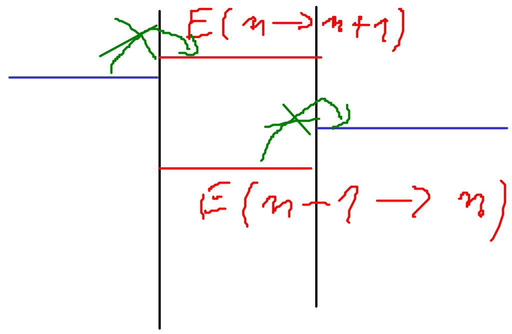
7.3 Cotunneln

(nächste Ordnung Störungstheorie)

Situation mit Coulomb-Blockade



Übergang trotz angelegter Transportspannung nicht möglich (bei $T=0$)

⇒ kein sequentielles Tunneln

$$\gamma_{i\to f} = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \sum_{j\neq i} \frac{\langle i | H_t | j \rangle \langle j | H_t | f \rangle}{E_j - E_i} \right|^2 \delta(E_i - E_f)$$

Zustand $|j\rangle$ wird nur virtuell besetzt

⇒ Energie $E_j - E_i$ geht nur in Nenner ein, nicht in Exponenten

⇒ keine exponentielle Unterdrückung

Reihenfolge: a) erst links dann rechts $\delta E_l = E_{ch}(n+1) - E_{ch}(n) - eV_l$

b) erst rechts $n \to n-1$ dann links $\delta E_r = E_{ch}(n-1) - E_{ch}(n) + eV_r$

Es gibt viele Ausgangszustände k, σ

viele Zust. auf der Insel q, σ

⇒ mit hoher Wahrscheinlichkeit wird $q'\sigma'$ weitergehen

viele Endzustände k', σ'

wg. viele Zustände auf Insel

a) $E_j - E_i = \delta E_\ell + \varepsilon_q - \varepsilon_k$

b) $E_j - E_i = \delta E_r + \varepsilon_{k'} - \varepsilon_{q'}$

Goldene Regel

$$\frac{2\pi}{\hbar} N_\ell \Omega_\ell (N_i \Omega_i)^2 N_r \Omega_r \quad \underbrace{4}_{2\cdot\text{Spin}} |T_{kq} T_{q'k'}|^2$$

$$\Rightarrow \Gamma_{cot} = \frac{\hbar}{2\pi e^4 R_{t\ell} R_{tr}} \int_{k\in \ell} d\varepsilon_k \int_{q\in i} d\varepsilon_q \int_{q'\in i} d\varepsilon_{q'} \int_{k'\in r} d\varepsilon_{k'}$$

$$\left[\frac{1}{\delta E_\ell + \varepsilon_q - \varepsilon_k} + \frac{1}{\delta E_r + \varepsilon_{k'} - \varepsilon_{q'}}\right]^2$$

$$f(\varepsilon_k)[1-f(\varepsilon_q)] f(\varepsilon_{q'})[1-f(\varepsilon_{k'})]$$

$$\delta(-eV_{tr} - \varepsilon_k + \varepsilon_q - \varepsilon_{q'} + \varepsilon_{k'})$$

Hinterher bleibt eine Elektron - Loch Anregung (q, q') auf der Insel. Daher nennt man den Prozess inelastisches Cotunneln.

In Grenzfällen und in Quantenpunkten (dots) mit wenigen Zuständen spielt "elastisches Cotunneln" $(q\sigma = q'\sigma')$ eine wichtige Rolle.

für $T = 0$

$$\Gamma_{cot} = \frac{\hbar}{12\pi e^4 R_{t\ell} R_{tr}} \left(\frac{1}{\delta E_\ell} + \frac{1}{\delta E_r}\right)^2 (eV_{tr})^2$$

für $eV_{tr} \ll \delta E_\ell, \delta E_r$

$\longrightarrow 0$ für $V_{tr} \to 0$

für $T \neq 0$ gilt das nicht

außerdem ist für $V_x = 0$ elast. Cotunneln wichtig.

Zusätzliche Parameter $\qquad R_{t1} = R_{t2} = R_t$

$$\Gamma_{seq} = \frac{\delta E_\alpha}{e^2 R_t} \qquad \text{vgl. } \Gamma_{cot} = \frac{\hbar}{12\pi\, e^2 e^2 R_t^2}\left(E_\alpha \right)$$

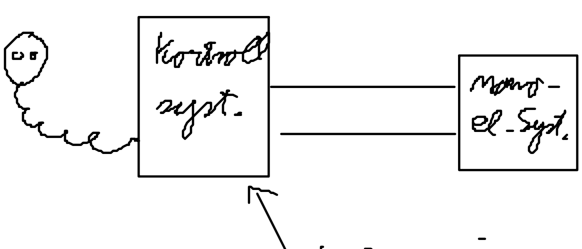
$$\Rightarrow \quad \alpha = \frac{h}{e^2 R_t} = \frac{R_K}{R_t}$$

$\alpha \ll 1 \;\rightarrow\;$ seq. ausreichend (cot. vernachlässigbar)

$\alpha \approx 1 \;\rightarrow\;$ cot. ist wichtig

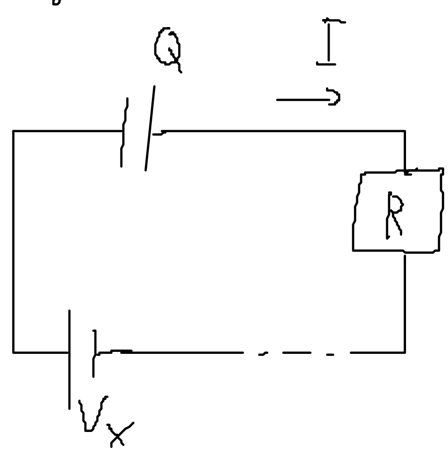
7.4 Einfluß von Dämpfung

z.B. el.-mag. Umgebung



Widerstände
$\Rightarrow$ Dämpfung

Bsp



$$V_x + \frac{Q}{C} + IR + \ldots = 0$$

$$\frac{Q}{C} = V \quad , \; I = \dot{Q}$$

$$C\dot{V} + \frac{V}{R} + \frac{V_x}{R} + \ldots = 0$$

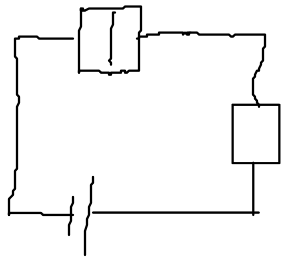
$f(V)$

$$C\ddot{V} + \frac{\dot{V}}{R} + \ldots = 0$$

$\Rightarrow$ Ohmscher Wid. wirkt wie eine Geschwind.-prop. Dämpfung

Bsp

C Tunnelkontakt



V_x

$Z(\omega)$ Impedanz,

z.B. $Z(\omega) = R$

$$C\dot{V} + \frac{V}{R} + \frac{V_x}{R} = \delta I(t)$$

Johnson-Nyquist-Rauschen

$$\langle \delta I(t) \rangle = 0$$

$$\langle \delta I(t)\, \delta I(t') \rangle \neq 0$$

weißes Rauschen

$$= \frac{2kT}{R}\,\delta(t-t')$$

Antikommutator

$$\langle \delta I\, \delta I \rangle_\omega = \int_{-\infty}^{\infty} dt\, e^{i\omega t} \langle \{\delta I(t), \delta I(0)\} \rangle$$

$$= \mathrm{Re}\{Z^{-1}(\omega)\}\, \hbar\omega \coth\frac{\hbar\omega}{2k_B T}$$

$$\underset{\substack{Z=R \\ \hbar\omega \ll k_B T}}{=} \frac{1}{R}\, 2k_B T$$

$$\Rightarrow \left[i\omega C + \frac{1}{Z(\omega)}\right] \delta V(\omega) = \delta I(\omega) \qquad (\omega \neq 0)$$

$$\Rightarrow \dots \Rightarrow \langle \delta V \delta V \rangle_\omega = \mathrm{Re}\, Z_t(\omega)\, \hbar\omega \coth\frac{\hbar\omega}{2k_B T}$$

mit $Z_t(\omega) = \dfrac{1}{i\omega C + \frac{1}{Z(\omega)}}$

$$H = \sum \left\{ \varepsilon_k + e\left[V + \delta V(t)\right] \right\} c^{\dagger}_{k\sigma} c_{k\sigma} + \sum_{q\sigma} \varepsilon_q c^{\dagger}_{q\sigma} c_{q\sigma}$$

$$+ \sum_{kq\sigma} T_{kq} c^{\dagger}_{k\sigma} c_{q\sigma} + h.c. + H_{Bad}$$

$V \propto V_x$

≈ fällt nach Spannung am Wid. ab

ist verantwortlich für $\delta V(t)$