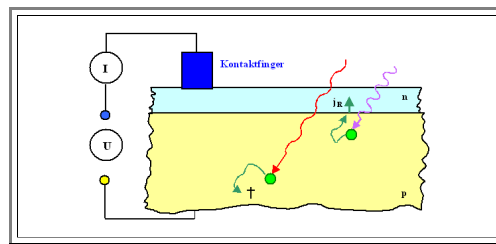


6.4.4 Zusammenfassung Kapitel 6.4

Solarzelle

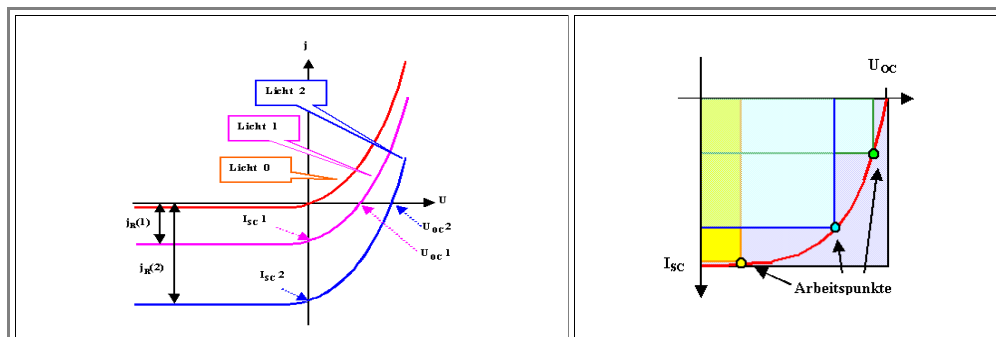
- ▶ Solarzellen sind großflächige **pn-Übergänge** mit einer (im Jahre **2003**) **(0.3 - 0.5) μm** dicken **p-Si-Seite** und einer dünnen ($\ll 1 \mu\text{m}$) **n-Si-Schicht**.
 - Alle Photonen mit $E = h \cdot \nu > E_G$ werden im Halbleiter absorbiert wobei ein Elektron-Lochpaar gebildet wird. Alle Photonen mit kleinerer Energie werden nicht absorbiert; ihre Energie geht "verloren". Die photogenerierte Elektronen landen als zusätzliche Minoritätsladungsträger im Leitungsband des **p-Halbleiter**.
 - Die bei kurzwelligeren Photonen vorhandene Überschussenergie $E_G - h \cdot \nu$ geht bei der Thermalisierung der Ladungsträger "verloren", d.h. macht nur die Solarzelle wärmer.
 - Damit gibt es ein fundamentales Dilemma: Halbleiter mit kleinem Bandgap absorbieren zwar mehr Photonen, verlieren aber einen Großteil der Überschussenergie; Halbleiter mit großem Bandgap tun das nicht, aber lassen viele Photonen durch.
- ▶ Konsequenz: Relativ zum gegebenen Sonnenspektrum (= wieviel Photonen gibt es bei welcher Energie) muß es ein optimales Bandgap E_G^{opt} geben mit maximalem Wirkungsgrad $\eta = (\text{Energie aus Solarzelle} / \text{Energie im Licht}) \cdot 100\%$.
 - E_G^{opt} liegt bei $\approx 1,5 \text{ eV}$ ($\approx \text{GaAs}$); η^{max} ist dann $\approx 30\%$. Für **Si** Solarzellen ($E_G = 1,1 \text{ eV}$) ist der theoretisch maximale Wirkungsgrad zwangsläufig etwas kleiner und liegt bei $\approx 25\%$.
 - Reale Wirkungsgrade sind immer kleiner, **15%** ist für ein kommerzielles Solarzellenmodul bereits ein sehr guter Wert. Damit ist die Energie"produktion" im Mittel über alles begrenzt auf (ganz grob /Faustregel) **100 W/m^2** .
- ▶ Ein Blick auf die grundsätzliche Funktionsweise macht klar, warum die Diffusionslänge, und damit kristalline Perfektion, der Schlüsselparameter zum Erfolg ist (und **Si** Solarzellen niemals beliebig billig sein werden).



- Elektrisch wird die Solarzelle komplett beschrieben durch die Diodengleichung mit einem zusätzlichem Term für den (Rückwärts) Photostrom

$$j(U_{\text{ex}}) = \left(\frac{e \cdot L \cdot n_{\text{Min}}(L)}{\tau} + \frac{e \cdot L \cdot n_{\text{Min}}(V)}{\tau} \right) \cdot \left(\exp \frac{eU_{\text{ex}}}{kT} - 1 \right) - j_r(\text{solar})$$

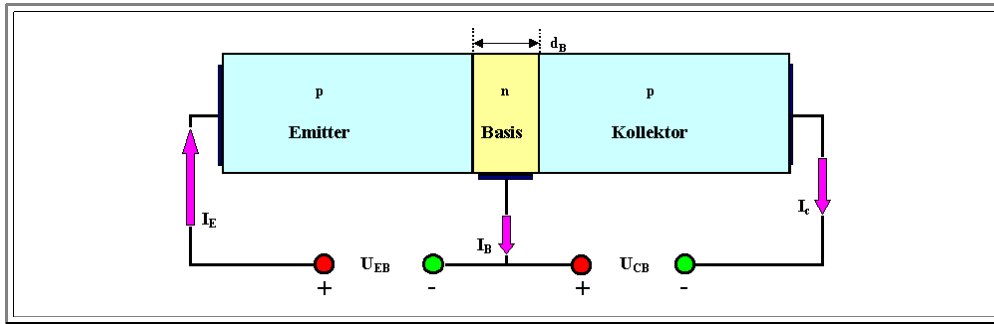
- ▶ Die graphische Darstellung ist einfach und aufschlußreich: Sie definiert direkt die Schlüsselparameter Kurzschlußstrom (I_{sc}); Leerlaufspannung (U_{oc}), Füllfaktor (**FF**) und optimaler Arbeitspunkt (**AP**).



Bipolar Transistor

Ein bipolar Transistor ist eine Sequenz aus **npn** oder **pnp**-dotiertem **Si**, wobei der mittlere Teil (die **Basis**) sehr dünn sein muß (genauer: $d_B \ll L$)

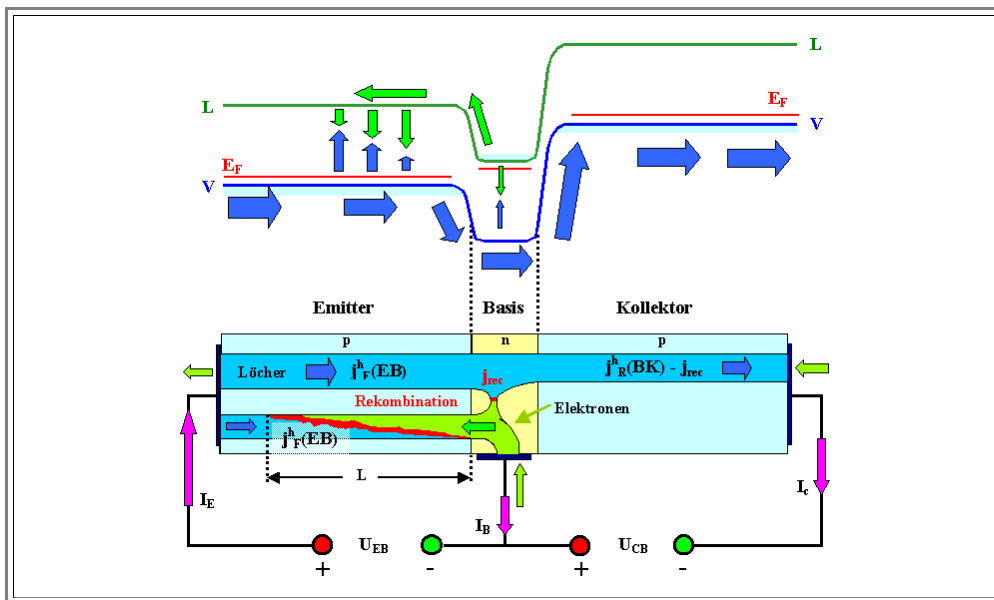
Ein Bild definiert die wichtigsten Terme:



Das Prinzip ist einfach: Die in Vorwärtsrichtung geschaltete Emitter-Basisdiode injiziert einen großen Löcherstrom vom Emitter in die Basis und einen Elektronenstrom von der Basis in den Emitter.

Da die Basis dünn ist, werden viele der injizierten Löcher bis zur **RLZ** der in Sperrichtung geschalteten Basis-Kollektordiode gelangen und dann vom dort herrschenden elektrischen Feld in den Kollektor "gespült".

Es ist wichtig (und einfach), den "Stromlaufplan" zu verstehen:



Bei Vernachlässigung aller "kleinen" Rückwärtströme und der Voraussetzung, dass $j^h_R(BK) \approx j^h_F(EB)$, ergibt sich sofort die **Stromverstärkung** in einfachster Weise zu

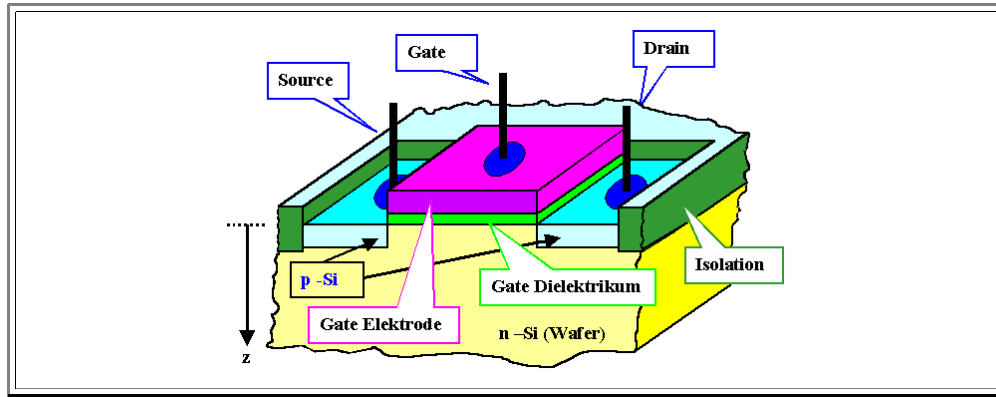
$$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{j^h_R(BK)}{j^e_F(EB)} = \frac{j^h_F(EB)}{j^e_F(EB)} = \frac{\frac{e \cdot D \cdot (n_i)^2}{N_D(B) \cdot L} \cdot \exp\left(\frac{eU_{ex}}{kT} - 1\right)}{\frac{e \cdot D \cdot (n_i)^2}{N_A(E) \cdot L} \cdot \exp\left(\frac{eU_{ex}}{kT} - 1\right)} = \frac{N_A(E)}{N_D(B)}$$

Damit ist die Herstellung eines verstärkenden Elements zurückgeführt auf Geometrie ("Mache ein sehr dünne Basis (plus "Drähtchen nach außen)") und ein extremes Dotierverhältnis!

Mikroelektronik wird möglich!

MOS Transistor

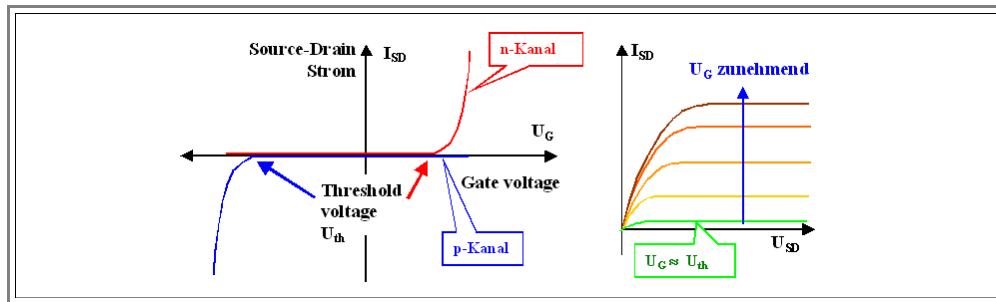
Nur ein Verständnis des Prinzips ist notwendig und möglich. Dazu reicht es, den prinzipiellen Aufbau zu betrachten:



Mit der Gatespannung wird der Stromfluß zwischen Source und Drain gesteuert; entscheidend ist die Polarität der Gatespannung. Für den **p-Kanal MOS** Transistor wie oben gezeigt gilt:

- **Positive** Gatespannung "zieht" Elektronen an und erhöht die Elektronenkonzentration unter dem Gate. Unabhängig von der Polarität der an Source - Drain anliegenden Spannung, ist einer der beiden **pn**-Übergänge immer gesperrt. Es fließt bei jeder Gatespannung immer nur ein (vernachlässigbar) kleiner Source-Drain Leckstrom.
- **Negative** Gatespannung stößt Elektronen ab, und **verringert** die Elektronenkonzentration direkt unter dem Gate. Das Massenwirkungsgesetz sorgt dann für **erhöhte** Löcherkonzentration. Oberhalb einer "Schwellspannung" erfolgt **Inversion**, d.h. es bildet sich ein **p**-leitender **Kanal**. Es gibt keine sperrenden **pn**-Übergänge mehr; damit kann ein großer Source-Drain Strom fließen.

Die wichtigsten Kurven sehen so aus:



Die weitaus überwiegende Anzahl der Trillionen (oder mehr??) pro Jahr hergestellten Transistoren sind **MOS** Transistoren.