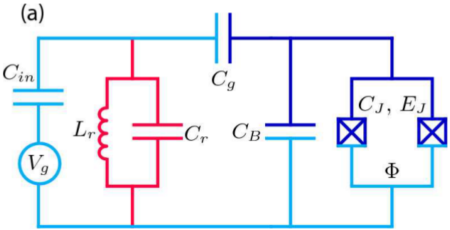
# Moderne Supraleitende Qubits

Hauptseminar

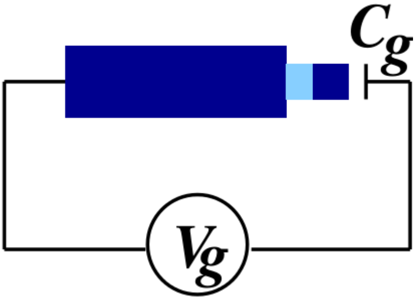
Melanie Hauck | 10. Juli 2012

INSTITUT FÜR THEORETISCHE FESTKÖRPERPHYSIK - TFP



# Inhalt

# Schaltkreis der SCB




*aus: Wendin, Shumeiko, Superconducting Circuits, Qubits and Computing*

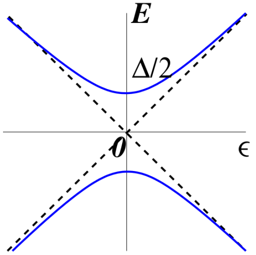
Hamiltonoperator der SCB:

- $H = 4E_C(\hat{n} - n_g)^2 - E_J \cos\hat{\phi}$
- $E_J = \frac{\hbar}{2e} I_C; \quad E_C = \frac{e^2}{2C_\Sigma}; \quad C_\Sigma = C + C_g$
- Charge Regime: $E_C \gg E_J$

# $H$ der SCB in der Basis $|0\rangle, |1\rangle$

Durch Projektion des Hamiltonoperators auf den Grundzustand und den ersten angeregten Zustand des Qubits erhält man:

$$H = -\frac{1}{2}(\epsilon\sigma_z + \Delta\sigma_x)$$

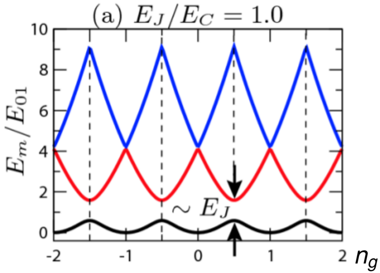



*aus: Wendin, Shumeiko, Superconducting Circuits, Qubits and Computing*

- $\epsilon = E_C(1 - 2n_g)$;
- $\Delta = E_J$
- Energielevelabstand: $\Delta E = \sqrt{\epsilon^2 + \Delta^2}$
- Sweet Spot: $n_g = \frac{1}{2}$, wobei $\epsilon(n_g = \frac{1}{2}) = 0$

## Eigenschaften der Cooper Pair Box

- Anharmonizität → keine äquidistanten Energielevels
- Ladungsdispersion → zeigt Abhängigkeit der Energielevelabstände von $V_g$




*aus: Koch, Yu, Gambetta, Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box*

$$H = 4E_C(\hat{n} - n_g)^2 - E_J \cos\hat{\phi}$$

# Eigenschaften der CPB

Vorteile der CPB

- starke Anharmonizität der Energielevels
- gute Kopplung an elektromagnetische Felder

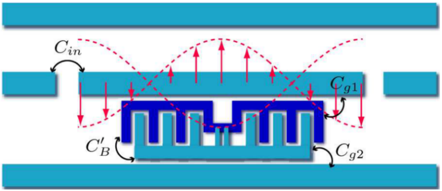
Nachteile der CPB

- sehr anfällig gegen Ladungsrauschen $\rightarrow$ Wahl eines “Sweet Spots” notwendig
- schnelles Verlassen “Sweet Spots” aufgrund von Ladungsfluktuationen
- starke Dekohärenz

## Zielsetzung des Transmons

- Verringerung der Krümmung der Ladungsdispersion
- Empfindlichkeit gegenüber anderer Rauschquellen soll der der CPB entsprechen
- Erhaltung der Anharmonizität

# Transmonschaltkreis




*aus: Koch, Yu, Gambetta, Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box*

# Hamiltonoperator des Transmons

- $H = 4E_C(\hat{n} - n_g)^2 - E_J \cos\hat{\phi}$
- $n_g = \frac{Q_r}{2e} + \frac{C_g U_g}{2e}$
- $E_C = \frac{e^2}{2C_\Sigma}; \quad C_\Sigma = C + C_B + C_g; \quad E_J = \frac{\hbar}{2e} I_C$
- Transmon Regime: $E_J \gg E_C$

$\rightarrow$Erinnerung an CPB: $E_C \gg E_J$

# Dephasierung

$$H = \frac{1}{2}(\Delta E_0 + X)\sigma_z$$

X sei eine gaußverteilte Größe

$$P(X) = \frac{1}{\sqrt{\pi}W} e^{-\left(\frac{X}{W}\right)^2}$$

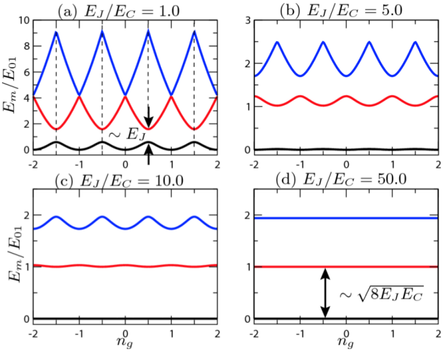
Zeitentwicklung bei konstantem X

$$\rho_{\downarrow\uparrow}(t) = e^{-i(\Delta E_0 + X)t} \rho_{\downarrow\uparrow}(0)$$

Mittelung über alle Experimente

$$\langle \rho_{\downarrow\uparrow}(t) \rangle = \rho_{\downarrow\uparrow}(0) e^{-i\Delta E_0 t} e^{-\frac{W^2}{4} t^2}$$

# Transmonregime

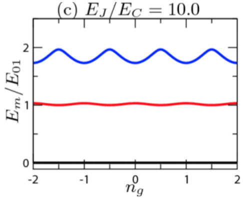



*aus: Koch, Yu, Gambetta, Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box*

$\rightarrow$ Anharmonizität nimmt mit steigendem Verhältnis $\frac{E_J}{E_C}$ ab

$\rightarrow$ Für großes $\frac{E_J}{E_C}$ sind die Energien nahzu unabhängig von $n_g$.

# Energien des Transmons




*aus: Koch, Yu, Gambetta, Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box*

$m$-tes Energielevel des Transmons im Fall $E_J \gg E_C$ (Tramsmonregime)

$$E_m(n_g) \approx E_m(n_g = \frac{1}{4}) - \frac{\epsilon_m}{2} \cos 2\pi n_g$$

Dabei gilt:

$$\epsilon_m \equiv E_m(n_g = \frac{1}{2}) - E_m(n_g = 0)$$

## Abhängigkeit der Anharmonizität und der Dispersionskurven von $\frac{E_J}{E_C}$

1. Bestimmung des Peak-to-Peak Wertes der Dispersionskurven mithilfe der WKB-Näherung:

$$\epsilon_m \approx (-1)^m E_C \frac{2^{4m+5}}{m!} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{E_J}{2E_C}\right)^{\frac{m}{2}+\frac{3}{4}} e^{-\sqrt{8\frac{E_J}{E_C}}} \propto e^{-\sqrt{8\frac{E_J}{E_C}}}$$

2. Hamiltonoperator mit quartischer Störung:

$$E_m \approx -E_J + \sqrt{8E_J E_C}\left(m + \frac{1}{2}\right) - \frac{E_C}{4}(2m^2 + 2m + 1)$$

$\rightarrow$Anharmonizität $\propto \sqrt{\frac{E_C}{E_J}}$

$\Rightarrow$ Bedingung für das Transmonregime:

$$20 \lesssim \frac{E_J}{E_C} \ll 5 \cdot 10^4$$

# Dekohärenzeffekte

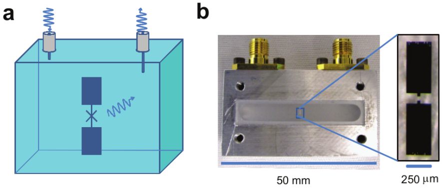
| Noise source | | transmon $E_J/E_C = 85$ | CPB $E_J/E_C = 1$ |
|---|---|---|---|
| **dephasing** | $1/f$ amplitude | $T_2$ [ns] | $T_2$ [ns] |
| charge | $A = 10^{-4} - 10^{-3}e$ | 400,000 | **1,000*** |
| flux | $A = 10^{-6} - 10^{-5}\Phi_0$ | 3,600,000* | 1,000,000* |
| crit. current | $A = 10^{-7} - 10^{-6}I_0$ | **35,000** | 17,000 |

* diese Werte wurden an einem „Sweet Spot“ aufgenommen

*aus: Koch, Yu, Gambetta, Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box*

$$\Gamma_2 = \frac{\Gamma_1}{2} + \underbrace{\Gamma_2^*}_{\text{pure dephasing}}$$

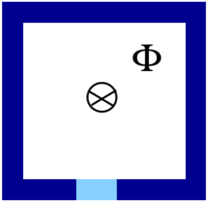
# Experiment




| qubit (cavity) | $f_{01}$ (GHz) | $E_J$ (GHz) | $E_C$ (GHz) | $g/2\pi$ (MHz) | $g^2/2\pi\delta$ (MHz) | $f_c$ (GHz) | $Q_c$ ($x10^3$) | $T_1$ ($\mu$s) | $T_2$ ($\mu$s) | $T_{\text{echo}}$ ($\mu$s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| J1 (D) | 6.808 | 21.1 | 0.301 | 138 | 15.9 | 8.0035 | 340 | 60 | 18 | 25 |
| J1a (D) | 6.769 | 21.0 | 0.301 | 140 | 15.8 | 8.00375 | 340 | 50 | 20 | 24 |
| J2 (C) | 7.772 | 28.6 | 0.292 | 152 | 99.8 | 8.0020 | 360 | 25 | 15 | 21 |
| J3 (B) | 7.058 | 22.5 | 0.304 | 141 | 21.5 | 7.9835 | 320 | 42 | 12 | 12 |
| S (D) | 7.625 | 34.4 | 0.227 | 136 | 48.2 | 8.01065 | 340 | 35 | 7.3 | 11 |
| Sa (A) | 7.43 | 32.5 | 0.228 | 123 | 24.1 | 8.06169 | 100 | 20 | 6 | 8 |

*aus: H. Paik, D. I. Schuster, L. S. Bishop, G. Kirchmair, G. Catelani, A. P. Sears, B. R. Johnson, M. J. Reagor, L. Frunzio, L. I. Glazman, S. M. Girvin, M. H. Devoret, and R. J. Schoelkopf, Observation of high coherence in Josephson junction qubits measured in a three-dimensional circuit QED architecture*

# Fluxonium




*aus: Wendin, Shumeiko, Superconducting Circuits, Qubits and Computing*

$$H = E_C \hat{n}^2 - E_J \cos\hat{\phi} + E_L \frac{(\hat{\phi} - \phi_e)^2}{2}$$

In der Basis $|L\rangle$ , $|R\rangle$ ergibt sich

$$H = -\frac{1}{2}(\epsilon\sigma_z + \Delta\sigma_x)$$

- $E_J = \frac{\hbar}{2e} I_C \quad E_C = \frac{(2e)^2}{2C}$
- $E_L = \frac{\Phi_0}{4\pi^2 L}$ mit $\Phi_0 = \frac{h}{2e}$
- $\epsilon = E_R - E_L$;
- $\Delta = 2H_R L$
- Flux Regime: $E_J \gg E_C$

# Literatur


- Koch, Yu, Gambetta, Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box
- Manucharyan, Koch, Glazman, Devoret, Charging effects in the inductively shunted Josephson junction
- Manucharyan, Koch, Glazman, Devoret, Fluxonium: Single Cooper-Pair Circuit Free of Charge Offsets
- Wendin, Shumeiko, Superconducting Circuits, Qubits and Computing
- Koch, Yu, Gambetta, Charging effects in the inductively shunted Josephson junction