

9.4.4 Merkpunkte zu Kapitel 9.4: Der pn-Übergang

Das Banddiagramm eines **pn**-Übergangs im Gleichgewicht folgt sofort aus der Konstruktionsanleitung:

- **Fermienergie** ist überall gleich.
- Weit links und rechts vom Übergang liegt das Banddiagramm des "im Dunkeln rumliegenden" Halbleiters vor (= Gleichgewicht).
- Hier haben wir:

- Links **p**-Typ-Material.
- Rechts **n**-Typ-Material

Die Lage der Fermienergie zeigt die Dotierung eindeutig an. Außerdem haben wir dasselbe Material links und rechts, da die Energielücken identisch sind.

- Im Übergangsbereich müssen die Bänder "irgendwie" verbogen sein. Damit gibt es ein **elektrisches Feld** im Übergangsbereich und so gut wie keine freien Ladungsträger.

Was passiert ist wie zuvor: Elektronen wandern vom **n-Si** zum **p-Si**, weil es dort jede Menge freie Plätze bei tieferen Energien gibt; für Löcher ist es entgegengesetzt.

- Die ortsfesten geladenen Dotieratome bleiben zurück; es entsteht eine Bandverbiegung mit Raumladungszone und elektrischem Feld.

Es fließen ständig Elektronen- und Löcherströme j_i von links nach rechts und zurück.

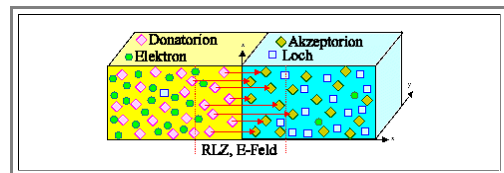
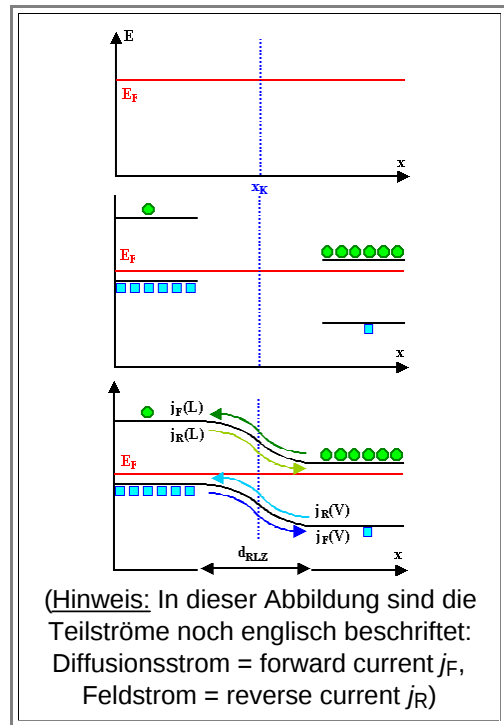
- Im Gleichgewicht gilt aber: $\sum j_i = 0$.

Im Ortsraum sieht es so aus $\Rightarrow$

- Die Weite der **RLZ** ist analog zum Fall der Oberfläche: proportional zur Wurzel aus der Differenz der Fermienergien (oder der wirkenden Spannung) und umgekehrt proportional zu einer Art "Mittelwert" der Dotierkonzentrationen.

Die Ströme haben Namen $\Rightarrow$

- Im **Durchlaßbereich** (englisch: forward direction) einer **Diode**, die ein **pn**-Übergang immer darstellt, fließen die Ladungsträger letztlich per **Diffusion** von der hohen zur niedrigen Konzentration (1. Ficksches Gesetz). Auf der "anderen" Seite sind sie jetzt überzählige Minoritäten und verschwinden durch **Rekombination**.
- Im **Sperrbereich** (englisch: reverse direction) einer Diode, die ein **pn**-Übergang immer darstellt, fließen die Ladungsträger letztlich per **Drift** im elektrischen **Feld** der **RLZ** zur anderen Seite – aber immer nur so viele wie durch **Generation** ersetzt werden können!



Strom der **Majoritäten** in das jeweils andere Gebiet.
Beispiel: Elektronenstrom vom **n-Si** zum **p-Si**:

- **Diffusionsstrom**, oder
- **Rekombinationsstrom**, oder
- **Durchlaßstrom**.

Strom der **Minoritäten** in das jeweils andere Gebiet.
Beispiel: Elektronenstrom vom **p-Si** zum **n-Si**:

- **Feldstrom**, oder
- **Driftstrom**, oder
- **Generationsstrom**, oder
- **Sperrstrom**.

Die Größe der 4 Teilströme lässt sich bis auf einen Proportionalitätsfaktor (der sich zu **1** ergibt, wenn man aufwendig rechnet) sofort ableiten:

Der (feldgetriebene) **Sperrstrom** j_F muss proportional sein zum:

- **Einzugsgebiet** des **pn-Kontakts** = **Diffusionslänge** L , weil Minoritäten weit weg von dem **pn-Übergang** per Rekombination verschwinden, bevor sie zum "Abhang" (= elektr. Feld der **RLZ**) kommen und dann unweigerlich "hinunterfallen".
- **Generationsrate** $G = n_{\min}/\tau$, denn mehr als das, was pro Sekunde generiert wird, kann pro Sekunde nicht abfließen.
- **Ladung** $q = \pm e$.

Der (diffusionsgetriebene) **Durchlaßstrom** j_D muss entgegengesetzt gleichgroß sein wie der Sperrstrom, da im Gleichgewicht ($U_{\text{ext}} = 0$) der externe Strom $j_{\text{ext}} = 0$ sein muss.

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

$$j_F(V) = \frac{-e \cdot L \cdot n_{\min}(V)}{\tau} = \frac{-e \cdot L \cdot (n_i)^2}{N_D \cdot \tau}$$

$$j_D = -j_F \quad \text{im Gleichgewicht, d.h. für } j_{\text{ext}} = 0$$

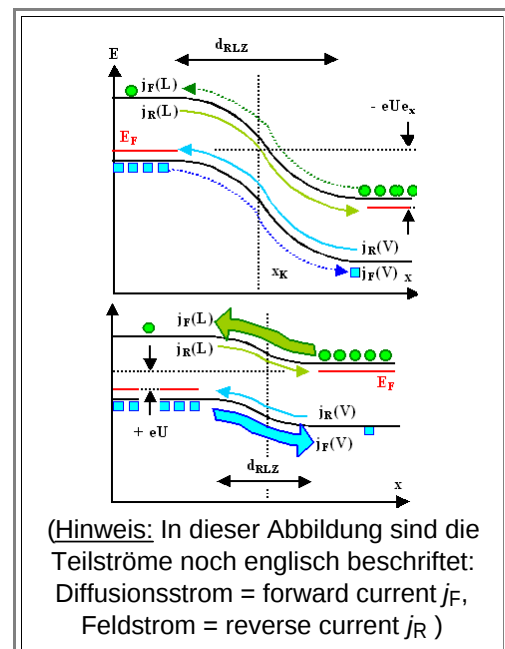
Beim **pn-Übergang** mit angelegter Spannung U_{ext} verschieben sich die Bänder um $\pm e U_{\text{ext}}$. Die Fermienergie ist **kein** waagrechter Strich mehr – sie ist gar nicht mehr definiert, denn wir haben, da jetzt Netto-Strom fließt, **kein** Gleichgewicht mehr.

Weit weg vom **pn-Übergang** hat sich aber nicht viel geändert; dort zeichnen wir die Bänder wie gewohnt.

Was bei den Strömen passiert, ist leicht zu sehen:

- **Nichts** beim Sperrstrom. Ladungsträger, die zum "Abhang" gelangen, fallen runter, egal wie tief es runter geht.
- Für den Durchlaßstrom hat sich die Energiebarriere, über die er fließen muss, um $\pm e|U_{\text{ext}}|$ erhöht oder erniedrigt – je nach Vorzeichen der angelegten Spannung. Er wird sich dadurch gegenüber dem Durchlaßstrom im Gleichgewicht, $j_D(U_{\text{ext}} = 0) = |j_F|$, um $\exp[-eU_{\text{ext}}/(k_B T)]$ erniedrigen oder erhöhen:

$$j_D(U_{\text{ex}}) = |j_F| \cdot \exp\left(\frac{+eU_{\text{ex}}}{k_B T}\right)$$



Es ergibt sich sofort die Diodengleichung

$$j(U_{\text{ex}}) = \left(|j_F(L)| + |j_F(V)| \right) \cdot \left(\exp \frac{eU_{\text{ex}}}{k_B T} - 1 \right)$$

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

Konventionen: Durchlaßstrom ist *immer* positiv.

- Durchlaß für **+** an **p**-Teil, **-** an **n**-Teil.
- Üblich bei Profis: **log(I)**- **U**-Diagramm.
- Maximale Sperrspannung ist begrenzt durch Durchbruch.
- Durchlaßstrom ist begrenzt durch Serienwiderstände.

