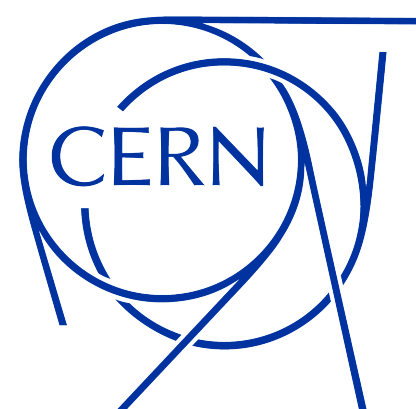


# Der Einfluss der Quartischen Higgs Selbstkopplung auf Di-Higgs Prozesse am LHC

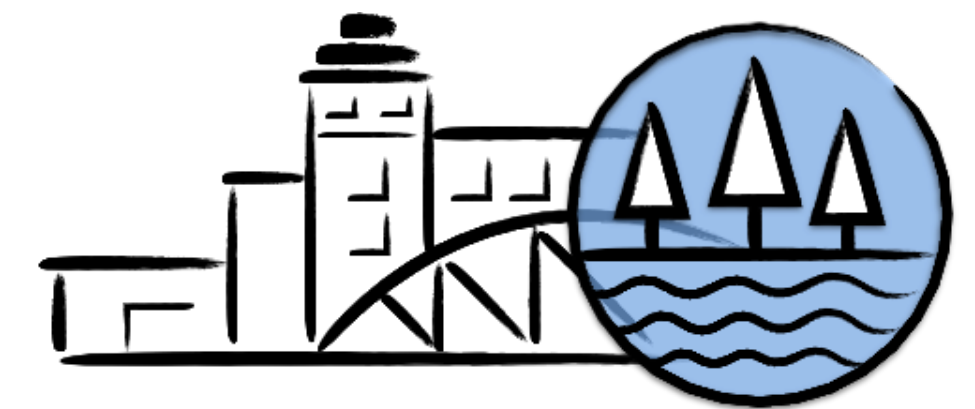
Brian Moser, Philip Sommer, Sophie Kollatzsch, Franziska Rauscher

mit großem Dank an Luca Rottoli

Abschlusspräsentationen Projektwochen, 04.11.2022



NETZWERK  
TEILCHENWELT



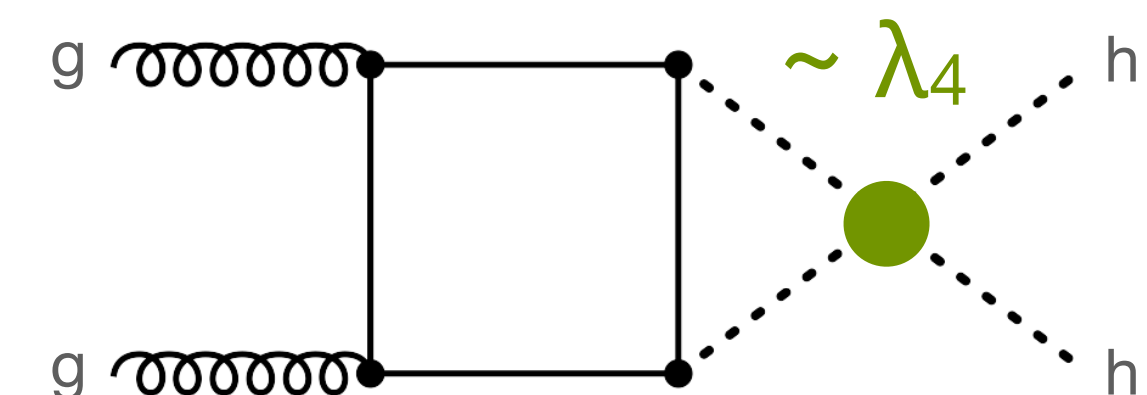
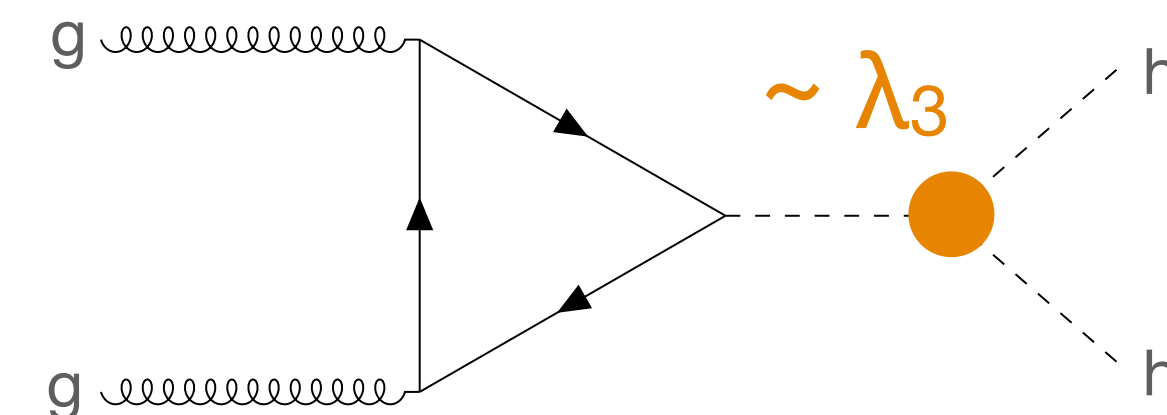
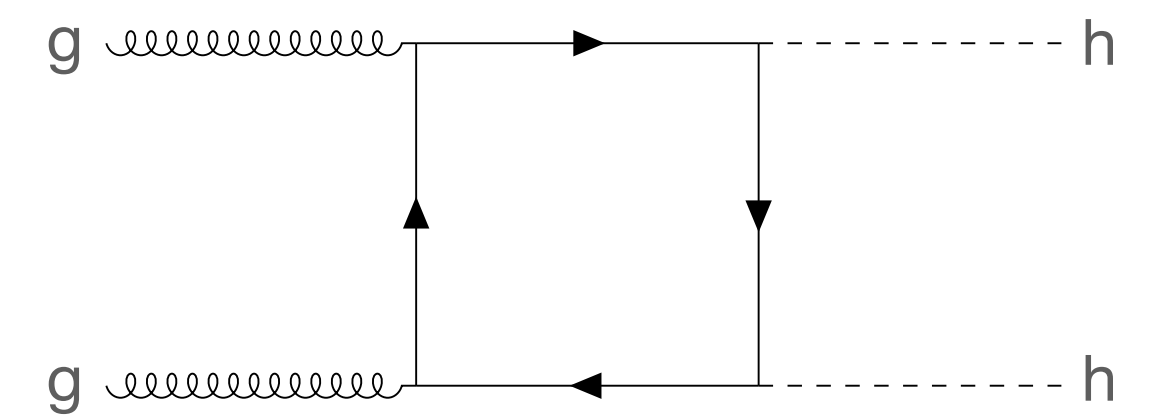
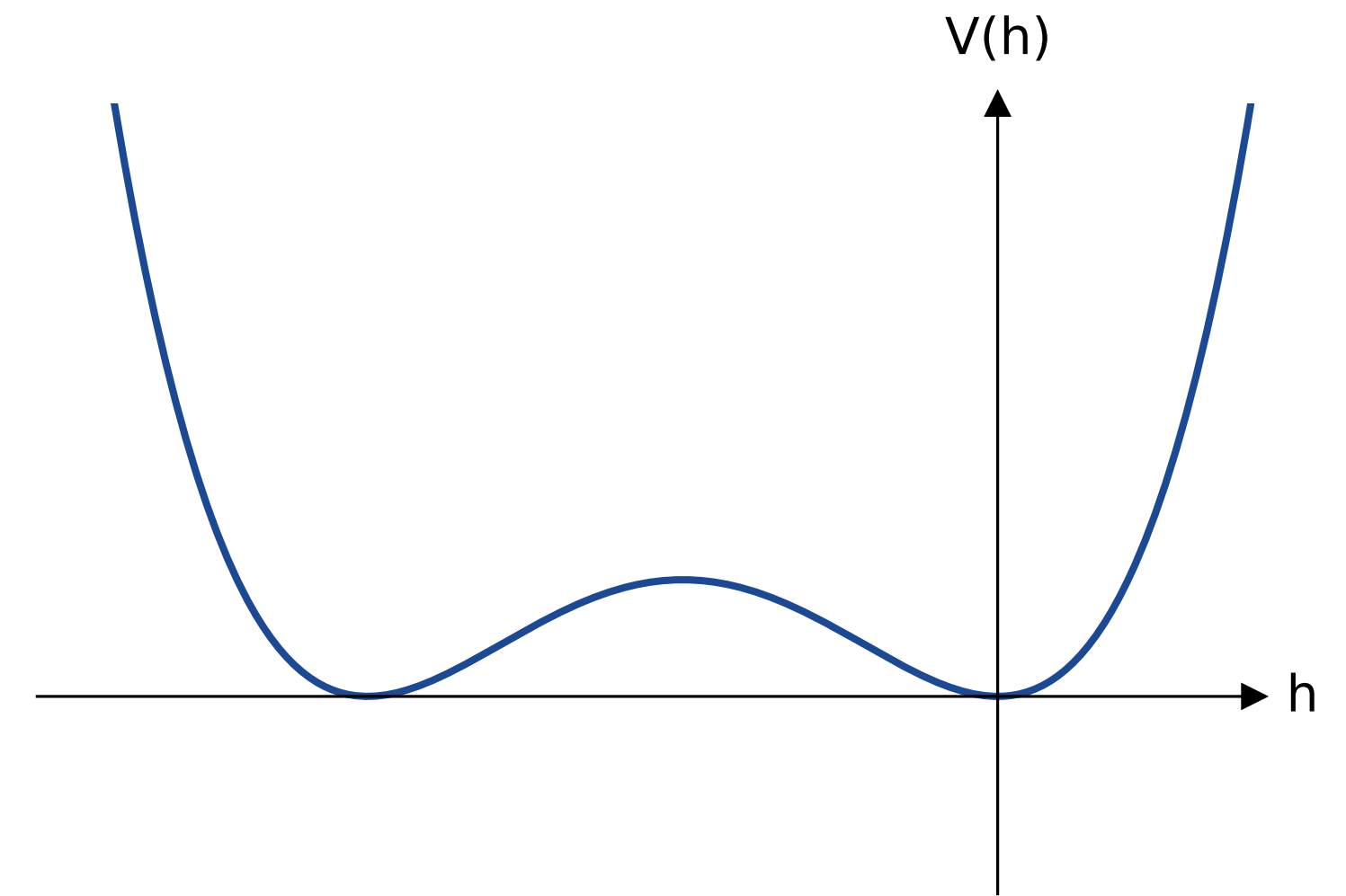
# Motivation

- Das Higgs Potential  $V(h)$  ist eine der interessantesten Vorhersagen des Standardmodells, die experimentell noch nicht bestätigt wurde.

$$V(h) = \frac{1}{2}m_h^2 h^2 + \lambda_3 v h^3 + \lambda_4 h^4$$

- Di-Higgs Produktion ( $pp \rightarrow hh$ ) ist ein Prozess, dessen Rate unter anderem abhängig von der Form des Potenzials ist.
- Bis jetzt haben wir nur den Einfluss von  $\lambda_3$  auf den di-Higgs Wechselwirkungsquerschnitt (WWQ) berücksichtigt, aber auch  $\lambda_4$  wirkt sich darauf auf zwei-Schleifen-Level aus.
- $\lambda_3 = \lambda_4$  (im SM), aber das muss nicht so sein

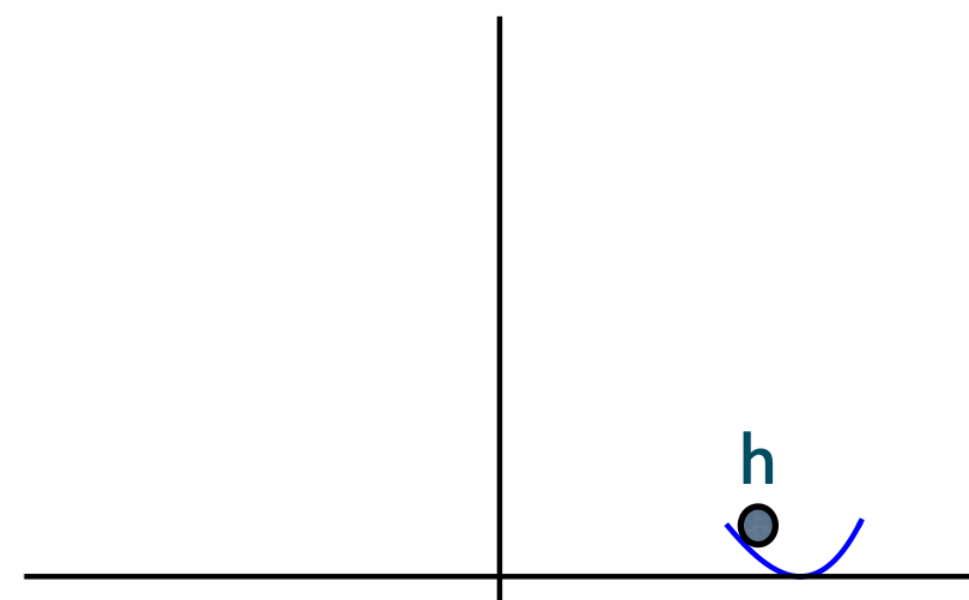
→ Wir wollen abschätzen, wie sich Abweichungen von  $\lambda_4$  vom SM auf den  $pp \rightarrow hh$  WWQ auswirken



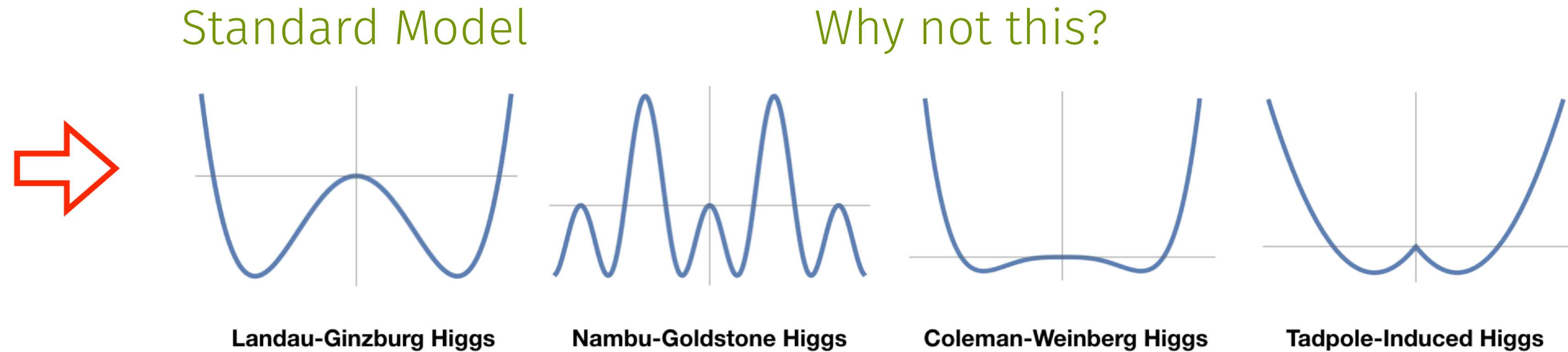
Beispiel-Feynman-Diagramme

# Warum ist $\lambda \neq \text{SM}$ interessant?

- Bis jetzt untersuchen wir mit den meisten Higgs Messungen nur den Bereich um das Minimum des Potentials



[[arXiv:1511.06495](https://arxiv.org/abs/1511.06495)]



- Andere Formen des Higgs-Potentials könnten große Fragen beantworten, wie z.B: “Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie?”
- Abweichungen von  $\lambda_3$  und  $\lambda_4$  vom SM haben riesige Auswirkungen für uns
- Die Messung des Higgs-Potentials wird DIE definierende Higgs Messung der Zukunft sein

# Setup

- Berechnungen gibt es bereits für den HE-LHC (pp @ 27 TeV) und den FCC-hh (pp @ 100 TeV) [[arXiv:1810.04665](https://arxiv.org/abs/1810.04665)]
- Wir haben ein privates POWHEG Model von Luca Rottoli (einer der Autoren) bekommen, die die Kopplungsmodifizierer  $\kappa_3$  und  $\kappa_4$  berücksichtigt, in erster Ordnung der QCD

$$\kappa_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_3^{\text{SM}}} = 1 + \Delta\kappa_3$$

$$\kappa_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_4^{\text{SM}}}$$

- WWQ für  $pp \rightarrow hh$ :  $\sigma \sim \left\{ \begin{array}{l} \text{[SM Box]} + \text{[SM Triangle]} + \text{[SM Box]} + \text{[SM Triangle]} \end{array} \right\}^2$

- WWQ für  $pp \rightarrow hh \sim p_0 + p_1 \kappa_3 + p_2 \kappa_4 + p_3 \kappa_3^2 + p_4 \kappa_3 \kappa_4 + p_5 \kappa_4^2 + p_6 \kappa_3^2 \kappa_4 + p_7 \kappa_3 \kappa_4^2 + p_8 \kappa_3^2 \kappa_4^2$   
[Polynom in  $\kappa_3$  und  $\kappa_4$ ]

- Generierung der WWQ Werte für Kombinationen von  $(\kappa_3, \kappa_4)$  und fitten eines Polynoms durch die Punkte

# Setup Verifizierung

- Reproduzieren des Polynoms für den HE-LHC

$$\begin{aligned}\sigma(pp \rightarrow hh)_{\text{HE-LHC}} = & 131 \left[ 1 - 0.73\Delta\kappa_3 + 1.9 \cdot 10^{-3} \Delta\kappa_4 \right. \\ & + 0.24 (\Delta\kappa_3)^2 + 4.9 \cdot 10^{-4} \Delta\kappa_3 \Delta\kappa_4 + 2.7 \cdot 10^{-5} (\Delta\kappa_4)^2 \\ & - 1.3 \cdot 10^{-3} (\Delta\kappa_3)^2 \Delta\kappa_4 - 1.8 \cdot 10^{-5} \Delta\kappa_3 (\Delta\kappa_4)^2 \\ & \left. + 8.8 \cdot 10^{-6} (\Delta\kappa_3)^2 (\Delta\kappa_4)^2 \right] \text{fb},\end{aligned}$$

- Was wir erhalten haben:

$$\begin{aligned}\mu(pp \rightarrow hh)_{\text{HE-LHC}} = & 1.00 - 0.72\Delta\kappa_3 + 1.9 \cdot 10^{-3} \Delta\kappa_4 \\ & + 0.23(\Delta\kappa_3)^2 + 6.0 \cdot 10^{-4} \Delta\kappa_3 \Delta\kappa_4 + 3.0 \cdot 10^{-5} (\Delta\kappa_4)^2 \\ & - 1.2 \cdot 10^{-3} (\Delta\kappa_3)^2 \Delta\kappa_4 - 2.0 \cdot 10^{-5} \Delta\kappa_3 (\Delta\kappa_4)^2 \\ & + 8.7 \cdot 10^{-6} (\Delta\kappa_3)^2 (\Delta\kappa_4)^2\end{aligned}$$

[ $\mu = \sigma/\sigma_{\text{SM}}$ ]

- Werte stimmen verhältnismäßig gut überein, wenn man bedenkt dass die Formeln unterschiedlicher Ordnung in der Störungstheorie sind (LO vs. NLO QCD)

# Durchführen des Grid Scans in $\kappa_3$ , $\kappa_4$ und fitting

- Berechnete WWQ Werte für viele Kombinationen von  $\kappa_3$  und  $\kappa_4$ ...

Kappa 3	Kappa 4	Cross-section [pb]	uncertainty on cross-section [pb]	mu
1	1	1.59E-02	3.97E-05	1
1	-100	1.79E-02	4.72E-05	1.128877778
1	-50	1.57E-02	4.04E-05	0.988802303
1	-10	1.56E-02	3.94E-05	0.984440267
1	0	1.58E-02	3.96E-05	0.99828691
1	10	1.62E-02	4.02E-05	1.018103687
1	50	1.84E-02	4.48E-05	1.157129427
1	100	2.33E-02	5.61E-05	1.465395461
2.5	-100	1.09E-02	2.67E-05	0.684850159
2.5	-50	7.94E-03	1.96E-05	0.500695987
4	-100	3.99E-02	9.13E-05	2.511811738
4	-50	2.56E-02	5.91E-05	1.615024927
5	-100	7.93E-02	1.88E-04	4.996097825
5	-50	5.16E-02	1.18E-04	3.251576572
5	-10	3.54E-02	8.16E-05	2.230553768
-1	-100	8.35E-02	2.03E-04	5.262292034
-1	-50	6.57E-02	1.59E-04	4.141255536
-1	-10	5.78E-02	1.40E-04	3.64022726
-1	0	5.66E-02	1.37E-04	3.569842909
-1	10	5.59E-02	1.35E-04	3.521518745
-1	50	5.63E-02	1.37E-04	3.547849525
-1	100	6.47E-02	1.58E-04	4.074798065
-4	-100	3.02E-01	7.63E-04	19.04109494
-4	-50	2.26E-01	5.67E-04	14.22226132
-4	-10	1.86E-01	4.61E-04	11.72057316
-4	0	1.79E-01	4.42E-04	11.28349098
-4	10	1.73E-01	4.25E-04	10.92146891
-4	50	1.62E-01	3.98E-04	10.22474169
-4	100	1.75E-01	4.33E-04	11.04415812

- ...und fittete Koeffizienten des Polynoms

```

polyFit_new.py
~/Documents/CERNProject/Fitting
polyFit_new.py x plotMu5.py x plot1DKappa3.py x plot2DChi2.py x polyFit.py x
import numpy as np
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures
from sklearn import linear_model
from iminuit import Minuit
import random

v_x = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2.5, 2.5, 4, 4, 5, 5, 5, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -4, -4, -4, -4, -4, -4, -4, -4]
v_y = [1, -100, -50, -10, 0, 10, 50, 100, -100, -50, -100, -50, -100, -50, -10, -100, -50, -10, 0, 10, 50, 100, -100, -50, -10, 0, 10, 50, 100]

v_z = [1, 1.12887777820982,
0.98880230342964,
0.984440266736124,
0.998286909913317,
1.01810368748266,
1.15712942744424,
1.46539546050979,
0.684850159287821,
0.500695987356043,
2.5118117381868,
1.61502492749948,
4.9960978249245,
3.25157657162293,
2.23055376804509,
5.26229203424769,
4.14125553628454,
3.64022725999424,
3.56984290907817,
3.52151874451287,
3.54784952460695,
4.07479806453528,
19.0410949407849,
14.2222613230289,
11.7205731576057,
11.2834909805174,
10.9214689077899,
10.2247416894208,
11.0441581220656]

# emulate mu values for closure test
#def pol(k3, k4):
#    dk3 = k3-1
#    dk4 = k4-1
#    mu = 1.0 - 0.73*dk3 +(1.9e-3)*dk4 + (0.24)*(dk3**2) + (4.9e-4)*dk3*dk4 + (2.7e-5)*dk4**2 -
(1.3e-3)*dk3**2*dk4 - (1.8e-5)*dk3*dk4**2 + (8.8e-6)*(dk3**2)*(dk4**2)
#    return mu
#or i in range(len(v_x)):
#    v_z.append(pol(v_x[i], v_y[i]))

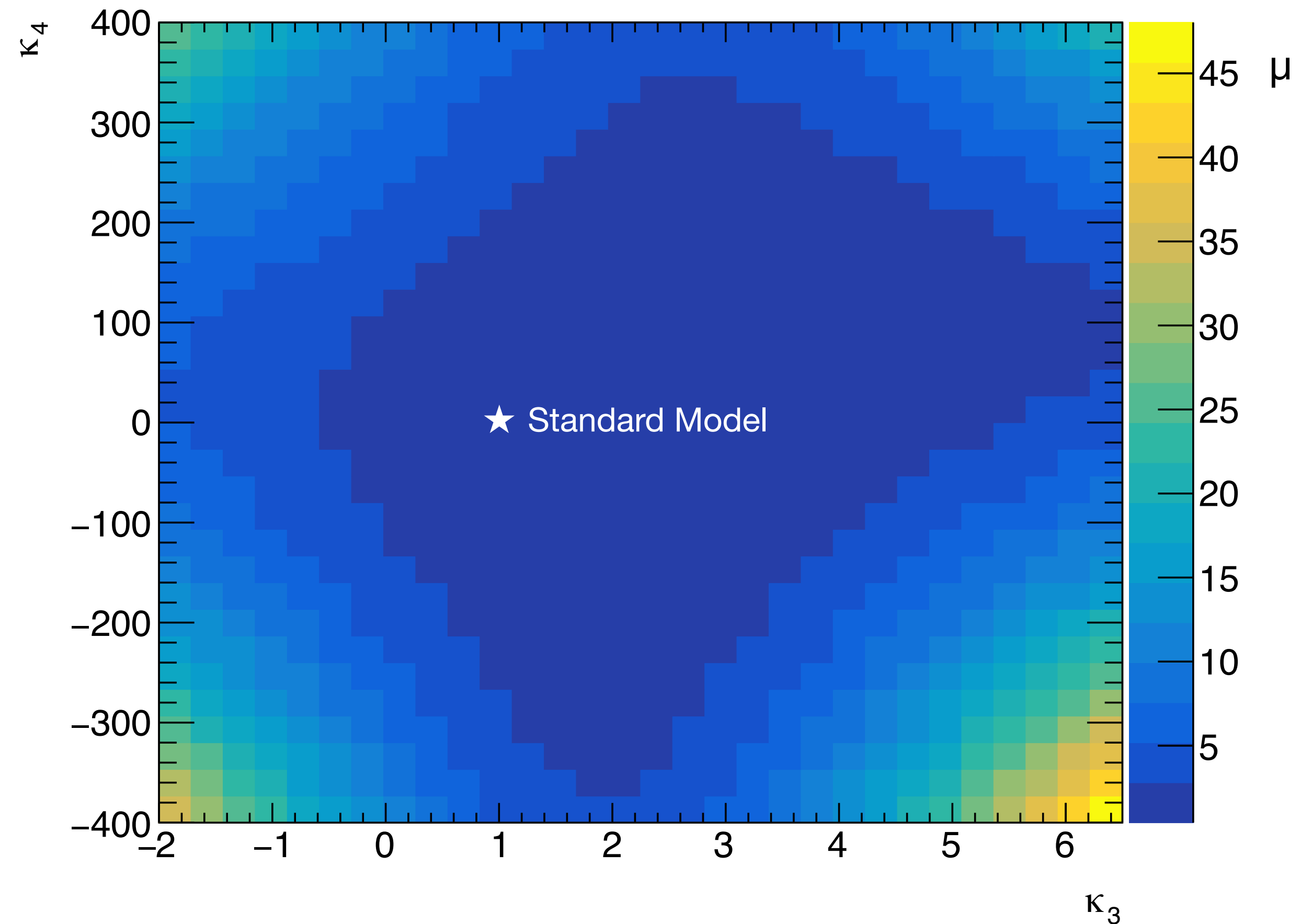
```

# Parameterisierung am LHC

- Mit der Run 2 Schwerpunktsenergie von 13 TeV bekommen wir für die Signalstärke  $\mu = \sigma/\sigma_{\text{SM}}$

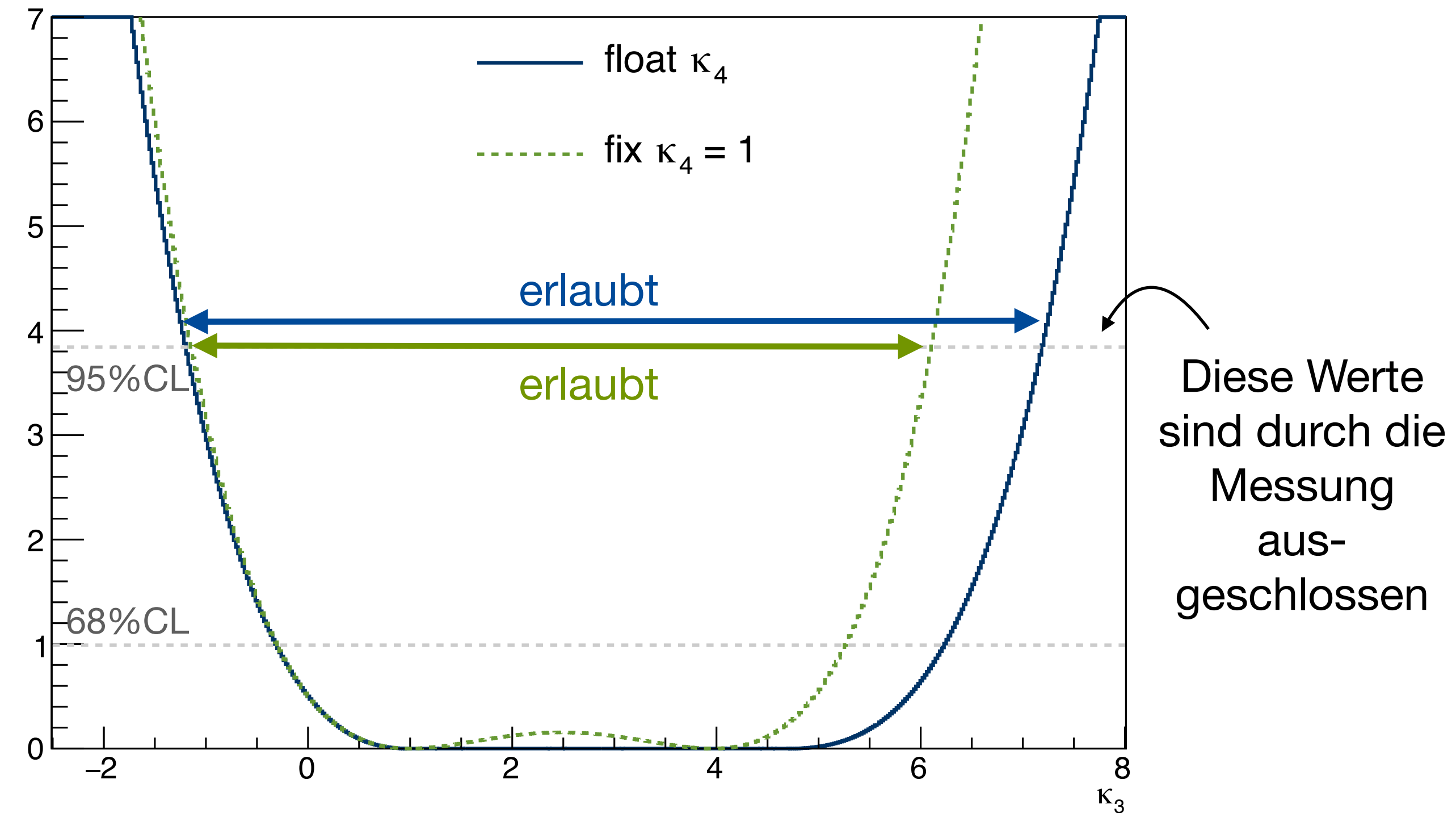
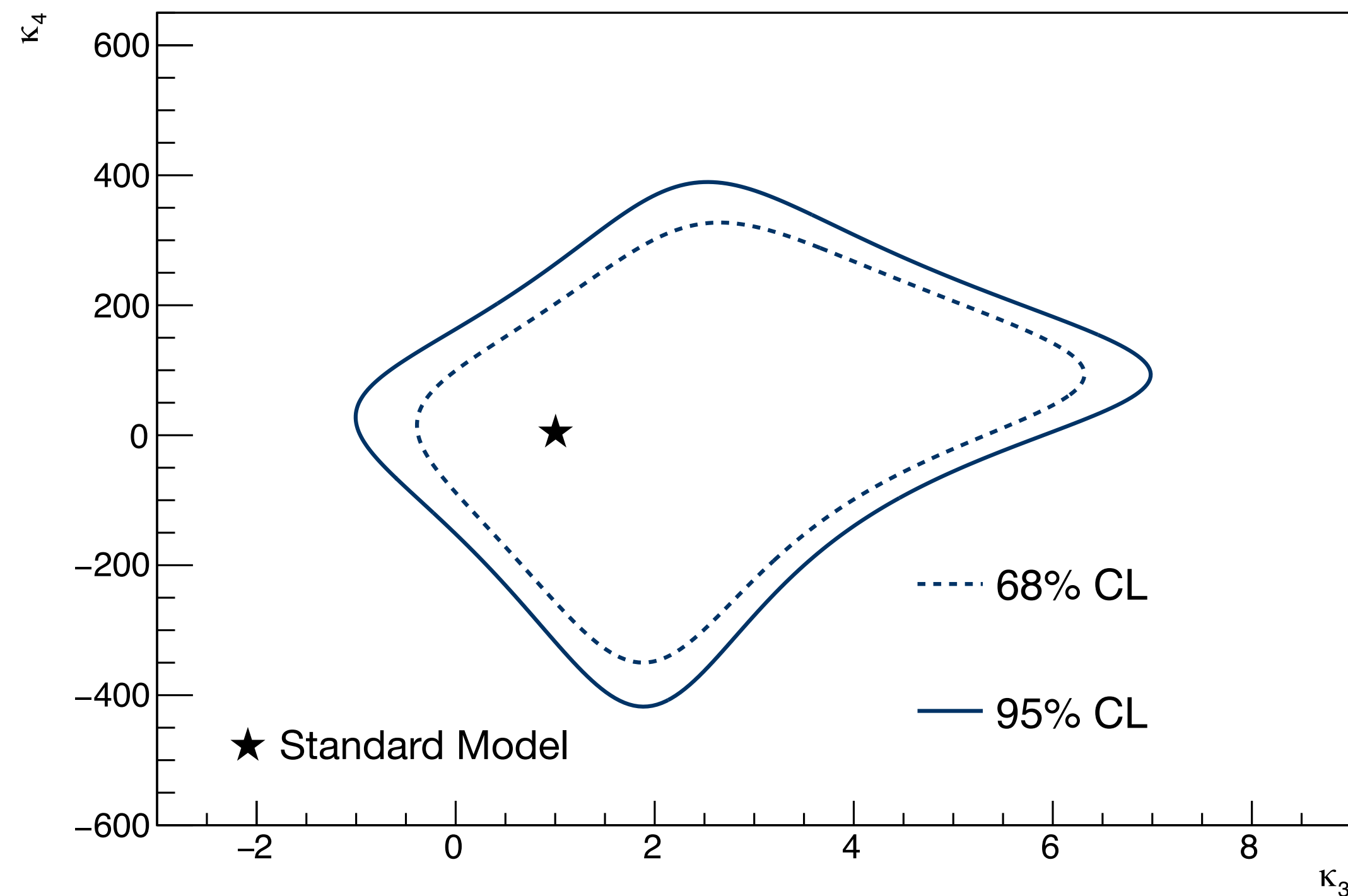
$$\begin{aligned}\mu(pp \rightarrow hh)_{\text{LHC}} = & 1.00 - 0.77\Delta\kappa_3 \\ & + 1.7 \cdot 10^{-3}\Delta\kappa_4 \\ & + 0.26(\Delta\kappa_3)^2 \\ & + 7.5 \cdot 10^{-4}\Delta\kappa_3\Delta\kappa_4 \\ & + 3.0 \cdot 10^{-5}(\Delta\kappa_4)^2 \\ & - 1.5 \cdot 10^{-3}(\Delta\kappa_3)^2\Delta\kappa_4 \\ & - 2.0 \cdot 10^{-5}\Delta\kappa_3(\Delta\kappa_4)^2 \\ & + 9.7 \cdot 10^{-6}(\Delta\kappa_3)^2(\Delta\kappa_4)^2\end{aligned}$$

[LO QCD]



# Was sagen uns die hh Messungen?

- Wir nehmen das neuste ATLAS Run 2 h+hh Kombinationslimit:  $\mu_{\text{expected}} < 2.9 @ 95\% \text{ CL}$



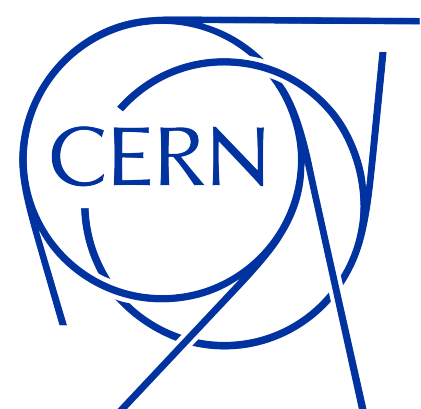
- Mit den Run 2 Daten können wir  $\kappa_4$  nicht stark einschränken, da  $pp \rightarrow hh$  nur wenig sensitiv auf  $\kappa_4$  ist
- Limits von  $\kappa_3$  werden etwas schwächer, wenn  $\kappa_4$  frei gewählt werden darf, sind dafür aber unabhängiger von SM Annahmen



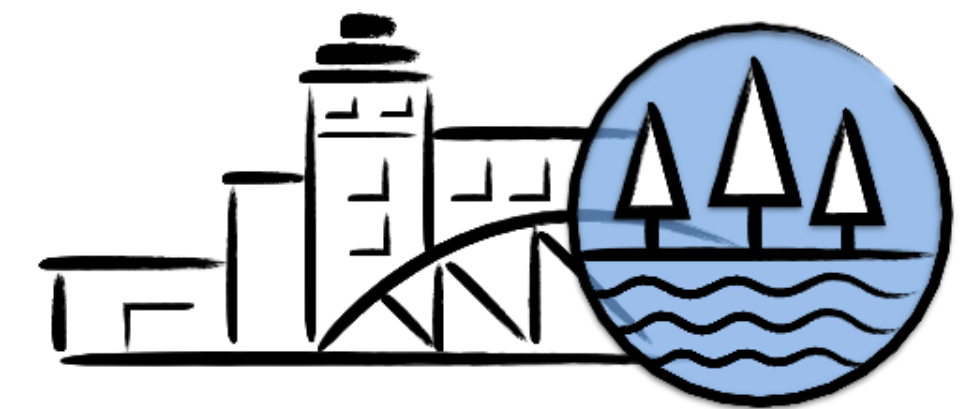
# Fazit und Blick in die Zukunft

- Haben die Abhängigkeit des  $pp \rightarrow hh$  WWQs von  $\kappa_4$  berechnet und mit Run 2 ATLAS Messungen konfrontiert
- Im Moment haben wir limitierte Sensitivität auf  $\kappa_4$ , aber unsere Studien machen es möglich,  $\kappa_3$  zu beschränken ohne dabei Annahmen über  $\kappa_4$  machen zu müssen
- **Nächste Schritte:** Rechnungen auf NLO QCD Level wiederholen (Setup ist fertig, wir hatten aber keine Zeit mehr)  
→ keine drastischen Veränderungen in den Ergebnissen erwartet

# Backup.



NETZWERK  
TEILCHENWELT



# Run 3 Parameterisierung

- Mit der Run 3 Schwerpunktsenergie von 13.6 TeV bekommen wir:

$$\begin{aligned}\mu(pp \rightarrow hh)_{\text{LHC}} = & 1.00 - 0.77\Delta\kappa_3 + 1.7 \cdot 10^{-3}\Delta\kappa_4 \\ & + 0.25(\Delta\kappa_3)^2 + 7.4 \cdot 10^{-4}\Delta\kappa_3\Delta\kappa_4 + 3.0 \cdot 10^{-5}(\Delta\kappa_4)^2 \\ & - 1.5 \cdot 10^{-3}(\Delta\kappa_3)^2\Delta\kappa_4 - 2.0 \cdot 10^{-5}\Delta\kappa_3(\Delta\kappa_4)^2 \\ & + 9.7 \cdot 10^{-6}(\Delta\kappa_3)^2(\Delta\kappa_4)^2\end{aligned}$$

[LO QCD]