## Die Messung des Winkels $\alpha$ in $B_d^0 \to \pi^+\pi^-$-Zerfällen

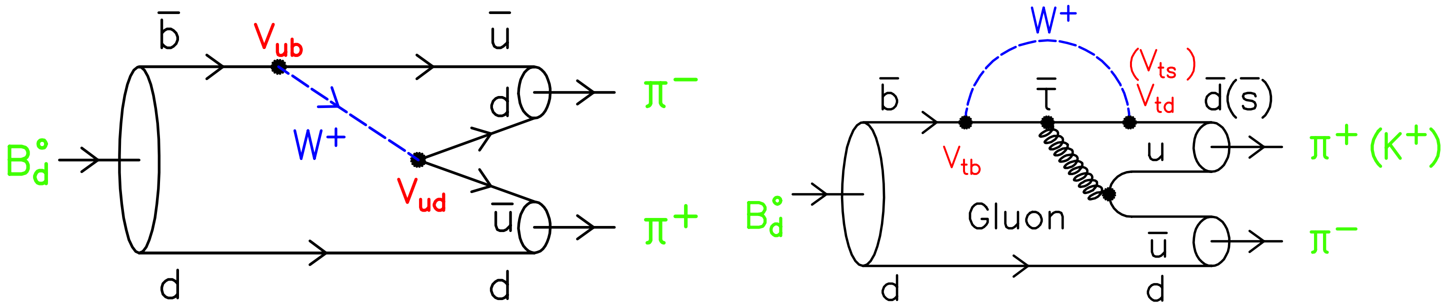
ist wesentlich schwieriger, da

1. $B \to \pi\pi$-Zerfälle sehr selten sind ($b \to u$).
   Sie wurden zuerst 1994 bei CLEO und LEP (ALEPH, OPAL) entdeckt. Die Verzweigungsverhältnisse sind (Babar, Belle, CLEO):

$$\begin{aligned} BR(B_d^0 \to \pi^+\pi^-) &= (4.5 \pm 0.4) \cdot 10^{-6} \\ BR(B_d^0 \to \pi^0\,\pi^0\,) &= (1.5 \pm 0.3) \cdot 10^{-6} \\ BR(B^+ \to \pi^+\pi^0) &= (5.5 \pm 0.6) \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

2. $B_d^0 \to \pi^+\pi^-$-Zerfälle von den viel häufigeren Zerfällen $B_d^0 \to K^+\pi^-$ mit $BR = (18.2 \pm 0.8) \cdot 10^{-6}$ unterschieden werden müssen.

   Dies erfordert gute $K - \pi$-Trennung bei Impulsen von 5 GeV durch Messungen der Flugzeit (ToF), des Energieverlusts durch Ionisation in der Spurkammer (dE/dx) und des Winkels des $\check{C}$erenkov-Lichtkegels.




3. Neben dem CKM-unterdrückten tree-Prozeß niedrigster Ordnung ($V_{ub}$, Phasenwinkel $\gamma$) auch der konkurrierende Pinguin-Prozeß höherer Ordnung (loop, $V_{td}$, Phasenwinkel $\beta$) nicht vernachlässigbar (mit etwa $30\%$) zu dem Zerfall $B_d^0 \to \pi^+\pi^-$ beiträgt, so daß die gemessenen CP-Asymmetrieparameter (Babar + Belle),

$$S_{\pi\pi} = \sin 2\alpha_{\text{eff}} = -0.50 \pm 0.12, \quad C_{\pi\pi} = -0.37 \pm 0.10,$$

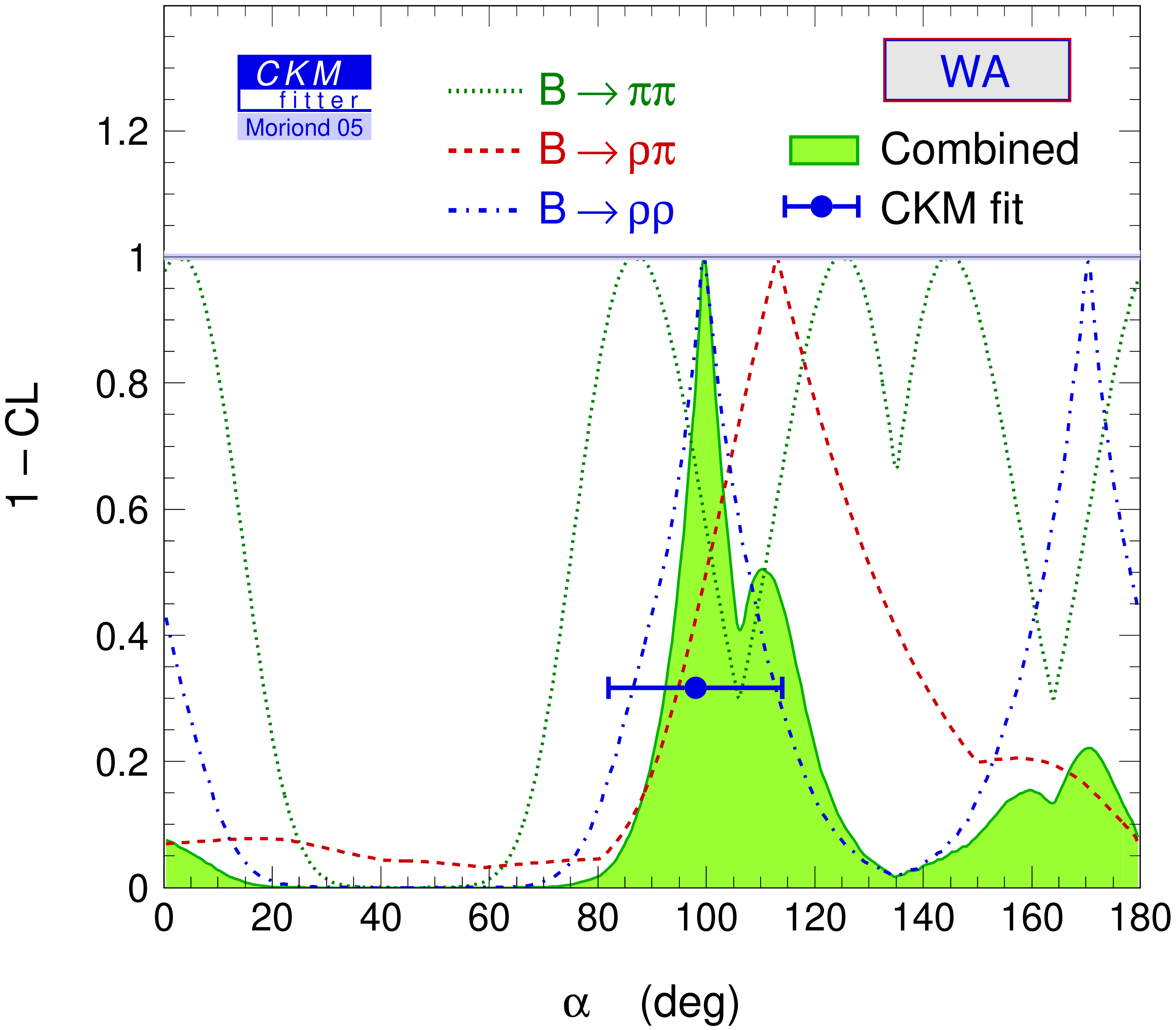
anders als bei $\beta$ und $B_d^0 \to J\psi K_s^0$, nicht direkt mit dem Winkel $\alpha$ verknüpft sind: $\alpha = \alpha_{\text{eff}} + \Delta\alpha$.

Die Korrektur muß durch Messungen der Zerfallswahrscheinlichkeiten und CP-Asymmetrien für $B_d^0 \to \pi^0\pi^0$ und $B^+ \to \pi^+\pi^0$ bestimmt werden.

# CP-Asymmetrie in $B^0 \to \pi\pi$-Zerfällen

Das Ergebnis für $\alpha$ von CP-Asymmetrien in $B \to \pi\pi$, $B \to \rho\rho$ und $B \to \rho\pi$ Zerfällen ist

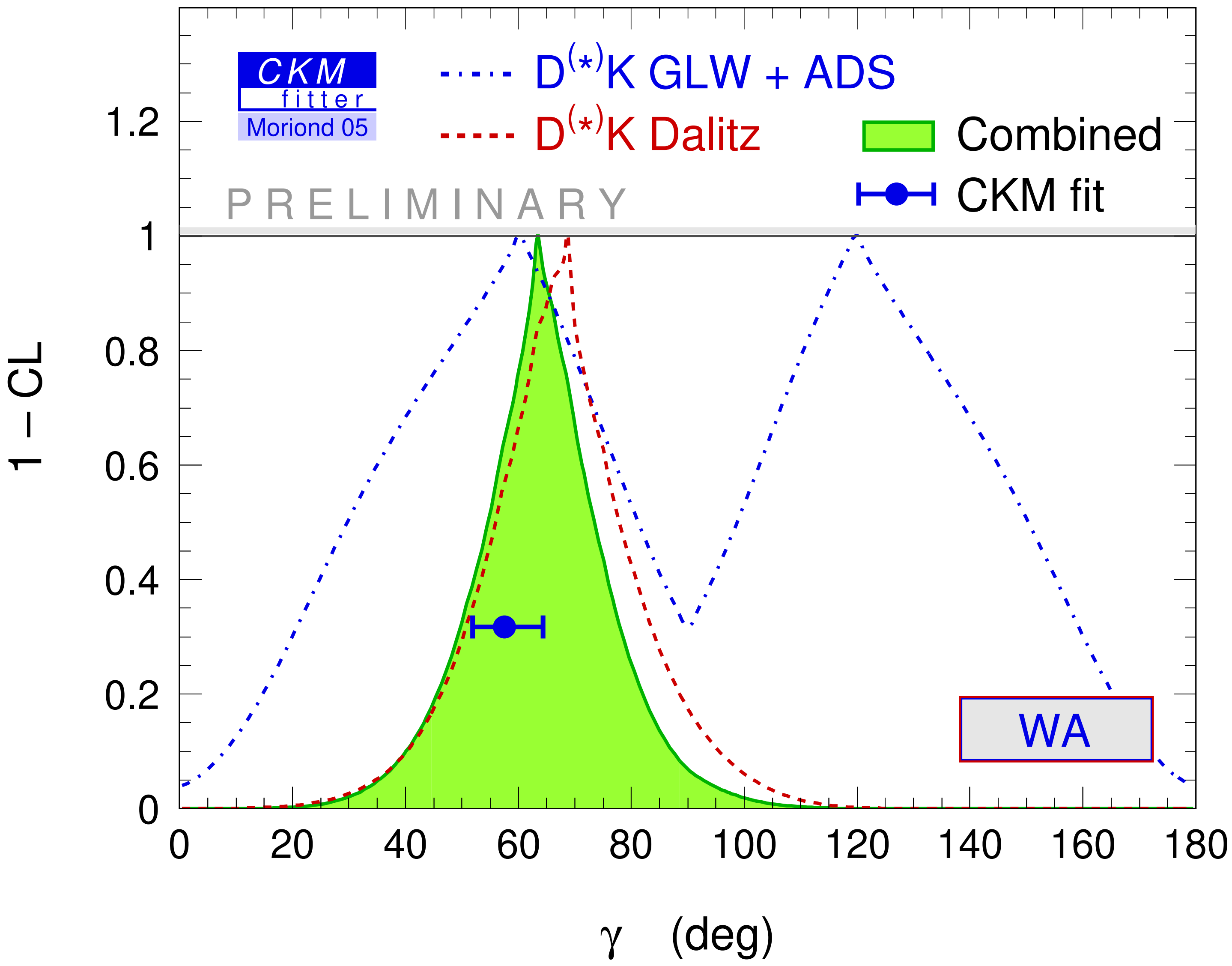
$$\alpha = (100 \pm 10)^\circ$$



## Messung des Winkels $\gamma \approx \delta$

aus CP-Asymmetrien und Zerfallsraten in $B^{\pm} \to DK^{\pm}$-Zerfällen mit Interferenz von $D = D^0 \to K^-\pi^+$ $(b \to c,$ $V_{cb})$ und $D = \overline{D}^0 \to K^-\pi^+$ $(b \to u,\ V_{ub} = |V_{ub}|e^{-i\gamma})$ im Endzustand:

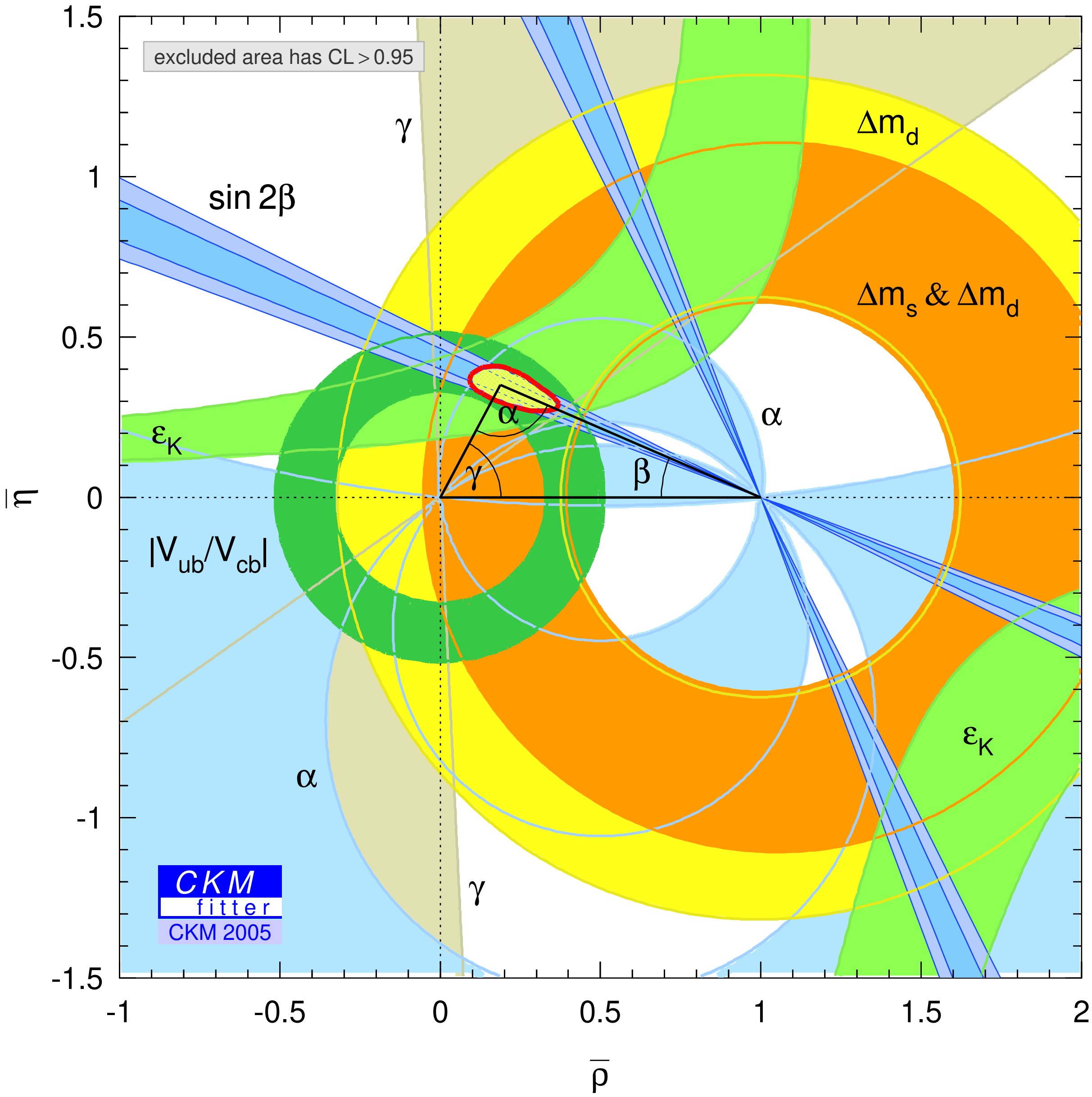
$$\gamma = (68 \pm 23)^\circ$$



# $B^{\pm} \to DK^{\pm}$-Zerfälle

# 2.3.5.6 Bestimmung des Unitaritätsdreiecks

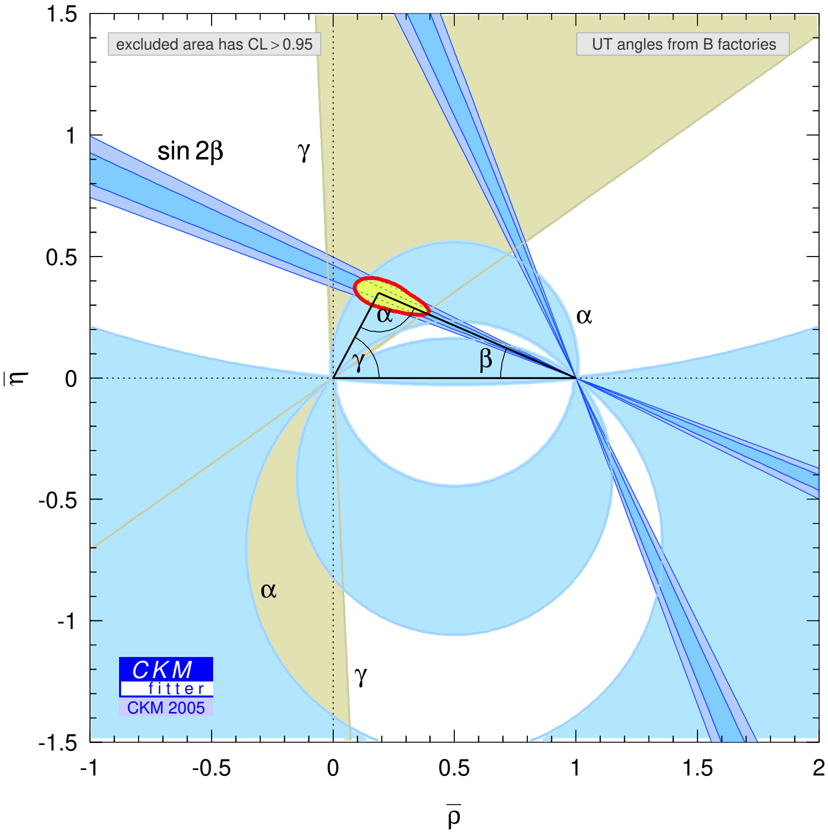
Messungen der Seiten und Winkel und von $\varepsilon_K$ kombiniert:



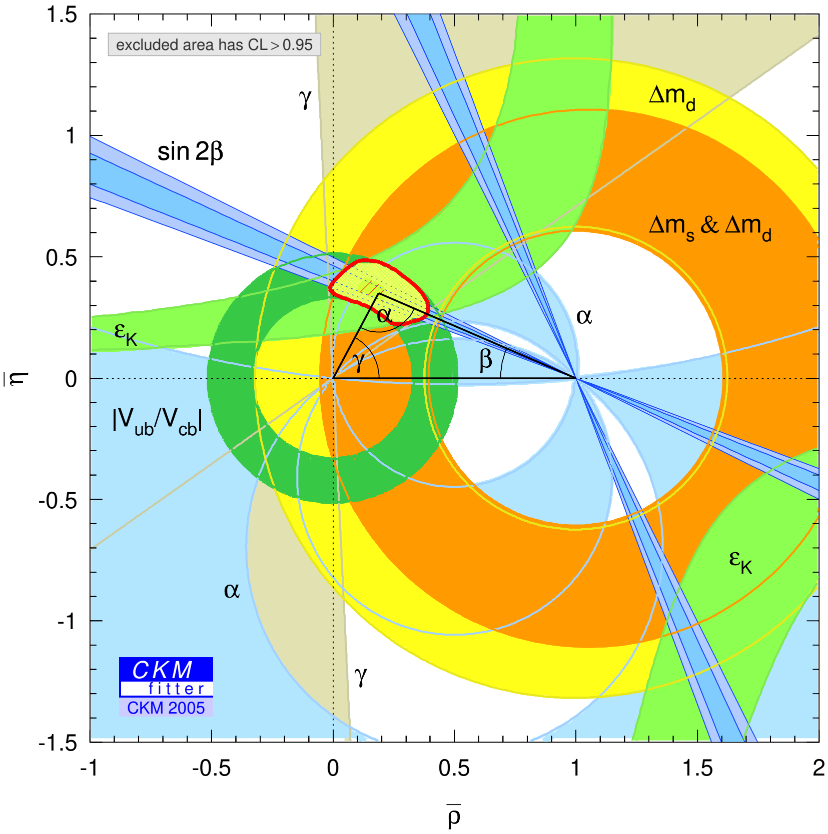

$$\begin{aligned}\alpha &= (97.9 \pm 6)^\circ \\ \beta &= (23.1 \pm 1.5)^\circ \\ \delta \approx \gamma &= (59.0 \pm 6)^\circ \\ \Delta m_s &= (18^{+5}_{-1})\ \mathrm{ps}^{-1}\end{aligned}$$

mit Randbedingung $\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$ (Standardmodell).

# Bestimmung des Unitaritätsdreiecks nur aus Winkeln:




# Bestimmung des Unitaritätsdreiecks nur aus Seiten:



Vergleich der direkten Winkelmessung mit der Vorhersage aus den Seitenmessungen und $\varepsilon_K$ alleine:

Test des Standardmodells: Überbestimmung des Unitaritätsdreiecks.
Unitarität? Konsistenz der Messungen?

| (Grad) | Direkt | Seiten |
|---|---|---|
| $\alpha$ | $100 \pm 10$ | $93.1 \pm 12$ |
| $\beta$ | $23 \pm 1$ | $21.5\ ^{+4}_{-1}$ |
| $\gamma$ | $68 \pm 23$ | $58.2 \pm 6$ |
| Summe | $191 \pm 25$ | $172.8 \pm 14$ |

Neue Effekte außerhalb des Standardmodells, falls Winkelsumme $\neq 180°$ (Verletzung der Unitarität: neue Generation schwerer Fermionen?) oder signifikante Abweichungen zwischen direkter Winkelmessung und der Winkelbestimmung über die Dreiecksseiten (neue Phasenwinkel durch Austausch neuer Teilchen in loop-Prozessen).

Verbesserungen der Genauigkeit der Bestimmung des Unitaritätsdreiecks und der CKM-Matrixelemente für schwere Quarks:

- Statistische Präzision der Winkelmessungen: mehr B-Mesonen.

- $V_{ub}$ aus leptonischen B-Zerfällen $B^+(\bar{b}u) \to W^{+*} \to \tau^+\nu_\tau$ (geringe QCD-Korrekturen) bei $e^+e^-$-B-Fabriken.

- Messung der Oszillationsfrequenz von $B_s^0$-Mesonen, 14.5¡ $\Delta m_s < 28.8$ ps$^{-1}$, am Tevatron bzw. LHC.

- Seltene Kaon-Zerfälle $K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu}$ (geringe QCD-Korrekturen) und seltene B-Zerfälle $B \to K^*\gamma$, $B \to K^*\ell^+\ell^-$, $B_{d,s}^0 \to \mu^+\mu^-$ ($e^+e^-$-B-Fabriken und Hadroncollider).