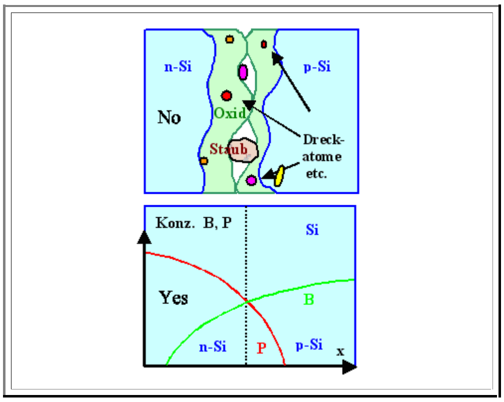
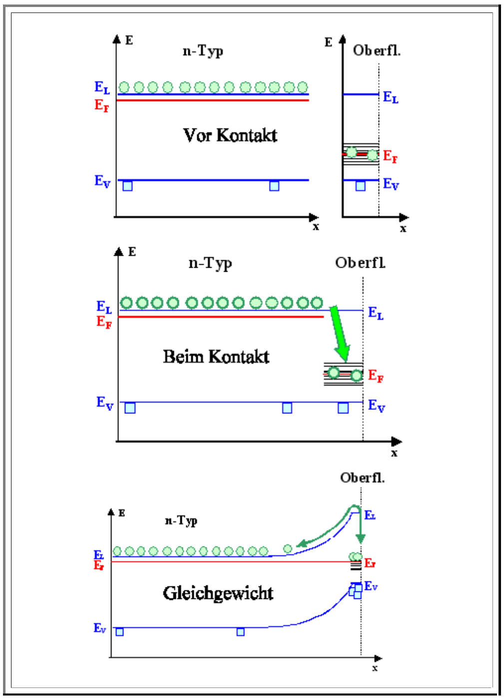
9.3.4 Merkpunkte zu Kapitel 9.3: Raumladungszonen und Kontakte



- Kontakte oder "junctions" machen Bauelemente.
  - Es gibt *kein* Halbleiterbauelement ohne Halbleiter-Metall Kontakt und so gut wie keines ohne "*pn-Kontakt*".
  - Kontakte bei Halbleiterbauelementen macht man nicht durch "kontaktieren" im Sinne von "Zusammendrücken" sondern durch (extrem trickreiche) Halbleitertechnologie.
  - Ein **pn**-Übergang liegt vor an der Stelle, an der die Akzeptor- und Donatorkonzentration gleich groß ist.
  - "*Ohmsche Kontakte*", die man immer braucht, sind idealerweise eigenschaftslos, d. h. sie lassen bei jeder Spannung und Polarität den vollen Strom durch. Sie sind aber oft recht schwer zu machen.

- Links und rechts von einem Übergang können vor Kontakt unterschiedliche Fermienergien vorliegen.
  - ⇒ Es gibt unterschiedliche Ladungsträgerkonzentrationen.
  - ⇒ Es gibt unterschiedliche Zustände in der Energielücke bei "homo"-Kontakten wie dem **pn**-Übergang im **Si**.
  - *Beispiel*: "Kontakt" **Si**mit der Oberfläche des **Si**-Kristalls.



- Es ist extrem wichtig, das Bild ⇒zu verrstehen!
  - Vor Kontakt: "Irgendwie" verschiedene **Si**-Varianten = verschiedene Zustände in der Energielücke = verschiedene Fermienergien.
  - In der (Pico)sekunde nach (gedachtem) Kontakt fließen Elektronen auf jetzt verfügbare Zustände mit niedrigerer Energie (im Beispiel nach rechts zu den Oberflächenzuständen); Löcher laufen auf neu verfügbare (mit Elektronen besetzte) Plätze mit höherer Energie.
  - In der Nähe des Kontakts herrscht keine Ladungsneutralitität mehr. Im Beispiel lädt die Oberfläche sich negativ auf durch den Zustrom von Elektronen, die jetzt aber *auf* der Oberfläche lokalisiert sind.
  - Im Volumen nahe der Oberfläche bleiben díe ortsfesten positiv geladenen Donatoratome zurück; sie bilden eine *Raumladung* mit der Dichte $N^{+}_{\mathbf{Don}}$.
  - Dadurch entsteht ein *elektrisches Feld*, das die zur Oberfläche strebenden Elektronen zurücktreibt.
  - Die rechte Seite des Banddiagramms geht deshalb energetisch "hoch", es entsteht eine *Bandverbiegung*.

- Entscheidend ist das Banddiagramm für *Gleichgewicht*. Einige Definitionen dazu, die alle im Grunde dasselbe sagen:
  - *Gleichgewicht*liegt vor, sobald es genausoviel Energie kostet gegen das Feld anzulaufen, wie man durch "Tieferfallen" an der Oberfläche gewinnen kann.
  - *Gleichgewicht* liegt vor, sobald energetisch nichts mehr zu gewinnen ist. ⇒ Die Fermienergie ist überall dieselbe.

⇐	**Vollständig äquivalente Formulierungen** **Damit Rezept für Banddiagramm-Erstellung:**
1.	**Zeichne die Fermienergie als horizontale Linie; markiere den Übergang.**
	Zeichne "weit" links davon das Banddiagramm von

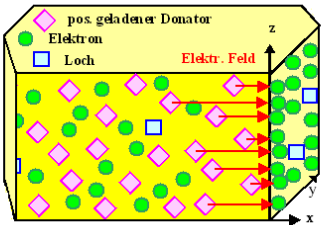
- *Gleichgewicht* liegt vor, sobald der nach rechts fließende Elektronen*strom* genau so groß ist wie der zurückfließende Strom.

- Ströme fließen, weil es für Elektronen auf beiden Seiten eine Wahrscheinlichkeit **exp(–Δ*E*/k*T*)** gibt, die *Energiebarriere* Δ***E*** zur jeweils anderen Seite zu überwinden.

2.	**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.**

Eine Darstellung im *Ortsraum* verdeutlicht das Konzept der *Raumladungszone*.

- Es gibt "Ladungen im Raum", da die ionisierten Dotieratome nicht beweglich sind und "ihre" Ladungsgträger jetzt woanders sind.
- Das *elektrische Feld* beginnt und endet auf den jetzt separierten Ladungen.
- Wir haben unvermeidlich einen geladenen *Kondensator* mit der Kapazität C_{RLZ}.



Die Weite d_{RLZ} der Raumladungszone (**RLZ** oder "**SCR**" für "space charge region") ergibt sich sofort aus dem Kondensatormodell:

- Wir haben Fläche ***F*** und (mittleren) Abstand der "Kondensatorplatten" = ½d_{RLZ}

- Der Potentialunterschied in Volt = anliegende *Spannung* ist $\Delta E_F/e$

- Die *Ladung* auf den Platten ist gleich der *Zahl* der ionisieten Dotieratome = gleich *Dichte* mal *Volumen* = $N_D \cdot V$ der positiv geladenen Donatorionen im Volumen $V = F \cdot d_{RLZ}$.

- Aus den beiden Gleichungen für die Unbekannten d_{RLZ} und C_{RLZ} folgt sofort die Weite der **RLZ** ⇒

$$C_{RLZ} = \frac{2 \cdot \epsilon_{Si} \cdot \epsilon_0 \cdot F}{d_{RLZ}}$$

$$C_{RLZ} = \frac{Q}{U_K} = \frac{Q}{\Delta E_F/e}$$

$$= \frac{e^2 \cdot (N_D \cdot F \cdot d_{RLZ})}{\Delta E_F}$$

$$d_{RLZ} = \left(\frac{2 \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \Delta E_F}{e^2 \cdot N_D}\right)^{½}$$

Legt man zusätzlich zu der "eingebauten" Spannung oder *Kontaktspannung* $\Delta E_F/e$ noch ein externe Spannung U_{ext} an, muß die Gesamtspannung ***U*** in die Formel eingesetzt werden.
(Auf Vorzeichen aufpassen!)

- Falls jetzt Strom fließt, haben wir *kein* Gleichgewicht mehr!

- Falls *kein* (oder nur vernachlässigbarer kleiner) Strom fließt, haben wir jetzt ⇒

$$U = \frac{\Delta E_F}{-e} + U_{ext}$$

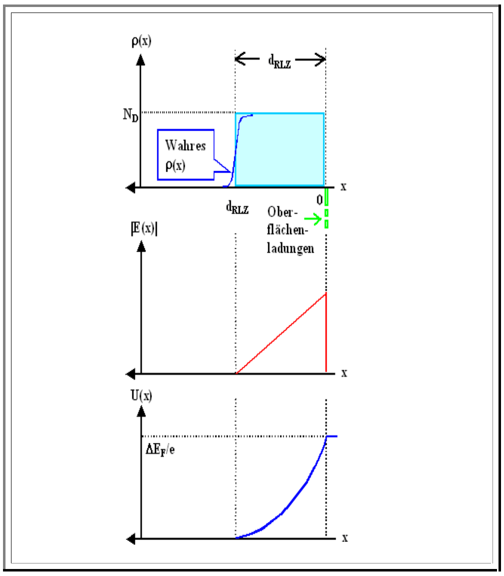
$$d_{RLZ} = \left(\frac{2\,\epsilon_{Si}\,\epsilon_0\,(\Delta E_F + eU_{ext})}{e^2 \cdot N_D}\right)^{½}$$

$$\frac{C_{RLZ}}{F} = \left(\frac{2\,\epsilon_{Si}\,\epsilon_0\,e^2\,N_D}{\Delta E_F + eU_{ext}}\right)^{½}$$

- Formal-mathematisch wird die *Poisson-Gleichung* gelöst (Grundgleichung der Elektrostatik).
  - Die Poisson-Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen Ladungsdichte ρ , elektr. Feld $\boldsymbol{E}$ und elektr. Potential $\boldsymbol{V}$.

$$\Delta \boldsymbol{V}(x, y, z) = -\frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0}$$

$$\nabla \boldsymbol{V}(x, y, z) = -\boldsymbol{E}(x, y, z)$$



- Lösungsweg eindimensional:
  - *Ladungsdichte* $\rho = \boldsymbol{N_{Dot}}$ in $\boldsymbol{d_{RLZ}}$ = const.
  - *Feld* $\boldsymbol{E}$ = einmal integrieren = Gerade. Randbedingung: $\boldsymbol{E(x = d_{SCR}) = 0}$ **V/cm**
  - *Potential* $\boldsymbol{V}$ = zweimal integrieren = Parabel. Randbedingung $\boldsymbol{V(d_{SCR}) = 0}$ **eV**; Potentialdifferenz = $\Delta \boldsymbol{E_F/e}$