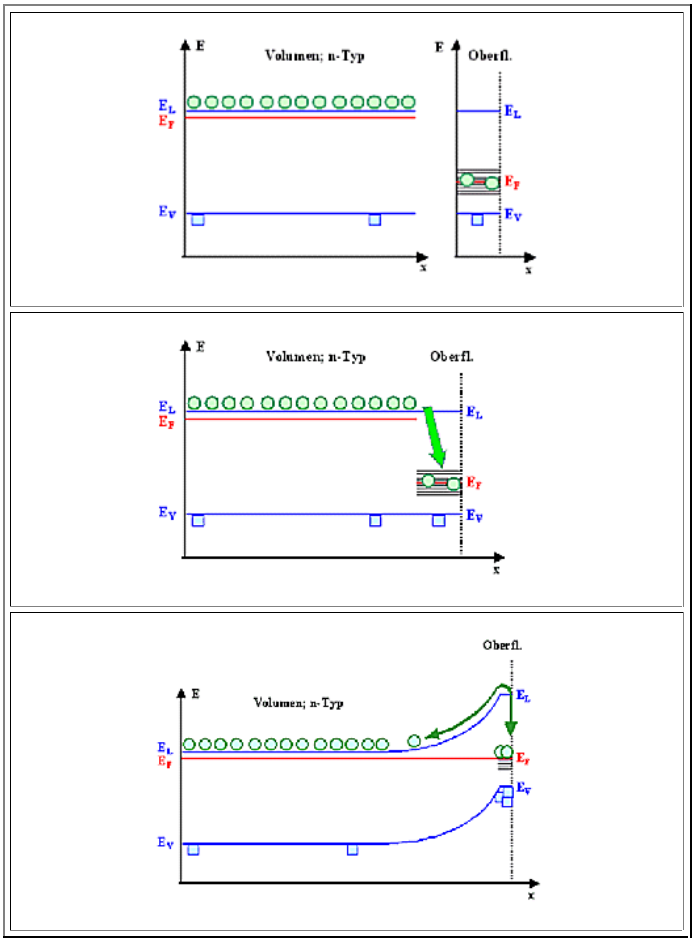
6.5.1 Merkpunkte Kapitel 6: Halbleiterkontakte und Bauelemente

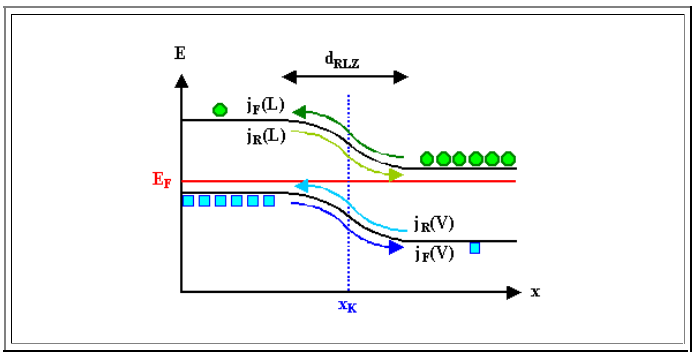
- Kontakte zwischen verschiedenen Materialien sind wichtig; in Stromkreisen sind sie unvermeidbar.
  - Die ***IU***-Kennlinie kann kompliziert sein; sie ist nicht notwendigerweise "Ohmsch", d.h. linear.
  - Reale Kontakte sind nicht die "idealen" Kontakte der Theorie: Nicht verwechseln!
  - Halbwegs "ideale" **pn**-Übergänge sind nicht leicht herzustellen
- Die Oberfläche hat eine andere Bandstruktur als das Volumen, insbesondere gibt es viele Zustände in der Bandlücke.
  - Auch der Übergang Halbleiter - Oberfläche ist damit ein Kontakt!
- Grundprinzip bei Kontakt: Ladungen verschieben sich in Richtung möglicher Energiegewinn. (Elektronen "nach unten"; Löcher "nach oben").
  - Dadurch entstehen elektr. Felder, Potentialunterschiede und Bandverbiegungen zwischen links - rechts.
  - Im Gleichgewicht: Energiegewinn (**= ΔE_F**) = Potentialunterschied links- rechts.



- Einfaches Rezept für Konstruktion Banddiagramm bei Kontakten ⇒
  - Wesentliche Größe: Raumladungszone (**RLZ**)
  - Weite d_{RLZ} der Raumladungszone ist verhältnismäßig leicht versteh- und errechenbar ("Kondensatormodell").
  - d_{RLZ} skaliert grundsätzlich mit **(Potentialunterschied)$^{1/2}$** und **(Dotierung/Ladungsträgerdicht)$^{-1/2}$**

1.	**Zeichne die Fermienenergie als horizontale Linie; markiere den Kontakt.**
2.	**Zeichne "weit" links vom Kontakt das Banddiagramm von Material 1; weit rechts das von Material 2; immer relativ zu der bereits festgelegten Fermienergie.**
3.	**Verbinde Leitungs- und Valenzband durch eine "gefühlsmäßig" gezeichnete Bandverbiegung.**

- Banddiagramm **pn**-Übergang im Gleichgewicht:
  - Ströme in jedem Band sind entgegengesetzt gleich groß.
  - Zwei grundsätzliche Sorten:
    - Majoritätsladungsträger fließen "bergauf" = *Vorwärtsstrom* j_F (Diffusionsstrom, Rekombinationsstrom).
    - Minoritätsladungsträger fließen "bergab" = *Rückwärtsstrom* j_R (Feldstrom, Driftstrom, Generationsstrom).
  - Im **GG** gilt $j_R = -j_F$.



- Rückwärtsstrom j_R sofort verständlich;
  - Proportional zum "Einzugsgebiet, d.h. Diffusionslänge L.
  - Proportional zur Generationsrate $G = n_{Min}/\tau$.
- "Radfahrermodell" zur Veranschaulichung

$$j_R = -j_F = \frac{-e \cdot L \cdot n_{Min}}{\tau} = \frac{-e \cdot L \cdot (n_i)^2}{N_A \cdot \tau}$$

- Mit externer Spannung U_{ex} ändert sich die Höhe der Energiebarriere.
  - Nur der Vorwärtsstrom ändert sich (mit einem Boltzmannfaktor).

$$j_F(U_{ex}) = -j_R \cdot \exp\frac{eU_{ex}}{kT}$$

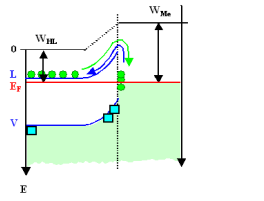
- Die komplette Strombilanz führt sofort auf die (elementare) Diodengleichung.
  - Gilt nur für ideale Diode ohne Berücksichtigung von Ladungsträgergeneration in der **RLZ**.

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

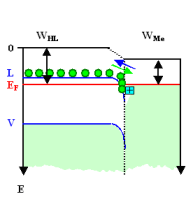
- Berücksichtigung **RLZ** ist tricky, aber leicht zu veranschaulichen: Ein weiterer Term ist zur Stromgleichung zu addieren.
  - Konsequenz: Für Halbleiter mit "großer" Bandlücke (schon für **Si**) dominiert der **RLZ** Term in Rückwärtsrichtung; d.h. der Leckstrom einer **Si** Diode wird durch den **RLZ** Beitrag dominiert.

$$j = \left(\frac{e \cdot L \cdot n_i^2}{\tau \cdot N_A} + \frac{e \cdot L \cdot n_i^2}{\tau \cdot N_D}\right) \cdot \left(\exp\frac{eU}{kT} - 1\right) + \frac{e \cdot n_i \cdot d_{RLZ}(U)}{\tau}\left(\exp\frac{eU}{2kT} - 1\right)$$

- Banddiagramm Metall - Halbleiterkontakten nach Rezept.
  - Austrittsarbeiten definieren den jetzt notwendigen gemeinsamen Nullpunkt.
  - Neues Phänomen: Akkumulation von Ladungsträger (im Halbleiter) and der Grenzfläche.

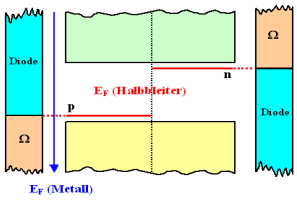


RLZ; Verarmung; Schottky Kontakt



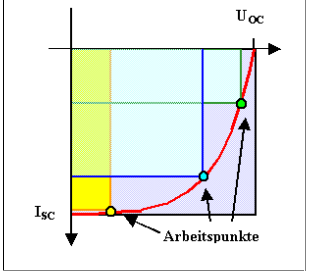
Akkumulation, Ohmscher Kontakt

- Gesamteffekt: Diodenverhalten oder ohmscher Kontakt - je nach Vorzeichen der Differenz Austrittsarbeit Metall - Austrittsarbeit (= Fermienergie) Halbleiter.
  - Damit werden die unersetzlichen ohmschen Kontakte verstanden und systematisch möglich!



Solarzelle = großflächiger **pn**-Kontakt

- Lichtabsorption produziert zusätzliche Minoritäten; fließen ab als Photostrom falls sie bis zur **RLZ** diffundieren können.
- Damit große Diffusionlsänge erforderlich.
- Wirkungsgrad begrenzt durch
  - Nicht absorbierte Photonen (Zahl steigt mit zunehmendem E_G)
  - Verlorene Überschußenergie Photon (Wird größer mit abnehmendem E_G
- Optimales $E_G \approx$ **1,5 eV** mit $\eta^{max} \approx$ **30 %**
- **Si** Solarzellen: $\eta^{max} \approx$ **25 %**; $\eta^{tech} \approx$ **15 %**.



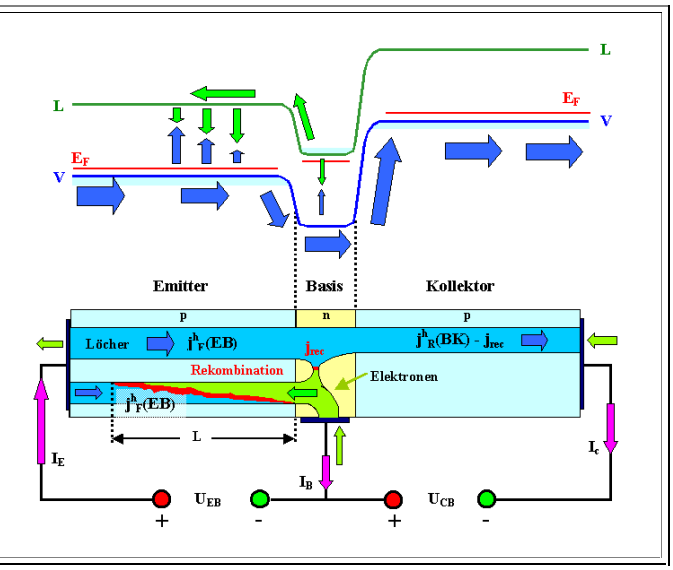
Kennlinie mit wesentlichen Parametern

- **Leerlaufspannung**
- **Kurzschlußstrom**
- **Füllfaktor**
- **Arbeitspunkt**

Bipolar Transistor

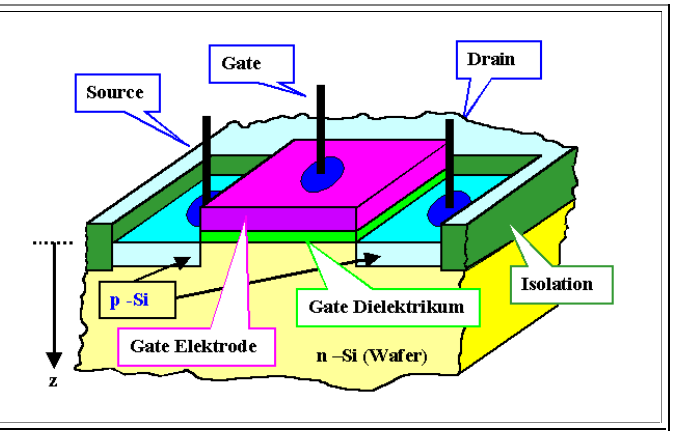
- **npn**- oder **pnp**-Struktur mit dünner Basis.
- Die Emitter-Basisdiode wird in Vorwärtsrichtung betrieben und injiziert die Majoritätsladungsträger des Emitters in die Basis.
- Dort diffundieren diese Ladungsträger bis zum Kollektor, wo sie durch das elektrische Feld der in Rückwärtsrichtung gepolten Basis-Kollektordiode "abgesaugt" werden
- Damit Stromverstärkung möglich mit

$$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{N_A(E)}{N_D(B)}$$



MOS Transistor

- Prinzip: Schaffung eines Kanals unter dem Gate mit derselben Ladungsträgerart wie Source/ Drain.
- Dazu nötig: *Inversion*: Reduzierung der Majoritätsladungsträgerkonzentration durch elektrostatische "Abstoßung" direkt unter dem Gate bis (durch Massenwirkungsgesetz) die Minoritätsladungsträger überwiegen.
- Schwellspannung (Threshold Voltage): Notwendige Spannung zur Erreichung der Inversion; einstellbar durch Technologieparameter (insbesondere Dicke des Gate Dielektrikums).



Fragebogen

Multiple Choice Fragen zu Kapitel 6