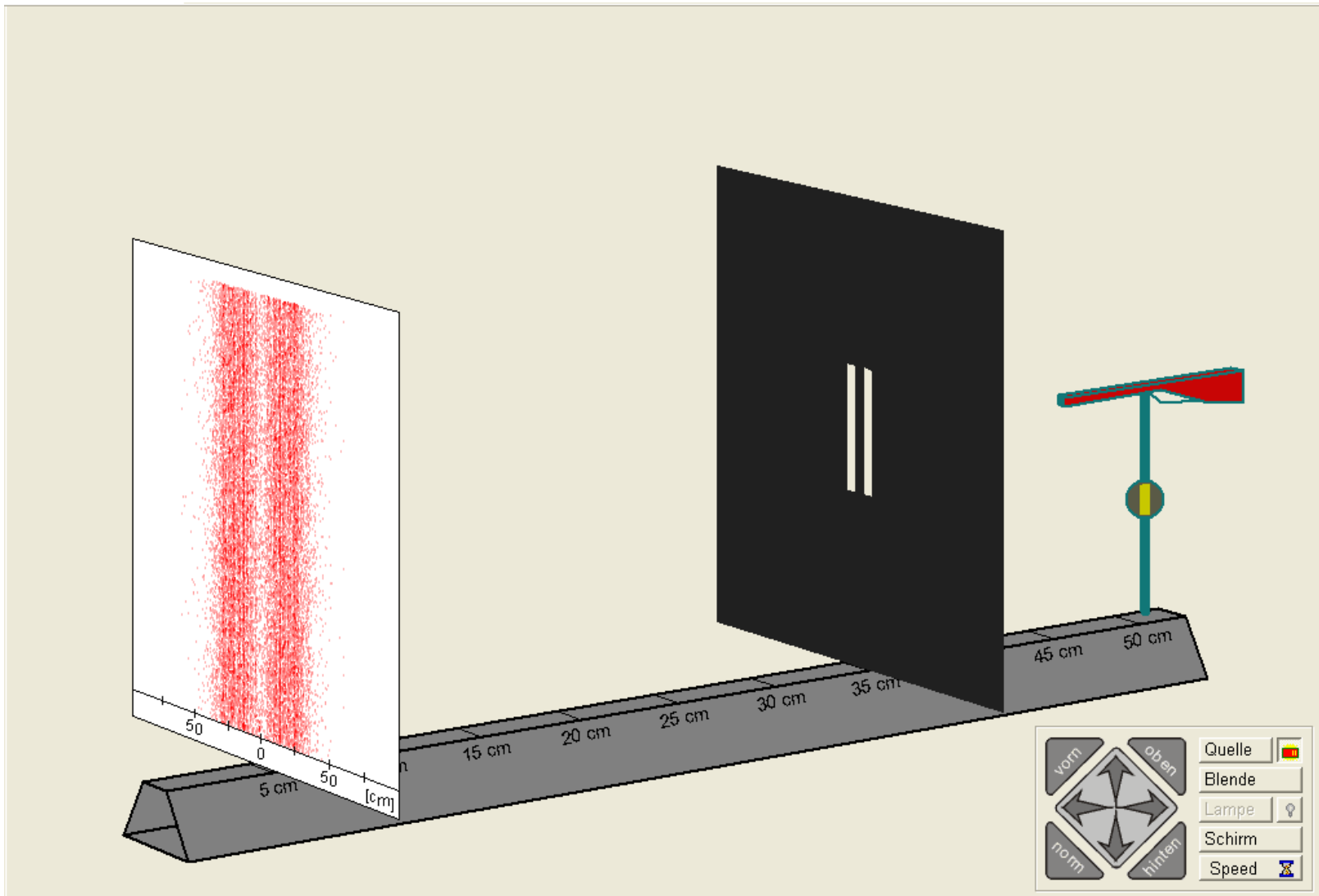
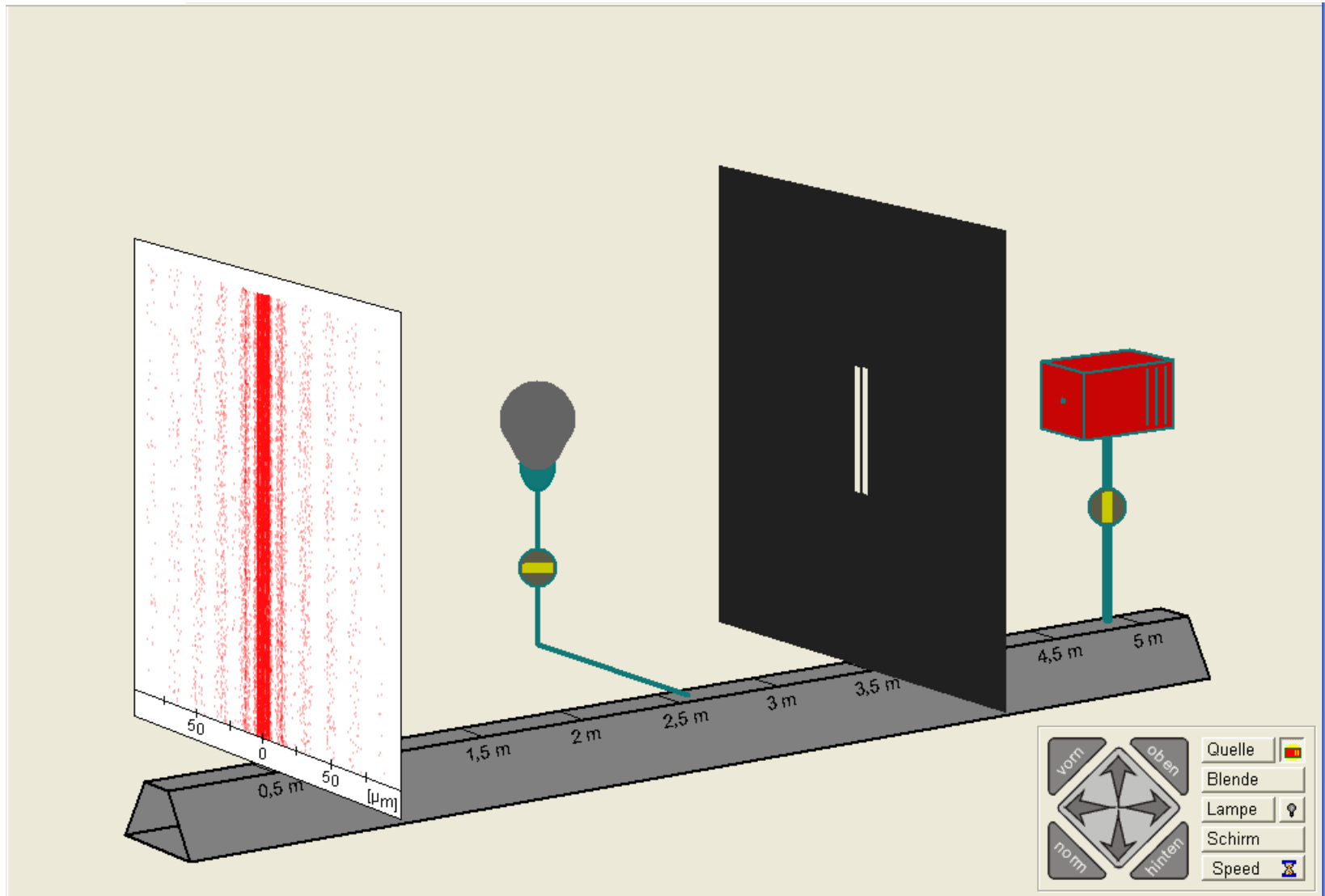


# Tunnelbauelemente



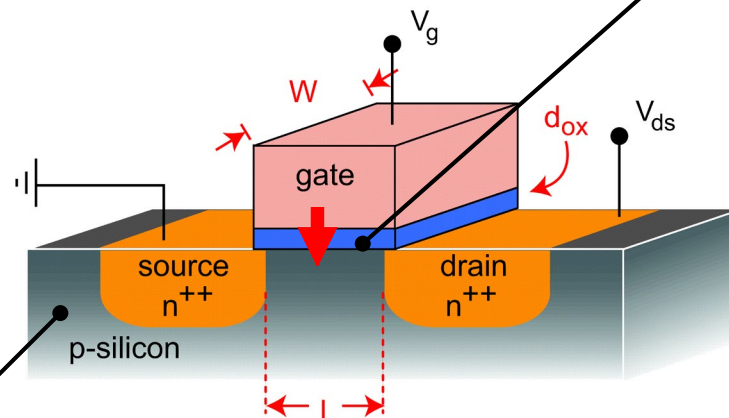
- Quantenmechanische Grundlagen
  - Wellennatur der QM-Teilchen
  - Schrödingergleichung
  - Teilchen in der Box
  - Der Tunneleffekt
- Tunneldiode
- EEPROM





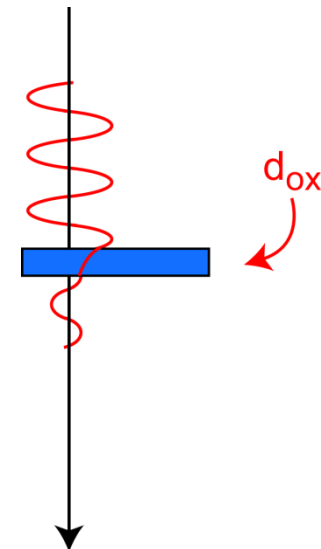
In heutigen ICs ist Isolator extrem dünn ( $\sim 1\text{nm}$ )

- Ladungsträger können durch Isolator tunneln
- Welchen Einfluss hat das auf ein Bauelement?



Elektronen in Halbleiter!

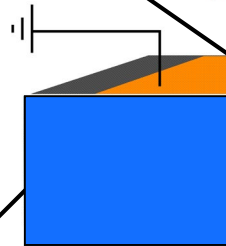
- Wie verhalten sich Elektronen in Festkörper?
- Was sind Energiebänder?
- Wie kommt es zu Bandlücken?
- Ist die Bandlücke wichtig?



# Ultradünne Kanalschichten - Elektronen räumlich eingeschränkt: Teilchen in der Box

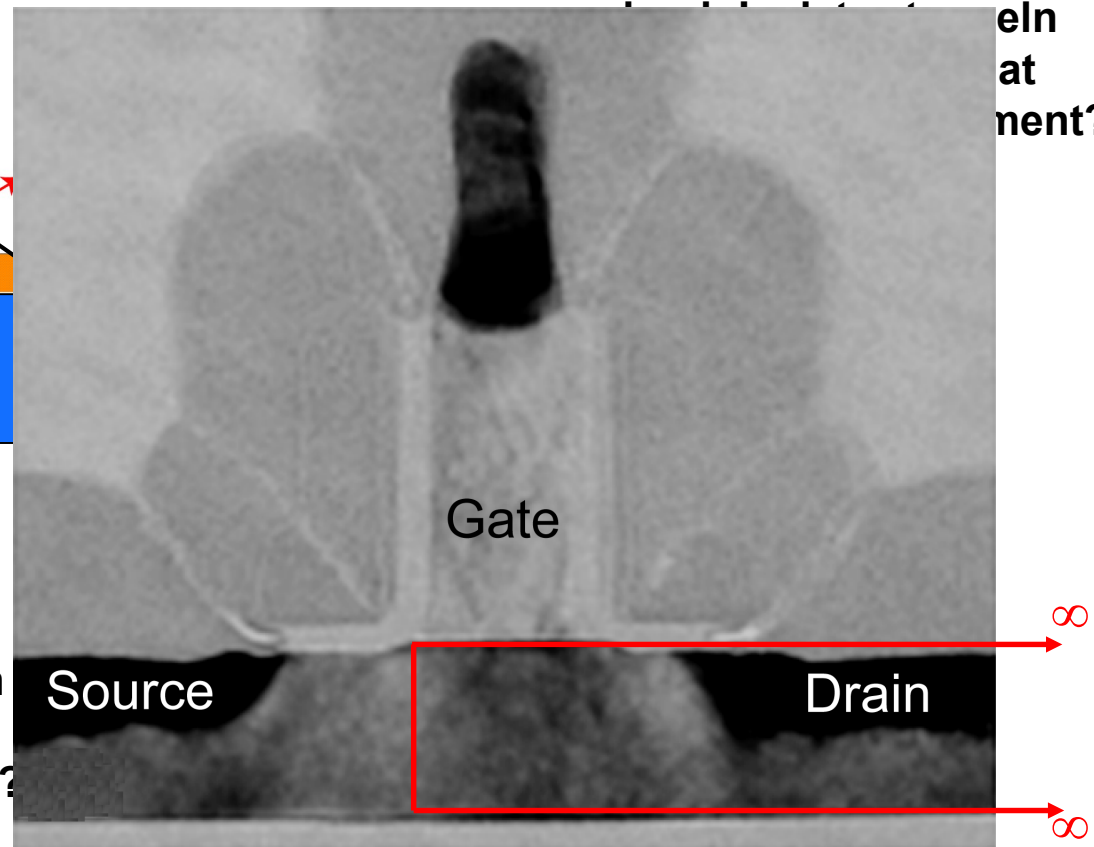
**In heutigen ICs ist Isolator extrem dünn (~1nm)**

- Ladungsträger können nicht transportiert werden?



# Elektronen in Halbleiter!

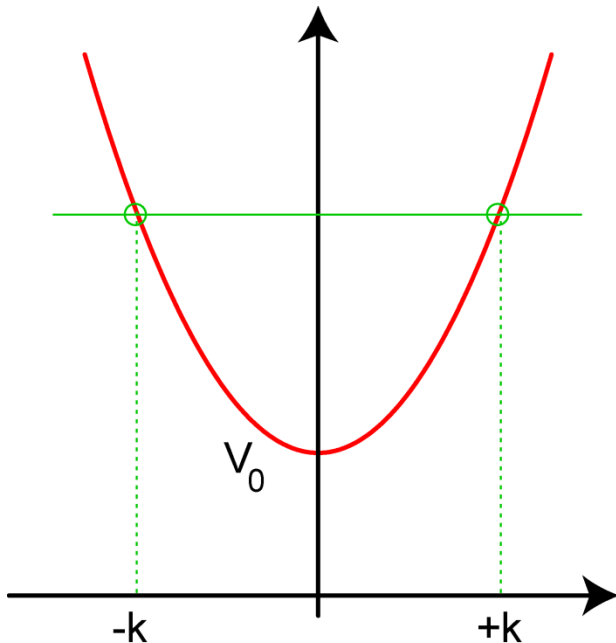
- Wie verhalten sich Elektronen
- Was sind Energiebänder?
- Wie kommt es zu Bandlücken?
- Ist die Bandlücke wichtig?



$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right] \varphi(x) = E \varphi(x)$$

**Ansatz:**  $\varphi(x) \propto \exp(ikx)$

wenn  $V(x) = V_0 = \text{const.}$



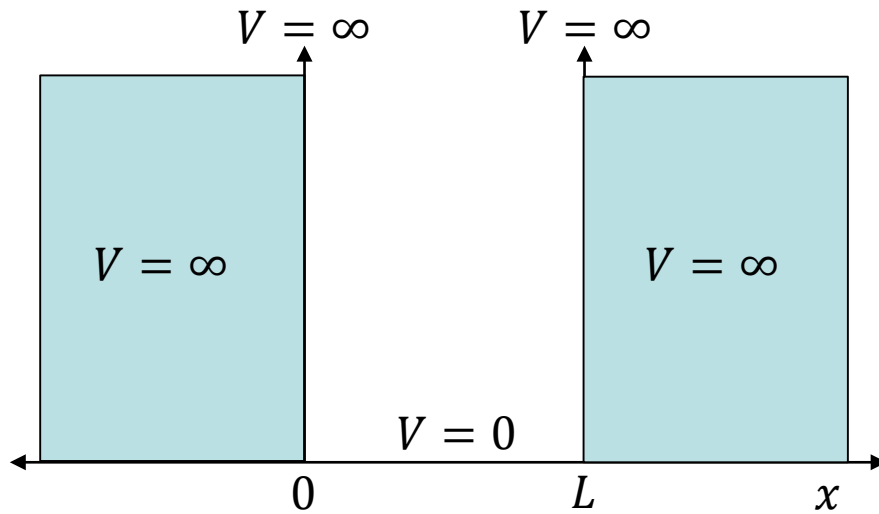
$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + V_0$$

Dispersionbeziehung eines **freien** Teilchens



**allgemeinerer Ansatz:**

$$\varphi(x) = A \cdot e^{ikx} + B \cdot e^{-ikx}$$



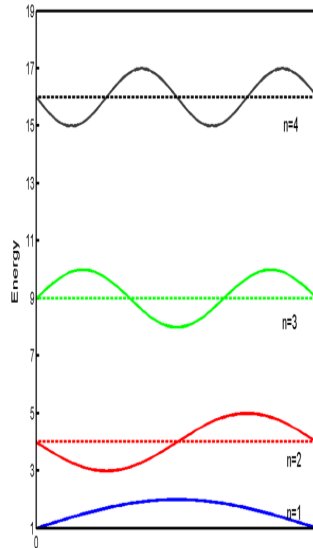
## Randbedingungen

$$\varphi(0) \stackrel{!}{=} 0$$

$$\varphi(L) \stackrel{!}{=} 0$$

$$A = B \rightarrow B = -A$$

$$\varphi(x) = A \cdot (e^{ikx} - e^{-ikx}) \cdot \frac{2i}{2i} = 2iA \sin(kx)$$

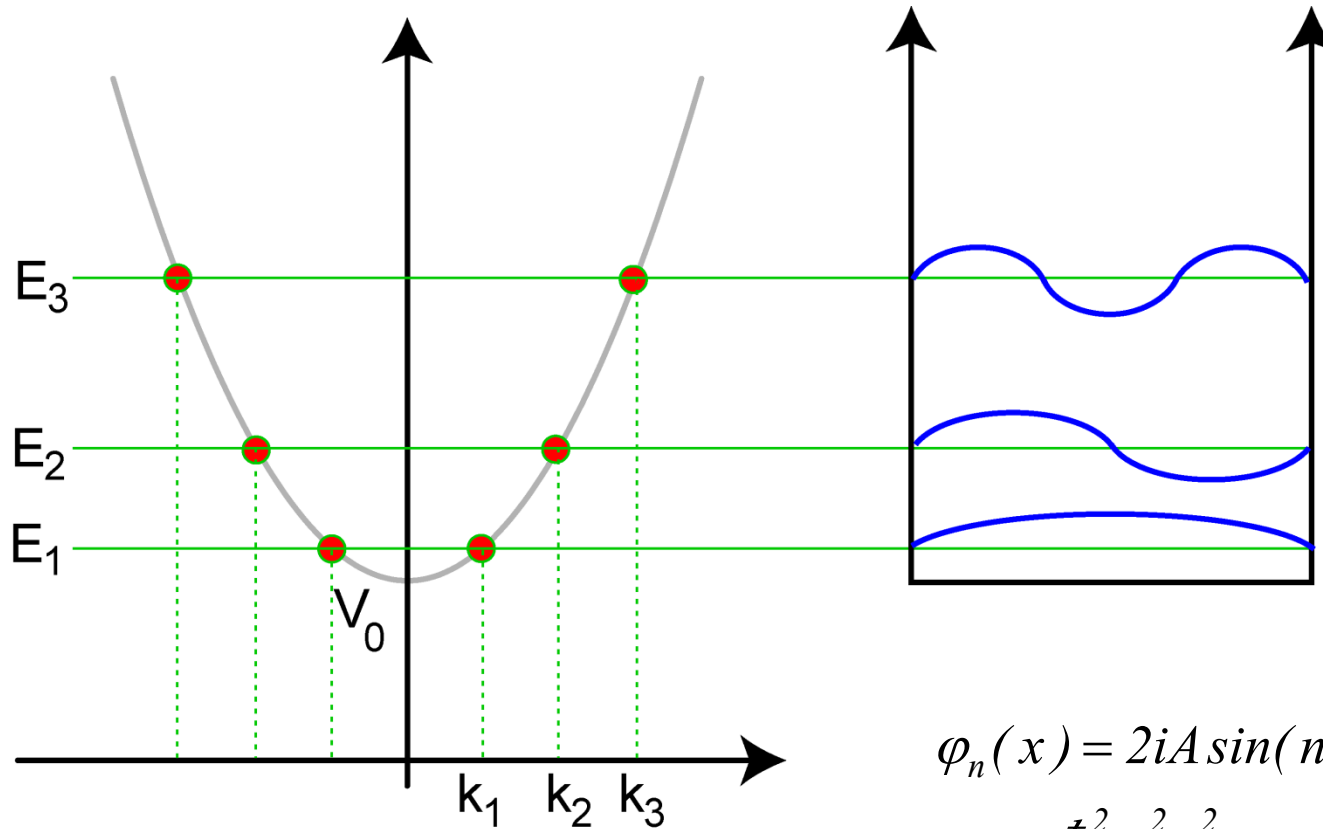


$$\varphi_n(x) = 2iA \sin(n\pi/L \cdot x)$$

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2mL^2}$$

$$kL \stackrel{!}{=} n \cdot \pi \rightarrow k_n = n \frac{\pi}{L}$$





$$\varphi_n(x) = 2iA \sin(n\pi/L \cdot x)$$

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2mL^2}$$

$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + V_0 \rightarrow k_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{2m(E - V_0)}{\hbar^2}}$$

$$E < V_0$$

$$E > V_0$$

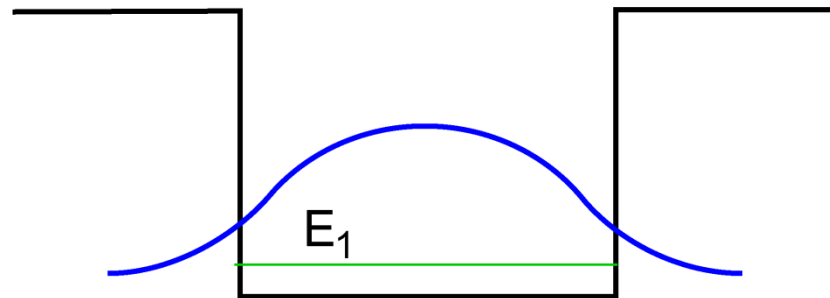
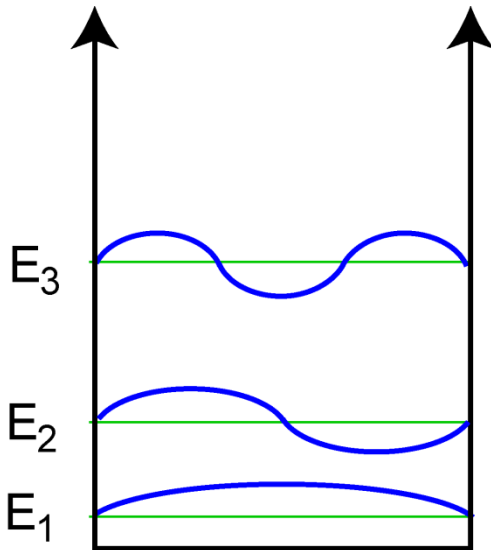
$$E < V_0$$

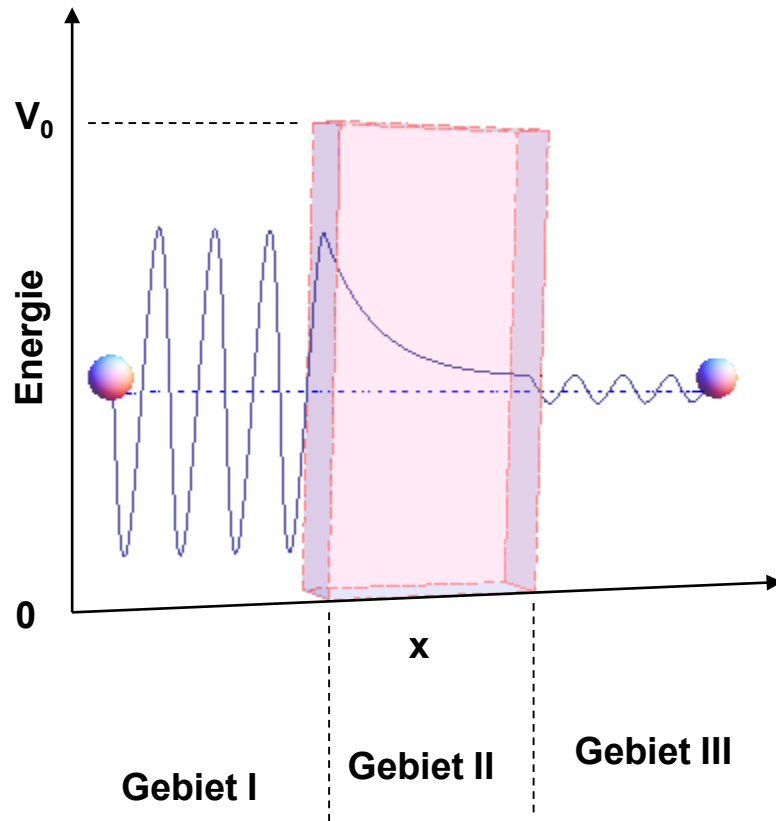
$$k_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{2m(E - V_0)}{\hbar^2}}$$

$$k_{1,2} = \pm i \sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}} = \pm i K_{1,2}$$

$$\varphi \propto e^{ik_{1,2}x}$$

$$\varphi \propto e^{i(iK_{1,2})x} \propto e^{-K_{1,2}x}$$



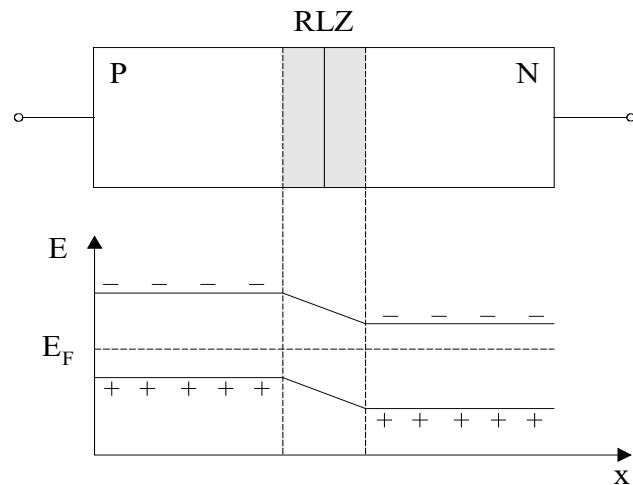


$$\varphi_i(x) = A_i e^{ik_i x} + B_i e^{-ik_i x}$$

$$k_I = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$$

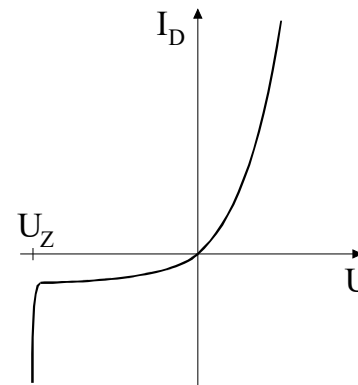
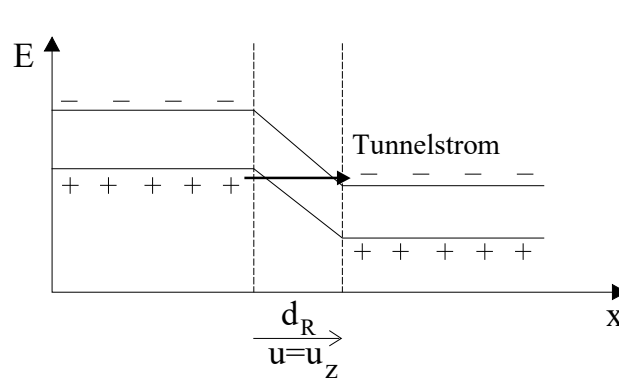
$$k_{II} = \sqrt{\frac{2m(E - V_0)}{\hbar^2}} = i\sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}}$$

$$k_{III} = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$$

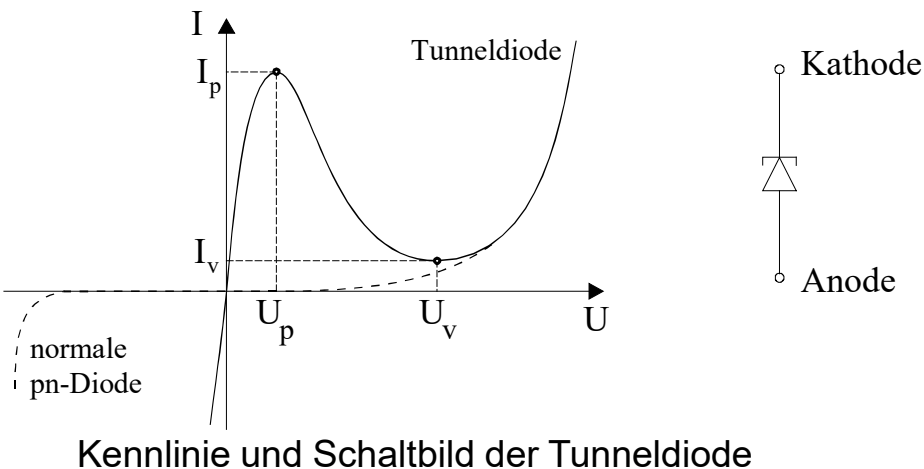


Bändermodell der Zenerdiode

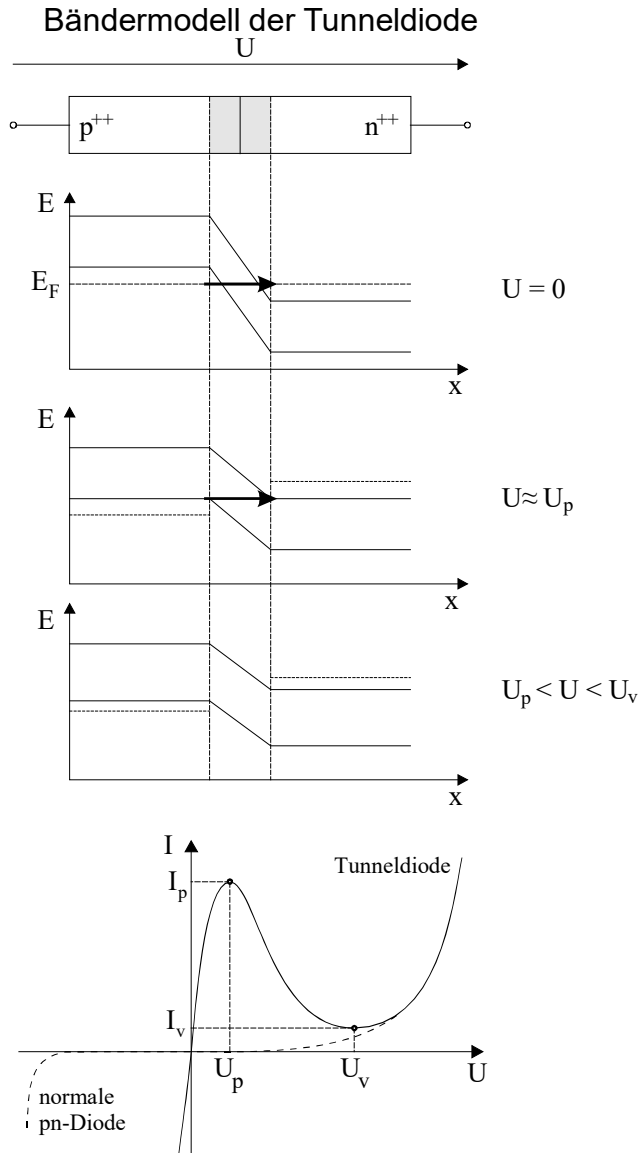
Eine Zenerdiode weist gegenüber einer Standard-Diode eine deutlich höhere Dotierung auf ( $N_A; N_D > 10^{18} \frac{1}{\text{cm}^3}$ ), sodass bei einer hohen Sperrspannung Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband tunneln können. Der Einsatzpunkt (Zenerspannung) wird von der Dotierung bestimmt, da die Dotierstoffkonzentration die Weite der RLZ bestimmt:  $d_R \sim \sqrt{\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}}$



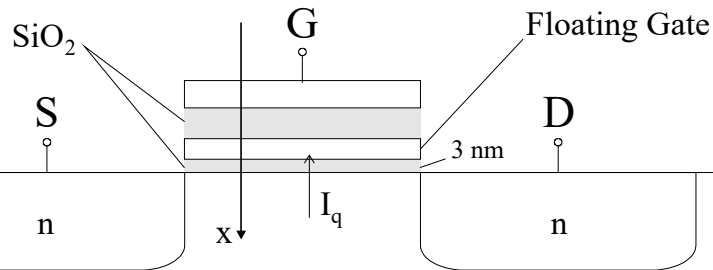
Bändermodell der Zenerdiode mit angelegter Sperrspannung



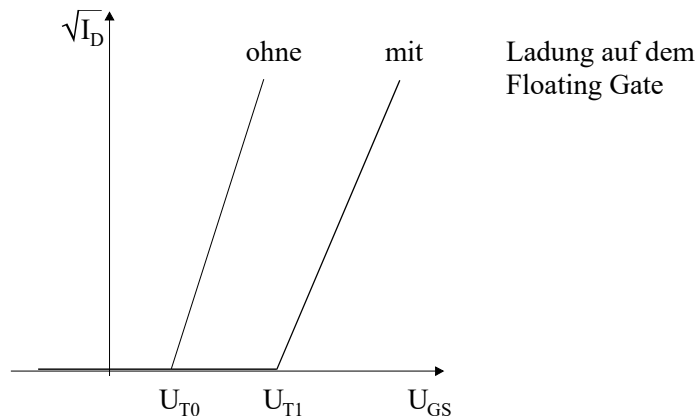
- ▶ Bei der Tunneldiode (Esaki-Diode) wird die Dotierung beidseitig weiter erhöht. Die Dotierung ist so stark, dass eine Entartung auftritt.
- ▶ Dadurch entsteht ein Kennlinienabschnitt mit einem negativen differentiellen Widerstand.
- ▶ Damit ein Tunnelstrom fließen kann, muss einerseits die zu tunnelnde Strecke genügend kurz sein, und andererseits müssen den Elektronen der einen Seite freie Plätze auf etwa gleichem Niveau auf der anderen Seite gegenüberstehen.



- Bei einem entarteten n-Halbleiter liegt die Fermikante oberhalb der Leitungsbandkante, also bereits im Leitungsband, beim entarteten p-Halbleiter entsprechend unterhalb der Valenzbandkante.
- ➔ Bandkanten werden nicht wie übliche durch Valenz- und Leitungsband gebildet, sondern sind zur Bandmitte verschoben. ➔ Bei Sperrspannungen können Ladungsträger vom Valenzband in das Leitungsband tunneln, wenn die RLZ schmal genug ist.
- In Durchlassrichtung fließt ein Tunnelstrom, der jedoch nur so lange ansteigt, bis die Spannung so groß ist, dass die Elektronen in der Gegenseite auf gleichem Energieniveau teilweise keine unbesetzten Zustände, sondern die verbotene Zone vorfinden.
- Dies ist bei der Spannung  $U_p$  der Fall, bei der ein Strommaximum auftritt. Mit weiter steigender Spannung nimmt der Strom ab, da immer weniger Elektronen tunneln können, bis bei der Spannung  $U_v$  ( $< 0,1V$ ) das Tunneln ganz aufhört und ein Stromminimum erreicht wird.
- Bei noch höheren Spannungen verhält sich die Tunneldiode wie eine normale Diode.



Aufbau eines Floating-Gate-MOS-Transistors



Übertragungskennlinie des Floating-Gate-MOS-Tr.

- › Nichtflüchtige Datenspeicherung mit modifiziertem MOS-Transistor: Electrical Programmable Read Only Memory (EPROM) oder Flash
- › Da die Oxidschicht nur 3nm dick ist, kann ein Tunnelstrom zwischen Substrat und Floating Gate auftreten, mit dem diese Elektrode aufgeladen wird.
- › Die Ladung auf dem Floating Gate verschiebt die Schwellenspannung