Warum verhält sich makroskopische Welt nicht quanten-mechanisch sondern klassisch?

insb. keine Superpositionen!

QM nur mikroskopisch gültig!?

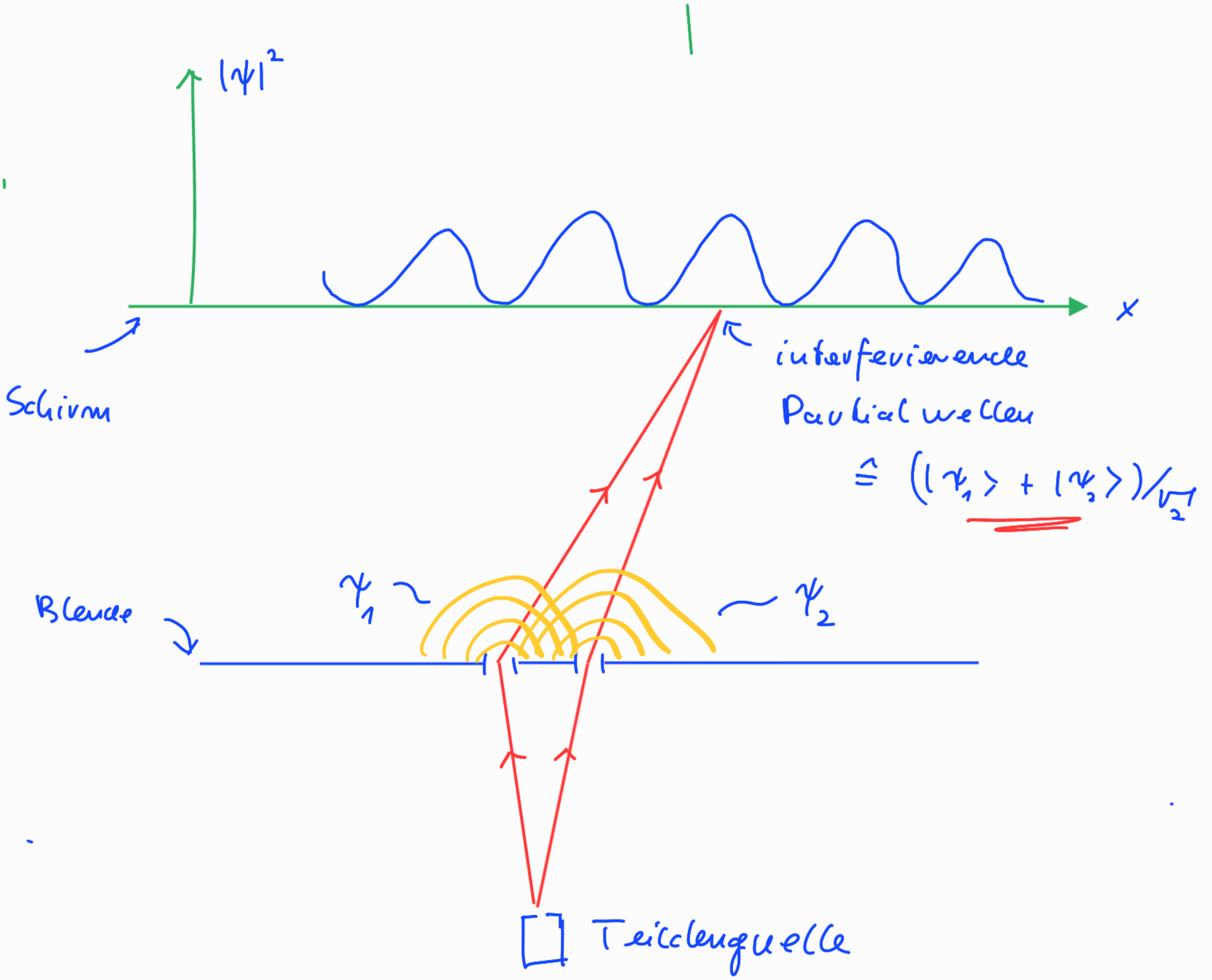
Alternative: scheinbar klassisches Verhalten makroskopischen Quantensystem aufgrund unvermeidbarer W.W. mit Umgebung:

Dekohärenz

(Zeh ~ 1970
Zurek ~ 1980
Experimente:
Zeilinger ~ 2000)

→ graduelles Verschwinden q.m. Effekte!

Beispiel: Interferenz am Doppelspalt:

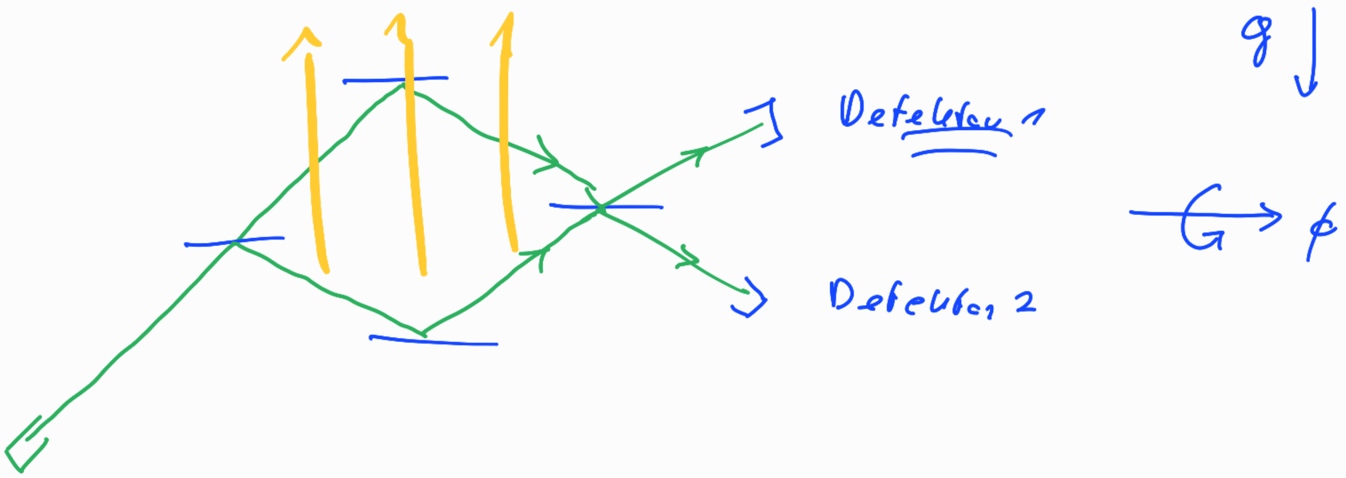


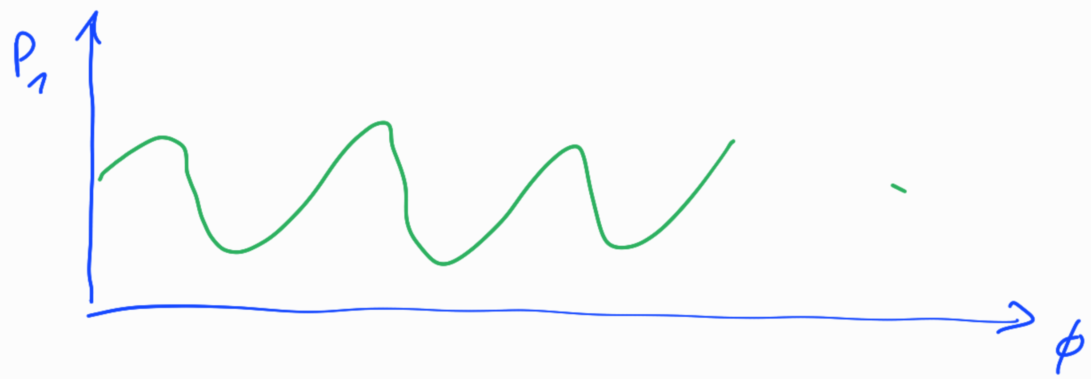
<u>wollen verstehen:</u> Verschwinden der Interferenz bei "Beobachtung des Teilchens"

$\hat{=}$ W.W. des Teilchen mit Umgebung !

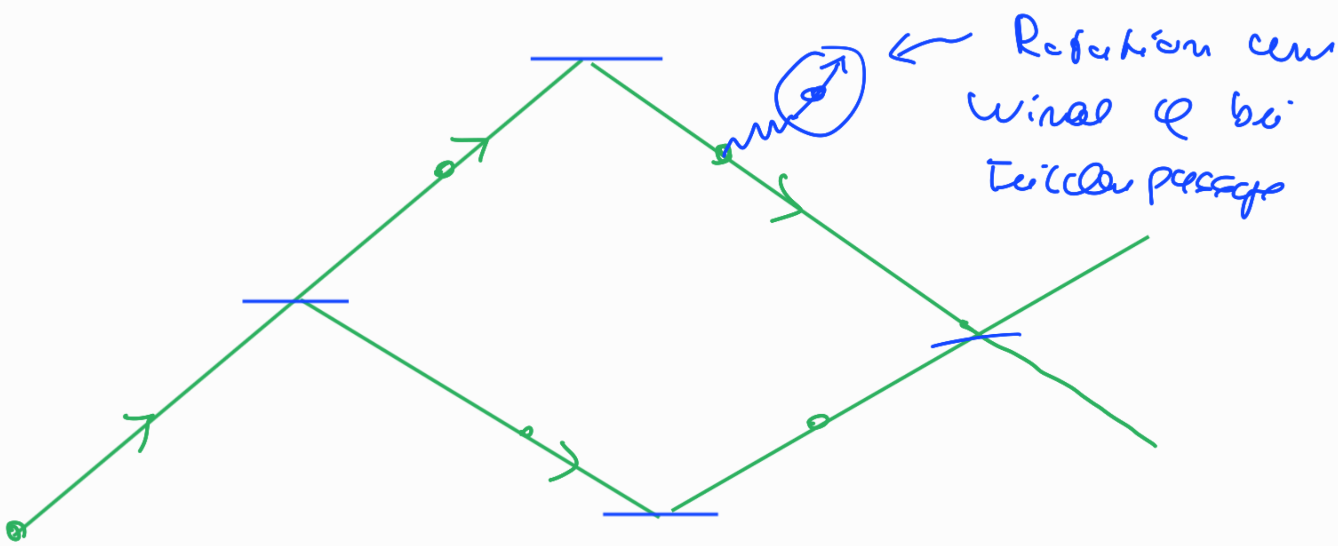
einfaches: <u>Teilchen-Interferometer</u>

(~1975 : Colella, Overhauser, Werner)

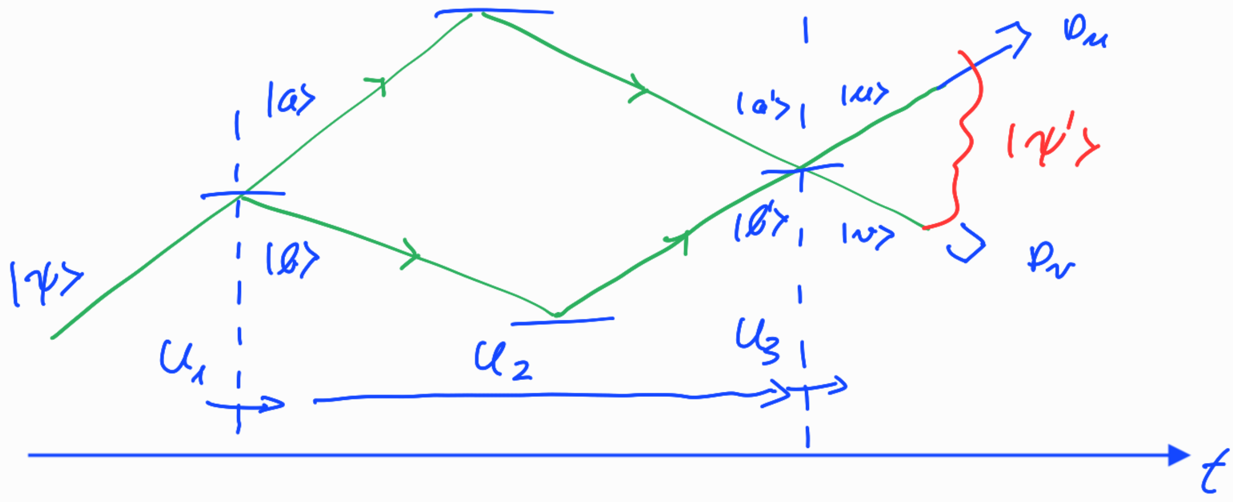




<u>Modell</u>: Interferometer + <u>Kontrollspin</u>



I ohne Kontrollspin:



$$U_1 : \quad |\psi\rangle \longmapsto (|a\rangle + |b\rangle)/\sqrt{2}$$

$$U_2 : \quad |a\rangle \longmapsto e^{i\vartheta} |a'\rangle \qquad \vartheta = \vartheta(F)$$

$$|b\rangle \longmapsto |b'\rangle$$

$$U_3 : \quad |a'\rangle \longmapsto (|u\rangle + |v\rangle)/\sqrt{2}$$

$$|b'\rangle \longmapsto (|u\rangle - |v\rangle)/\sqrt{2}$$

$$|\psi'\rangle = U_3 U_2 U_1 |\psi\rangle$$

$$= U_3 U_2 (|a\rangle + |b\rangle)/\sqrt{2}$$

$$= U_3 (e^{i\vartheta}|a'\rangle + |b'\rangle)/\sqrt{2}$$

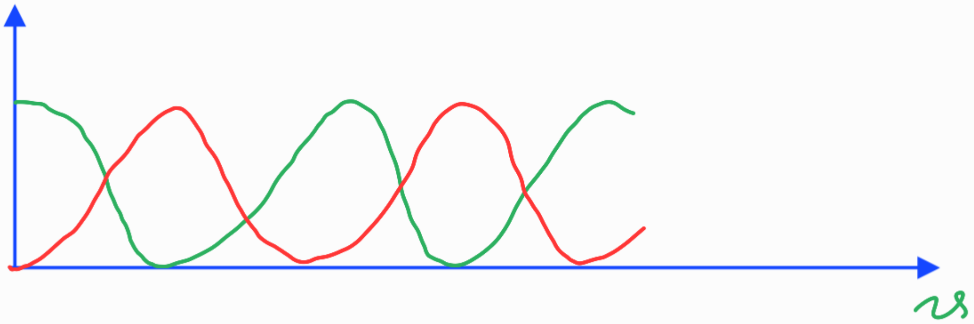
$$|\psi'\rangle = \frac{1}{2}(e^{i\vartheta}+1)|u\rangle + \frac{1}{2}(e^{i\vartheta}-1)|v\rangle$$

$$\rightarrow P_u = |\langle u|\psi'\rangle|^2$$

$$= \frac{1}{4}|e^{i\vartheta}+1|^2 = \frac{1}{2}(1+\cos\vartheta)$$

$$P_u = \frac{1}{2}(1 + \cos\vartheta)$$

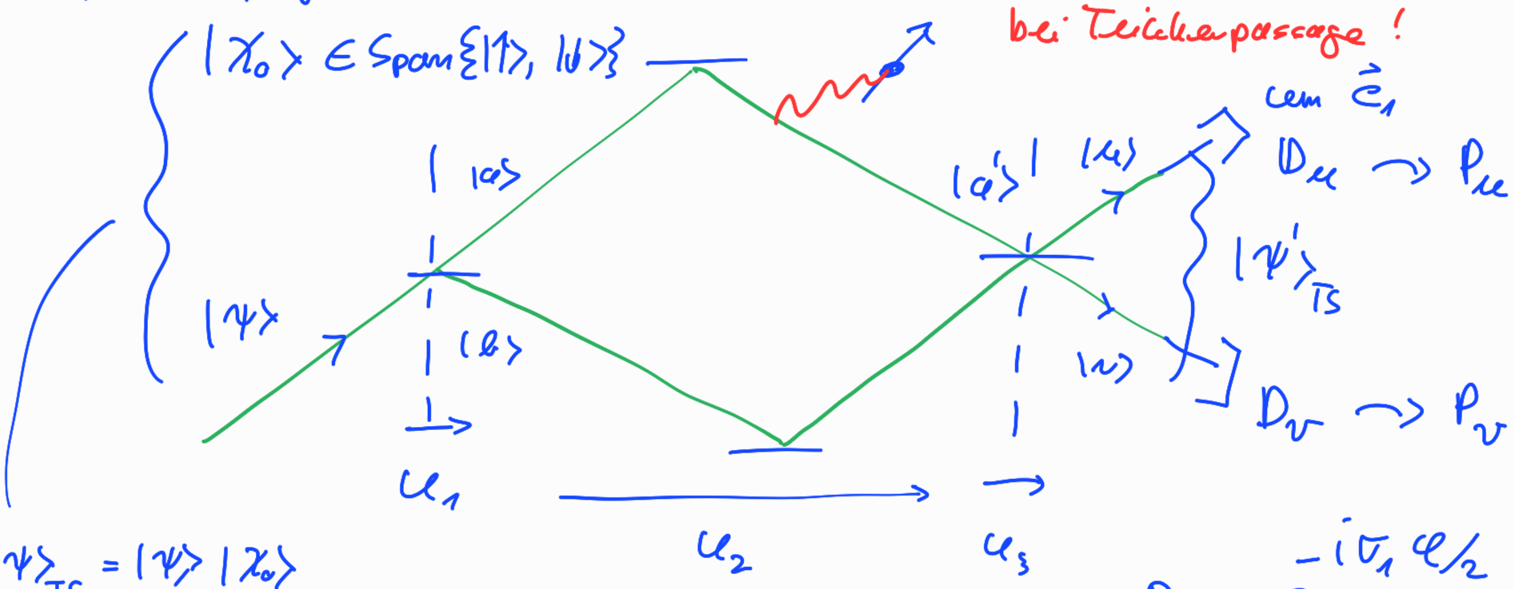
$$P_v = \frac{1}{2}(1 - \cos\vartheta)$$



II mit Kontrollspin:

Spin-Anfangszust:

Rotation um Winkel φ bei Teilchenpassage!



$$R_\varphi = e^{-i\sigma_1 \varphi/2}$$

$$U_1: \quad |\psi\rangle|\chi\rangle \longmapsto \frac{1}{\sqrt{2}}(|a\rangle + |b\rangle)|\chi\rangle$$

$$\boxed{\begin{aligned} U_2: \quad |a\rangle|\chi\rangle &\longmapsto e^{i\vartheta}\, |a'\rangle\, R_\varphi |\chi\rangle \\ &= (e^{i\vartheta} \otimes R_\varphi)\, |a'\rangle \otimes |\chi\rangle \\ |b\rangle|\chi\rangle &\longmapsto |b'\rangle\, |\chi\rangle \end{aligned}}$$

$$U_3: \quad \begin{aligned} |a'\rangle|\chi\rangle &\longmapsto \frac{1}{\sqrt{2}}(|u\rangle + |v\rangle)|\chi\rangle \\ |b'\rangle|\chi\rangle &\longmapsto \frac{1}{\sqrt{2}}(|u\rangle - |v\rangle)|\chi\rangle \end{aligned}$$

$$|\psi'\rangle_{TS} = U_3 U_2 U_1 |\psi\rangle|\chi_0\rangle$$

$$= U_3 U_2 \frac{1}{\sqrt{2}}(|a\rangle + |b\rangle)|\chi_0\rangle$$

$$= U_3 \frac{1}{\sqrt{2}}\Big(\underbrace{\underbrace{e^{i\vartheta} \otimes R_\varphi |a\rangle|\chi_0\rangle}_{e^{i\vartheta}|a\rangle R_\varphi|\chi_0\rangle} + |b\rangle|\chi_0\rangle}_{\text{für } R_\varphi \neq \mathbb{1} \text{ verschränkt!}}\Big)$$

$$\boxed{\begin{aligned} |\psi'\rangle_{TS} &= \frac{1}{2}\left(e^{i\vartheta}\otimes R_\varphi + \mathbb{1}_S\right)|u\rangle|\chi_0\rangle \\ &+ \frac{1}{2}\left(e^{i\vartheta}\otimes R_\varphi - \mathbb{1}_S\right)|v\rangle|\chi_0\rangle \end{aligned}}$$

Wkt, dass Teilchen in D_u detektiert wird?

P_u = Erwartungswert der Observable:

$$\boxed{A \overset{!}{=} |u\rangle\langle u| \otimes \mathbb{1}_S}$$

Γ

$|\psi\rangle_{TS} = |\psi\rangle|\chi\rangle \rightarrow \langle A\rangle_{|\psi\rangle_{TS}} = \langle\psi|\langle\chi|\left(|u\rangle\langle u| \otimes \mathbb{1}_S\right)|\psi\rangle|\chi\rangle$

$$P_u = \langle\psi|u\rangle\langle u|\psi\rangle \cdot \underbrace{\langle\chi|\mathbb{1}_S|\chi\rangle}_{=1}$$

$$\boxed{\begin{aligned}|\psi'\rangle_{TS} &= \frac{1}{2}\left(e^{i\vartheta}\otimes R_\varphi + \mathbb{1}_{TS}\right)|u\rangle|\chi_0\rangle \\ &+ \frac{1}{2}\left(e^{i\vartheta}\otimes R_\varphi - \mathbb{1}_S\right)|v\rangle|\chi_0\rangle\end{aligned}}$$

$$P_u = {}_{TS}\langle\psi'|\left(|u\rangle\langle u|\otimes\mathbb{1}\right)|\psi'\rangle_{TS}$$

$$= \frac{1}{4}\left(\langle u|\langle\chi_0|\left(e^{-i\vartheta}\otimes R_\varphi^{+} + \mathbb{1}\right)\right)\left(|u\rangle\langle u|\otimes\mathbb{1}\right)$$

$$\left(e^{i\vartheta}\otimes R_\varphi + \mathbb{1}\right)|u\rangle|\chi_0\rangle$$

$$= \frac{1}{4}\Big(1+1+\underbrace{\underbrace{e^{-i\vartheta}\langle\chi_0|R_\varphi^{+}|\chi_0\rangle}\ +\ \underbrace{e^{i\vartheta}\langle\chi_0|R_\varphi|\chi_0\rangle}}_{\text{k. k.}}\Big)$$

$$\rightarrow \boxed{P_u = \frac{1}{2}\left(1 + \mathrm{Re}\, e^{i\vartheta}\langle\chi_0|R_\varphi|\chi_0\rangle\right)} \quad (*)$$

(i) $\varphi = 0 \rightarrow R_0 = \mathbb{1} \rightarrow \langle\chi_0|R_0|\chi_0\rangle = 1$

$\rightarrow P_u = \frac{1}{2}(1+\cos\vartheta)$ ✓ vollst. Interferenz.

(ii) $\varphi = \pi$; $|\chi_0\rangle = |\uparrow\rangle = |z+\rangle$

$$(**): \; R_\varphi = e^{-i\sigma_1 \varphi/2} = \cos\varphi/2 - i\sigma_1 \sin\varphi/2$$

$$\mathrm{Re}\; e^{i\vartheta} \langle \chi_0 | R_\varphi | \chi_0 \rangle$$

$$\underset{(**)}{=} \mathrm{Re}\Big[\big(\cos\vartheta + i\sin\vartheta\big)\big(\cos\varphi/2 - i\sin\varphi/2 \langle \chi_0 | \sigma_1 | \chi_0 \rangle\big)\Big]$$

$$= \cos\vartheta \cos\varphi/2 + \sin\vartheta \sin\varphi/2 \langle \chi_0 | \sigma_1 | \chi_0 \rangle$$

$$\rightarrow \boxed{P_u = \frac{1}{2}\Big(1 + \cos\vartheta \cos\varphi/2 + \sin\vartheta \sin\frac{\varphi}{2} \langle \chi_0 | \sigma_1 | \chi_0 \rangle\Big)}$$

(ii) $\varphi = \pi$, $|\chi_0\rangle = |\uparrow\rangle$: $\rightarrow$ $\langle \chi_0 | \sigma_1 | \chi_0 \rangle = 0$

$$\rightarrow \quad P_u = \frac{1}{2} \quad !$$

(iii) $\varphi > 0$, $|\chi_0\rangle \equiv |\uparrow\rangle$

$$P_u = \frac{1}{2}\big(1 + \cos\vartheta \cdot \cos\varphi/2\big)$$

verminderte Interferenz!

(iv) $\varphi = \pi$; $|\chi_c\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle\right) = |x_+\rangle$

$$P_u = \frac{1}{2}\Big(1 + \underbrace{\cos 2\vartheta \cos\frac{\pi}{2}}_{=0} + \sin 2\vartheta \underbrace{\sin\frac{\pi}{2}}_{=1} \underbrace{\langle x_+|\sigma_1|x_+\rangle}_{1}\Big)$$

$$P_u = \frac{1}{2}\left(1 + \sin 2\vartheta\right) \quad !$$

(v) $\varphi = \pi$, $|\chi_c\rangle = |\uparrow\rangle$

$\Rightarrow$ σ_1-Messung am Kontrollspin !

$\rightarrow$ Interferenz ?

fast! nach Korrelation von $x_+ \Leftrightarrow u$,
$x_- \Leftrightarrow \ell$!