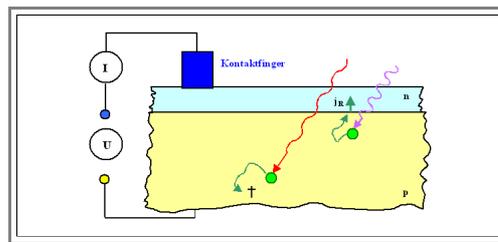


## 6.4.4 Zusammenfassung Kapitel 6.4

### Solarzelle

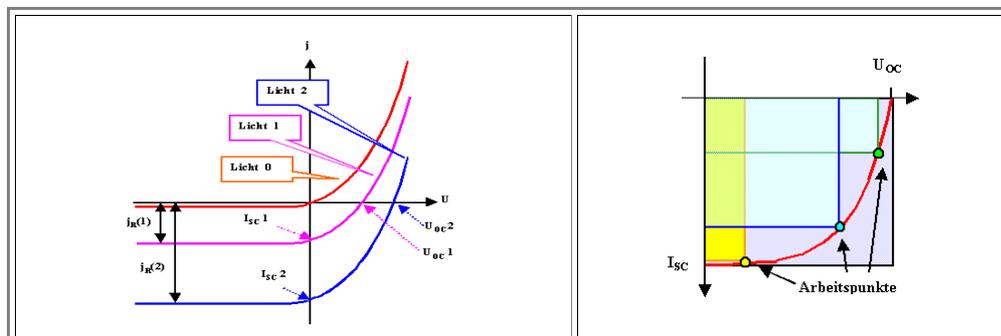
- ▶ Solarzellen sind großflächige **pn-Übergänge** mit einer (im Jahre **2003**) **(0.3 - 0.5)  $\mu\text{m}$**  dicken **p-Si-Seite** und einer dünnen ( $\ll 1 \mu\text{m}$ ) **n-Si-Schicht**.
  - Alle Photonen mit  $E = h \cdot \nu > E_G$  werden im Halbleiter absorbiert wobei ein Elektron-Lochpaar 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  $E_G^{\text{opt}}$  geben mit maximalem Wirkungsgrad  $\eta = (\text{Energie aus Solarzelle} / \text{Energie im Licht}) \cdot 100\%$ .
  - $E_G^{\text{opt}}$  liegt bei  $\approx 1,5 \text{ eV}$  ( $\approx \text{GaAs}$ );  $\eta^{\text{max}}$  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  $\text{W}/\text{m}^2$** .
- ▶ 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

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

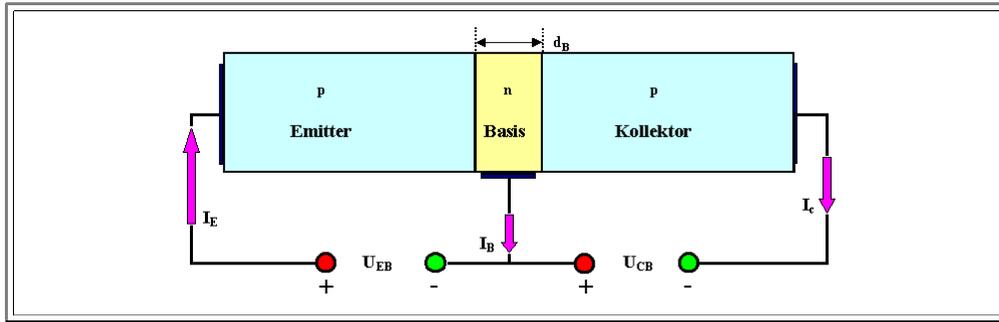
- ▶ Die graphische Darstellung ist einfach und aufschlußreich: Sie definiert direkt die Schlüsselparameter Kurzschlußstrom ( $I_{\text{sc}}$ ); Leerlaufspannung ( $U_{\text{oc}}$ ), Füllfaktor (**FF**) und optimaler Arbeitspunkt (**AP**).



# Bipolar Transistor

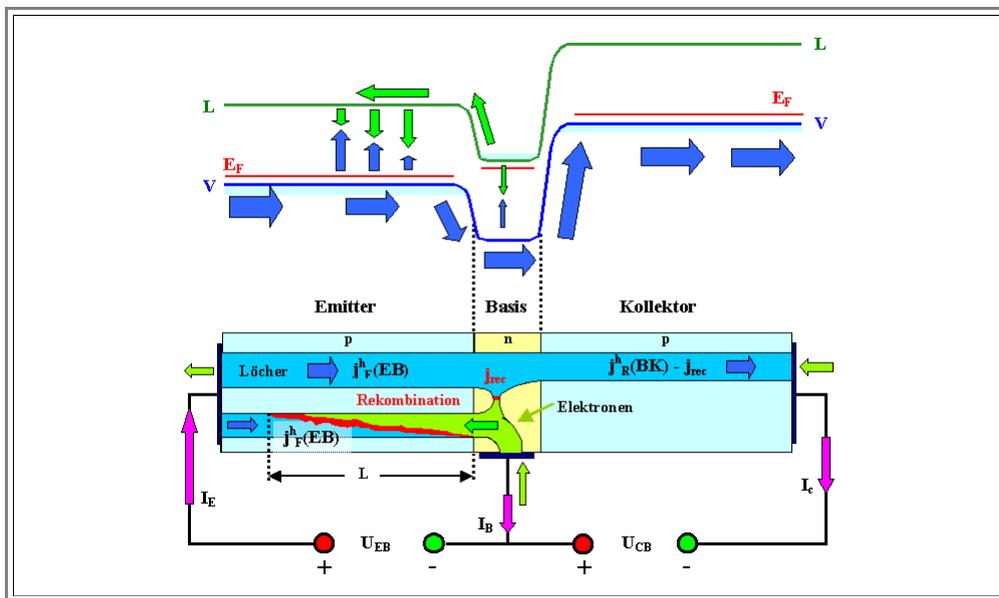
Ein bipolar Transistor ist eine Sequenz aus **npn** oder **pnp**-dotiertem **Si**, wobei der mittlere Teil (die **Basis**) sehr dünn sein muß (genauer:  $d_B \ll L$ )

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

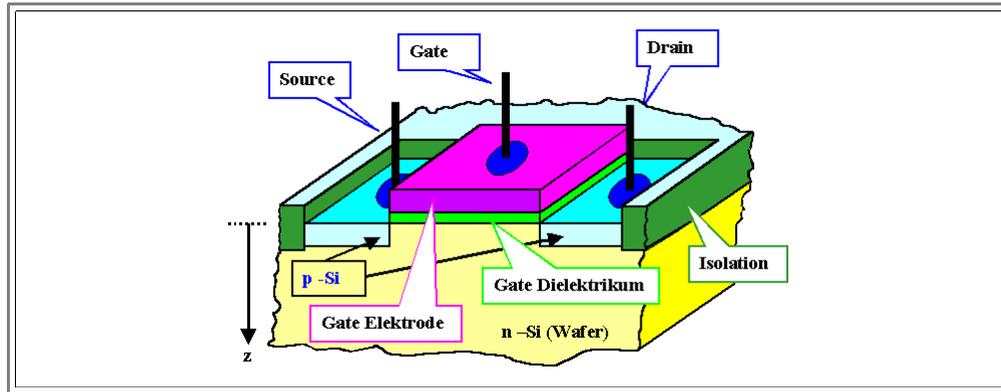
$$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{j^h_R(BK)}{j^e_F(EB)} = \frac{j^h_F(EB)}{j^e_F(EB)} = \frac{\frac{e \cdot D \cdot (n_i)^2}{N_D(B) \cdot L} \cdot \exp\left(\frac{eU_{ex}}{kT} - 1\right)}{\frac{e \cdot D \cdot (n_i)^2}{N_A(E) \cdot L} \cdot \exp\left(\frac{eU_{ex}}{kT} - 1\right)} = \frac{N_A(E)}{N_D(B)}$$

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

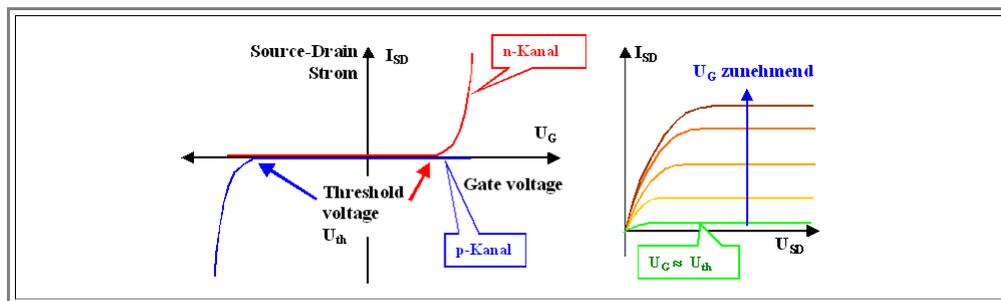
Nur ein Verständnis des Prinzips ist notwendig und möglich. Dazu reicht es, den prinzipiellen Aufbau zu betrachten:



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.