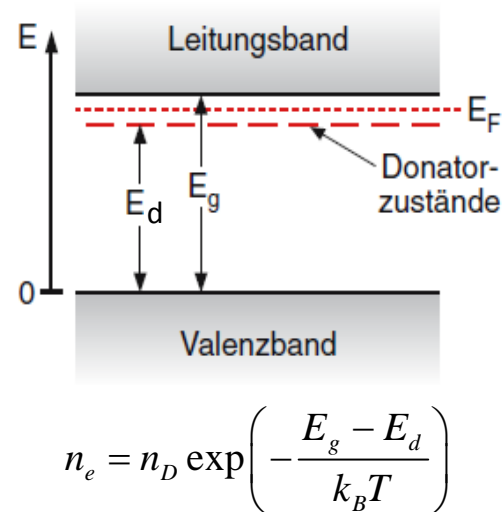
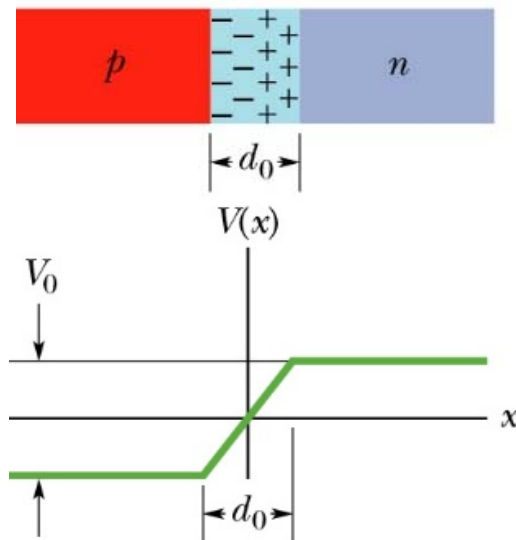


# An welche Stichwörter von der letzten Vorlesung können Sie sich noch erinnern?

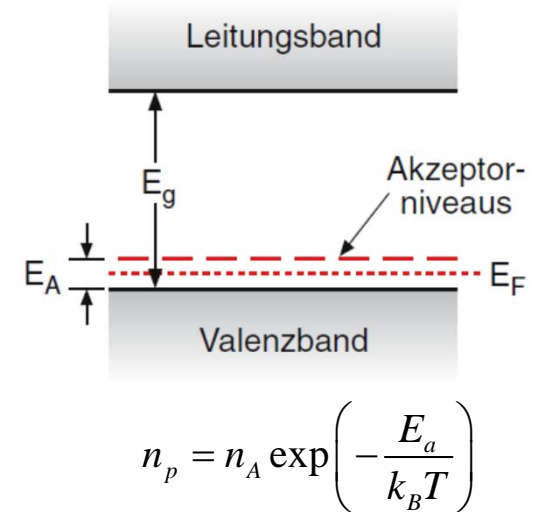
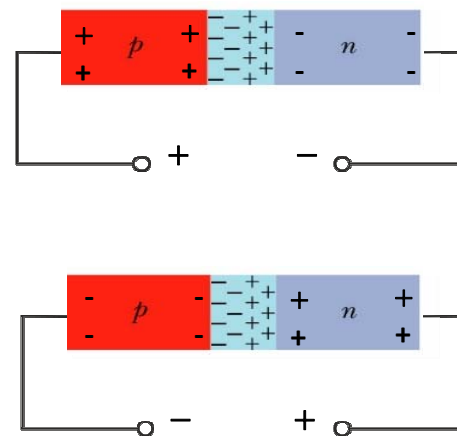
$n$ -  $n_e \gg n_p$  und  
 $p$ -  $n_p \gg n_e$   
 dotierte Halbleiter



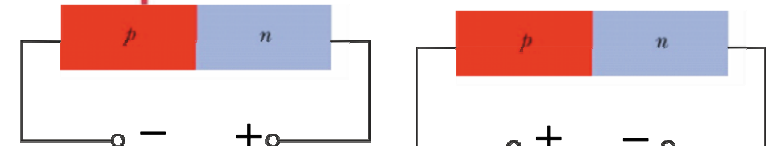
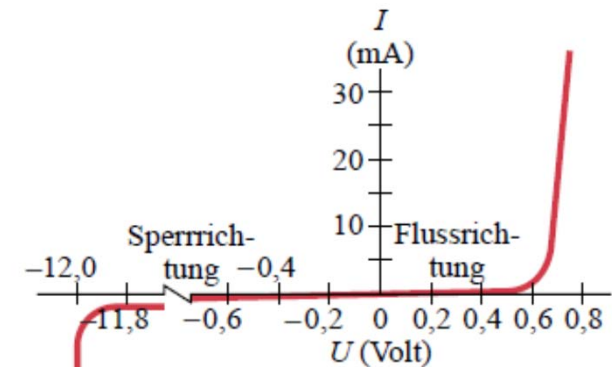
Der pn-Übergang



Die Diode



$$n_p = n_A \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right)$$



### 37.11 Licht- und Photodiode

Lichtdiode, LED: light-emitting diode.

Für die Lichterzeugung in einem Halbleiter ist es notwendig, dass ein Elektron vom Leitungsband in ein Loch vom Valenzbands fällt und die bei dieser Elektron-Loch-Rekombination frei werdende Energie als Licht, d.h. als Photon mit der Energie  $hf$  emittiert wird.

Bei einem solchen strahlenden Rekombinationsprozess:

Elektron + Loch  $\Rightarrow$  Photon

gelten der Energieerhaltungssatz, d.h.  $E_{El} - E_{Loch} = E_{Photon} \approx E_g$

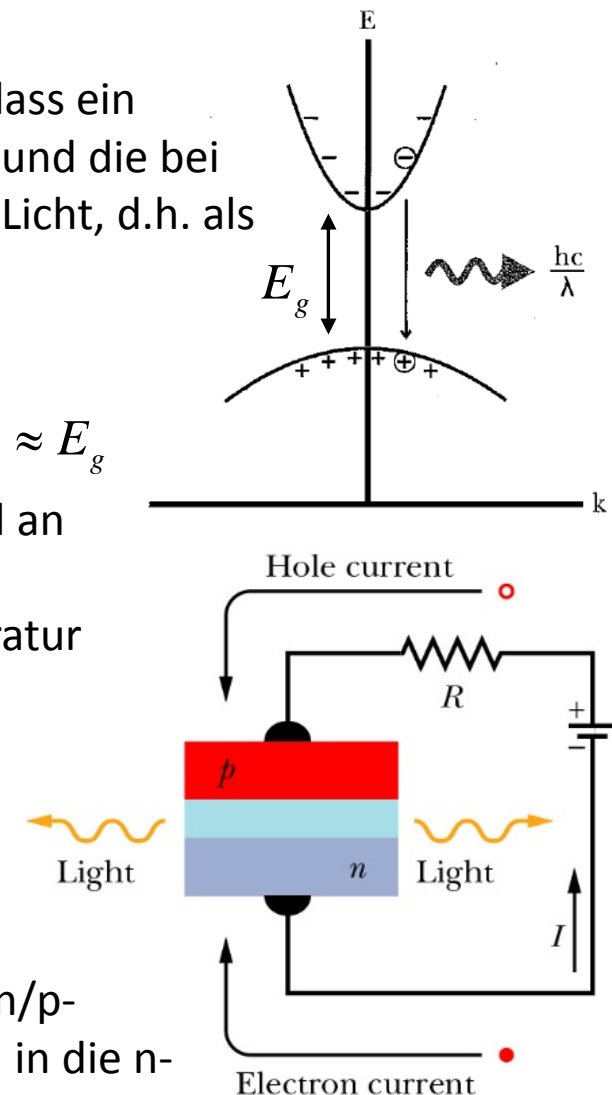
In dem LED-Werkstoff muss es zu einer genügend großen Zahl an Elektron-Loch-Übergängen kommen. Diese Bedingung ist in einem reinen Halbleiter nicht erfüllt, da es bei Zimmertemperatur einfach nicht genügend Elektron-Loch-Paare gibt.

Auch eine Dotierung des Halbleiters hilft nicht weiter:

ein n(p)-dotierter Halbleiter besitzt zwar ausreichend viele Leitungselektronen (Löcher), aber es gibt nicht genügend viele Löcher (Elektronen), mit denen sie rekombinieren können.

Eine sehr starke Durchlassspannung an einem hochdotierten n/p-Übergang dient der Strom  $I$  sowohl der Zufuhr von Elektronen in die n-dotierte Seite als auch der Zufuhr von Löchern in die p-dotierte Seite.

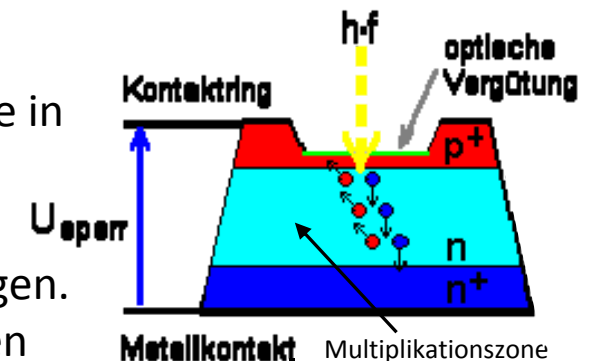
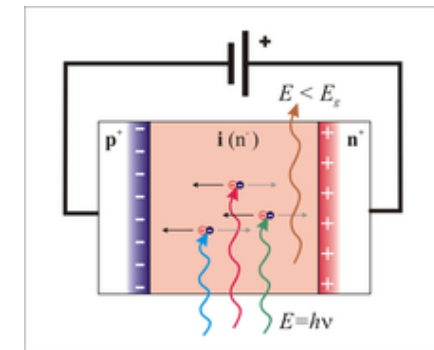
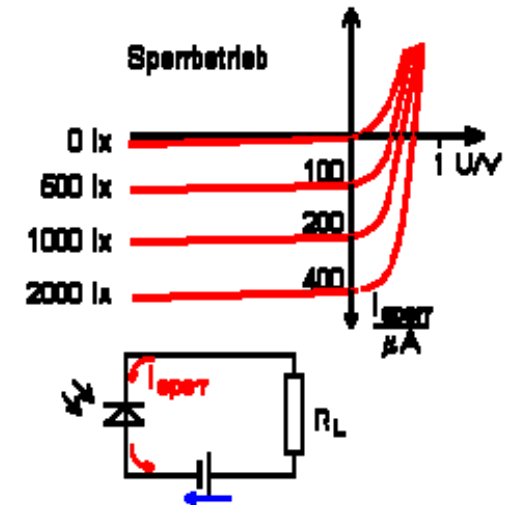
Unter diesen Umständen kommt es zu vielen Rekombinationen von Elektronen und Löchern und damit zur Emission von Licht aus diesem Bereich.



Photodiode: hier wird durch Lichtenergie die Leitfähigkeit verändert. Im Gegensatz zum LED wird eine Photodiode in *Sperrrichtung* betrieben. Im Dunkeln ist der messbare Sperrstrom sehr gering. Die Raumladungszone, die Sperrschicht, ist fast frei von Ladungsträgern, da durch die thermische Bewegungsenergie nur sehr wenige Elektronen-Lochpaare erzeugt werden.

Fällt Licht mit ausreichend hoher Energie ein, so brechen Gitterbindungen auf und bilden Ladungsträgerpaare. Diese wandern vom angelegten äußeren Feld angezogen entsprechend ihrer Polarität zur p- und n-Randschicht. Die Elektronen nutzen das Leitungsband des n-dotierenden Halbleiters. Die Löcher gehen in der Gegenrichtung. Beide Ladungsträger durchqueren die Sperrschicht und erhöhen dort den Sperrstrom.

Lawinenfotodioden oder **Avalanche Photodiodes (APDs)**: man erhöht die Sperrspannung, so nimmt die elektrische Feldstärke in der Raumladungszone zu. Durchqueren Ladungsträger dieses Feld, dann erfahren sie eine starke Beschleunigung. Damit werden durch Stoßionisation neue Ladungsträgerpaare erzeugt. Diese Elektronen und Löcher werden durch das Feld abgezogen und erhöhen den Sperrstrom.

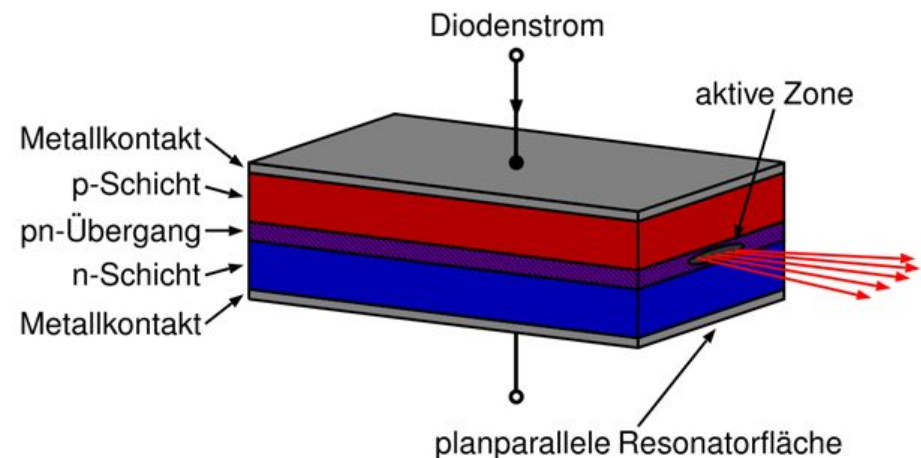
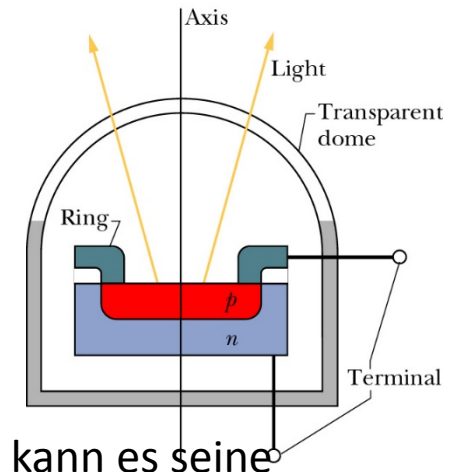


### 37.12 Der Halbleiter-Injektionslaser

In einem LED befinden sich viele Elektronen im Leitungsband des n-dotierten Werkstoffs und viele Löcher im Valenzband des p-dotierten Werkstoffs. Es liegt also eine Besetzungsinversion für die Elektronen vor, d. h., es gibt mehr Elektronen in höheren Energieniveaus als in tieferen Energieniveaus. Dies ist eine notwendige Bedingung für die Erzeugung von Laserlicht.

Wechselt ein einzelnes Elektron vom Leitungsband in das Valenzband, kann es seine Energie in Form eines Photons abgeben. Dieses Photon kann ein zweites Elektron zu einem Übergang ins Valenzband anregen und so durch stimulierte Emission ein zweites Photon erzeugen.

Ist der Strom durch den pn-Übergang groß genug, kann auf diese Weise eine Kettenreaktion stimulierter Emissionen ausgelöst werden und es kann Laserlicht entstehen. Damit dies möglich wird, müssen die Seitenflächen des Kristalls, der den p/n-Übergang enthält, flach und parallel sein, damit das Licht innerhalb des Kristalls hin- und herreflektiert werden kann. Das so erzeugte Licht ist hochgradig kohärent und in Bezug auf seine Wellenlänge weitaus schärfer definiert als das Licht einer LED.



### 37.13 Der Flächentransistor

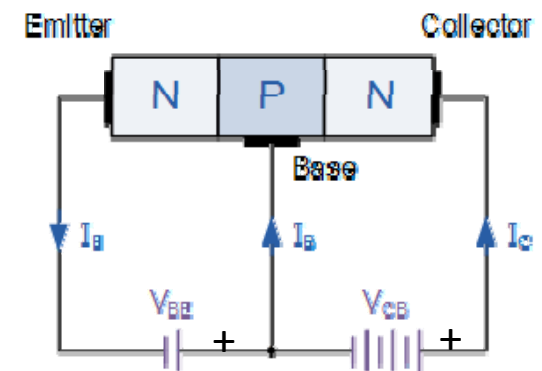
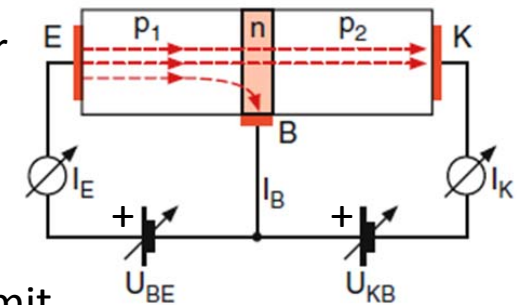
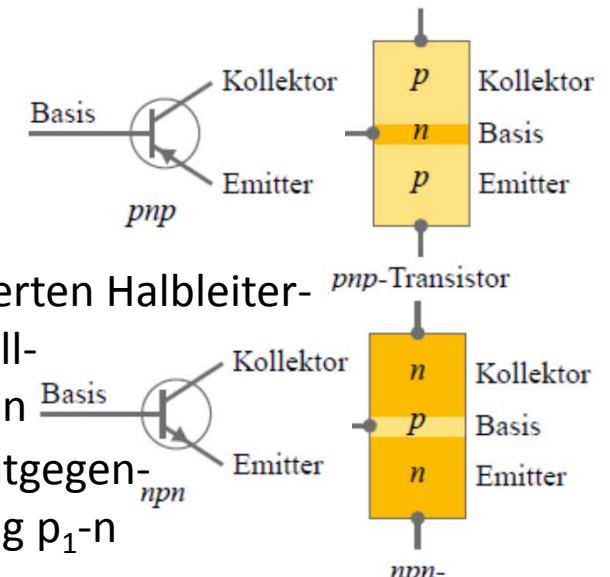
Ein Transistor ist ein Halbleiterbauelement mit drei Anschlüssen, das zur Verstärkung von Eingangssignalen dient.

Ein einfacher Flächentransistor besteht aus einem  $n$ -oder  $p$ -dotierten Halbleiterkristall, der sich zwischen zwei entgegengesetzt dotierten Kristallbereichen befindet. Es gibt sowohl  $pnp$ - als auch  $nnp$ -Transistoren

Ein Transistor ist nichts anderes als zwei  $p$ - $n$ -Übergänge, die in entgegengesetzter Durchlaßrichtung zusammen gefügt sind. Der Übergang  $p_1$ - $n$  sei in Durchlassrichtung gepolt, d. h. an der Elektrode E liegt gegenüber B eine positive Spannung, so dass ein Strom vom *Emitter* E zur *Basiselektrode* B fließt, der im  $p_1$ -Teil überwiegend durch Löcher, im  $n$ -Teil durch Elektronen getragen wird.

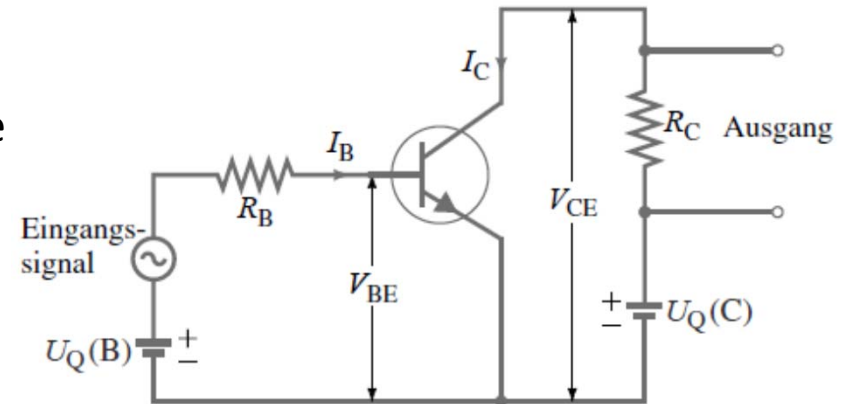
Der zweite Übergang  $n$ - $p_2$  sei in Sperrichtung gepolt, d. h. an K liegt eine negative Spannung gegenüber B. Die Löcher können im  $n$ -Teil mit Elektronen rekombinieren, was zum Basisstrom beiträgt.

Wenn die  $n$ -Schicht genügend dünn ist, kann ein Teil der Löcher durch die  $n$ -Schicht diffundieren, und in den  $p_2$ -Teil gelangen. Hier werden sie durch die negative Spannung an K beschleunigt und bilden damit den Kollektorstrom  $I_K$  ( $I_C$ ).  
Stärke des Kollektorstromes hängt vom Basisstrom ab.



$$I_C \gg I_B.$$

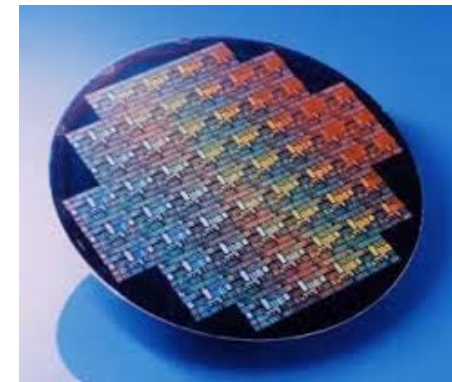
Eine geringe Veränderung der Basisvorspannung aufgrund eines Eingangssignals bewirkt eine starke Veränderung im Basisstrom, im Kollektorstrom und deshalb eine starke Veränderung im Spannungsabfall am Ausgangswiderstand  $R_C$ . Daher kann ein Transistor ein schwaches Signal zu einem starken verstärken.



Die Stromverstärkung:  $\beta_I = \frac{i_C}{i_B} \gg 1$

$$i_B = \frac{U_{Ein}}{R_B} \quad \longrightarrow \quad i_C = \beta_I i_B = \beta_I \frac{U_{Ein}}{R_B} \quad \longrightarrow \quad U_{Aus} = R_C i_C = R_C \beta_I \frac{U_{Ein}}{R_B} = \boxed{\beta_I \frac{R_C}{R_B}} U_{Ein}$$

*Integrierten Schaltkreise* bestehen aus Dioden, Transistoren, Kondensatoren, Spulen und Widerständen. Sie funktionieren als logische Gatter, Verstärker, Prozessoren usw. Eine kleine integrierte Schaltung auf einem Chip mit nur 1 mm Kantenlänge kann Millionen von Transistoren und anderen Schaltelementen enthalten.



### 37.14 Der Feldeffekttransistor (FET)

Ein Feldeffekttransistor (FET) besteht aus

1. Source S (Quelle) entspricht dem Emitter
2. Drain D (Senke) entspricht dem Kollektor
3. Gate G (Tor) entspricht der Base

Die Elektronen fließen von S zu D.

Dieser Elektronenstrom lässt sich durch ein elektrisches Feld (Feldeffekt!!!) innerhalb über ein geeignetes elektrisches Potenzial am G steuern.

Für logische Anwendungen ist der FET entweder ist der DS-Strom EINGeschaltet (das Tor offen, logisches „1“) oder AUSgeschaltet (das Tor geschlossen, logisches „0“).

Senke und Quelle sind durch einen schmalen Kanal aus n-dotiertem Material verbunden. Ein Strom kann durch das Kanal fließen.

Dem Kanal gegenüber befindet sich eine dünne Metallschicht - das Gate G. Das Gate steht nicht in elektrischem Kontakt mit dem eigentlichen Transistor, sondern ist von ihm durch die isolierende Oxidschicht getrennt.

Ein negatives Potenzial  $V_{GS}$  erzeugt ein elektrisches Feld, das die Elektronen aus dem Kanal in das Substrat drängt. Dadurch wird das Kanal unterbrochen, den Strom wird ausgeschaltet.

