

# Moderne Experimentalphysik III: Kerne und Teilchen (Physik VI)

**Günter Quast, Roger Wolf, Pablo Goldenzweig**  
13. Juli 2017

INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS (IEKP) – PHYSICS FACULTY



# Fermionsektor: Quarks & Leptonen

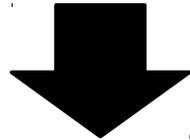


# Masse für Elektronen

- Erhalte Elektronenmasse aus **Yukawa-Kopplung** an neu eingeführtes Higgs-Feld  $\phi$

$$\mathcal{L}^{\text{Yukawa}} = -f_e (\bar{e}_R \phi^\dagger \psi_L) - f_e^* (\bar{\psi}_L \phi e_R)$$

$$\phi = \begin{pmatrix} 0 \\ \sqrt{\frac{\mu^2}{2\lambda} + \frac{H}{\sqrt{2}}} \end{pmatrix} \quad \psi_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e_L \end{pmatrix}$$



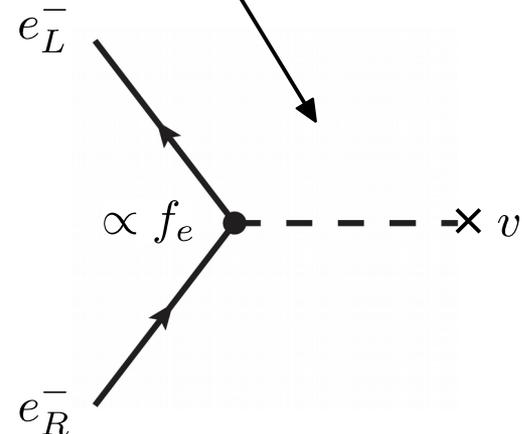
Spontane  
Symmetriebrechung

$$\mathcal{L}^{\text{Yukawa}} = -f_e \left( \sqrt{\frac{\mu^2}{2\lambda} + \frac{H}{\sqrt{2}}} \right) (\bar{e}_R e_L + \bar{e}_L e_R) = -m_e \bar{e} e - \frac{m_e}{v} \frac{H}{\sqrt{2}} \bar{e} e$$

Masse des  
Elektrons:

$$m_e \equiv f_e \sqrt{\frac{\mu^2}{2\lambda}}$$

**NB:** Massenterme  
erhalten Chiralität  
nicht (vgl  
VL-16 Folie15)



# Erweiterung auf Quarksektor

- Fasse in **linkshändige Dubletts** und **rechthändige Singulets** zusammen

$$\psi_L = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \psi_R^u = u_R \quad \psi_R^d = d_R$$

$SU(2)_L \times U(1)_Y$ Hypercharges			
Particle	$Y_{R/L}$	$I_3$	$Q$
$u_L$	$1/3$	$+1/2$	
$d_L$	$1/3$	$-1/2$	
$u_R$	$4/3$	$0$	$+2/3$
$d_R$	$-2/3$	$0$	$-1/3$



$$Q = I_3 + \frac{Y}{2} \quad (\text{Gell-Mann Nischijima})$$

- Einführung kovarianter Ableitung führt zu erwünschten geladenen und neutralen Strömen (vgl [VL-20 Folie 7ff](#))

# Erweiterung auf Quarksektor

- Fasse in **linkshändige Dubletts** und **rechthändige Singulets** zusammen

$$\psi_L = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \psi_R^u = u_R \quad \psi_R^d = d_R$$

$SU(2)_L \times U(1)_Y$ Hypercharges			
Particle	$Y_{R/L}$	$I_3$	$Q$
$u_L$	$1/3$	$+1/2$	$+2/3$
$d_L$	$1/3$	$-1/2$	$-1/3$
$u_R$	$4/3$	$0$	$+2/3$
$d_R$	$-2/3$	$0$	$-1/3$



$$Q = I_3 + \frac{Y}{2} \quad (\text{Gell-Mann Nischijima})$$

- Einführung kovarianter Ableitung führt zu erwünschten geladenen und neutralen Strömen (vgl [VL-20 Folie 7ff](#))

# Neutraler Strom im Quarksektor

$$\mathcal{L}_{IA}^{SU(2)\times U(1)} = i \begin{pmatrix} \bar{u}_L & \bar{d}_L \end{pmatrix} \gamma^\mu \left( \partial_\mu + i\frac{g'}{2}Y_L B_\mu + igW_\mu^a \mathbf{t}^a \right) \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} + i\bar{u}_R \gamma^\mu \left( \partial_\mu + i\frac{g'}{2}Y_R B_\mu \right) u_R + i\bar{d}_R \gamma^\mu \left( \partial_\mu + i\frac{g'}{2}Y_R B_\mu \right) d_R$$

$$\mathcal{L}_{IA}^{NC} = i \begin{pmatrix} \bar{u}_L & \bar{d}_L \end{pmatrix} \gamma^\mu \left( i\frac{g'}{2}\frac{1}{3}B_\mu + i\frac{g}{2}W_\mu^3 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} + i\bar{u}_R \gamma^\mu \left( i\frac{g'}{2}\frac{4}{3}B_\mu \right) u_R - i\bar{d}_R \gamma^\mu \left( i\frac{g'}{2}\frac{2}{3}B_\mu \right) d_R$$

$$= -\frac{\sqrt{g^2 + g'^2}}{2} \left( (\bar{u}_L \gamma^\mu u_L) \left( \sin \theta_W \frac{1}{3} B_\mu + \cos \theta_W W_\mu^3 \right) + (\bar{d}_L \gamma^\mu d_L) \left( \sin \theta_W \frac{1}{3} B_\mu - \cos \theta_W W_\mu^3 \right) \right)$$

$$- \frac{\sqrt{g^2 + g'^2}}{2} \left( (\bar{u}_R \gamma^\mu u_R) \sin \theta_W \frac{4}{3} B_\mu - (\bar{d}_R \gamma^\mu d_R) \sin \theta_W \frac{2}{3} B_\mu \right)$$

$$= -\frac{\sqrt{g^2 + g'^2}}{2} \left( (\bar{u}_L \gamma^\mu u_L) \left( \sin \theta_W \frac{1}{3} (-\sin \theta_W Z_\mu + \cos \theta_W A_\mu) + \cos \theta_W (\cos \theta_W Z_\mu + \sin \theta_W A_\mu) \right) + \right. \\ \left. (\bar{d}_L \gamma^\mu d_L) \left( \sin \theta_W \frac{1}{3} (-\sin \theta_W Z_\mu + \cos \theta_W A_\mu) - \cos \theta_W (\cos \theta_W Z_\mu + \sin \theta_W A_\mu) \right) \right)$$

$$- \frac{\sqrt{g^2 + g'^2}}{2} \left( (\bar{u}_R \gamma^\mu u_R) \sin \theta_W \frac{4}{3} (-\sin \theta_W Z_\mu + \cos \theta_W A_\mu) - (\bar{d}_R \gamma^\mu d_R) \sin \theta_W \frac{2}{3} (-\sin \theta_W Z_\mu + \cos \theta_W A_\mu) \right)$$

$$= -\frac{\sqrt{g^2 + g'^2}}{2} \left( \left( \left( \cos^2 \theta_W - \frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) Z_\mu + \frac{4}{3} \sin \theta_W \cos \theta_W A_\mu \right) (\bar{u}_L \gamma^\mu u_L) + \right. \\ \left. \left( \left( -\cos^2 \theta_W - \frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) Z_\mu - \frac{2}{3} \sin \theta_W \cos \theta_W A_\mu \right) (\bar{d}_L \gamma^\mu d_L) \right)$$

$$- \frac{\sqrt{g^2 + g'^2}}{2} \left( \left( \begin{array}{cc} -\frac{4}{3} \sin^2 \theta_W & Z_\mu + \frac{4}{3} \sin \theta_W \cos \theta_W A_\mu \end{array} \right) (\bar{u}_R \gamma^\mu u_R) + \right.$$

$$\left. \left( \begin{array}{cc} -\frac{2}{3} \sin^2 \theta_W & Z_\mu - \frac{2}{3} \sin \theta_W \cos \theta_W A_\mu \end{array} \right) (\bar{d}_R \gamma^\mu d_R) \right)$$

$$\mathcal{L}_{IA}^{NC} = -\frac{e}{2 \sin \theta_W \cos \theta_W} Z_\mu [(\bar{u}_L \gamma^\mu u_L) - (\bar{d}_L \gamma^\mu d_L)] - e (A_\mu - \tan \theta_W Z_\mu) \left( \frac{2}{3} (\bar{u} \gamma^\mu u) - \frac{1}{3} (\bar{d} \gamma^\mu d) \right)$$

# Schwache WW flavorändernd

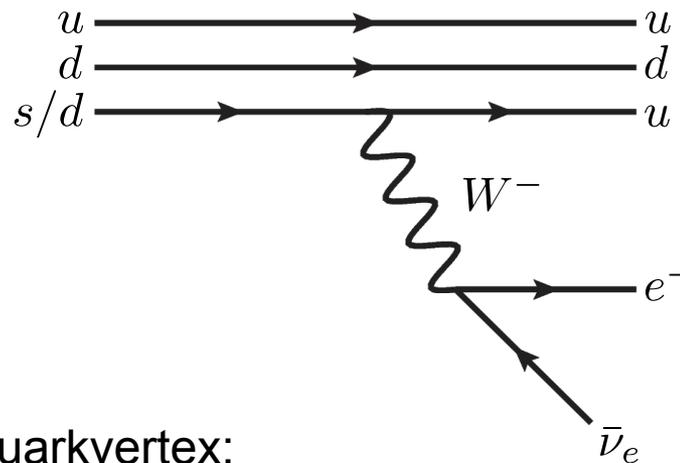
- (Vgl VL-19 Folie 22) → Quarkeigenzustände (der starken WW) **nicht äquivalent** mit Eigenzuständen der schwachen WW:

- Sowohl s- also auch d-Quark kann in u-Quark übergehen

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\Lambda^0 \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

- Berücksichtige durch modifizierten Quarkvertex:



$$\bar{u}\gamma^\mu \left( \frac{1 - \gamma^5}{2} \right) \left( \cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s \right)$$

Eigenzustände der schwachen WW	$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$	Eigenzustände der starken WW
--------------------------------------	---	------------------------------------

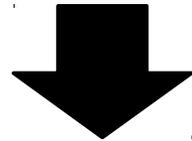
$$(\vartheta = 13^\circ: \text{Cabbibo-Winkel})$$

# Massen für Quarks

- Erhalte Quarkmassen aus **Yukawa-Kopplung** an neu eingeführtes Higgs-Feld  $\phi$

$$\mathcal{L}_d^{\text{Yukawa}} = -f_d (\bar{d}_R \phi^\dagger \psi_L^d) - f_d^* (\bar{\psi}_L^d \phi d_R)$$

$$\mathcal{L}_s^{\text{Yukawa}} = -f_s (\bar{s}_R \phi^\dagger \psi_L^s) - f_s^* (\bar{\psi}_L^s \phi s_R)$$



Spontane  
Symmetriebrechung

$$\mathcal{L}_d^{\text{Yukawa}} = -f_d \left( \sqrt{\frac{\mu^2}{2\lambda}} + \frac{H}{\sqrt{2}} \right) (\bar{d}_R d_L + \bar{d}_L d_R) = -m_d \bar{d}d - \frac{m_d}{v} \frac{H}{\sqrt{2}} \bar{d}d$$

$$\mathcal{L}_s^{\text{Yukawa}} = -f_s \left( \sqrt{\frac{\mu^2}{2\lambda}} + \frac{H}{\sqrt{2}} \right) (\bar{s}_R s_L + \bar{s}_L s_R) = -m_s \bar{s}s - \frac{m_s}{v} \frac{H}{\sqrt{2}} \bar{s}s$$

- Vgl [VL-21 Folie 20f](#)

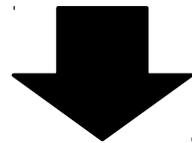
# Massen für down-type Quarks

- Erhalte Quarkmassen aus **Yukawa-Kopplung** an neu eingeführtes Higgs-Feld  $\phi$

$$\mathcal{L}_d^{\text{Yukawa}} = -f_d (\bar{d}_R \phi^\dagger \psi_L^d) - f_d^* (\bar{\psi}_L^d \phi d_R)$$

$$\mathcal{L}_s^{\text{Yukawa}} = -f_s (\bar{s}_R \phi^\dagger \psi_L^s) - f_s^* (\bar{\psi}_L^s \phi s_R)$$

$$-f_d \bar{d}_R \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{\frac{\mu^2}{2\lambda} + \frac{H}{\sqrt{2}}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$$



Spontane  
Symmetriebrechung

$$\mathcal{L}_d^{\text{Yukawa}} = -f_d \left( \sqrt{\frac{\mu^2}{2\lambda} + \frac{H}{\sqrt{2}}} \right) (\bar{d}_R d_L + \bar{d}_L d_R) = -m_d \bar{d}d - \frac{m_d}{v} \frac{H}{\sqrt{2}} \bar{d}d$$

$$\mathcal{L}_s^{\text{Yukawa}} = -f_s \left( \sqrt{\frac{\mu^2}{2\lambda} + \frac{H}{\sqrt{2}}} \right) (\bar{s}_R s_L + \bar{s}_L s_R) = -m_s \bar{s}s - \frac{m_s}{v} \frac{H}{\sqrt{2}} \bar{s}s$$

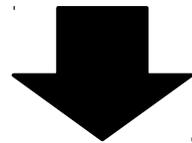
- Vgl [VL-21 Folie 20f](#)

# Massen für up-type Quarks

- Erhalte Quarkmassen aus **Yukawa-Kopplung** an neu eingeführtes Higgs-Feld  $\phi$   
 → **ladungskonjugiert**<sup>(1)</sup>

$$\mathcal{L}_u^{\text{Yukawa}} = -f_u (\bar{u}_R \phi_c^\dagger \psi_L^u) - f_u^* (\bar{\psi}_L^u \phi_c u_R)$$

$$-f_u \bar{u}_R \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{\mu^2}{2\lambda} + \frac{H}{\sqrt{2}}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$$



Spontane  
Symmetriebrechung

$$\mathcal{L}_u^{\text{Yukawa}} = -f_u \left( \sqrt{\frac{\mu^2}{2\lambda} + \frac{H}{\sqrt{2}}} \right) (\bar{u}_R u_L + \bar{u}_L u_R) = -m_u \bar{u}u - \frac{m_u}{v} \frac{H}{\sqrt{2}} \bar{u}u$$

Ladungskonjugation Higgsfeld:<sup>(1)</sup>

$$\phi_c = i\mathbf{t}_2 \phi^* \quad Y_\phi = -1$$

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \rightarrow \phi = \begin{pmatrix} \phi^{0*} \\ -\phi^- \end{pmatrix}$$

- Vgl VL-21 Folie 20f

# Anmerkungen Fermionmassen

---

- Ankopplung Higgsfeld an Eichbosonen → zwingender Bestandteil lokaler Eichtheorie (vgl. [VL-20 Folie 14](#), [VL-21 Folie 12ff](#))
- Higgs-Fermionsektor viel weniger zwingend → **Yukawa-Kopplung “per Hand”** eingeführt → z.B. andere Kopplungsart?
- Massenerzeugung für up- und down-type Fermionen durch gleiches Higgsfeld → nochmal beliebiger!
- Beliebiges weiteres Higgs-Dublett-Feld mit nicht verschwindendem Vakuumerwartungswert in der oberen Komponente des Dubletts kann zu gleichem Ergebnis führen
- Viel diskutierte Erweiterungen des SM (z.B. SUSY) verlangen dies sogar!
- Bezeichnung daher früher als **minimal SM**

# FCNC

---

- In bisher formulierter Form sagt das Modell **flavorändernde neutrale Ströme** (FCNC) vorher:

$$\mathcal{L}^{NC} = -\frac{e}{2 \sin \theta_W \cos \theta_W} Z_\mu \left( (\bar{u}_L \gamma_\mu u_L) - (\bar{d}'_L \gamma_\mu d'_L) \right) \\ - e \left( A_\mu - \tan \theta_W Z_\mu \right) \left( \frac{2}{3} (\bar{u} \gamma_\mu u) - \frac{1}{3} (\bar{d}' \gamma_\mu d') \right)$$

# FCNC

- In bisher formulierter Form sagt das Modell **flavorändernde neutrale Ströme** (FCNC) vorher:

$$\mathcal{L}^{NC} = -\frac{e}{2 \sin \theta_W \cos \theta_W} Z_\mu \left( (\bar{u}_L \gamma_\mu u_L) - (\bar{d}'_L \gamma_\mu d'_L) \right) - e (A_\mu - \tan \theta_W Z_\mu) \left( \frac{2}{3} (\bar{u} \gamma_\mu u) - \frac{1}{3} (\bar{d}' \gamma_\mu d') \right)$$

Können Sie hier auf den FCNC zeigen?



$$\begin{aligned} (\bar{d}'_L \gamma^\mu d'_L) &= \left( (\cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s)_L \gamma^\mu (\cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s)_L \right) \\ &= \cos^2 \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu d_L) + \sin^2 \vartheta (\bar{s}_L \gamma^\mu s_L) + \cos \vartheta \sin \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu s_L + \bar{s}_L \gamma^\mu d_L) \end{aligned}$$

# FCNC

- In bisher formulierter Form sagt das Modell **flavorändernde neutrale Ströme** (FCNC) vorher:

$$\mathcal{L}^{NC} = -\frac{e}{2 \sin \theta_W \cos \theta_W} Z_\mu \left( (\bar{u}_L \gamma_\mu u_L) - (\bar{d}'_L \gamma_\mu d'_L) \right) - e (A_\mu - \tan \theta_W Z_\mu) \left( \frac{2}{3} (\bar{u} \gamma_\mu u) - \frac{1}{3} (\bar{d}' \gamma_\mu d') \right)$$

Können Sie hier auf den FCNC zeigen?

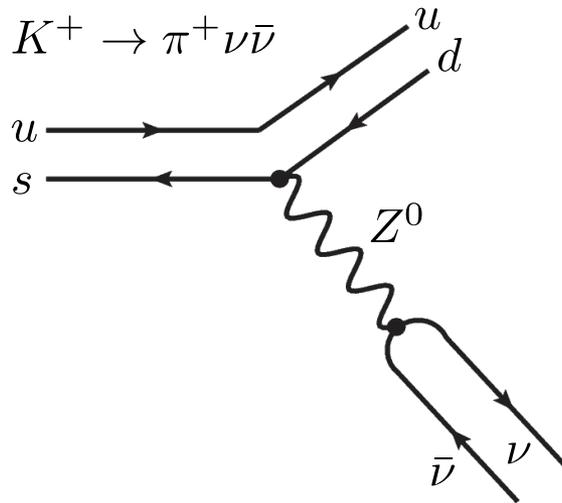


$$\begin{aligned} (\bar{d}'_L \gamma^\mu d'_L) &= \left( (\cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s)_L \gamma^\mu (\cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s)_L \right) \\ &= \cos^2 \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu d_L) + \sin^2 \vartheta (\bar{s}_L \gamma^\mu s_L) + \cos \vartheta \sin \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu s_L + \bar{s}_L \gamma^\mu d_L) \end{aligned}$$

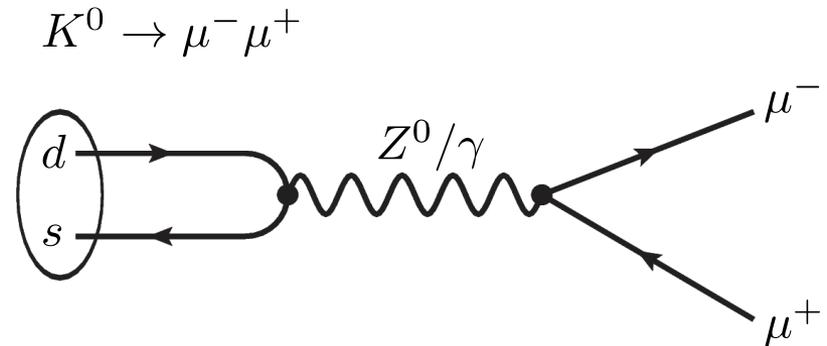
# FCNC

- In bisher formulierter Form sagt das Modell **flavorändernde neutrale Ströme** (FCNC) vorher:

$$\mathcal{L}^{NC} = -\frac{e}{2 \sin \theta_W \cos \theta_W} Z_\mu \left( (\bar{u}_L \gamma_\mu u_L) - (\bar{d}'_L \gamma_\mu d'_L) \right) \\ - e \left( A_\mu - \tan \theta_W Z_\mu \right) \left( \frac{2}{3} (\bar{u} \gamma_\mu u) - \frac{1}{3} (\bar{d}' \gamma_\mu d') \right)$$



$$\cdot \cos \vartheta \sin \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu s_L + \bar{s}_L \gamma^\mu d_L)$$



- In Natur sehr stark unterdrückt!

# GIM Mechanismus (LO)

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

- Berücksichtige **zweite Quarkgeneration**:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^{NC} = & -\frac{e}{2 \sin \theta_W \cos \theta_W} Z_\mu \left( (\bar{u}_L \gamma_\mu u_L) - (\bar{d}'_L \gamma_\mu d'_L) + (\bar{c}_L \gamma_\mu c_L) - (\bar{s}'_L \gamma_\mu s'_L) \right) \\ & - e \left( A_\mu - \tan \theta_W Z_\mu \right) \left( \frac{2}{3} (\bar{u} \gamma_\mu u) - \frac{1}{3} (\bar{d}' \gamma_\mu d') + \frac{2}{3} (\bar{c} \gamma_\mu c) - \frac{1}{3} (\bar{s}' \gamma_\mu s') \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\bar{d}'_L \gamma^\mu d'_L) &= \left( \overline{(\cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s)}_L \gamma^\mu (\cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s)_L \right) \\ &= \cos^2 \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu d_L) + \sin^2 \vartheta (\bar{s}_L \gamma^\mu s_L) + \cos \vartheta \sin \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu s_L + \bar{s}_L \gamma^\mu d_L) \end{aligned}$$

# GIM Mechanismus (LO)

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

- Berücksichtige **zweite Quarkgeneration**:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^{NC} = & -\frac{e}{2 \sin \theta_W \cos \theta_W} Z_\mu \left( (\bar{u}_L \gamma_\mu u_L) - (\bar{d}'_L \gamma_\mu d'_L) + (\bar{c}_L \gamma_\mu c_L) - (\bar{s}'_L \gamma_\mu s'_L) \right) \\ & - e \left( A_\mu - \tan \theta_W Z_\mu \right) \left( \frac{2}{3} (\bar{u} \gamma_\mu u) - \frac{1}{3} (\bar{d}' \gamma_\mu d') + \frac{2}{3} (\bar{c} \gamma_\mu c) - \frac{1}{3} (\bar{s}' \gamma_\mu s') \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\bar{d}'_L \gamma^\mu d'_L) &= \left( \overline{(\cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s)}_L \gamma^\mu (\cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s)_L \right) \\ &= \cos^2 \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu d_L) + \sin^2 \vartheta (\bar{s}_L \gamma^\mu s_L) + \cos \vartheta \sin \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu s_L + \bar{s}_L \gamma^\mu d_L) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\bar{s}'_L \gamma^\mu s'_L) &= \left( \overline{(-\sin \vartheta \cdot d + \cos \vartheta \cdot s)}_L \gamma^\mu (-\sin \vartheta \cdot d + \cos \vartheta \cdot s)_L \right) \\ &= \sin^2 \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu d_L) + \cos^2 \vartheta (\bar{s}_L \gamma^\mu s_L) - \cos \vartheta \sin \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu s_L + \bar{s}_L \gamma^\mu d_L) \end{aligned}$$

# GIM Mechanismus (LO)

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

- Berücksichtige **zweite Quarkgeneration**:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^{NC} = & -\frac{e}{2 \sin \theta_W \cos \theta_W} Z_\mu \left( (\bar{u}_L \gamma_\mu u_L) - (\bar{d}'_L \gamma_\mu d'_L) + (\bar{c}_L \gamma_\mu c_L) - (\bar{s}'_L \gamma_\mu s'_L) \right) \\ & - e \left( A_\mu - \tan \theta_W Z_\mu \right) \left( \frac{2}{3} (\bar{u} \gamma_\mu u) - \frac{1}{3} (\bar{d}' \gamma_\mu d') + \frac{2}{3} (\bar{c} \gamma_\mu c) - \frac{1}{3} (\bar{s}' \gamma_\mu s') \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\bar{d}'_L \gamma^\mu d'_L) &= \left( \overline{(\cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s)}_L \gamma^\mu (\cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s)_L \right) \\ &= \cos^2 \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu d_L) + \sin^2 \vartheta (\bar{s}_L \gamma^\mu s_L) + \cos \vartheta \sin \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu s_L + \bar{s}_L \gamma^\mu d_L) \end{aligned}$$

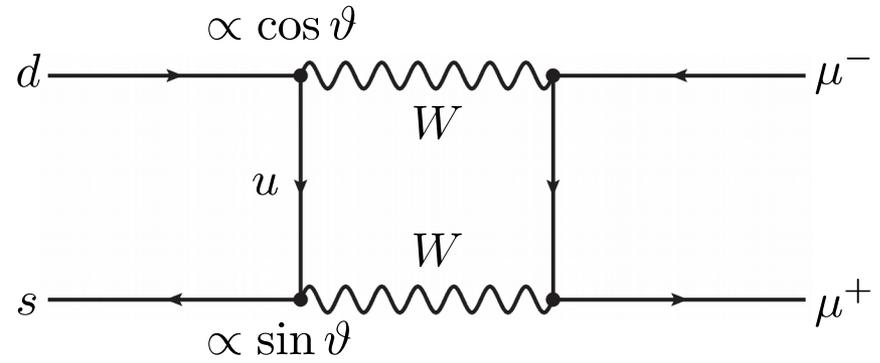
$$\begin{aligned} (\bar{s}'_L \gamma^\mu s'_L) &= \left( \overline{(-\sin \vartheta \cdot d + \cos \vartheta \cdot s)}_L \gamma^\mu (-\sin \vartheta \cdot d + \cos \vartheta \cdot s)_L \right) \\ &= \sin^2 \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu d_L) + \cos^2 \vartheta (\bar{s}_L \gamma^\mu s_L) - \cos \vartheta \sin \vartheta (\bar{d}_L \gamma^\mu s_L + \bar{s}_L \gamma^\mu d_L) \end{aligned}$$

- FCNC heben sich auf: **GIM Mechanismus** (→ Glashow, Iliopolus, Maiani)

# GIM Mechanismus (NLO)

- Zerfälle wie  $K^0 \rightarrow \mu^- \mu^+$  in höherer Ordnung im SM **immer noch möglich:**

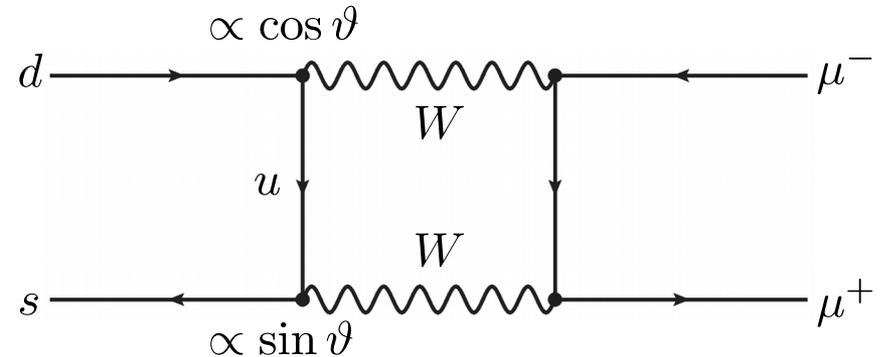
$$\bar{u} \gamma^\mu \left( \frac{1 - \gamma^5}{2} \right) \underbrace{\left( \cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s \right)}_{\equiv d'}$$



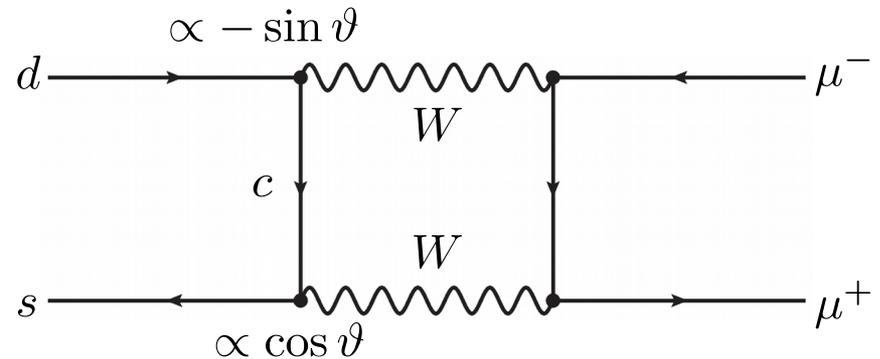
# GIM Mechanismus (NLO)

- Zerfälle wie  $K^0 \rightarrow \mu^- \mu^+$  in höherer Ordnung im SM **immer noch möglich**:

$$\bar{u}\gamma^\mu \left( \frac{1 - \gamma^5}{2} \right) \underbrace{\left( \cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s \right)}_{\equiv d'}$$



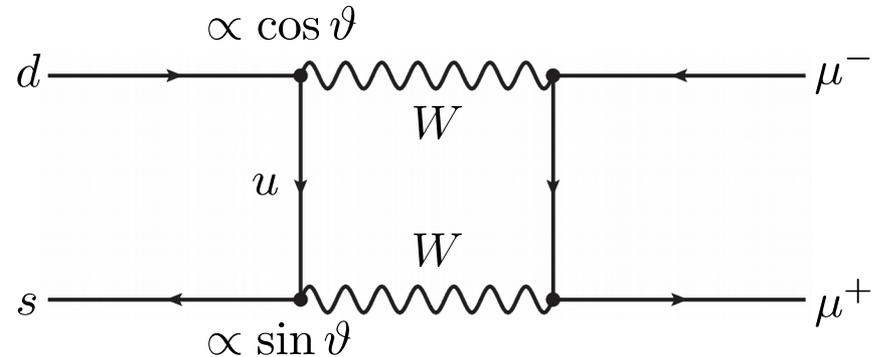
$$\bar{c}\gamma^\mu \left( \frac{1 - \gamma^5}{2} \right) \underbrace{\left( -\sin \vartheta \cdot d + \cos \vartheta \cdot s \right)}_{\equiv s'}$$



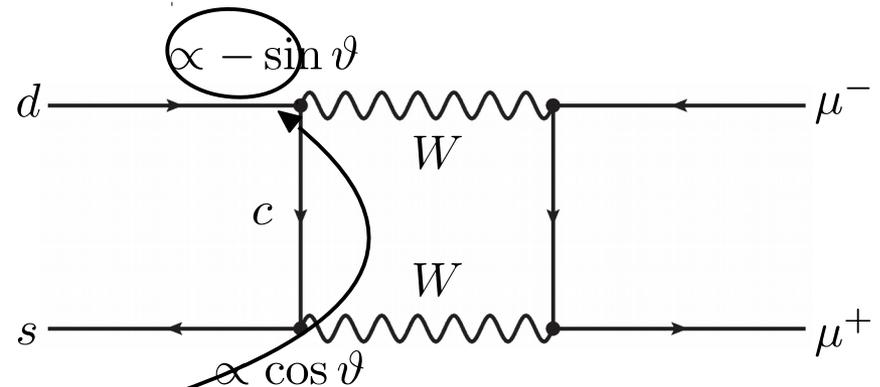
# GIM Mechanismus (NLO)

- Zerfälle wie  $K^0 \rightarrow \mu^- \mu^+$  in höherer Ordnung im SM **immer noch möglich**:

$$\bar{u}\gamma^\mu \left( \frac{1 - \gamma^5}{2} \right) \underbrace{\left( \cos \vartheta \cdot d + \sin \vartheta \cdot s \right)}_{\equiv d'}$$



$$\bar{c}\gamma^\mu \left( \frac{1 - \gamma^5}{2} \right) \underbrace{\left( -\sin \vartheta \cdot d + \cos \vartheta \cdot s \right)}_{\equiv s'}$$



- Minuszeichen bewirkt destruktive Interferenz (vgl [VL-03 Folie 16](#))!

# Anmerkungen GIM Mechanismus

---

- Für  $m_u = m_c$  würden sich auch die NLO Diagramme exakt auslöschen
- 1970: **Vorhersage charm-Quark**, mit neuer Quantenzahl C (vgl [VL-16 Folie 19](#))
- Aus experimenteller Beobachtung:

$$\frac{BR(K_L^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{BR(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)} \approx 10^{-8}$$

sogar Vorhersage für  $m_c$  möglich

- Entdeckung des charm-Quarks vier Jahre später, 1974 (vgl [VL-17 Folie 18](#))

# Masseneigenzustände vs Flavoreigenzustände

- **Masseneigenzustände** aus Higgsmechanismus:  $u, d, c, s, \dots$  (ungestrichen)
- **Flavoreigenzustände** der schwachen WW:  $u, d', c, s', \dots$
- Allgemeinere Schreibweise der Yukawa-Kopplung:

$$\mathcal{L}^{\text{Yukawa}} = \left( \bar{d}'_R \quad \bar{s}'_R \right) \mathcal{M}_{\text{cab}}^\dagger \mathcal{F}_{ds} \phi^\dagger \mathcal{M}_{\text{cab}} \begin{pmatrix} q_{d'}^u \\ q_{s'}^c \end{pmatrix}_L + \left( \bar{u}_R \quad \bar{c}_R \right) \mathcal{F}_{uc} \phi^\dagger \begin{pmatrix} q_{d'}^u \\ q_{s'}^c \end{pmatrix}_L$$

mit:

$$\mathcal{F}_{ds} = \begin{pmatrix} f_d & 0 \\ 0 & f_s \end{pmatrix} \quad \mathcal{F}_{uc} = \begin{pmatrix} f_u & 0 \\ 0 & f_c \end{pmatrix} \quad \mathcal{M}_{\text{cab}}^\dagger \mathcal{M}_{\text{cab}} = 1_2$$

$$q_{d'}^u = \begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \quad q_{s'}^c = \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \quad \mathcal{M}_{\text{cab}} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix}$$

(Cabbibo-Matrix)

- Massenmatrizen diagonal zu Eigenzuständen der starken und em WW, gegen schwache Eigenzustände jedoch um  $\vartheta$  verdreht

# Erweiterung auf drei Quarkgenerationen

- **Masseneigenzustände** aus Higgsmechanismus:  $u, d, c, s, \dots$  (ungestrichen)
- **Flavoreigenzustände** der schwachen WW:  $u, d', c, s', \dots$
- Allgemeinere Schreibweise der Yukawa-Kopplung:

$$\mathcal{L}^{\text{Yukawa}} = \left( \bar{d}'_R \quad \bar{s}'_R \quad \bar{b}'_R \right) \mathcal{M}_{\text{CKM}}^\dagger \mathcal{F}_{dsb} \phi^\dagger \mathcal{M}_{\text{CKM}} \begin{pmatrix} q_{d'}^u \\ q_{s'}^c \\ q_{b'}^c \end{pmatrix}_L$$

$$+ \left( \bar{u}_R \quad \bar{c}_R \quad \bar{t}_R \right) \mathcal{F}_{uct} \phi_c^\dagger \begin{pmatrix} q_{d'}^u \\ q_{s'}^c \\ q_{s'}^c \end{pmatrix}_L$$

mit:

$$\mathcal{F}_{dsb} = \begin{pmatrix} f_d & 0 & 0 \\ 0 & f_s & 0 \\ 0 & 0 & f_b \end{pmatrix} \quad \mathcal{F}_{uct} = \begin{pmatrix} f_u & 0 & 0 \\ 0 & f_c & 0 \\ 0 & 0 & f_t \end{pmatrix} \quad \mathcal{M}_{\text{CKM}}^\dagger \mathcal{M}_{\text{CKM}} = 1_3$$

(CKM-Matrix)

$$q_{d'}^u = \begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \quad q_{s'}^c = \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \quad q_{b'}^c = \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$$

# CKM Matrix

$$\mathcal{M}_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \bar{u} & \bar{c} & \bar{t} \end{pmatrix} \gamma^\mu \left( \frac{1 - \gamma^5}{2} \right) \mathcal{M}_{\text{CKM}} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta_{13}} & 0 & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}c_{13}e^{i\delta_{13}} & -c_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

$$c_{ij} = \cos \varphi_{ij} ; s_{ij} = \sin \varphi_{ij} \quad (ij = 12, 13, 23)$$

- Standardparametrisierung durch **drei Eulerwinkel und eine komplexe Phase**

# CKM Matrix

- Numerische Werte (v.a. aus mesonischen Verzweigungsverhältnissen):

$$(|\mathcal{M}_{\text{CKM}}|) = \begin{pmatrix} 0.97427 \pm 0.00014 & 0.22536 \pm 0.00061 & 0.00355 \pm 0.00015 \\ 0.22522 \pm 0.00061 & 0.97343 \pm 0.00015 & 0.0414 \pm 0.0012 \\ 0.00886 \pm 0.0003 & 0.0405 \pm 0.001 & 0.99914 \pm 0.00005 \end{pmatrix}$$

$$\theta_{12} = 13^\circ \quad \theta_{23} = 2.4^\circ \quad \theta_{13} = 0.2^\circ \quad \delta_{13} = 68^\circ$$

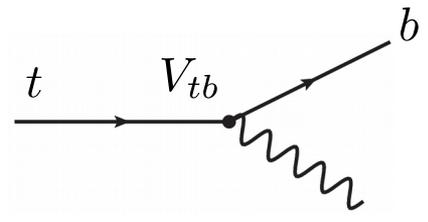
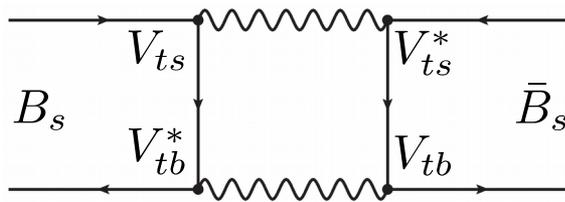
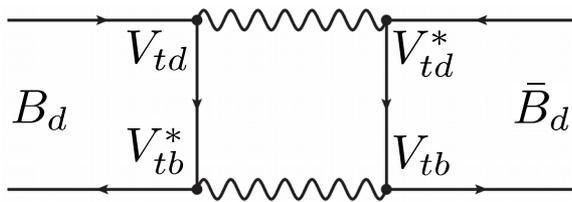
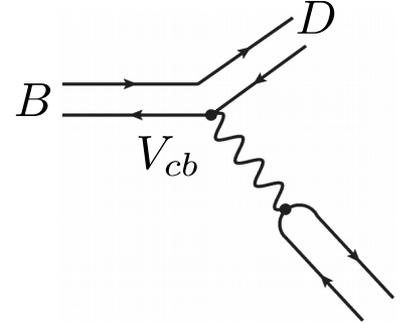
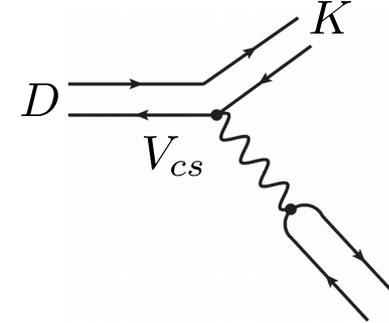
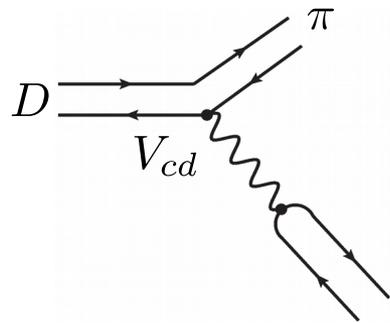
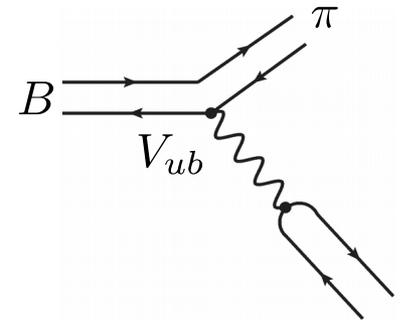
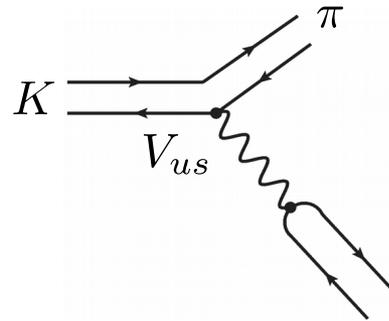
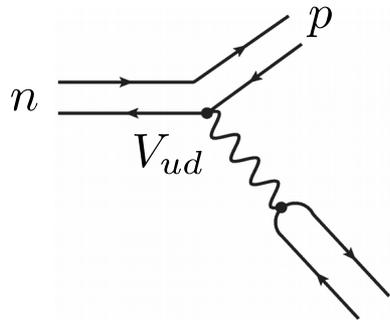
- Stark hierarchische Anordnung**, darstellbar durch **Wolfenstein-Parametrisierung**

$$\mathcal{M}_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \lambda = \sin \vartheta = |V_{us}| = 0.225 \\ (\vartheta = 13^\circ: \text{Cabbibo-Winkel}) \end{array}$$

- Diagonalelemente  $\rightarrow$  Übergänge innerhalb einer Familie  $\mathcal{O}(1)$
- Mischung zwischen 1. und 2. Familie  $\mathcal{O}(\lambda)$
- Mischung zwischen 2. und 3. Familie  $\mathcal{O}(\lambda^2)$
- Mischung zwischen 3. und 1. Familie  $\mathcal{O}(\lambda^3)$

# Messung der CKM Matrixelemente

$$\mathcal{M}_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$



# Anmerkungen CKM Matrix

---

- Sowohl für zwei also auch drei Quarkgenerationen beide Massenmatrizen **immer diagonalisierbar**
- Für zwei Generationen → **Rotationsmatrix reell** → Cabibbo-Matrix
- Für drei Generationen → **Rotationsmatrix komplexwertig** → CKM-Matrix
- CP-Verletzung beschrieben durch komplexe Phase in der Rotationsmatrix, ist die Phase 0 gibt es keine CP-Verletzung im SM → CP-Verletzung im SM also nur möglich mit (mindestens) drei Quarkgenerationen

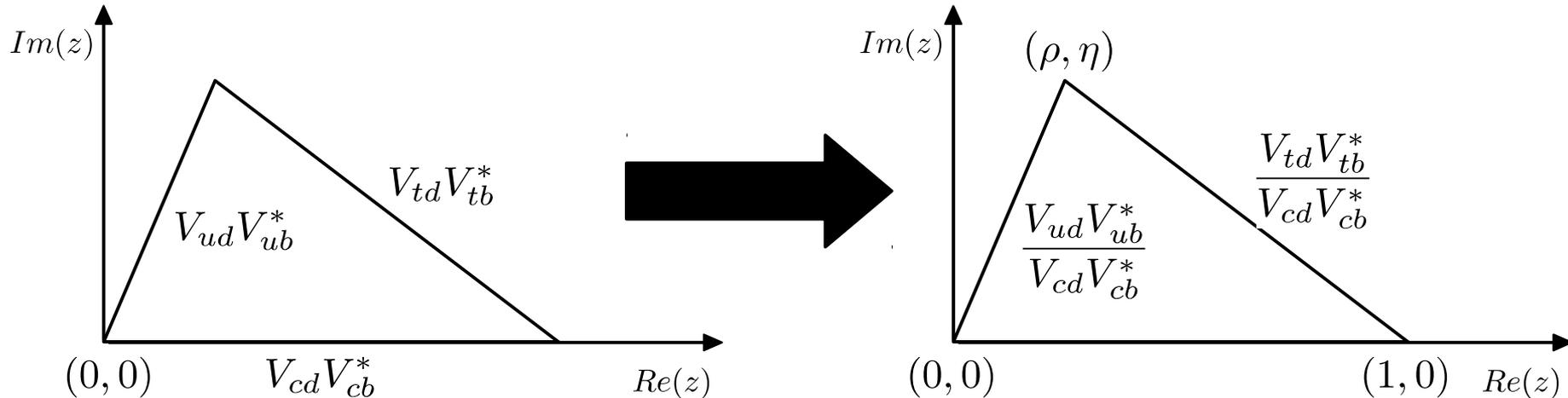
# Unitaritätsdreieck

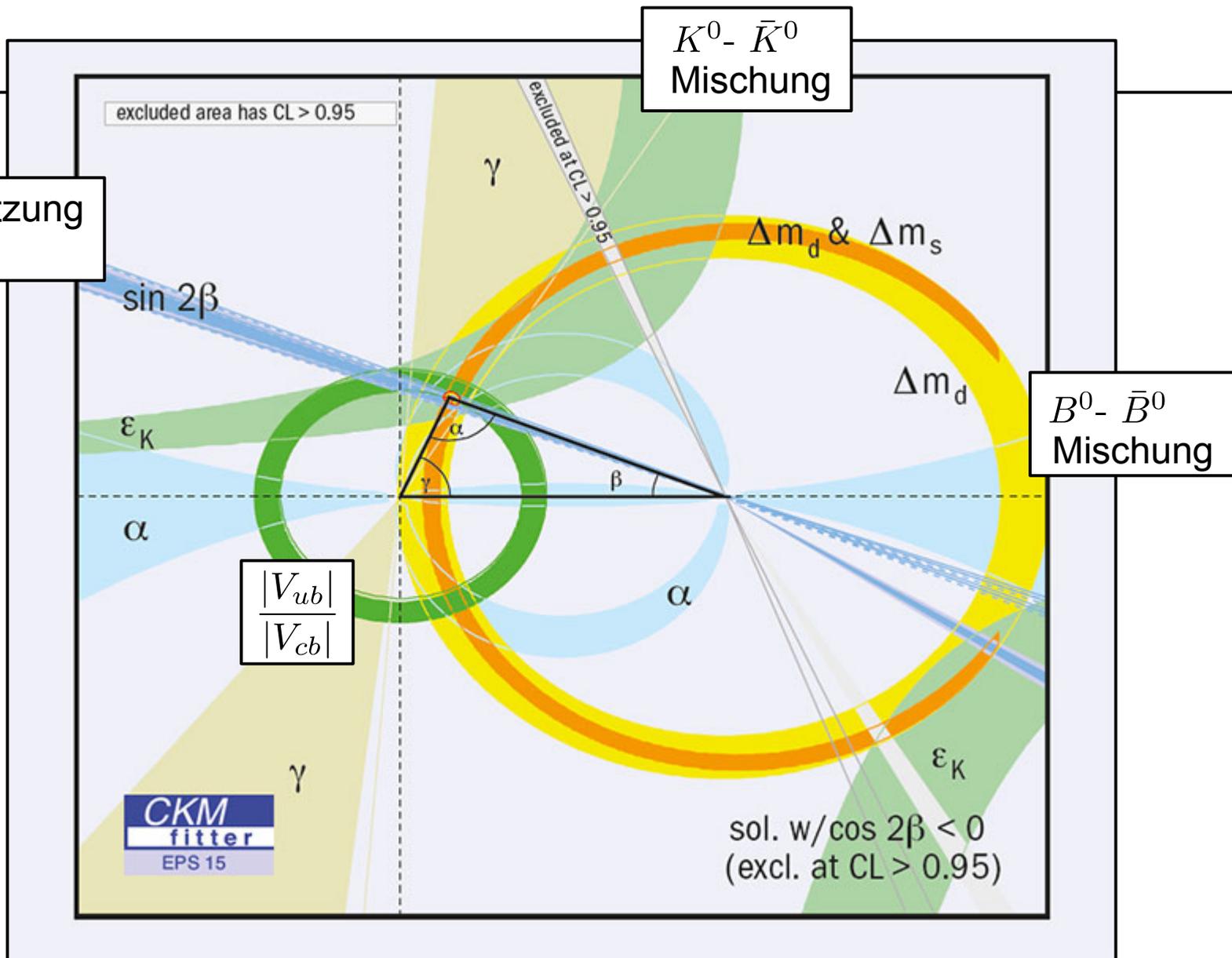
- CKM Matrix ist **unitär**:

$$\mathcal{M}_{\text{CKM}} \mathcal{M}_{\text{CKM}}^\dagger = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{ud}^* & V_{cd}^* & V_{td}^* \\ V_{us}^* & V_{cs}^* & V_{ts}^* \\ V_{ub}^* & V_{cb}^* & V_{tb}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- $\Sigma(\text{Spalte}_i) \times (\text{Spalte}_j)^* = 0$  ,  $\Sigma(\text{Spalte}_i) \times (\text{Spalte}_i)^* = 1$
- Beispiel (1.Spalte) x (3.Spalte)\*:

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$





**9 Elektroschwache Physik**

9.1 Eigenschaften der elektroschwachen Wechselwirkung . . . . .

9.2 Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung . . . . .

9.3 Quarkmischung und CP-Verletzung . . . . .

**10 Moderne Teilchenphysik**

10.1 Schlüsselexperimente der elektroschwachen Wechselwirkung an Collidern . . . . .

10.2 Neutrino-physik . . . . .

10.3 Astroteilchenphysik . . . . .

**11 Offene Fragen der Teilchenphysik**

11.1 Grenzen des SM . . . . .

11.2 Teilchenphysik und Kosmologie . . . . .

