

# Quantenkorrekturen zu Teilchenreaktionen

**Stefan Dittmaier**

*Max-Planck-Institut für Physik München*

## **Inhalt**

- 1 Einleitung**
- 2 Indirekte Schranken an die Higgs-Boson-Masse**
- 3 Higgs-Suche am LHC**
- 4 Higgs-Boson-Erzeugung in  $e^+e^-$ -Vernichtung**
- 5 Zusammenfassung**

# 1 Einleitung

## Rolle von Quantenkorrekturen in Teilchenreaktionen

- **pp-Kollision:** verlässliche Vorhersage von Wirkungsquerschnitten
  - Korrekturen der Starken WW (QCD) spielen tragende Rolle
    - ↪ Reduktion der Faktorisierungs- und Renormierungsskalenabhängigkeit
  - Größenordnung der Korrekturen  $\sim \mathcal{O}(10 - 100\%)$
- **$e^+e^-$ -Kollision:** präzise Vorhersagen von Wirkungsquerschnitten
  - Elektroschwache & QCD-Korrekturen gleichermaßen wichtig
  - Größenordnung der Korrekturen  $\sim \mathcal{O}(10\%)$
  - Messgenauigkeit an zukünftigen Kollidern  $\sim \mathcal{O}(1\%)$ 
    - ↪ Wirkungsquerschnitte als Präzisionsobservable
- „Hochpräzisionsobservablen“
  - Messgenauigkeit  $\sim \mathcal{O}(0.1 - 1\%)$
  - Präzise Auswertung von Quantenkorrekturen erforderlich
    - ↪ Hohe Sensitivität auf Modellparameter

Schwerpunkt des Vortrages:

## Quantenkorrekturen in der Higgs-Physik

- **Schranken an  $M_H$**  durch Hochpräzisionsobservablen
- Higgs-Suche am **LHC**
- Untersuchung von Higgs-Bosonen an  **$e^+e^-$ -Beschleunigern**

# Was sind Quantenkorrekturen ?

## Ausgangspunkt: Quantenfeldtheorie definiert Modell

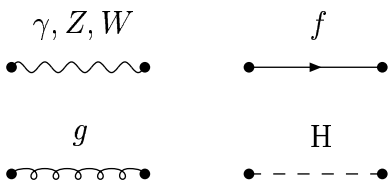
- Zu jedem Teilchen korrespondiert ein Feld  $\phi_i$ .
- Lagrange-Dichte  $\mathcal{L}(\phi_i)$  für freie Bewegung & Wechselwirkung

## Störungstheoretische Auswertung der Quantenfeldtheorie

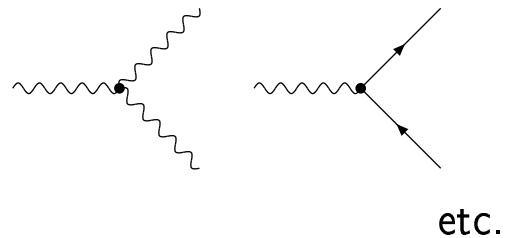
Übergangsamplitude  $\langle f|S|i\rangle = \sum$  Feynman-Graphen für  $|i\rangle \rightarrow |f\rangle$

Aufbau der Graphen nach **Feynman-Regeln**:

### Freie Propagatoren:



### Vertizes = elementare Wechselwirkungen:



Propagatoren & Vertizes  $\longleftrightarrow$  Terme in  $\mathcal{L}(\phi_i)$

**Störungsreihe** für  $g \rightarrow 0$

= Potenzreihe in  $g^n$

= Potenzreihe in  $\hbar^m$

= Entwicklung nach # Schleifen in Diagrammen

$\Rightarrow$  Schleifendiagramme = Quantenkorrekturen

# Zum Aufbau des Standardmodells

Standardmodell (SM) und QED im Vergleich:

	QED	SM
Materiefelder (Spin $\frac{1}{2}$ )	$e^\pm$	Leptonen + Quarks
Eichsymmetrie	$U(1)_{em}$	$SU(2) \times U(1)$
→ Eichbosonen (Spin 1)	$\gamma$	$\gamma, Z^0, W^\pm$

Unterschiede zur QED:

- Nicht-Abelsche Eichgruppe  
→ Eichboson-Selbstwechselwirkungen
- Spontane Symmetriebrechung  $SU(2) \times U(1) \rightarrow U(1)_{em}$   
→ Massive Eichbosonen  $Z^0, W^\pm$   
Higgs-Boson H (Spin 0)

⇒ Einheitliche Beschreibung  
der Elektromagnetischen und Schwachen Wechselwirkung

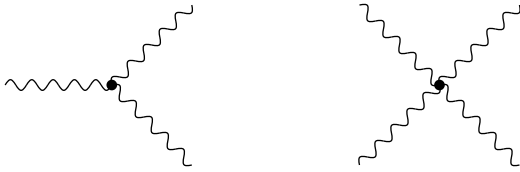
$$SU(3) \times$$

, g

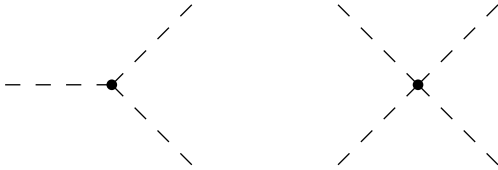
sowie der Starken Wechselwirkung

## Elementare Kopplungen der Elektroschwachen Wechselwirkung:

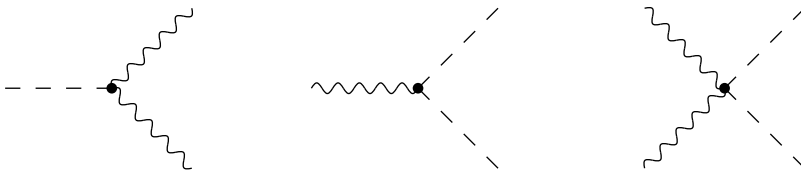
Eichboson-Selbstwechselwirkungen:



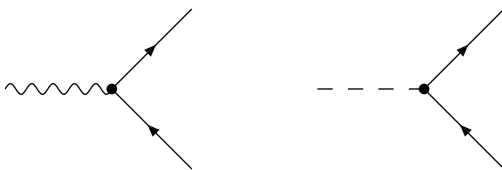
Higgs-Selbstwechselwirkungen:



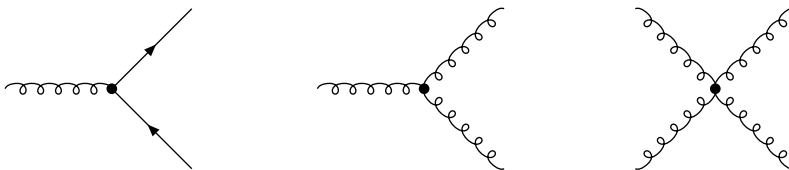
Eichboson-Higgs-Kopplungen:



Fermion-Kopplungen:



## Elementare Kopplungen der Starken Wechselwirkung:

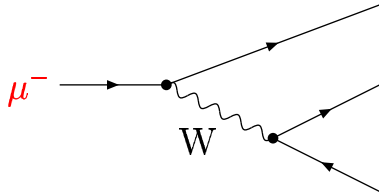


## 2 Indirekte Schranken an die Higgs-Boson-Masse

### 2.1 Allgemeiner Überblick

#### Wichtige Elektroschwache Experimente

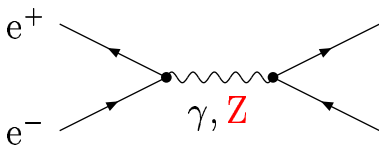
- Myon-Zerfall:  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu e^- \bar{\nu}_e$



Bestimmung der Fermi-Konstante

$$G_\mu = \frac{\pi\alpha M_Z^2}{\sqrt{2}M_W^2(M_Z^2 - M_W^2)} + \dots$$

- Z-Produktion (LEP1/SLC):  $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow f\bar{f}$

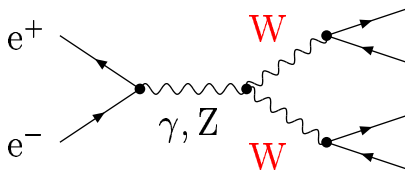


Zahlreiche Präzisionsmessungen zum Z:

$$M_Z, \Gamma_Z, \sigma_{\text{had}}, A_{\text{FB}}, A_{\text{LR}}, \text{etc.}$$

⇒ Gute Kenntnis des  $Zf\bar{f}$ -Sektors

- W-Paarproduktion (LEP2/LC):  $e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow 4f(+\gamma)$

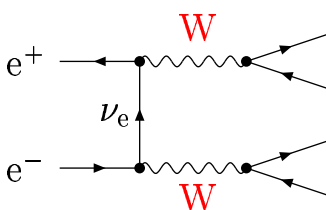


– Messung von  $M_W$

–  $\gamma WW$ -/ $ZWW$ -Kopplungen

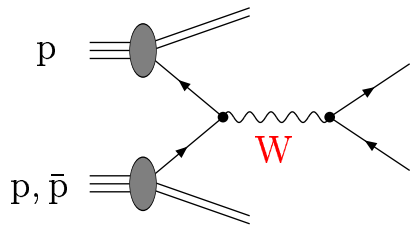
– quartische Kopplungen:

$$\gamma\gamma WW, \gamma ZWW$$



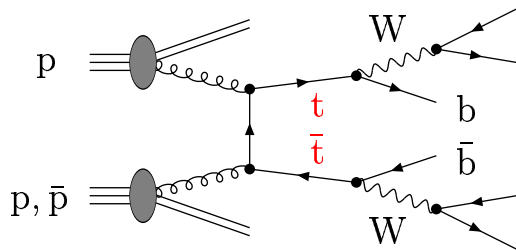
## Wichtige Elektroschwache Experimente (Fortsetzung)

- **W-Produktion** (Tev./LHC):  $pp, p\bar{p} \rightarrow W \rightarrow l\nu_l(+\gamma)$



- Messung von  $M_W$
- Einschränkung der  $\gamma WW$ -Kopplung

- **Top-Quark-Produktion** (Tev./LHC):  $pp, p\bar{p} \rightarrow t\bar{t} \rightarrow 6f$

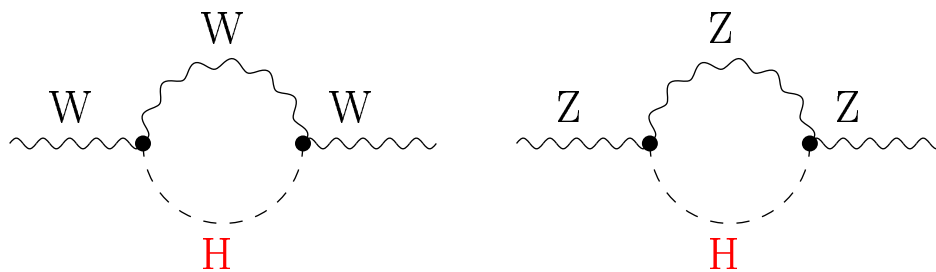


- Messung von  $m_t$

## Theoretische Vorhersagen

parametrisiert durch  $\alpha(M_Z)$ ,  $M_W$ ,  $M_Z$ ,  $m_t$ ,  $m_f$ ,  $\alpha_s(M_Z)$  und  $M_H$

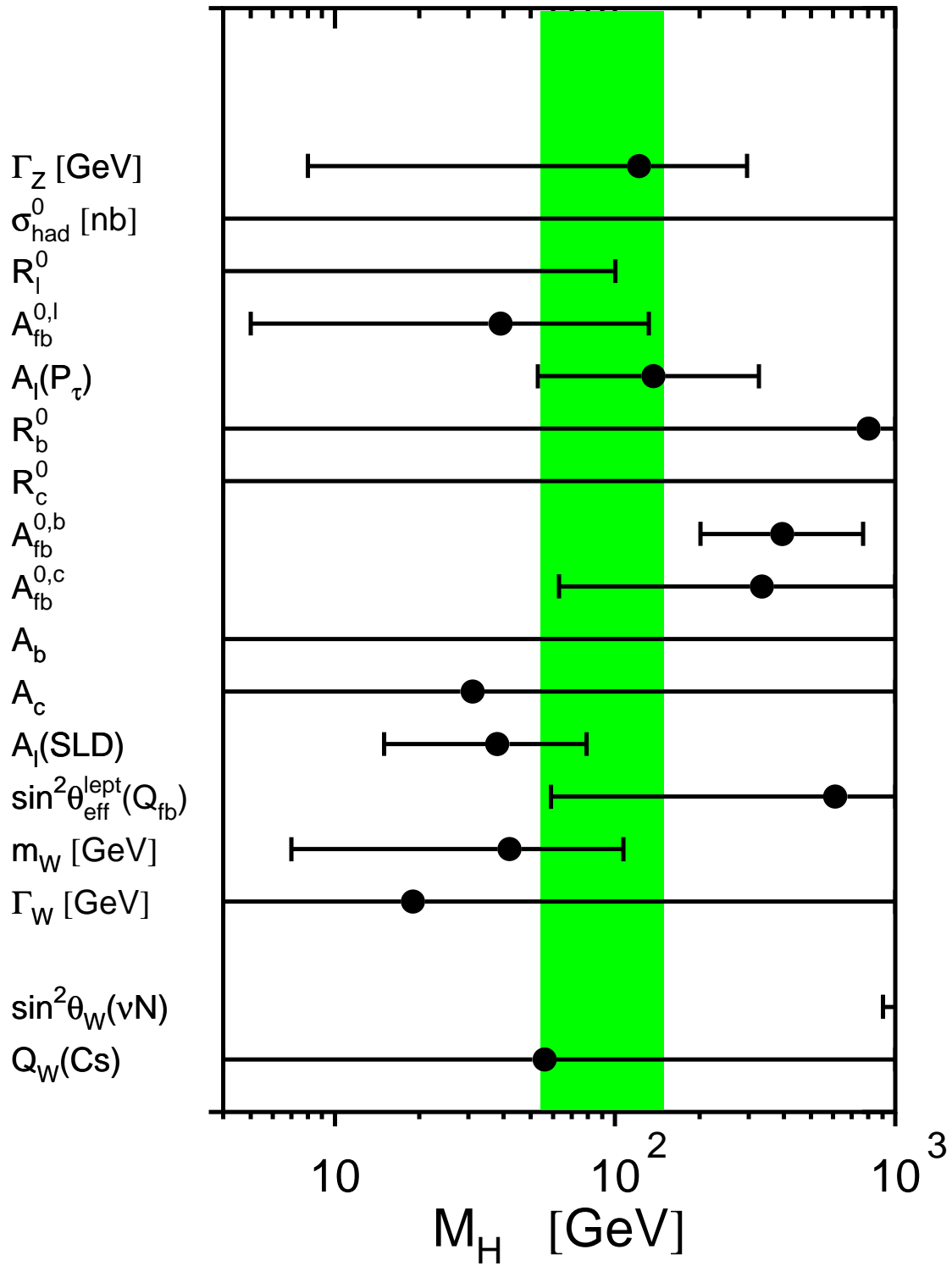
$M_H$ -Abhängigkeit hauptsächlich durch Propagatorkorrekturen:



⇒ **Fit von  $M_H$**  möglich, aber große Präzision der Daten nötig, da  $M_H$ -Abhängigkeit schwach  $\sim \frac{\alpha}{\pi} \log(M_H/M_W)$

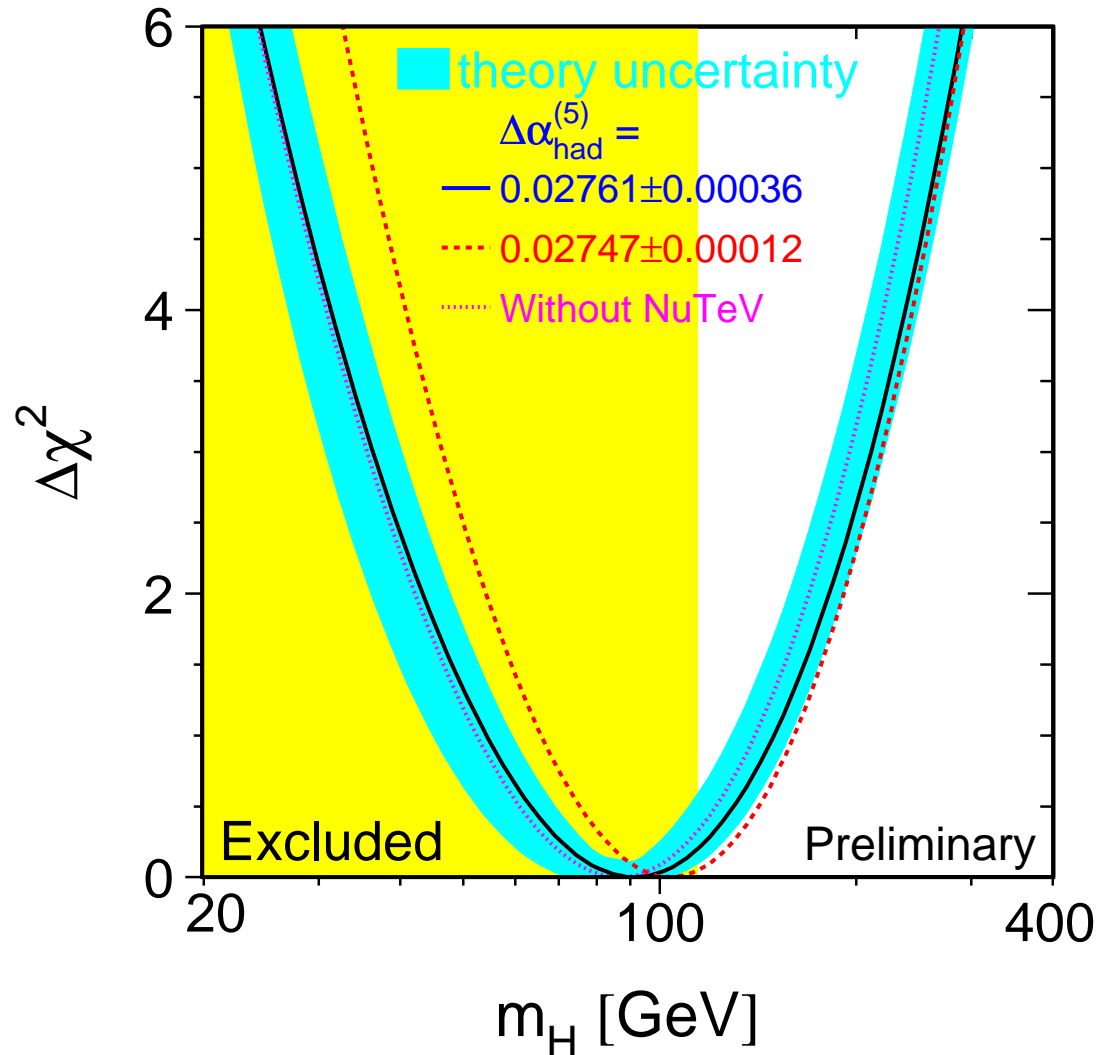


Winter 2003



## Grenzen an $M_H$ (95% C.L.)

- $M_H > 114.4 \text{ GeV}$ :  $e^+e^- \not\rightarrow ZH$  bei LEP2 LEPHIGGS '02
- $M_H < 211 \text{ GeV}$ : Fit an elektroschwache Präzisionsdaten (d.h. über Quantenkorrekturen) LEPEWWG '03

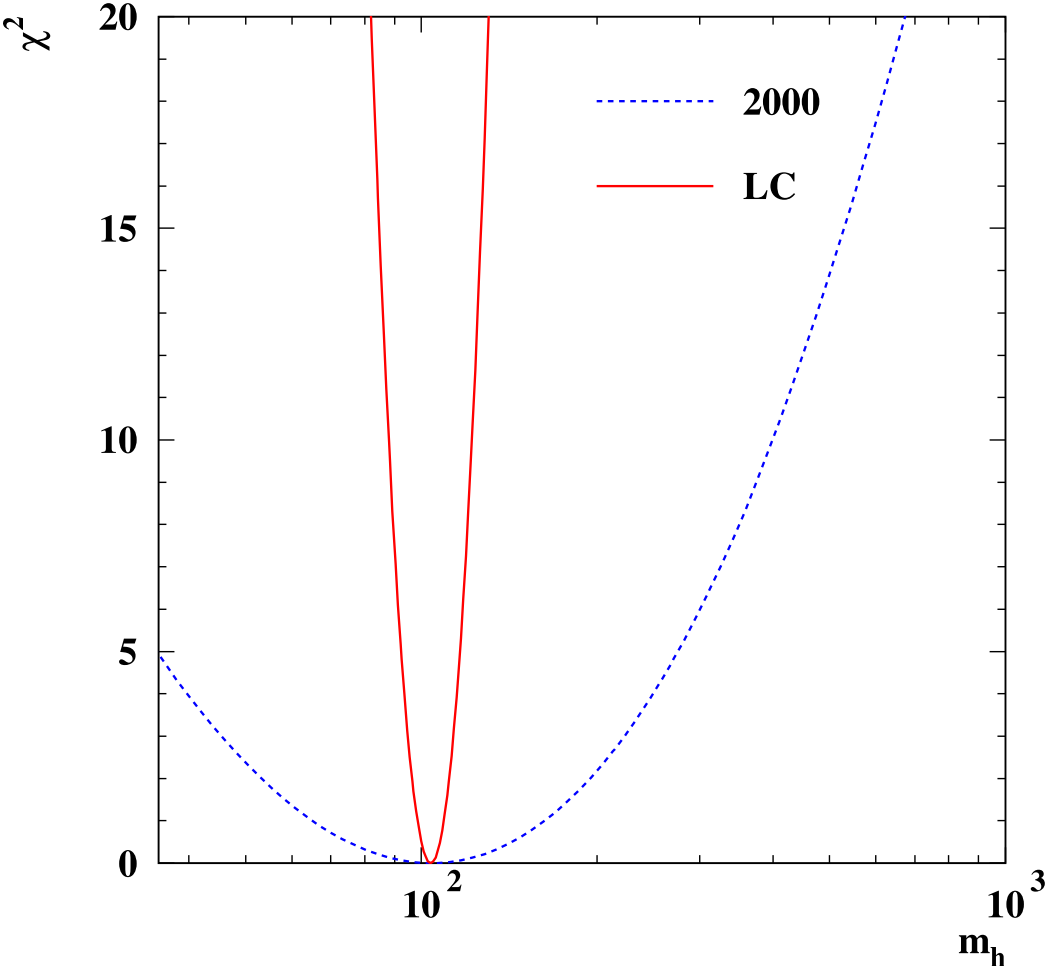


„Schlüsselobservablen“:  $m_t, M_W, \sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$

Genauere Messung (wäre/ist?) durch **TESLA** möglich!  
⇒ Stärkere Einschränkung von  $M_H$

Mögliche Schranken an  $M_H$  bei TESLA („GigaZ-Option“)

TESLA-TDR '01



## 2.2 Quantenkorrekturen zum Myon-Zerfall

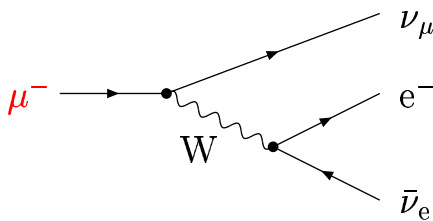
### Präzisionsrechnung von $M_W$ über $\mu$ -Zerfall

$\hookrightarrow M_W$  als Funktion von  $\alpha(0)$ ,  $G_\mu$ ,  $M_Z$  und der Größe  $\Delta r$

$$M_W^2 \left( 1 - \frac{M_W^2}{M_Z^2} \right) = \frac{\pi \alpha(0)}{\sqrt{2} G_\mu} (1 + \Delta r)$$

$\Delta r$  enthält die Quantenkorrekturen zum  $\mu$ -Zerfall, die über die elektromagnetischen Korrekturen des Fermi-Modells hinausgehen.

Niedrigste Störungsordnung:

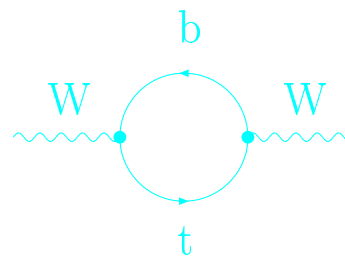
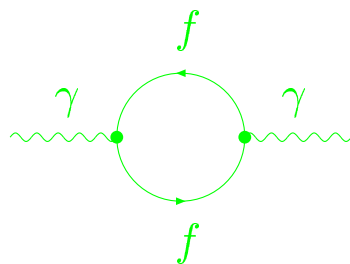


$\mathcal{O}(\alpha)$ -Korrekturen:

Sirlin '80, Marciano, Sirlin '80

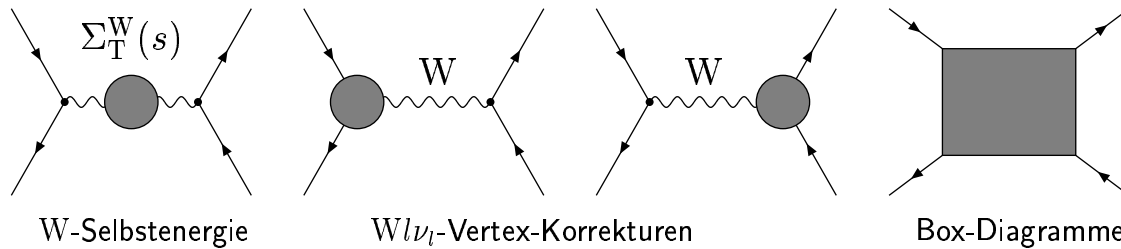
$$\Delta r_{1\text{-loop}} = \underbrace{\Delta \alpha(M_Z^2)}_{\sim 6\%} - \underbrace{\frac{c_W^2}{s_W^2} \Delta \rho}_{\sim 3\%} + \underbrace{\Delta r_{\text{rem}}(M_H)}_{\sim 1\%}$$

$$\alpha \ln(m_f/M_Z) \quad G_\mu m_t^2 \quad \alpha \ln(M_H/M_Z)$$

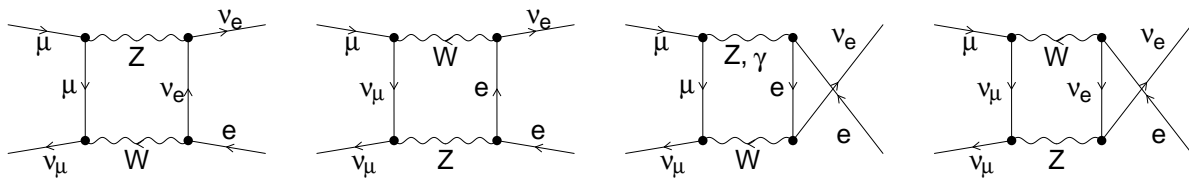


## Diagramme der $\mathcal{O}(\alpha)$ -Korrektur

### Virtuelle Korrektur – 1-Loop-Diagramme:



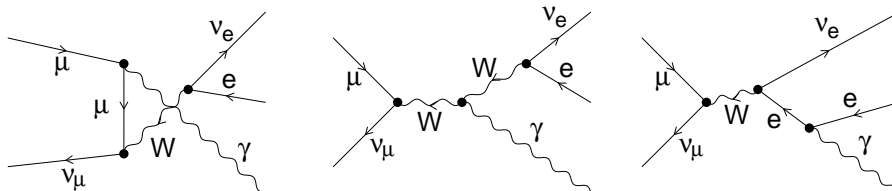
zum Beispiel:



Beachte:

- **UV-Divergenzen** in Selbstenergien und Vertex-Korrekturen  
 $\hookrightarrow$  Absorption durch **Renormierung** der W-Masse und der  $Wl\nu_l$ -Kopplung
- **IR-Divergenzen** durch  $\gamma$ -Austausch zwischen äußeren Linien  
 $\hookrightarrow$  Kompensation durch **Soft-Photon-Bremstrahlung**

### Reelle Korrektur – 1-Photon-Bremstrahlung:



## Bekannte Korrekturen zu $\Delta r$ :

- 1-Loop-Korrekturen

$$\mathcal{O}(\alpha)$$

Sirlin '80, Marciano, Sirlin '80

- Aufsummation führender Terme:

$$\Delta\alpha^n, \Delta\rho^2, \Delta\alpha\Delta\rho, \text{ etc.}$$

Marciano '79, Sirlin '84,  
Consoli, Hollik, Jegerlehner '89  
Stremplatt '98, Weiglein '98

- QCD-Korrekturen zu  $\Delta\rho$ :

$$- \mathcal{O}(\alpha\alpha_s)$$

Djouadi, Verzegnassi '87, Djouadi '88,  
Kniehl, Kühn, Stuart '88, Kniehl '90

$$- \mathcal{O}(\alpha\alpha_s^2)$$

Avdeev, Fleischer, Mikhailov, Tarasov '94,  
Chetyrkin, Kühn, Steinhauser '95

$$- \mathcal{O}(G_\mu^2 m_t^4 \alpha_s)$$

v.d.Bij et al. '00,

Faisst, Kühn, Seidensticker, Veretin '03

- Führende elektroschwache Korrekturen höherer Ordnung

$$- \mathcal{O}(G_\mu^2 m_t^4)$$

v.d.Bij, Hoogeveen '87, Barbieri et al. '92,  
Fleischer, Jegerlehner, Tarasov '93

$$- \mathcal{O}(G_\mu^2 m_t^2 M_Z^2)$$

Degrassi, Gambino, Vicini '96,  
Degrassi, Gambino, Sirlin '97

$$- \mathcal{O}(G_\mu^2 M_H^2 M_Z^2)$$

v.d.Bij, Veltman '84, v.d.Bij '84

$$- \mathcal{O}(G_\mu^3 m_t^6)$$

v.d.Bij et al. '00,

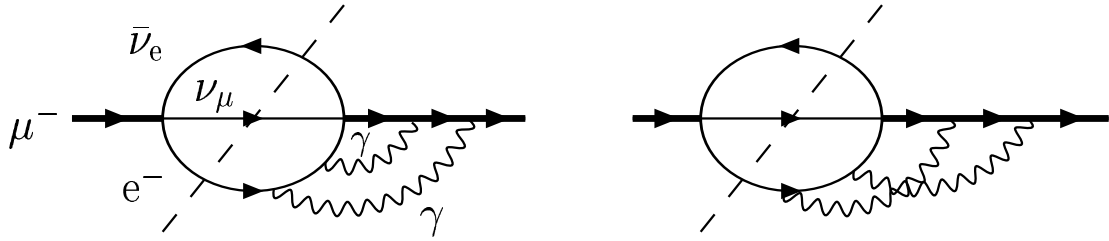
Faisst, Kühn, Seidensticker, Veretin '03

- Komplette elektroschwache Korrektur in  $\mathcal{O}(\alpha^2)$   $\longrightarrow$

# Elektroschwache Korrekturen in $\mathcal{O}(\alpha^2)$ zum Myon-Zerfall

- QED-Korrekturen im Fermi-Modell

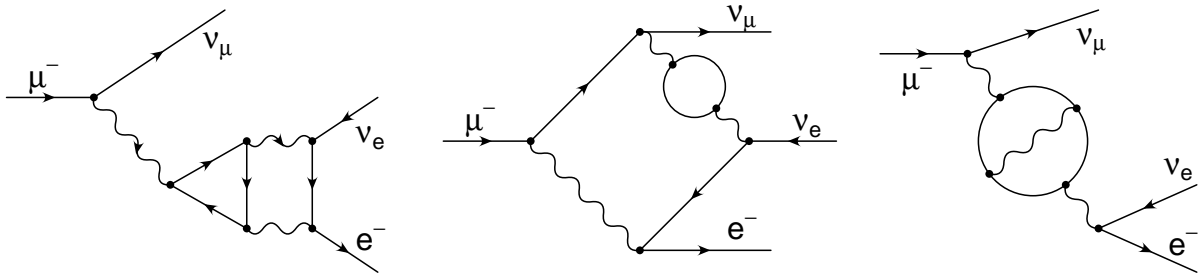
v.Ritbergen, Stuart '98  
Seidensticker, Steinhauser '99



↪ nötig zur konsistenten Benutzung von  $G_\mu$

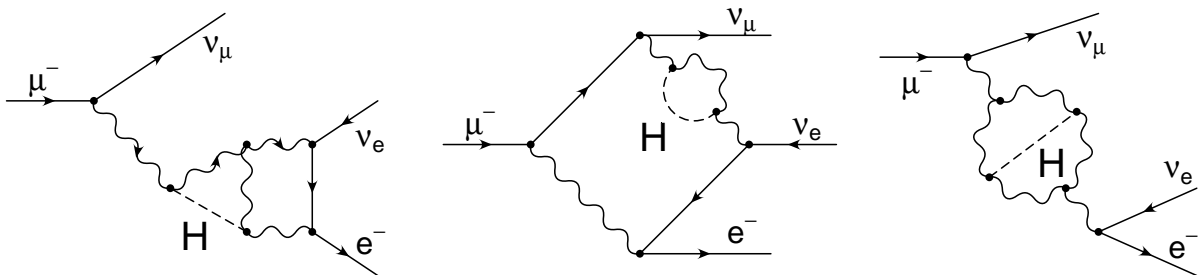
- Beiträge geschlossener Fermion-Loops

Freitas, Hollik, Walter, Weiglein '00



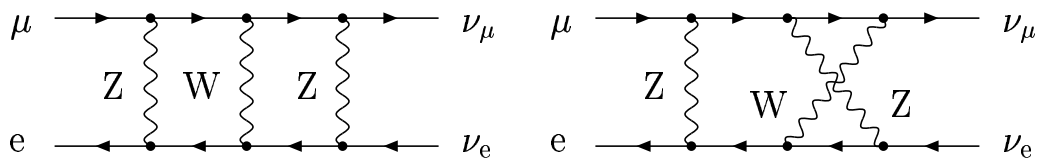
- $M_H$ -Abhängigkeit der bosonischen Loops

Freitas, Hollik, Walter, Weiglein '02



- Komplette Berechnung der bosonischen Loops

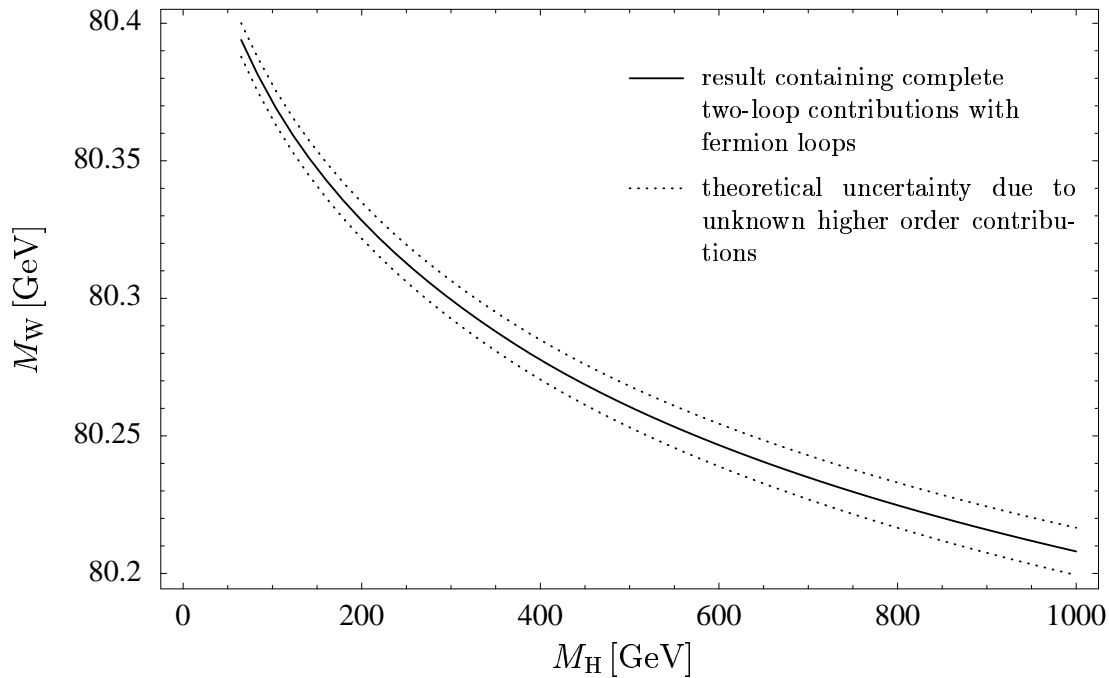
Awramik, Czakon '02  
Onishchenko, Veretin '02



# $M_W$ -Vorhersage durch Myon-Zerfall

Vorhersage inklusive fermionischer 2-Loop-Korrekturen:

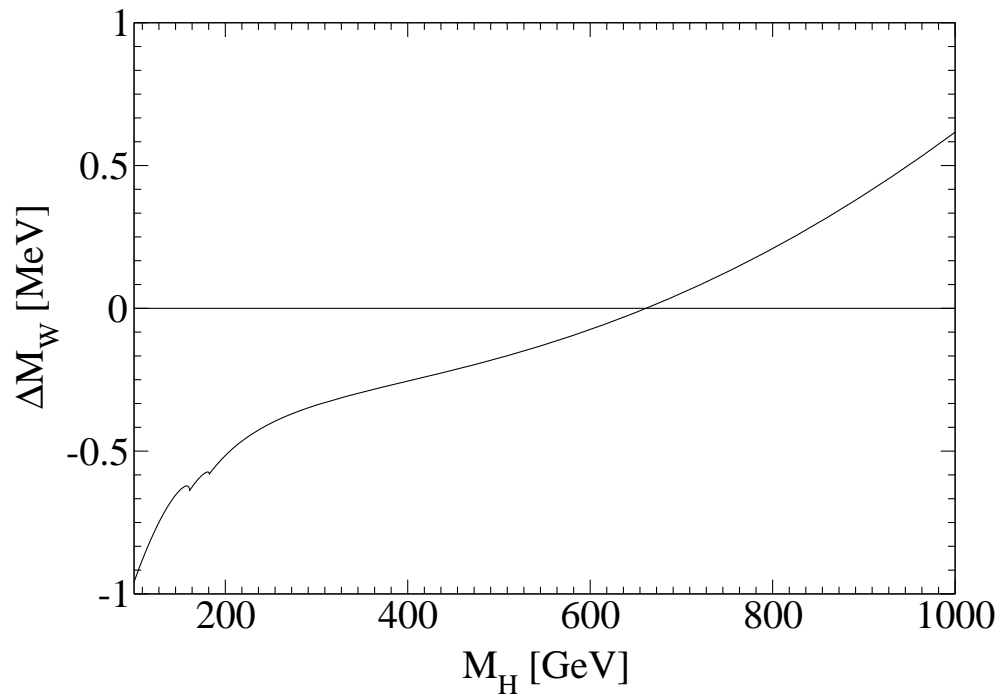
Freitas, Hollik,  
Walter, Weiglein '00



Stand 2003:  
 $\Delta M_W \sim 2 \text{ MeV}$

Bosonische  $\mathcal{O}(\alpha^2)$ -Korrekturen:

Awramik, Czakon '02  
Onishchenko, Veretin '02

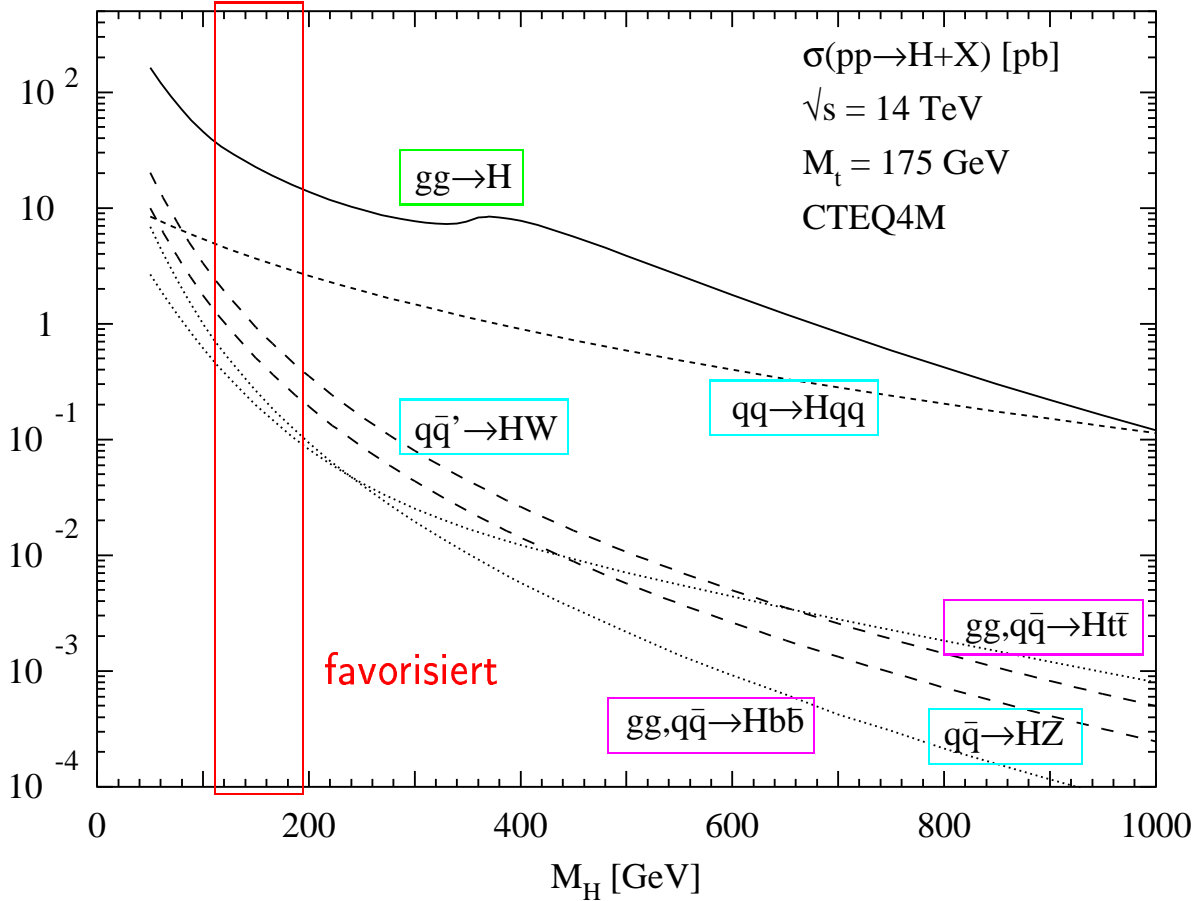




### 3 Higgs-Suche am LHC

#### 3.1 Die wichtigsten Reaktionskanäle

Spira '98



#### Physikalische Fragestellungen:

- **Higgs-Entdeckung**
  - $M_H$ -Bestimmung und Zerfallsanalysen
  - Suche nach weiteren Higgs-Bosonen (MSSM:  $h, H, A, H^\pm$ )
- **HWW-/HZZ-Kopplungen:**

$$q\bar{q} \rightarrow VH$$

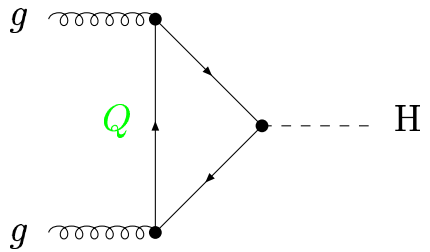
$$qq \rightarrow (qV^*)(qV^*) \rightarrow qqH$$
- **Hf $\bar{f}$ -Kopplungen:**

$$gg, q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}H, b\bar{b}H$$
- **HHH-Kopplung (Higgs-Potential):**

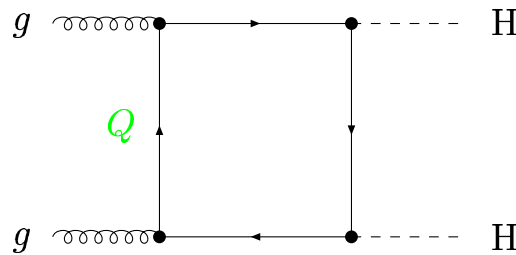
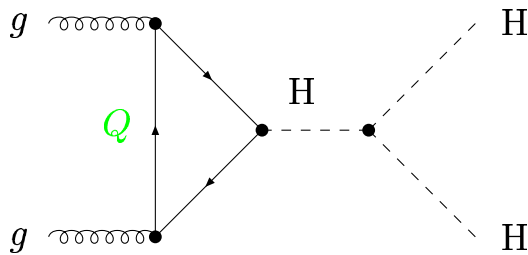
$$gg \rightarrow HH$$

## 3.2 H- und HH-Produktion durch Gluon-Fusion

Diagramme in „leading order“ (LO):



Beide Prozesse sind „loop-induziert“ !  
 Dominanter Beitrag:  $Q = \text{Top-Quark}$



Eigenschaften der theoretischen Vorhersagen:

- **LO-Vorhersage:** starke Abhängigkeit von Faktorisierungs- und Renormierungsskalen ( $\sim 100\%$  !)  
 → Hinweis auf große Korrekturen

- **Korrekturen:**

$gg \rightarrow H$ : volle NLO-Korrektur bekannt Graudenz, Spira, Zerwas '93  
Djouadi, Graudenz, Spira, Zerwas '95

NNLO im Limes  $m_t \rightarrow \infty$  Harlander, Kilgore '02  
Anastasiou, Melnikov '02  
Ravindran, Smith, van Neerven '03

$$K = \frac{\sigma_{\text{NNLO}}}{\sigma_{\text{LO}}} \sim 2.0$$

↔ Skalenunsicherheit reduziert auf  $\sim 10\%$

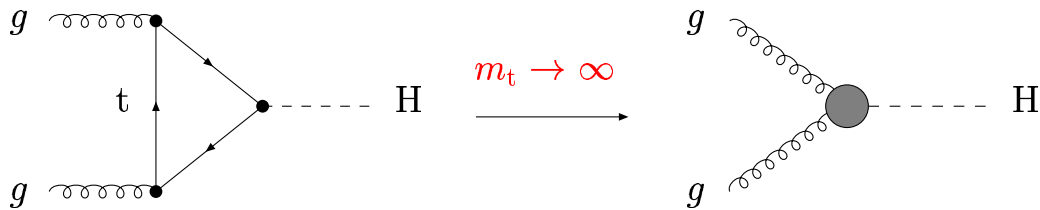
$gg \rightarrow HH$ : NLO im Limes  $m_t \rightarrow \infty$  Dawson, S.D., Spira '98

$$K = \frac{\sigma_{\text{NLO}}}{\sigma_{\text{LO}}} \sim 1.9$$

Approximation der Korrekturen durch Limes  $m_t \rightarrow \infty, m_b \rightarrow 0$ :

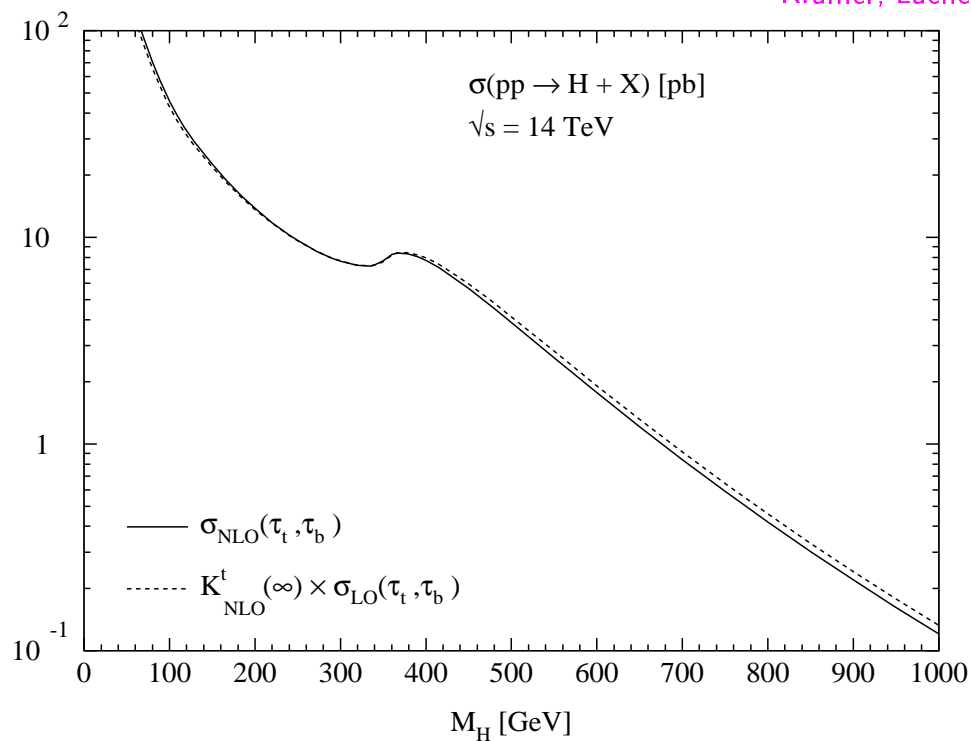
Physikalisches Bild: Langreichweitige Gluon-WW löst Prozess der „harten H-Erzeugung“ nicht auf

⇒ Effektive Gluon-Higgs-Wechselwirkung:



Praktische Anwendung:

Krämer, Laenen, Spira '96



Approximation für  $pp \rightarrow H + X$  in NLO:

$\sim 5\%$  für  $M_H \lesssim 2m_t \approx 350 \text{ GeV}$

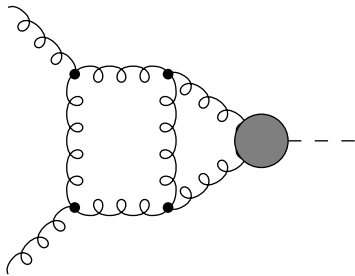
$\sim 10\%$  für  $M_H$  bis 1 TeV

⇒ Effektive Theorie sinnvoll für  $pp \rightarrow H + X$  in NNLO,  
 $pp \rightarrow HH + X$  in NLO

## NNLO-Berechnung von $pp \rightarrow H + X$ :

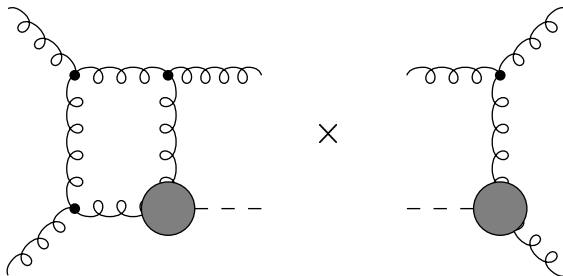
Verschiedene Beiträge — verschiedene Techniken/Tricks:

- virtuelle 2-Loop-Korrekturen:



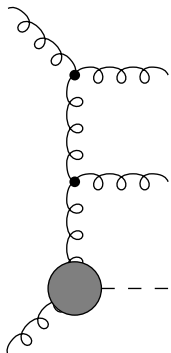
- Abbildung auf 3-Loop-Propagator-Diagramme [Baikov, Smirnov '00; Harlander '00](#)
- Reduktion auf Master-Integrale mit “integration by parts” und “Lorentz invariance” [Anastasiou, Melnikov '02](#)

- Interferenzen zwischen virtuellen 1-Loop- und reellen 1-Parton-Emissionsbeiträgen:



Konventionelle Methoden  
ausreichend

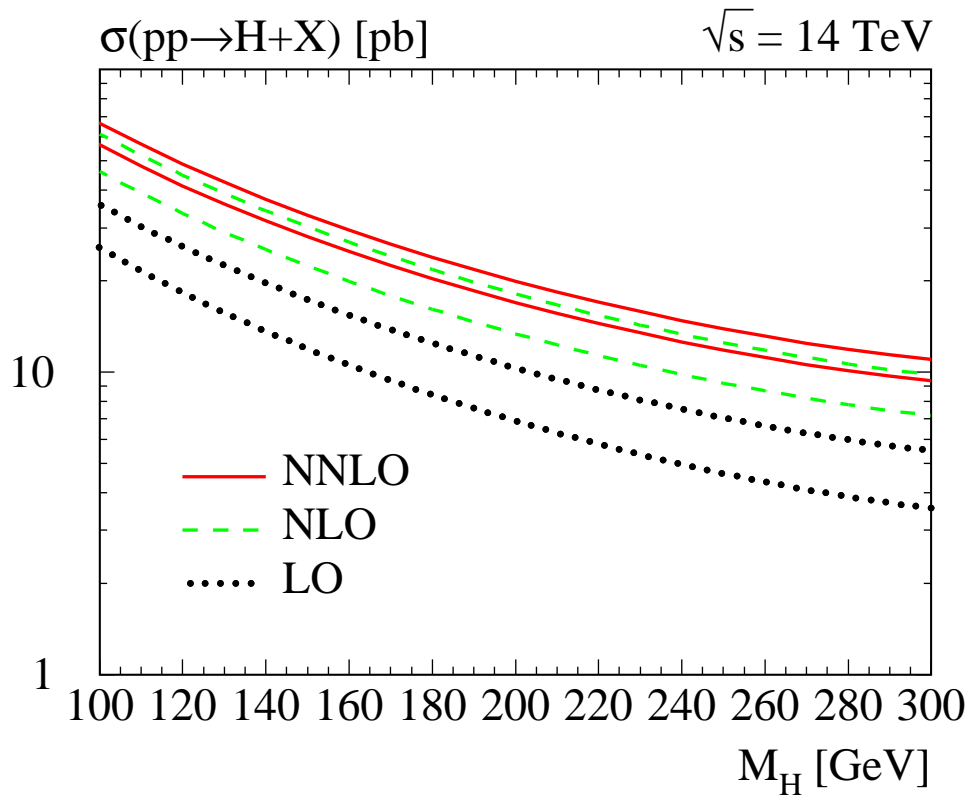
- reelle 2-Parton-Emissionsbeiträge:



- Phasenraum-Entwicklung [Harlander, Kilgore '02](#)
- Reduktion auf Master-Integrale mit “cutting techniques” [Anastasiou, Melnikov '02](#)
- Direkte Berechnung der Phasenraumintegrale [Ravindran, Smith, van Neerven '03](#)

# Totaler Wirkungsquerschnitt für $pp \rightarrow H + X$ in NNLO:

$$(M_H/2 < \mu_{\text{ren}} = \mu_{\text{fact}} < 2M_H)$$

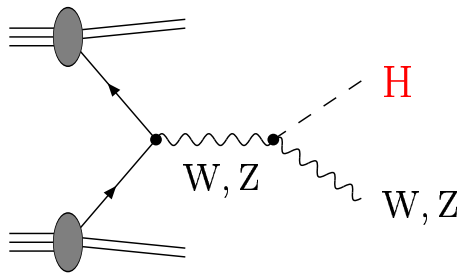


Harlander,  
Kilgore '02

⇒ Reduktion der Skalenunsicherheit bei LO → NLO → NNLO

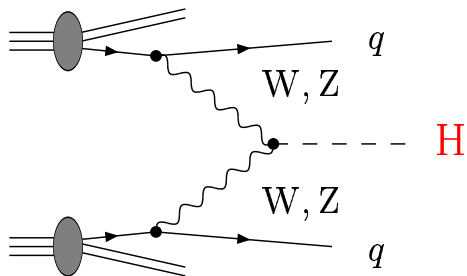
### 3.3 Higgs-Produktion über massive Eichbosonen

#### Higgs-Abstrahlung:



QCD-Korrekturen wie beim Drell-Yan-Prozess

#### Vektorboson-Fusion:



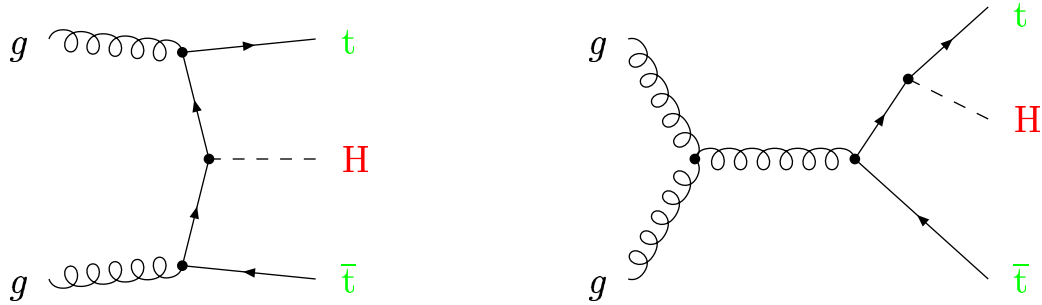
Farbaustausch zwischen Quark-Linien stark unterdrückt

⇒ Wesentliche QCD-Korrektur in Parton-Dichten enthalten

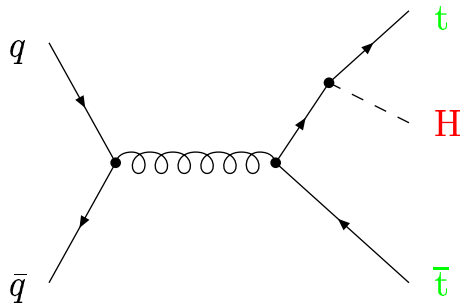
### 3.4 Higgs-Erzeugung mit $t\bar{t}$ -Paaren

Typische LO-Diagramme

... für  $gg$ -Fusion:



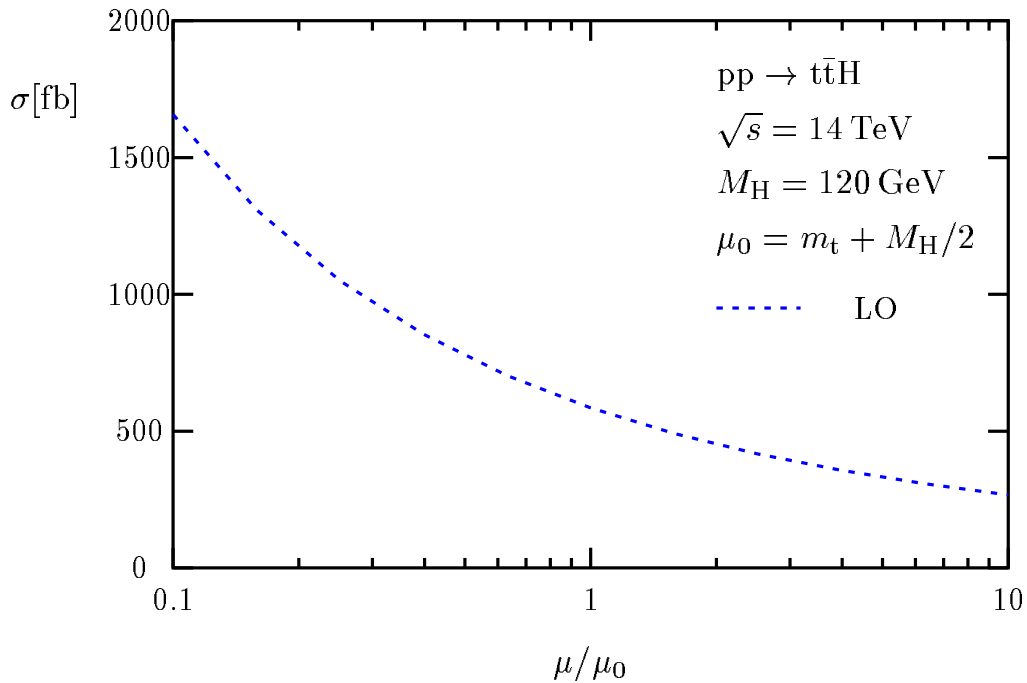
... für  $q\bar{q}$ -Vernichtung:



Zur Physik:

- $t\bar{t}H$  liefert wichtigen Beitrag zum **Higgs-Signal** für kleine  $M_H$   
↪ wenige, aber gut identifizierbare Events
- Bestimmung der  $t$ -**Yukawa-Kopplung**
- MSSM:  $b\bar{b}h/H/A$ -Produktion ist wichtige Reaktion für Higgs-Suche bei großem  $\tan\beta$

## Skalenabhängigkeit des LO-Wirkungsquerschnitts zu $pp \rightarrow t\bar{t}H$ :



### Aktueller Stand der Theorie:

- LO-Vorhersage

$\hookrightarrow$  sehr große Skalenunsicherheit

$\Rightarrow$  NLO-Korrektur sehr wichtig !

- NLO-Vorhersage:

– für totale Wirkungsquerschnitte

– für differentielle Wirkungsquerschnitte

Kunzt '84, Dicus, Willenbrock '89  
Gunion '91, Marcano, Paige '91

Beenakker, S.D., Krämer,  
Plümper, Spira, Zerwas '01

Dawson, Orr, Reina, Wackerath '02

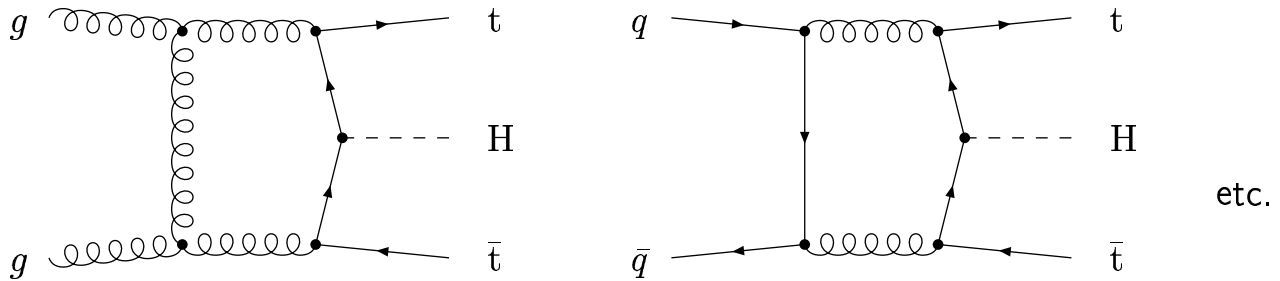
Beenakker, S.D., Krämer,  
Plümper, Spira, Zerwas '02

$\hookrightarrow$  drastische Reduktion der Skalenunsicherheit



# Komplikationen in den virtuellen Korrekturen

## Pentagon-Diagramme:



→ 1-Loop-Integrale der Form

$$E_{\mu\nu\dots} = \frac{(2\pi\mu)^{4-D}}{i\pi^2} \int d^D q \frac{q_\mu q_\nu \dots}{[(q + p_1)^2 - m_1^2] \dots [(q + p_5)^2 - m_5^2]}$$

## Probleme:

- **skalares Integral  $E_0$ :**

**komplizierte Singularitätenstruktur** (IR und kollinear)

nötig: Auswertung in  $D$  Dimensionen

bekannt: Zerlegung von  $E_0$  in 4-Punkt-Funktionen für  $D = 4$

Melrose '65

↔ Trick: **übersetze  $E_0$  in Regularisierung mit Massen und verwende dann  $D = 4$**

- **Tensor-Integrale  $E_{\mu\nu\dots}$ :**

– **Passarino-Veltman-Reduktion numerisch instabil**  
am Phasenraumrand (verschwindende Gram-Determinanten)

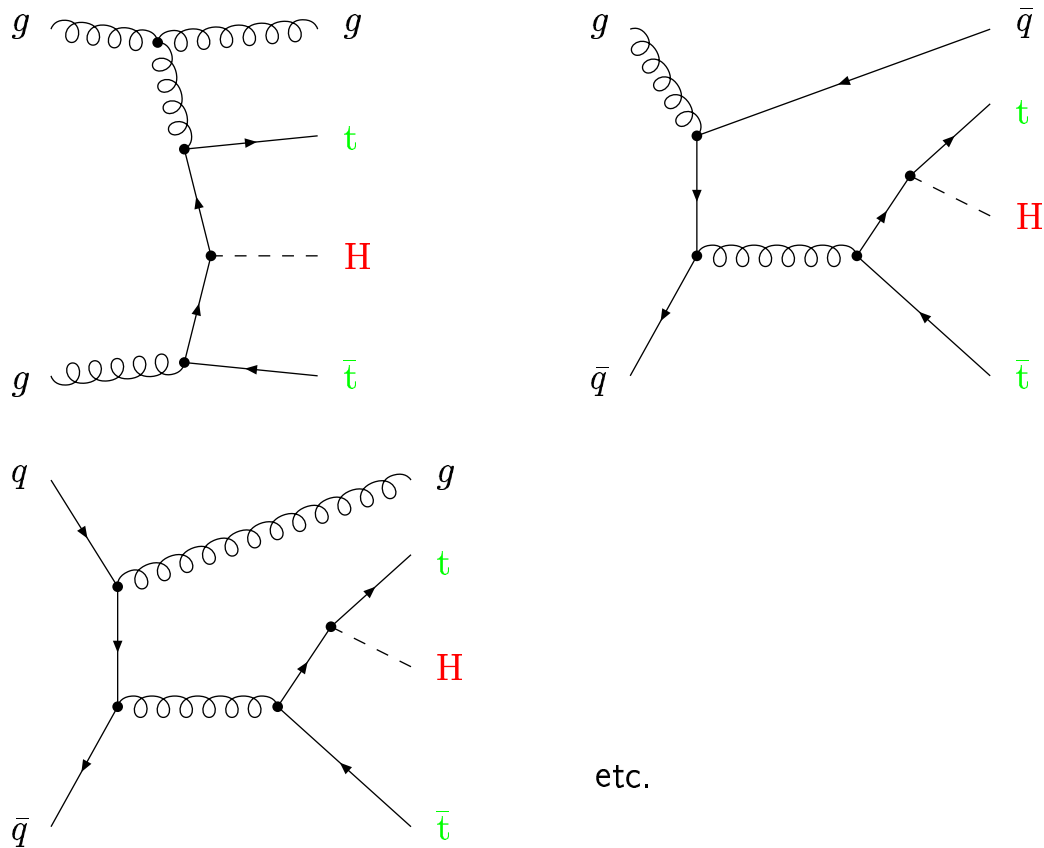
↔ **numerische Extrapolation in problematische Bereiche**

– neue Methode ohne inverse Gram-Determinanten **Denner, S.D. '02**

↔ **drastische Erhöhung der Stabilität**

# Reelle Korrekturen

## Typische Diagramme:



## Probleme:

- Auswertung komplizierter Matrixelemente
  - ↪ Anwendung konventioneller Spurtechniken und Benutzung des Programm-Pakets *Madgraph*
- **Softe und kollineare Divergenzen** und Faktorisierung
  - ↪ Anwendung einer Verallgemeinerung des **Dipol-Subtraktionsformalismus**

Stelzer, Long '94

## Dipol-Subtraktions-Formalismus

→ Prozessunabhängige Behandlung von Singularitäten  
in reellen NLO-Korrekturen

Ausgearbeitet für

- |  |   |  |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• QCD mit masselosen Partonen<br/>Catani, Seymour '96</li> <li>• <math>\gamma</math>-Abstrahlung von massiven Fermionen<br/>S.D. '99</li> </ul> | } | <p>QCD mit massiven Partonen</p> <p>Catani, S.D., Seymour, Trócsányi '02<br/>Phaf, Weinzierl '01</p> |
|--|---|--|

Grundidee: NLO-Korrektur zu Prozess mit  $m$  Partonen

$$\begin{aligned}
 \sigma^{\text{NLO}} = & \underbrace{\int_{m+1} [d\sigma^{\text{real}} - d\sigma^{\text{sub}}]}_{\text{endlich}} + \underbrace{\int_m [d\sigma^{\text{virtual}} + d\bar{\sigma}_1^{\text{sub}}]}_{\text{endlich}} \\
 & + \int_0^1 dx \underbrace{\int_m [d\sigma^{\text{fact}}(x) + (d\bar{\sigma}^{\text{sub}}(x))_+]}_{\text{endlich}}
 \end{aligned}$$

Bedingungen an  $d\sigma^{\text{sub}}$ :

- Summenregel:

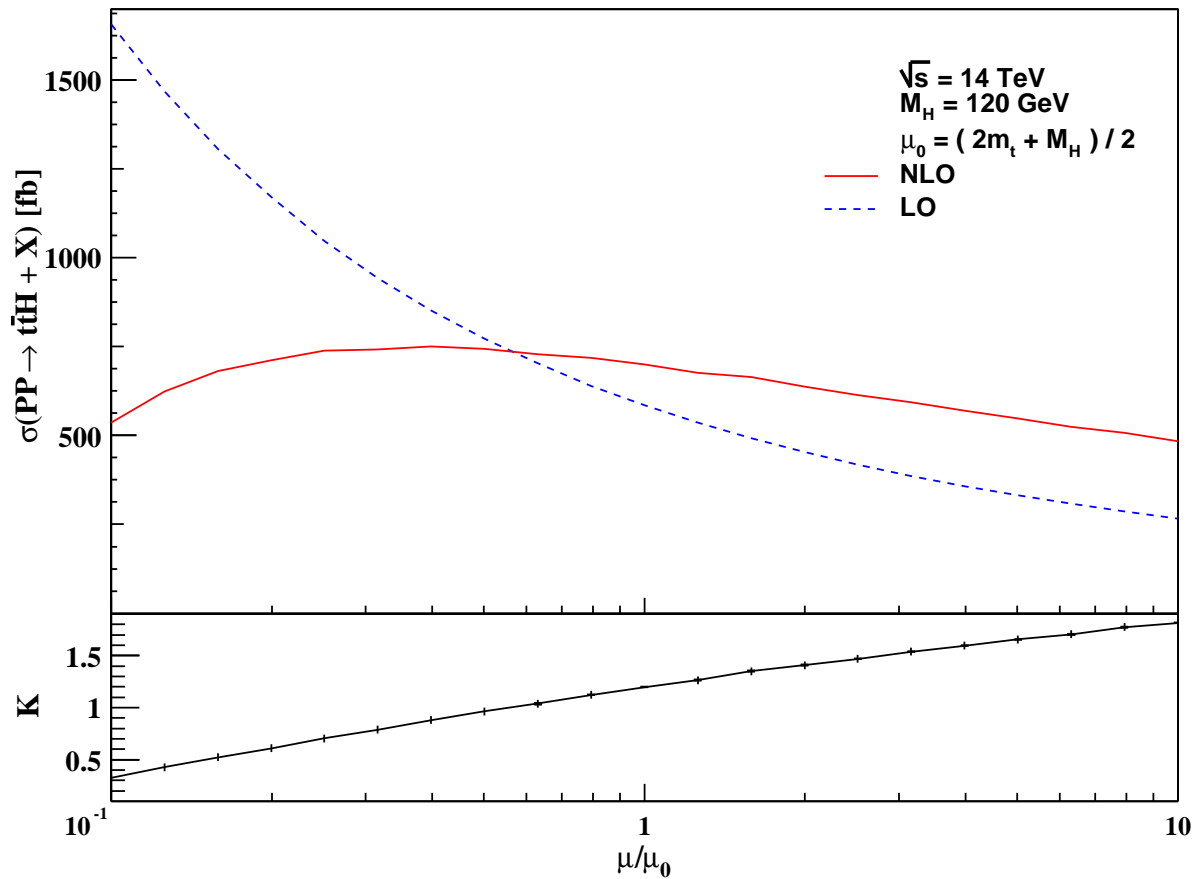
$$- \int_{m+1} d\sigma^{\text{sub}} + \int_m d\bar{\sigma}_1^{\text{sub}} + \int_0^1 dx \int_m (d\bar{\sigma}^{\text{sub}}(x))_+ = 0$$

- Asymptotik:

$$\sigma^{\text{sub}} \sim \sigma^{\text{real}} \quad \text{in allen Kollinear-/IR-Regionen}$$

# Skalenabhängigkeit des NLO-Wirkungsquerschnittes am LHC

Beenakker, S.D., Krämer,  
Plümper, Spira, Zerwas '01



Skalenvariation innerhalb  $\mu_0/3 \lesssim \mu \lesssim 3\mu_0$ :

$$\frac{\Delta\sigma_{\text{LO}}}{\sigma_{\text{LO}}} \sim 2 - 3,$$

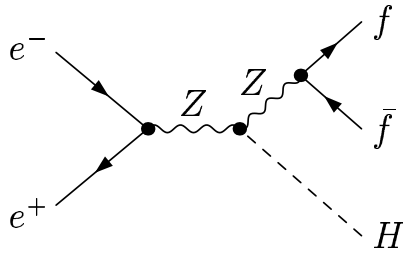
$$\frac{\Delta\sigma_{\text{NLO}}}{\sigma_{\text{NLO}}} \sim 20\%$$

Drastische Reduktion der Skalenunsicherheit

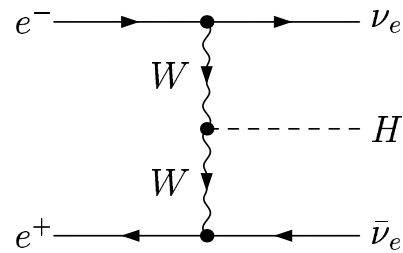
## 4 Higgs-Boson-Erzeugung in $e^+e^-$ -Vernichtung

Die wichtigsten Erzeugungsprozesse:

ZH-Produktion („Higgs-Strahlung“)



WW-Fusion



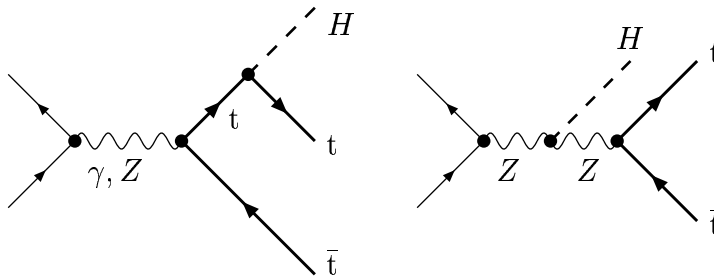
WW-Fusion dominiert bei hohen Energien ( $\sqrt{s} \gg M_H$ ):

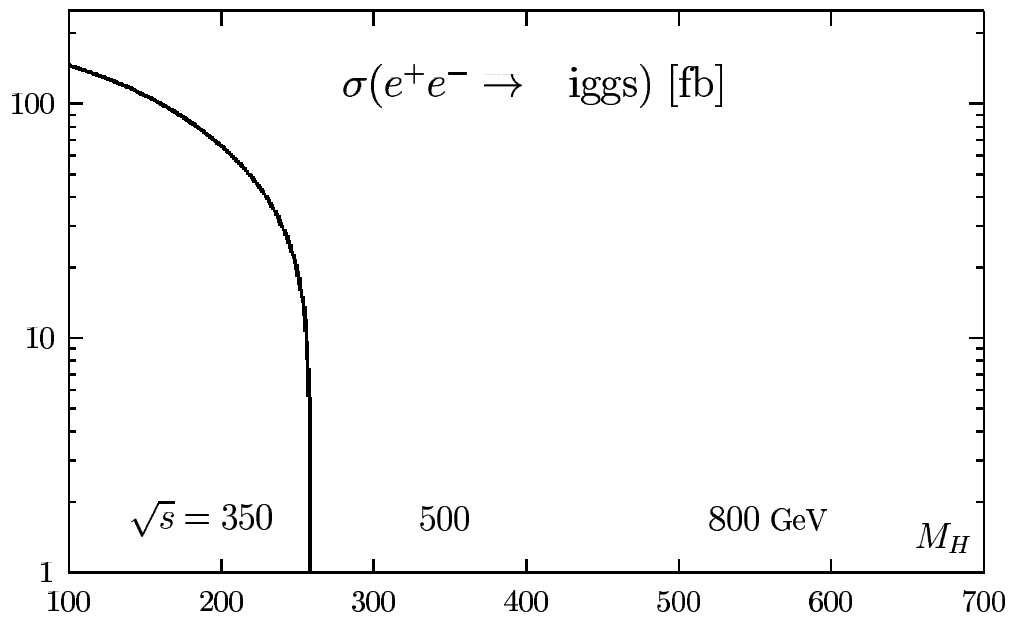
$$\sigma_{ZH} \sim \text{const} / s$$

$$\sigma_{WW} \sim \text{const} \times \ln(s/M_W^2)$$

Kanal zur Analyse der Top-Yukawa-Kopplung:

Assoziierte Higgs-Erzeugung:  $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$





# Präzisionsrechnungen zur Higgs-Produktion

## Korrekturen zu $e^+e^- \rightarrow ZH$

- $\mathcal{O}(\alpha)$ -Korrekturen für stabile Z- und H-Bosonen bekannt  
Fleischer, Jegerlehner '83; Kniehl '92;  
Denner, Küblbeck, Mertig, Böhm '92

## Korrekturen zu $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H$ (jüngerer Fortschritt)

- Fermion-Loop-Korrekturen (+Sfermion-Loops im MSSM)  
Eberl, Majerotto, Spanos '02  
Hahn, Heinemeyer, Weiglein '02
- Komplette  $\mathcal{O}(\alpha)$ -Korrektur  
Bélanger, Boudjema, Fujimoto, Ishikawa, Kaneko, Kato, Shimizu '02  
Denner, S.D., Roth, Weber '03

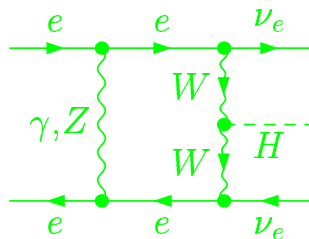
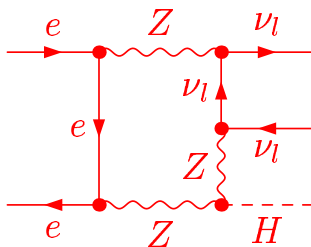
## Korrekturen zu $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$

- QCD-Korrekturen in  $\mathcal{O}(\alpha_s)$   
S.D., Krämer, Liao, Spira, Zerwas '98  
Dawson, Reina '98
- SUSY-QCD-Korrekturen in  $\mathcal{O}(\alpha_s)$     Zhu '02
- $\mathcal{O}(\alpha)$ -Korrektur bisher nicht bekannt

## Zur Berechnung der $\mathcal{O}(\alpha)$ -Korrektur zu $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H$

Denner, S.D., Roth, Weber '03

- $e^+e^- \rightarrow \nu_\mu\bar{\nu}_\mu H / \nu_\tau\bar{\nu}_\tau H$ :
  - ca. 150–180 1-Loop-Diagramme (je nach Eichung)
  - konsistente Beschreibung der Z-Resonanz
- Mehraufwand für  $e^+e^- \rightarrow \nu_e\bar{\nu}_e H$ :
  - ca. 100–170 1-Loop-Diagramme zusätzlich
  - kohärente Addition der ZH- und WW-Beiträge
- „Konsistenz-Checks“:
  - Kompensation der UV- und IR-Divergenzen
  - numerisch stabile Behandlung der kollinearen Singularitäten
    - ↪ Anwendung verschiedener Methoden zur Kombination von „virtuell + reell“ (“subtraction” versus “slicing”)
  - Eichunabhängigkeit
    - ↪ Berechnung in verschiedenen Eichungen
  - insgesamt **zwei komplett unabhängige Berechnungen** virtueller + reeller Korrekturen
- Numerisch stabile Auswertung der „Pentagon-Diagramme“



etc.

↪ Vermeidung inverser Gram-Determinanten



## Bemerkungen zur $\mathcal{O}(\alpha)$ -Korrektur zu $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H$

- starke Abhängigkeit der **relativen Korrektur  $\delta$**  vom Inputparameter-Schema, da  $\sigma_{\text{Born}} \propto \alpha^3$ :

$$\delta(\alpha(0)\text{-scheme}) \quad - \quad \delta(G_\mu\text{-scheme}) \quad \sim \quad +9\%$$

Bélanger et al.                      Hahn et al., Denner et al.

$$\delta(\hat{\alpha}(M_Z)\text{-scheme}) \quad - \quad \delta(G_\mu\text{-scheme}) \quad \sim \quad -13\%$$

Eberl et al.

Bemerkung: Stabilste Absorption universeller Korrekturen  
in  $\sigma_{\text{Born}}$  im  $G_\mu$ -Schema

- Vergleich der Ergebnisse verschiedener Gruppen:

(a)  $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H$  bei  $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$  ( $\alpha(0)$ -Schema):

$M_H$ [GeV]	$\sigma_{\text{Born}}$ [fb]	$\sigma$ [fb]	$\delta$ [%]	
150	61.074(7)	60.99(7)	-0.2	Bélanger et al.
	61.076(5)	60.80(2)	-0.44(3)	Denner et al.
200	37.294(4)	37.16(4)	-0.4	Bélanger et al.
	37.293(3)	37.09(2)	-0.56(4)	Denner et al.
300	10.758(1)	10.30(1)	-4.2	Bélanger et al.
	10.7552(7)	10.282(4)	-4.40(3)	Denner et al.

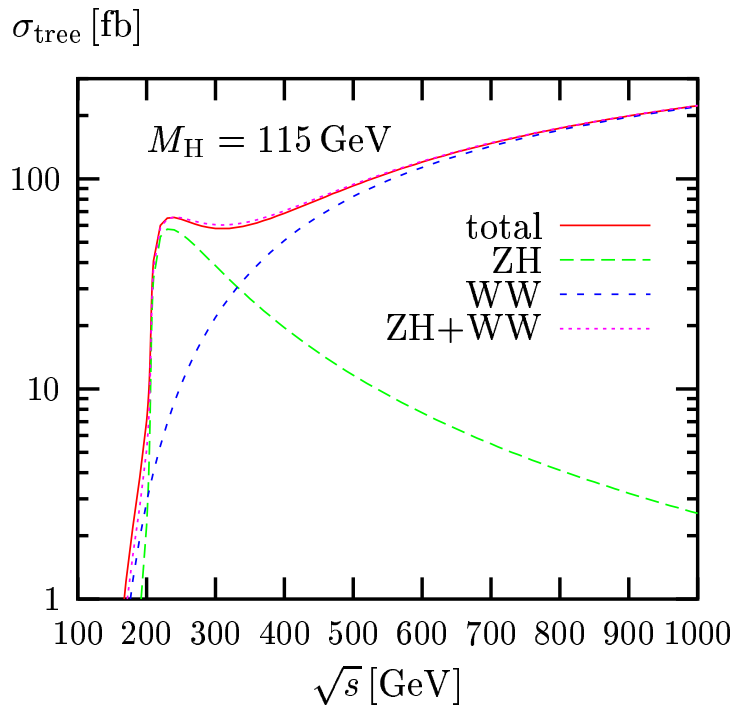
⇒ **Übereinstimmung bis auf  $\mathcal{O}(0.2\%)$**

(b) Ähnlich gute bzw. bessere Übereinstimmung mit  
**Eberl et al.** bzw. **Hahn et al.** für Fermion-Loops

**Gute Übereinstimmung**     $\longleftrightarrow$     **Fortschritt in Berechnung  
von Quantenkorrekturen**

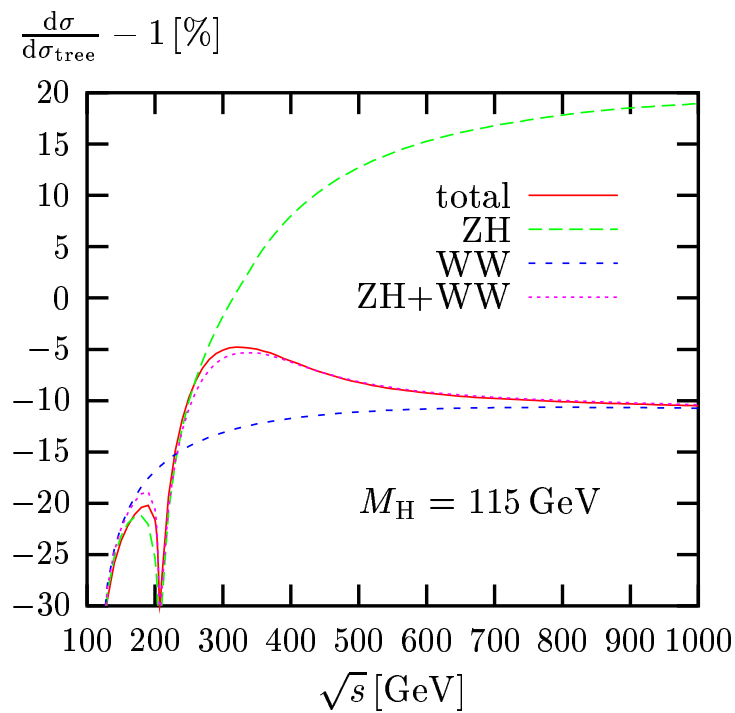
# Totaler Wirkungsquerschnitt für $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H$

Born'sche Näherung:



Denner, S.D.,  
Roth, Weber '03

$\mathcal{O}(\alpha)$ -Korrekturen ( $G_\mu$ -Schema):



Denner, S.D.,  
Roth, Weber '03

## 5 Zusammenfassung

### Rolle von Quantenkorrekturen

- **pp-Kollision**: verlässliche Vorhersage von Wirkungsquerschnitten
- **$e^+e^-$ -Kollision**: präzise Vorhersage von Wirkungsquerschnitten
- **„Hochpräzisionsobservablen“**:  
Zugang zu Energien jenseits Beschleunigerenergien

### Quantenkorrekturen in der Praxis

- **Virtuelle Korrekturen**
  - ↪ Loop-Integrale, Singularitäten, Renormierung
    - **1-loop**: Techniken gut ausgearbeitet und erfolgreich angewandt auf  $2 \rightarrow 3$  Prozesse
    - **2-loop**:  $1 \rightarrow 1$ : gut ausgearbeitet  
 $1 \rightarrow 2$ : spezielle Prozesse (z.B.  $gg \rightarrow H$ )  
 $1 \rightarrow 3, 2 \rightarrow 2$ : große Fortschritte
    - $n$ -loop: Ergebnisse in Spezialfällen (z.B.  $R$ -Verhältnis)
- **Reelle Korrekturen**
  - ↪ Phasenraumintegrale, Singularitäten
    - **1-Teilchen-Emission**: gut ausgearbeitet
    - $n$ -Teilchen-Emission: Spezialfälle + Fortschritte

⇒ Berechnung von Quantenkorrekturen

= wichtiger Bestandteil der Elementarteilchen-Phänomenologie  
+ mathematische & computertechnische Herausforderung !