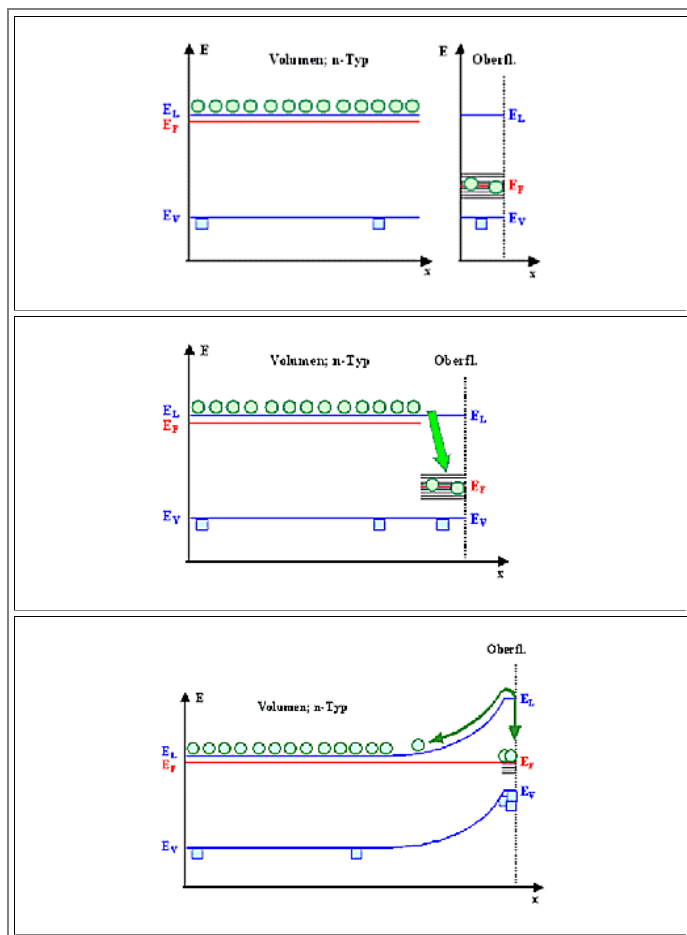


6.5.1 Merkpunkte Kapitel 6: Halbleiterkontakte und Bauelemente

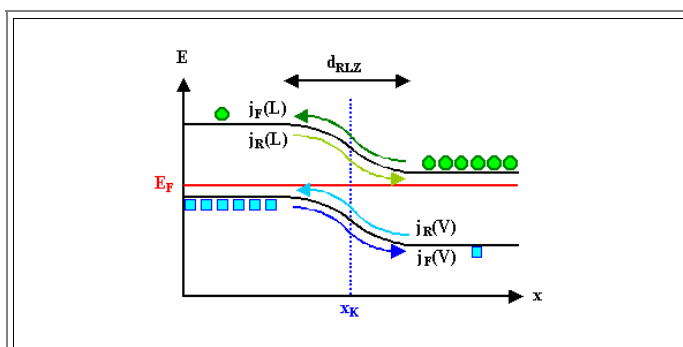
- ▶ Kontakte zwischen verschiedenen Materialien sind wichtig; in Stromkreisen sind sie unvermeidbar.
 - Die ***IU***-Kennlinie kann kompliziert sein; sie ist nicht notwendigerweise "Ohmsch", d.h. linear.
 - Reale Kontakte sind nicht die "idealen" Kontakte der Theorie: Nicht verwechseln!
 - Halbwegs "ideale" **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 ($= \Delta E_F$) = Potentialunterschied links- rechts.



- ▶ Einfaches Rezept für Konstruktion Banddiagramm bei Kontakten \Rightarrow
 - Wesentliche Größe: Raumladungszone (RLZ)
 - Weite d_{RLZ} der Raumladungszone ist verhältnismäßig leicht versteh- und erchenbar ("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 Fermienenergie.
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 $G = n_{Min}/\tau$.

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

• "Radfahrermodell" zur Veranschaulichung

➤ 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.

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

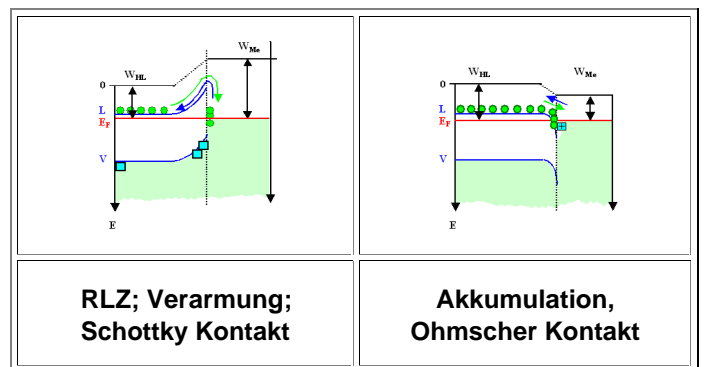
➤ Berücksichtigung RLZ ist tricky, aber leicht zu veranschaulichen: Ein weiterer Term ist zur Stromgleichung zu addieren.

- 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.

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

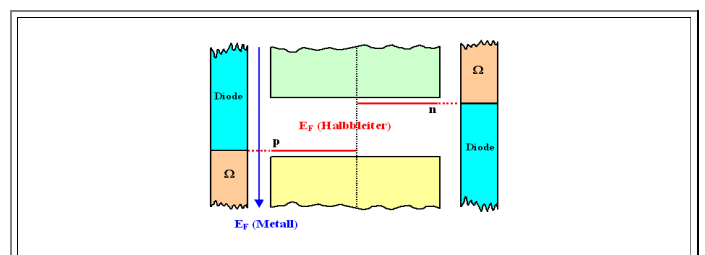
➤ Banddiagramm Metall - Halbleiterkontakten nach Rezept.

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



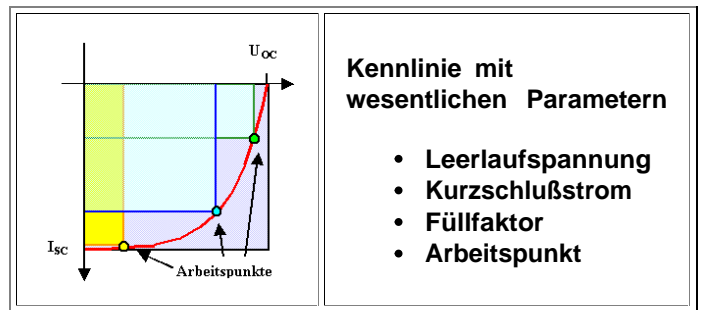
➤ Gesamteffekt: Diodenverhalten oder ohmscher Kontakt - je nach Vorzeichen der Differenz Austrittsarbeit Metall - Austrittsarbeit (= Fermienergie) Halbleiter.

- Damit werden die unersetzlichen ohmschen Kontakte verstanden und systematisch möglich!



Solarzelle = großflächiger pn-Kontakt

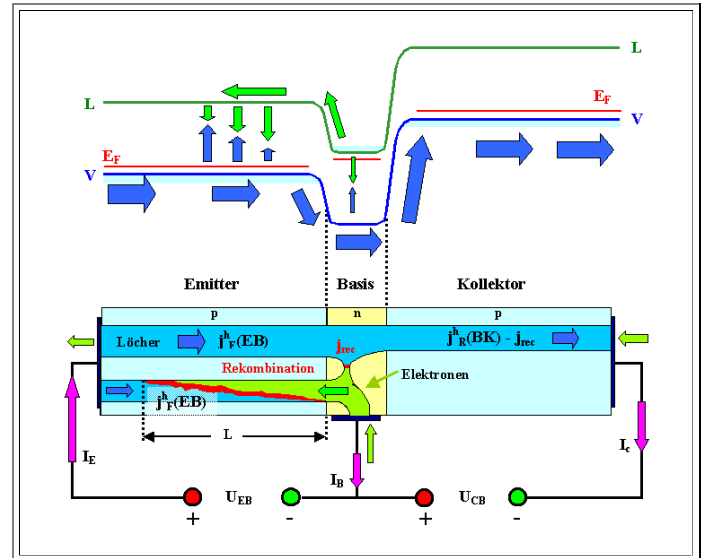
- Lichtabsorption produziert zusätzliche Minoritäten; fließen ab als Photostrom falls sie bis zur **RLZ** diffundieren können.
- Damit große Diffusionslänge erforderlich.
- Wirkungsgrad begrenzt durch
 - Nicht absorbierte Photonen (Zahl steigt mit zunehmendem E_G)
 - Verlorene Überschussenergie Photon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



Bipolar Transistor

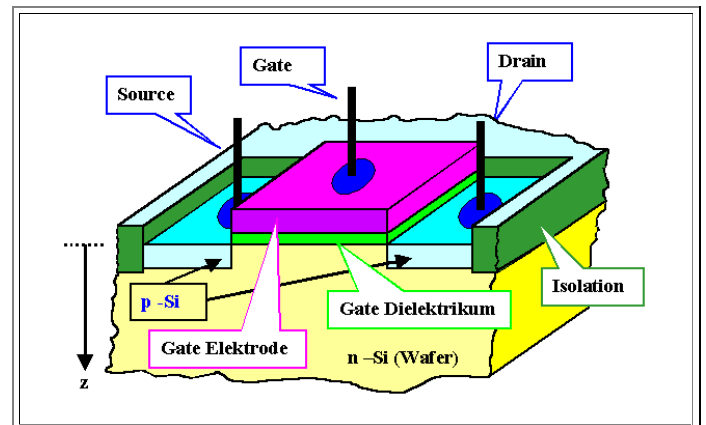
- npn- oder pnp-Struktur mit dünner Basis.
- Die Emitter-Basisdiode wird in Vorwärtsrichtung betrieben und injiziert die Majoritätsladungsträger des Emitters in die Basis.
- Dort diffundieren diese Ladungsträger bis zum Kollektor, wo sie durch das elektrische Feld der in Rückwärtsrichtung gepolten Basis-Kollektordiode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