

Präzisionsberechnungen für den LHC

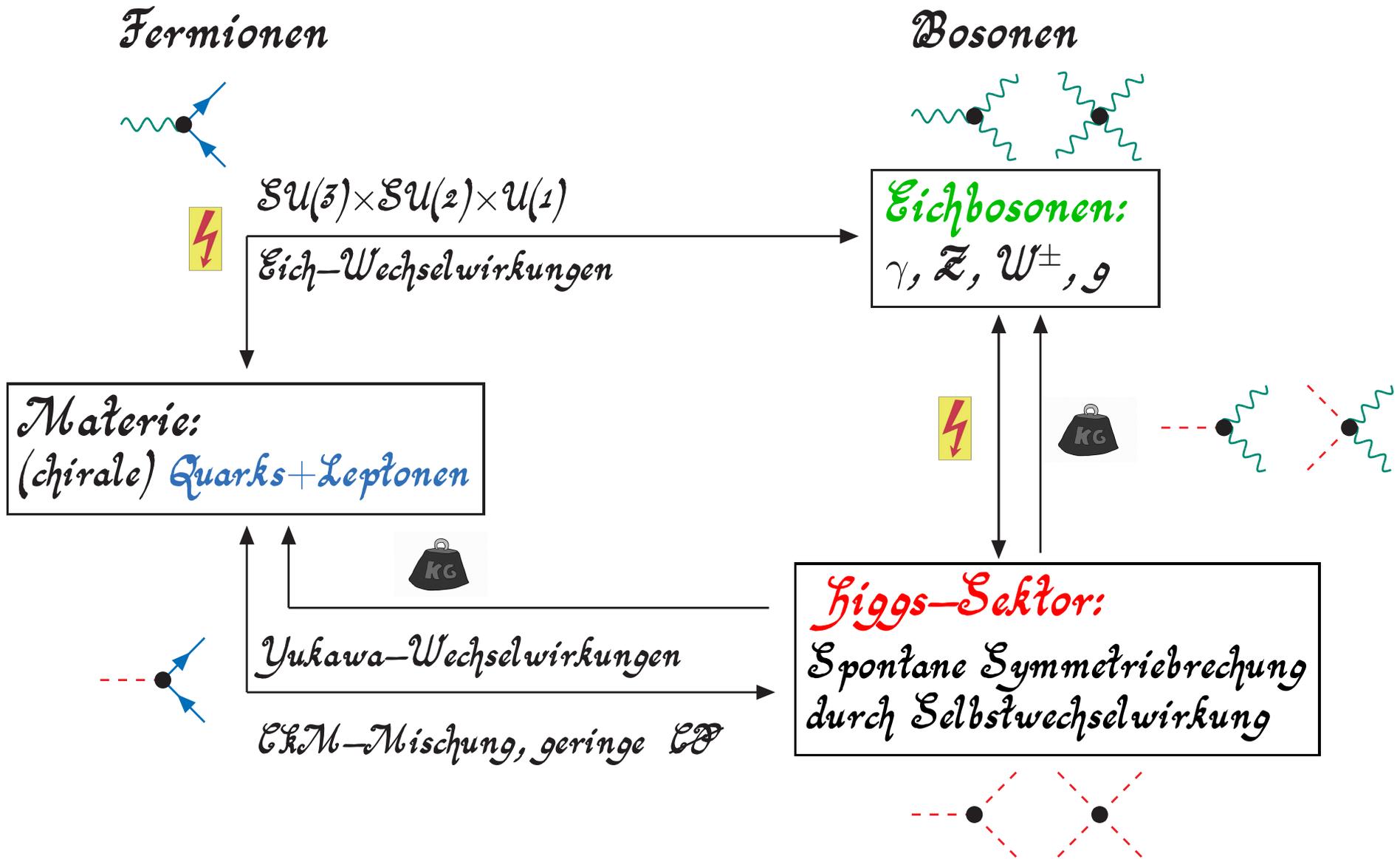
Stefan Dittmaier
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg



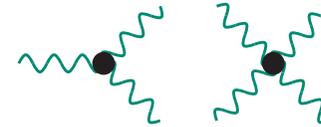
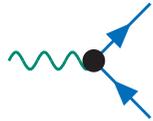
Allgemeiner Überblick



Startpunkt: Standardmodell bzw. erweiterte Theorie

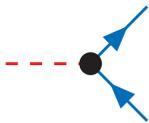
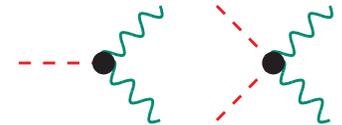


Startpunkt: Standardmodell bzw. erweiterte Theorie

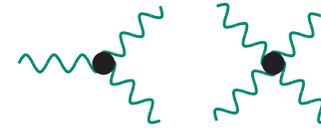
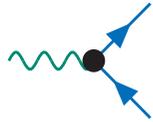


Test des Modells

\Leftrightarrow Exp. Rekonstruktion der Elementar-WW
Feynman-Regeln



Startpunkt: Standardmodell bzw. erweiterte Theorie

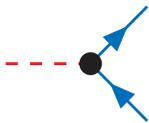
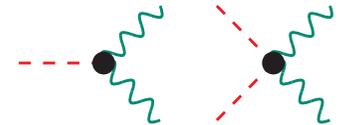


Test des Modells

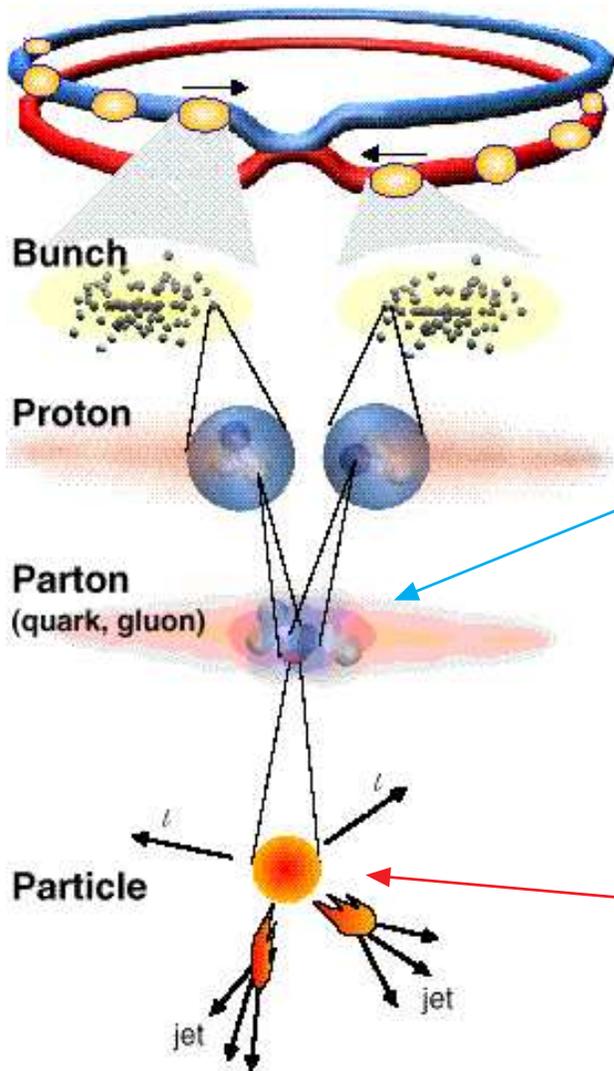
⇔ Exp. Rekonstruktion der Elementar-WW

Feynman-Regeln

Bausteine für perturbative Berechnungen



Zum Wirkungsquerschnitt σ_{pp} inelastischer pp-Kollisionen:



Parton-Gehalt des Protons:

Valenz-Quarks uud ,

See-Quarks $u, d, c, s, (+b,)$

Gluonen g (+Photonen γ)

“Parton-Verteilungsfunktionen” (PDF) $f_{i/p}(x, Q)$

bestimmen Anteil x des Partons i

am p-Impuls bei “Faktorisierungsskala” Q

= nicht-perturbativer Input (aus Exp.),

aber **prozess-unabhängig**

Harte WW der Partonen

↪ perturbative QFT anwendbar,

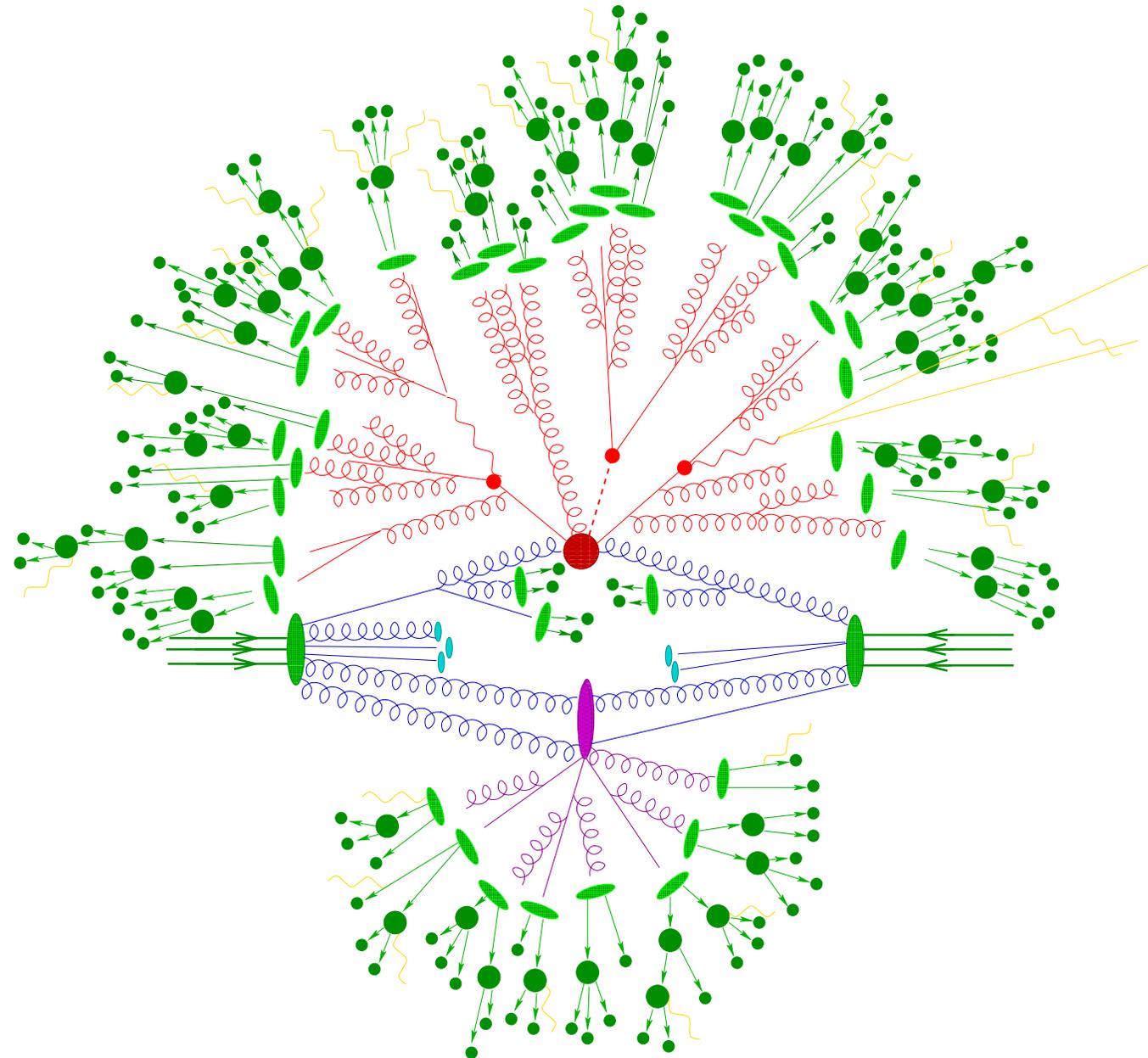
Modell für harte WW

(außer QCD/QED) geht nur hier ein

$$\sigma_{pp \rightarrow F+X}(p_1, p_2) = \int_0^1 dx_a \int_0^1 dx_b \sum_{a,b} f_{a/p}(x_a, Q) f_{b/p}(x_b, Q) \hat{\sigma}_{ab \rightarrow F}(x_a p_1, x_b p_2, Q)$$

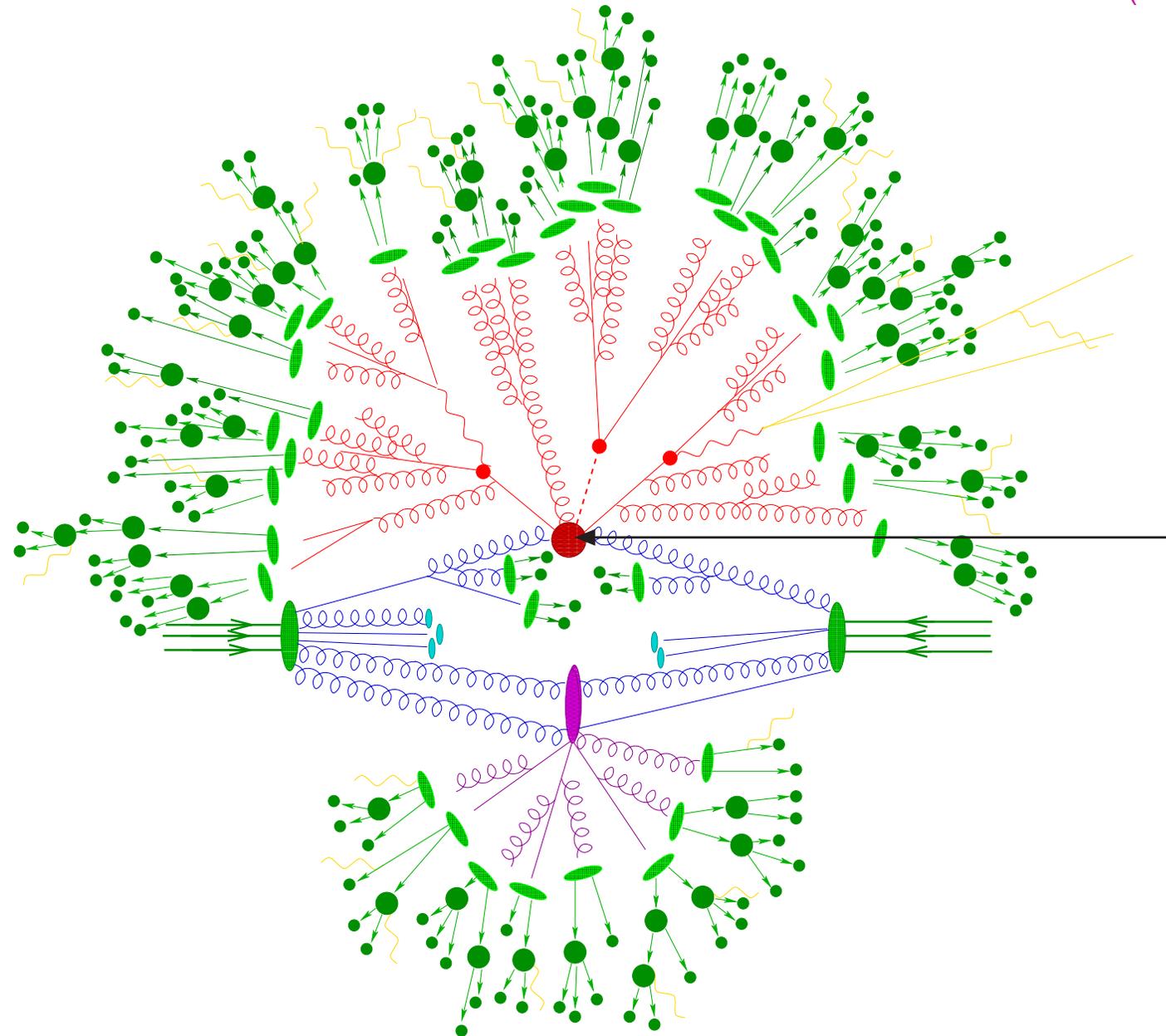
Veranschaulichung „harter“ bzw. „softer“ Anteile einer Event-Simulation

(designed by Sherpa)



Veranschaulichung „harter“ bzw. „softer“ Anteile einer Event-Simulation

(designed by Sherpa)



Harte partonische Streuung
↪ perturbativer Teil
= Schwerpunkt des Vortrags

Veranschaulichung „harter“ bzw. „softer“ Anteile einer Event-Simulation

(designed by Sherpa)

Fragmentation nach **Parton-Shower**

↔ HERWIG, PYTHIA, SHERPA

Harte partonische Streuung
↔ perturbativer Teil
= Schwerpunkt des Vortrags

“underlying event”, Mehrfachstreuung

↔ HERWIG, PYTHIA, SHERPA

PDF

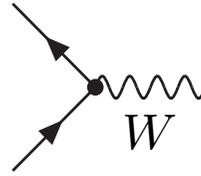
PDF



Wege zur Vorhersage – Pseudo-Observable versus Event-Simulation

LO cross sections

- stabile Teilchen
- partonische Endzustände



Wege zur Vorhersage – Pseudo-Observable versus Event-Simulation

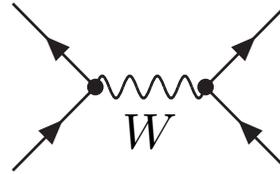
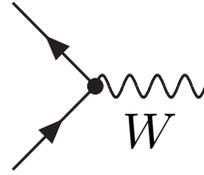
LO cross sections

- stabile Teilchen
- partonische Endzustände



LO-Verbesserungen

- Teilchenzerfälle
- Offshell-Beiträge
- universelle Korrekturen



Wege zur Vorhersage – Pseudo-Observable versus Event-Simulation

LO cross sections

- stabile Teilchen
- partonische Endzustände



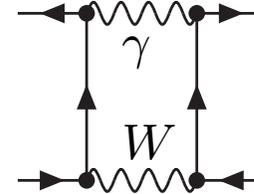
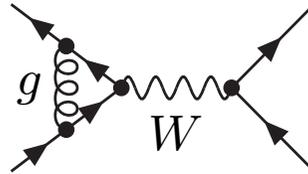
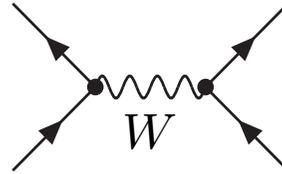
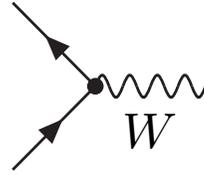
LO-Verbesserungen

- Teilchenzerfälle
- Offshell-Beiträge
- universelle Korrekturen



NLO cross sections

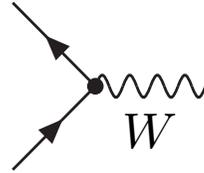
- QCD+EW Korrekturen
- harte Jets / LO-Jetstruktur
- γ -Abstrahlung



Wege zur Vorhersage – Pseudo-Observable versus Event-Simulation

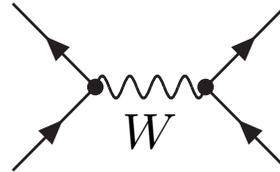
LO cross sections

- stabile Teilchen
- partonische Endzustände



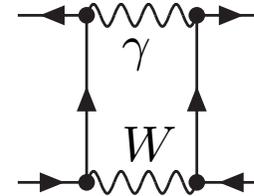
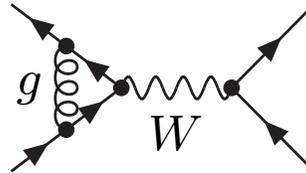
LO-Verbesserungen

- Teilchenzerfälle
- Offshell-Beiträge
- universelle Korrekturen



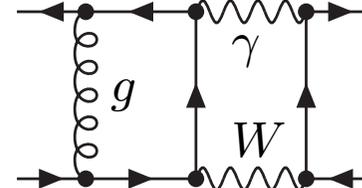
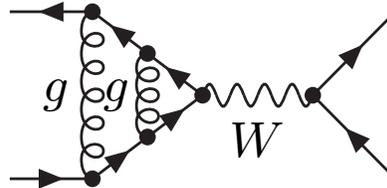
NLO cross sections

- QCD+EW Korrekturen
- harte Jets / LO-Jetstruktur
- γ -Abstrahlung



NNLO cross sections

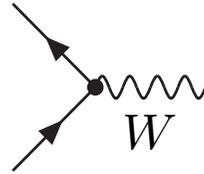
- QCD (+EW?) Korrekturen
- QCD \times EW Korrekturen
- mehr harte Jets / NLO-Jetstruktur



Wege zur Vorhersage – Pseudo-Observable versus Event-Simulation

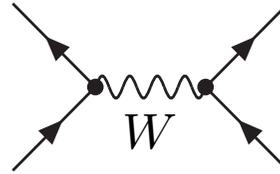
LO cross sections

- stabile Teilchen
- partonische Endzustände



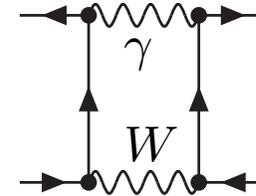
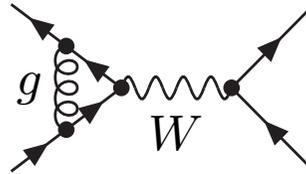
LO-Verbesserungen

- Teilchenzerfälle
- Offshell-Beiträge
- universelle Korrekturen



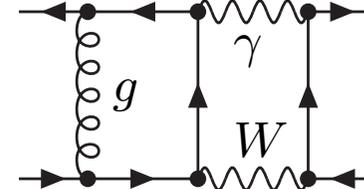
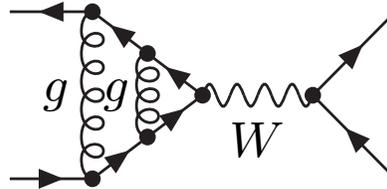
NLO cross sections

- QCD+EW Korrekturen
- harte Jets / LO-Jetstruktur
- γ -Abstrahlung



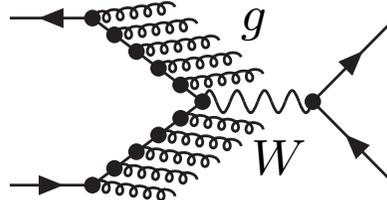
NNLO cross sections

- QCD (+EW?) Korrekturen
- QCD \times EW Korrekturen
- mehr harte Jets / NLO-Jetstruktur



Analyt. QCD-Resummationen

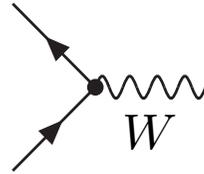
- reduzierte Skalenunsicherheit
- Elimination perturb. Artefakte
- für spezielle Observablen



Wege zur Vorhersage – Pseudo-Observable versus Event-Simulation

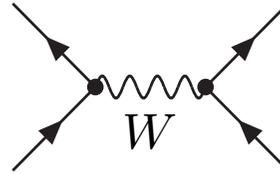
LO cross sections

- stabile Teilchen
- partonische Endzustände



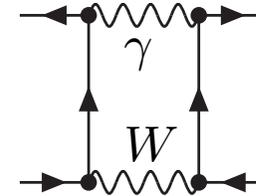
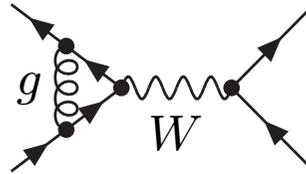
LO-Verbesserungen

- Teilchenzerfälle
- Offshell-Beiträge
- universelle Korrekturen



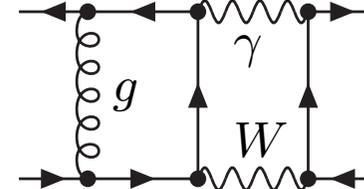
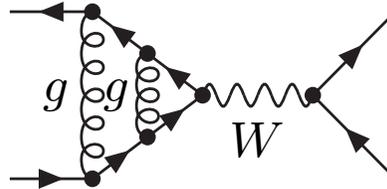
NLO cross sections

- QCD+EW Korrekturen
- harte Jets / LO-Jetstruktur
- γ -Abstrahlung



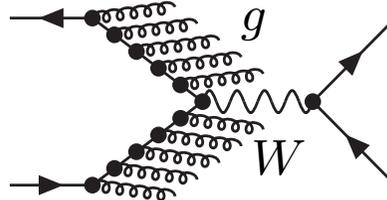
NNLO cross sections

- QCD (+EW?) Korrekturen
- QCD \times EW Korrekturen
- mehr harte Jets / NLO-Jetstruktur



Analyt. QCD-Resummationen

- reduzierte Skalenunsicherheit
- Elimination perturb. Artefakte
- für spezielle Observablen



Präzise Pseudo-Observable

σ , $d\sigma/dX$, M , Γ , A_{FB} , etc.

Wege zur Vorhersage – Pseudo-Observable versus Event-Simulation

LO cross sections

- stabile Teilchen
- partonische Endzustände



LO-Verbesserungen

- Teilchenzerfälle
- Offshell-Beiträge
- universelle Korrekturen



NLO cross sections

- QCD+EW Korrekturen
- harte Jets / LO-Jetstruktur
- γ -Abstrahlung



NNLO cross sections

- QCD (+EW?) Korrekturen
- QCD \times EW Korrekturen
- mehr harte Jets / NLO-Jetstruktur



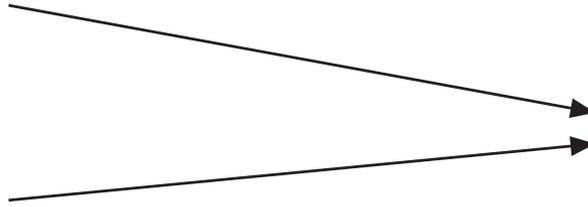
Analyt. QCD-Resummationen

- reduzierte Skalenunsicherheit
- Elimination perturb. Artefakte
- für spezielle Observablen



Präzise Pseudo-Observable

σ , $d\sigma/dX$, M , Γ , A_{FB} , etc.



LO-MC-Simulation

- Teilchenzerfälle
- Parton-Shower-Resummation
- ME-Korrektur in höheren Multiplizitäten
- hadronische EZ, MPI



Wege zur Vorhersage – Pseudo-Observable versus Event-Simulation

LO cross sections

- stabile Teilchen
- partonische Endzustände



LO-Verbesserungen

- Teilchenzerfälle
- Offshell-Beiträge
- universelle Korrekturen



NLO cross sections

- QCD+EW Korrekturen
- harte Jets / LO-Jetstruktur
- γ -Abstrahlung



NNLO cross sections

- QCD (+EW?) Korrekturen
- QCD \times EW Korrekturen
- mehr harte Jets / NLO-Jetstruktur



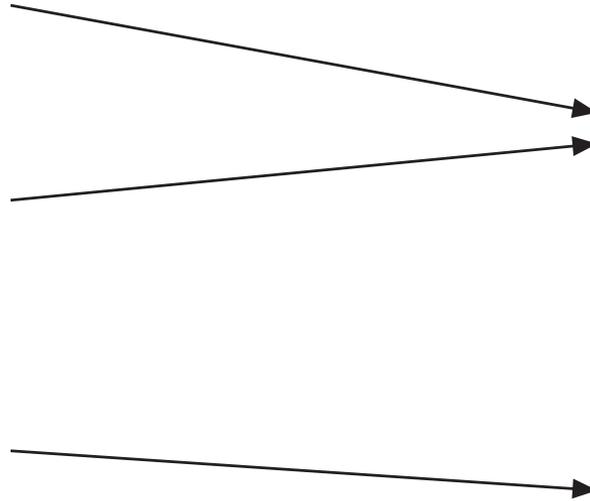
Analyt. QCD-Resummationen

- reduzierte Skalenunsicherheit
- Elimination perturb. Artefakte
- für spezielle Observablen



Präzise Pseudo-Observable

σ , $d\sigma/dX$, M , Γ , A_{FB} , etc.



LO-MC-Simulation

- Teilchenzerfälle
- Parton-Shower-Resummation
- ME-Korrektur in höheren Multiplizitäten
- hadronische EZ, MPI



NLO-MC-Simulation

- NLO Korrekturen
- Parton-Shower mit NLO Matching

Wege zur Vorhersage – Pseudo-Observable versus Event-Simulation

LO cross sections

- stabile Teilchen
- partonische Endzustände



LO-Verbesserungen

- Teilchenzerfälle
- Offshell-Beiträge
- universelle Korrekturen



NLO cross sections

- QCD+EW Korrekturen
- harte Jets / LO-Jetstruktur
- γ -Abstrahlung



NNLO cross sections

- QCD (+EW?) Korrekturen
- QCD \times EW Korrekturen
- mehr harte Jets / NLO-Jetstruktur



Analyt. QCD-Resummationen

- reduzierte Skalenunsicherheit
- Elimination perturb. Artefakte
- für spezielle Observablen



Präzise Pseudo-Observable

σ , $d\sigma/dX$, M , Γ , A_{FB} , etc.



LO-MC-Simulation

- Teilchenzerfälle
- Parton-Shower-Resummation
- ME-Korrektur in höheren Multiplizitäten
- hadronische EZ, MPI



NLO-MC-Simulation

- NLO Korrekturen
- Parton-Shower mit NLO Matching



Weitere Verbesserungen

- NNLO Normierung



||
Double-Counting!

Wege zur Vorhersage – Pseudo-Observable versus Event-Simulation

LO cross sections

- stabile Teilchen
- partonische Endzustände



LO-Verbesserungen

- Teilchenzerfälle
- Offshell-Beiträge
- universelle Korrekturen



NLO cross sections

- QCD+EW Korrekturen
- harte Jets / LO-Jetstruktur
- γ -Abstrahlung



NNLO cross sections

- QCD (+EW?) Korrekturen
- QCD \times EW Korrekturen
- mehr harte Jets / NLO-Jetstruktur



Analyt. QCD-Resummationen

- reduzierte Skalenunsicherheit
- Elimination perturb. Artefakte
- für spezielle Observablen



Präzise Pseudo-Observable

$\sigma, d\sigma/dX, M, \Gamma, A_{FB}, \text{etc.}$



||
Double-Counting!

LO-MC-Simulation

- Teilchenzerfälle
- Parton-Shower-Resummation
- ME-Korrektur in höheren Multiplizitäten
- hadronische EZ, MPI



NLO-MC-Simulation

- NLO Korrekturen
- Parton-Shower mit NLO Matching



Weitere Verbesserungen

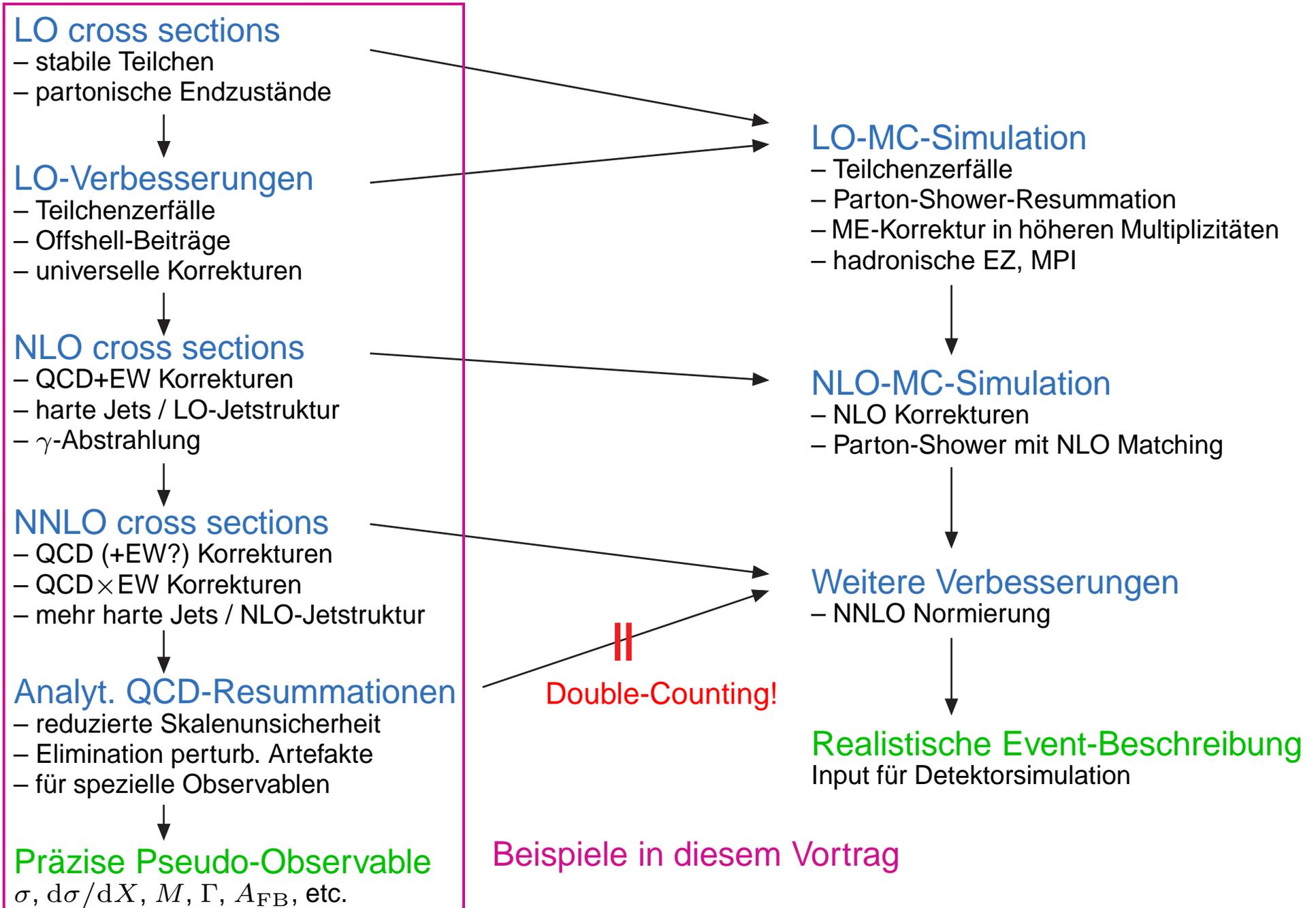
- NNLO Normierung



Realistische Event-Beschreibung

Input für Detektorsimulation

Wege zur Vorhersage – Pseudo-Observable versus Event-Simulation



Eigenschaften von (N)NLO Korrekturen



Schwierigkeiten in N...LO-Vorhersagen

Algebraische Komplexität

LO: Problem gelöst bis $2 \rightarrow \sim 10$ Teilchen

- ◇ Automatisierung durch ALPGEN, AMEGIC/SHERPA, COMPHEP, HELAC/PHEGAS, MADGRAPH/MADEVENT, O'MEGA/WHIZARD

NLO: Problem gelöst bis $2 \rightarrow 4$ Teilchen, erste Resultate für > 6 externe Teilchen

- ◇ traditionell mit Feynman-Graphen & modernen Reduktionstechniken
Tools: FEYNARTS/FORMCALC, GOLEM95, GRACE-LOOP private Codes
- ◇ neuere Methoden basierend auf „Unitaritäts-Cuts“ bzw. Rekursionen
Automatisierung durch BLACKHAT, GOSAM/SAMURAI, HELAC-NLO, MADLOOP/AMC@NLO, NGLUON/NJET, OPENLOOPS, RECOLA, ROCKET
→ T6.2 H.Ita, T7.4 N.Greiner
- ◇ erste Resultate durch numerische Methoden Becker et al. '12

$N \geq 2$ LO: Beispiele geringer Multiplizität und „Statische Größen“

- ◇ Algebra weitgehend mittels FORM
- ◇ z.B. Reduktion auf Master-Integrale

→ Sessions T10, T12, T13



Schwierigkeiten in N...LO-Vorhersagen

Algebraische Komplexität

Die „NLO-Revolution“: **NLO für ≥ 6 Teilchenprozesse**

$e^+e^- \rightarrow WW \rightarrow 4f$	EW	[Denner, S.D., Roth Wieders '05]
$pp \rightarrow t\bar{t}b\bar{b}$	QCD	[Bredenstein, Denner, S.D., Pozzorini '09-'10; Bevilacqua et al. '09]
$pp \rightarrow t\bar{t} + 2j$	QCD	[Bevilacqua, Czakon, Papadopoulos, Worek '10,'11]
$pp \rightarrow t\bar{t}t\bar{t}$	QCD	[Bevilacqua, Worek '12]
$pp \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	QCD	[Greiner, Guffanti, Reiter, Reuter '11]
$pp \rightarrow WWb\bar{b}$	QCD	[Denner, S.D., Kallweit, Pozzorini '10-'12; Bevilacqua et al. '10]
$pp \rightarrow WW + 2j$	QCD	[Melia, Melnikov, Rontsch, Zanderighi '10,'11; Greiner et al. '12]
$pp \rightarrow W/Z + 3j$	QCD	[Ellis, Melnikov, Zanderighi '09,'10; Berger et al. '09,'10]
$pp \rightarrow W/Z + 4j$	QCD	[Berger et al. '11,'12]
$pp \rightarrow 4j$	QCD	[Bern et al. '11; Badger, Biedermann, Uwer, Yundin '12]
$pp \rightarrow W\gamma\gamma j$	QCD	[Campanario, Englert, Rauch, Zeppenfeld '11]
$e^+e^- \rightarrow 5j$	QCD	[Frederix, Frixione, Melnikov, Zanderighi '10]
$e^+e^- \rightarrow 7j$	QCD	[Becker et al. '12]



Schwierigkeiten in N...LO-Vorhersagen

Algebraische Komplexität

Loop-Integrale

NLO: Problem gelöst

- ◇ alg. Reduktion auf skalare Standardintegrale (\leq Box-Integrale)
- ◇ spezielle Methoden zur numerischen Stabilisierung
- ◇ komplexe Massen (instabile Teilchen)
- ◇ Tools: **COLLIER**, **FF**, **LOOPTOOLS**, **ONELOOP**, **QCDLOOP**

NNLO: viele Beispiele (v.a. masselos), viele Massen beliebig kompliziert

- ◇ spezielle Methoden: asymptotische Entwicklungen, Differentialgleichungen, harmonische Summen, numerische Methoden

$N^{>2}$ LO: v.a. Vakuumgraphen

Tools: **BUBBLES**, **EXP**, **GEFICOM**, **HEPLOOPS**, **MATAD**, **MINCER**, **RECURSOR**, etc.



Schwierigkeiten in N...LO-Vorhersagen

Algebraische Komplexität

Loop-Integrale

IR-Singularitäten

NLO: Problem gelöst

- ◇ “Phase-space Slicing”
- ◇ Subtraktionsmethoden (v.a. Dipol-Subtraktion, FKS)
Automatisierung: **AUTO**DIPOLE, **HELAC**-DIPOLE, **MADDI**POLE, **SHERPA**, **MAD**FKS

NNLO: Problem in Arbeit

- ◇ IR-Verhalten verstanden
- ◇ Subtraktionsterme sukzessive ausgearbeitet (z.B. “antenna subtraction”)



Schwierigkeiten in N...LO-Vorhersagen

Algebraische Komplexität

Loop-Integrale

IR-Singularitäten

Instabile Teilchen @ NLO

↪ **Problem:** Breiten-Resummation \oplus Eichinvarianz !

Lösungen in NLO:

- “Pole scheme”
 - Effektive Feldtheorien
 - “Complex-mass scheme”
- ↪ komplexe Massen & Kopplungen, voller Phasenraum, mehr Arbeit
- } → Systematische Entwicklungen um Resonanz



Vorhersagen zur Higgs-Physik am LHC

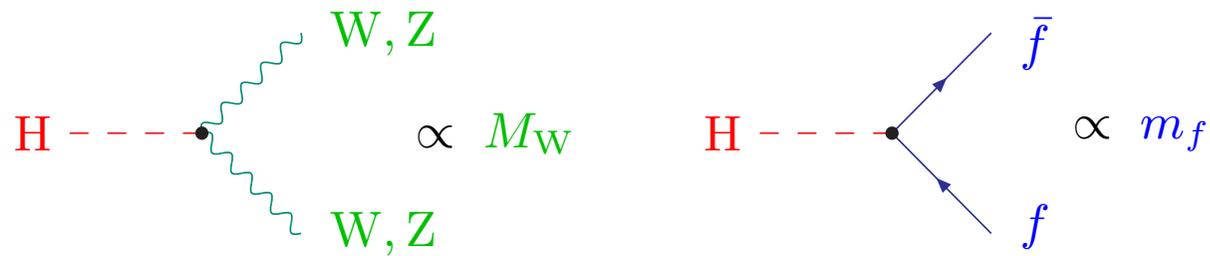
—

ausgewählte Beispiele



Higgs-Produktion und Zerfall am LHC

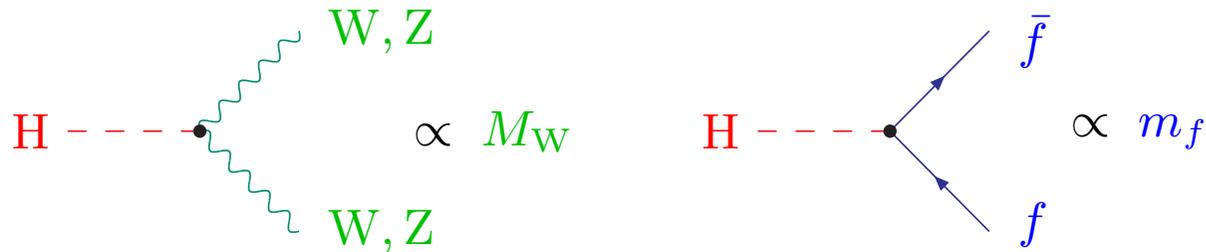
Higgs-Boson koppelt proportional zur Teilchenmasse:



⇒ Higgs-Produktion durch Kopplung an W/Z-Bosonen oder Top-Quarks

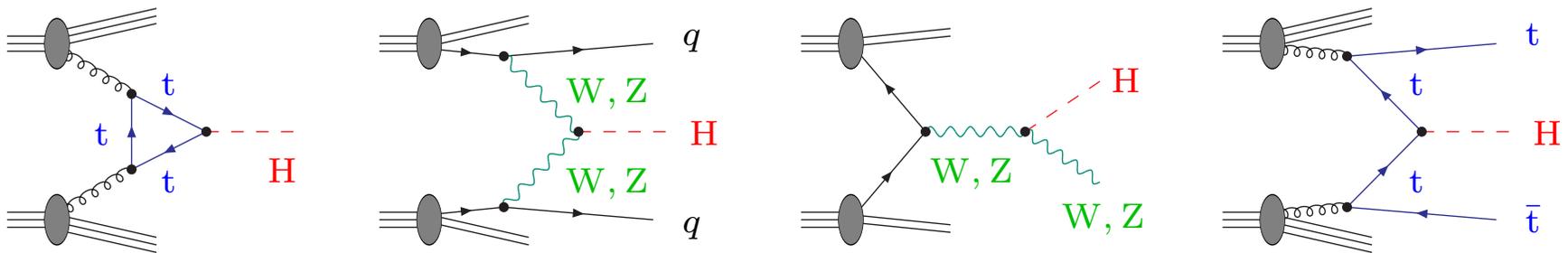
Higgs-Produktion und Zerfall am LHC

Higgs-Boson koppelt proportional zur Teilchenmasse:



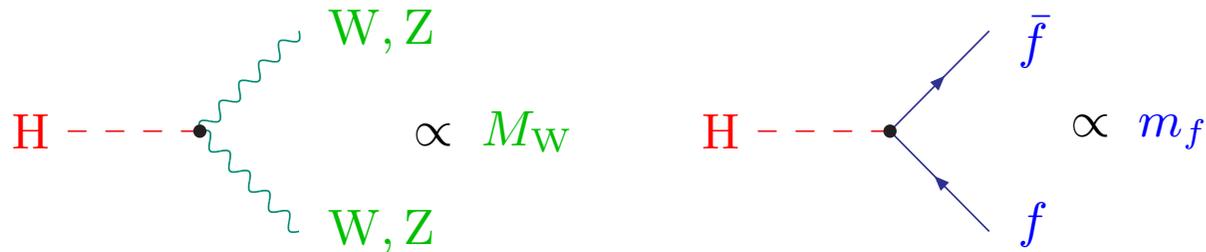
⇒ Higgs-Produktion durch Kopplung an W/Z-Bosonen oder Top-Quarks

Produktion an Hadron-Kollidern ($p\bar{p}/pp$):



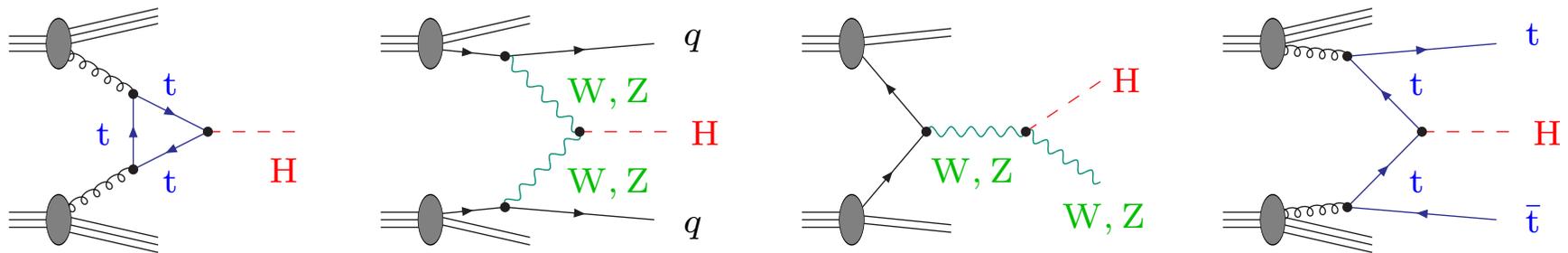
Higgs-Produktion und Zerfall am LHC

Higgs-Boson koppelt proportional zur Teilchenmasse:

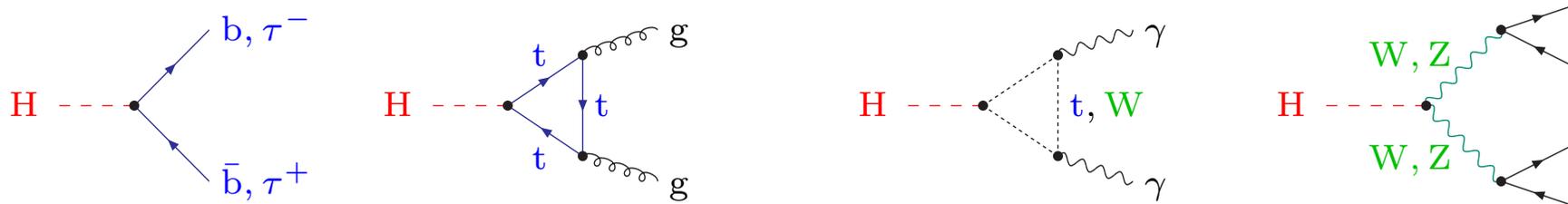


⇒ Higgs-Produktion durch Kopplung an W/Z-Bosonen oder Top-Quarks

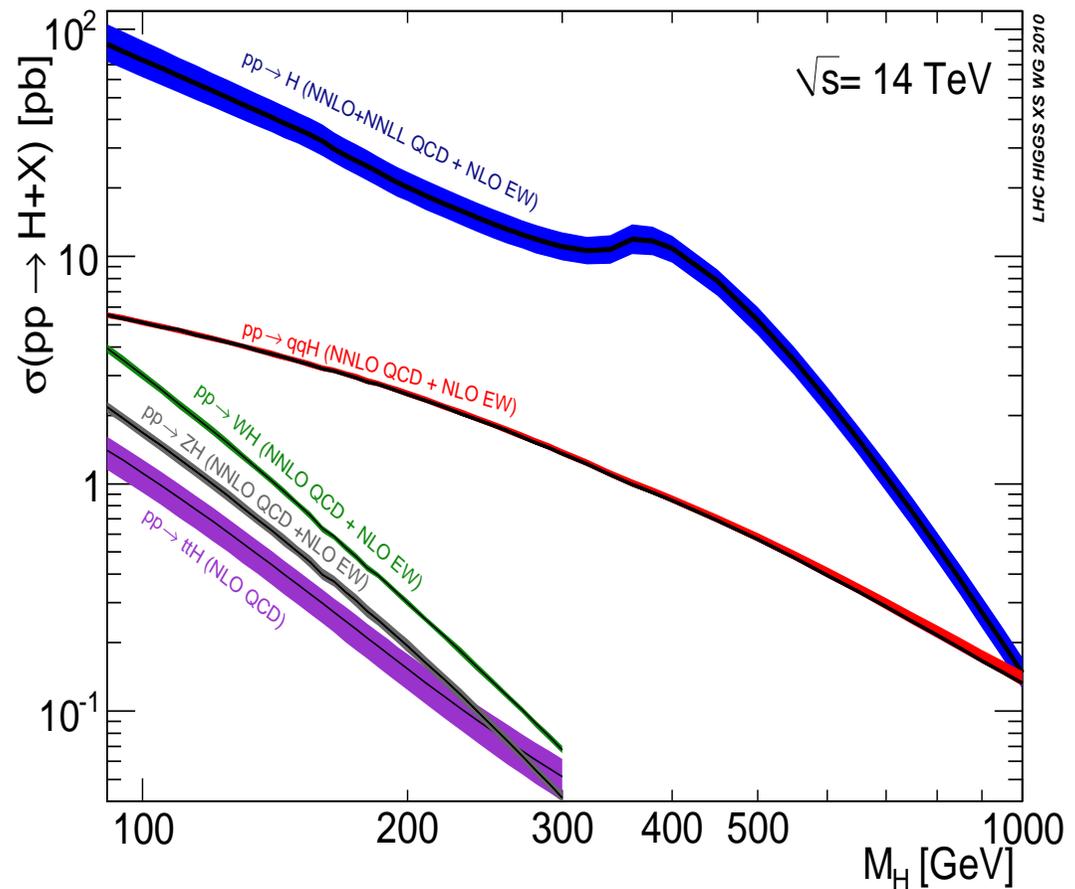
Produktion an Hadron-Kollidern ($p\bar{p}/pp$):



Zerfallskanäle für Higgs-Bosonen moderater Masse ($M_H \lesssim 300 \text{ GeV}$):



Wirkungsquerschnitte
für SM Higgs-Bosonen
am LHC bei $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$
LHC Higgs XS WG 2010



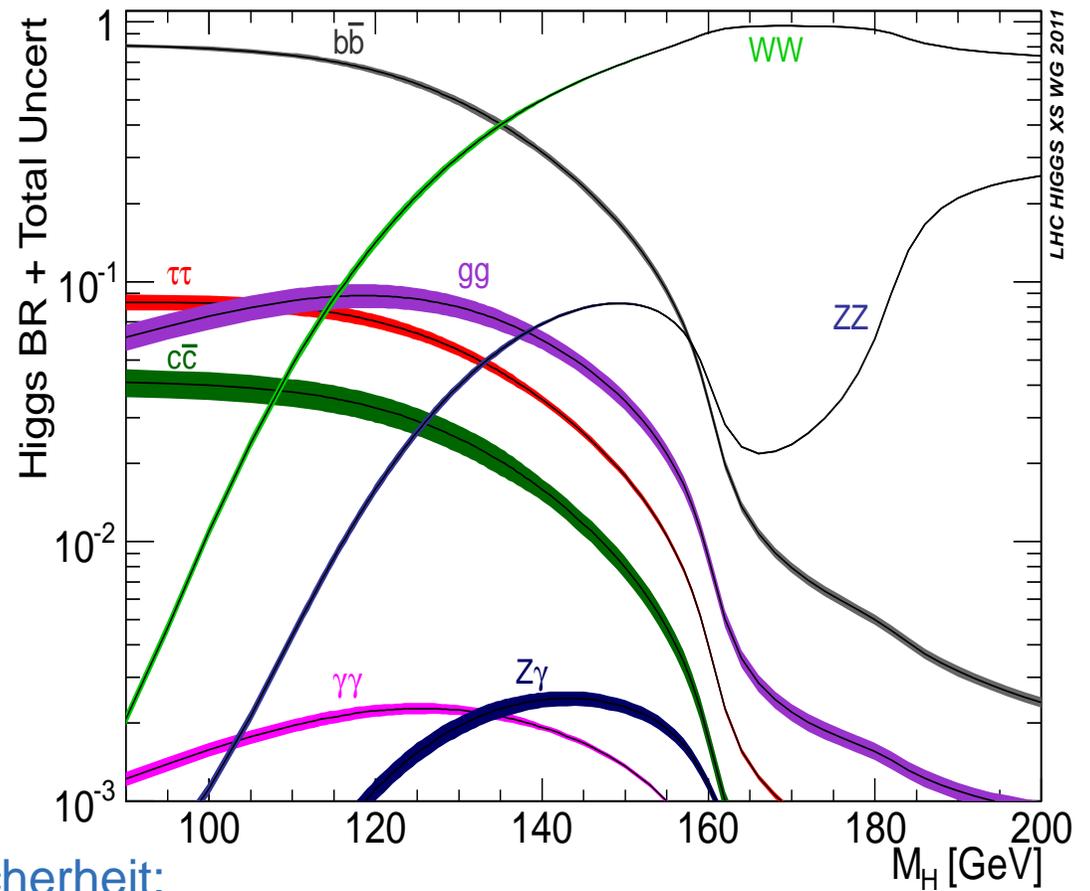
Abschätzungen:

	M_H	Unsicherheiten		NLO/NNLO/NNLO+	
		Skala	PDF4LHC	QCD	EW
ggF	< 500 GeV	6–14%	7%	>100%	5%
VBF	< 500 GeV	1%	3–4%	5%	5%
WH	< 200 GeV	1%	3–4%	30%	5–10%
ZH	< 200 GeV	2–4%	3–4%	45%	5%
ttH	< 200 GeV	10%	9%	15–20%	?

EW Korrekturen
 $\sim \mathcal{O}(\text{Unsicherheit})$

Verzweigungsverhältnisse des SM Higgs-Bosons

LHC Higgs XS WG 2011



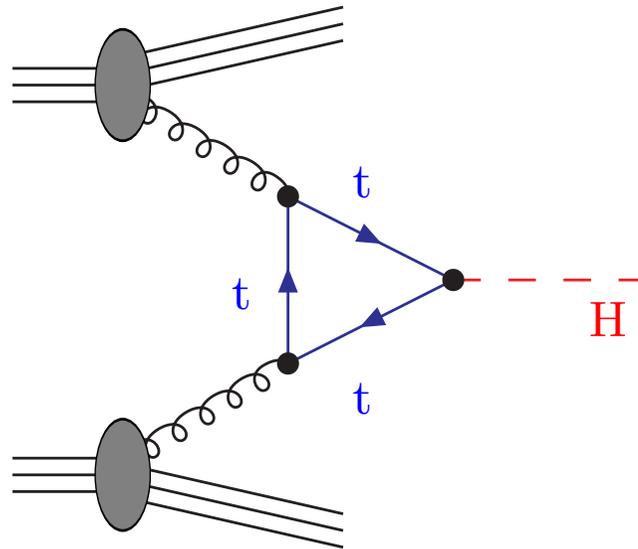
Parametrische + theoretische Unsicherheit:

M_H [GeV]	$H \rightarrow b\bar{b}$	$\tau^+\tau^-$	$c\bar{c}$	gg	$\gamma\gamma$	WW	ZZ
120	3%	6%	12%	10%	5%	5%	5%
150	4%	3%	10%	8%	2%	1%	1%
200	5%	3%	10%	8%	2%	< 0.1%	< 0.1%

← dominiert durch $\delta\Gamma_{H \rightarrow b\bar{b}}$

EW Korrekturen signifikant in Vorhersagen für $\Gamma_{H \rightarrow X}$ and $BR_{H \rightarrow X}$

Beispiel: Higgs-Produktion durch Gluon-Fusion



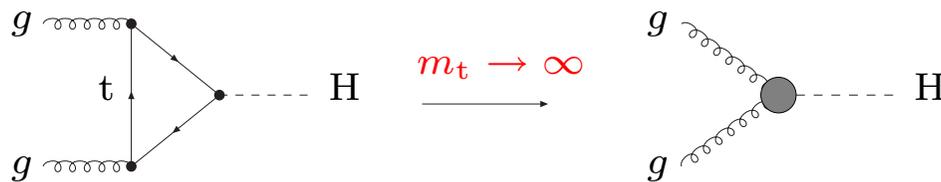
Korrekturen zur Higgs-Boson-Produktion über Gluon-Fusion

- **QCD-Korrekturen:**

- ◇ NLO-Korrektur komplett bekannt
- ◇ NNLO-Korrektur bekannt als Entwicklung für $m_t \rightarrow \infty$ "matched" mit $\hat{s} \rightarrow \infty$

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

- ◇ Resummationen / virtuelle / softe Terme in NNNLO für $m_t \rightarrow \infty$



Graudenz, Spira, Zerwas '93
Djouadi, Graudenz, Spira, Zerwas '95

Harlander, Kilgore '01,'02
Catani, de Florian, Grazzini '01
Anastasiou, Melnikov '02
Ravindran, Smith, v.Neerven '03,'04
Anastasiou, Melnikov, Petriello '04
Marzani et al. '08
Pak, Rogal, Steinhauser '09
Harlander, Ozeren '09

Catani et al. '03; Moch, Vogt '05
Laenen, Magnea '05; Idilbi, Ji, Ma, Yuan '05
Ravindran '05,'06; Ravindran, Smith, v.Neerven '06
Ahrens, Becher, Neubert, Yang '08,'10
Berger et al. '10; Stewart, Tackmann '11
Banfi, (Monni,) Salam, Zanderighi '12
Becher, Neubert '12

- **EW Korrekturen**

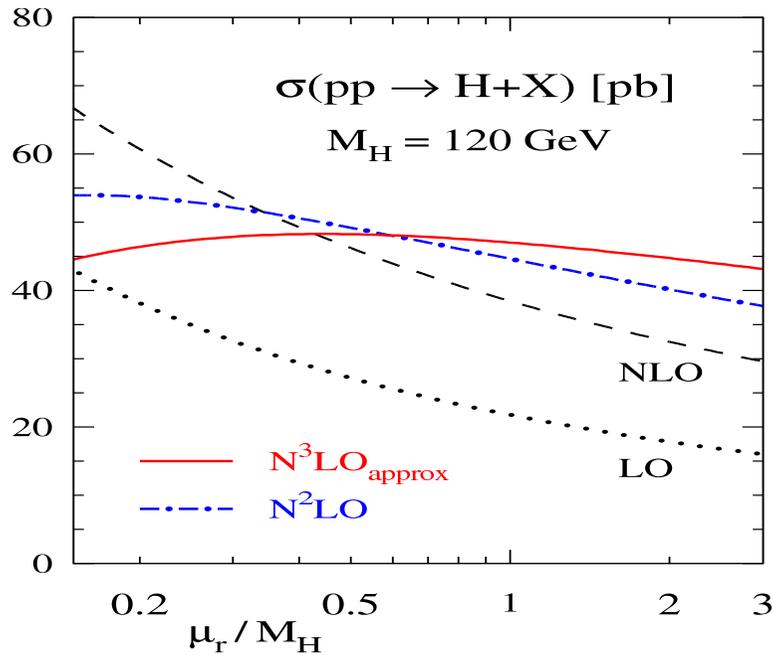
- ◇ komplette NLO-Korrektur bekannt $\sim \mathcal{O}(5\%)$
- ◇ gemischte $\mathcal{O}(\alpha\alpha_s)$ Korrekturen für kleine M_H

Aglietti, Bonciani, Degrassi, Vicini '04,'06
Degrassi, Maltoni '04
Actis, Passarino, Sturm, Uccirati '08

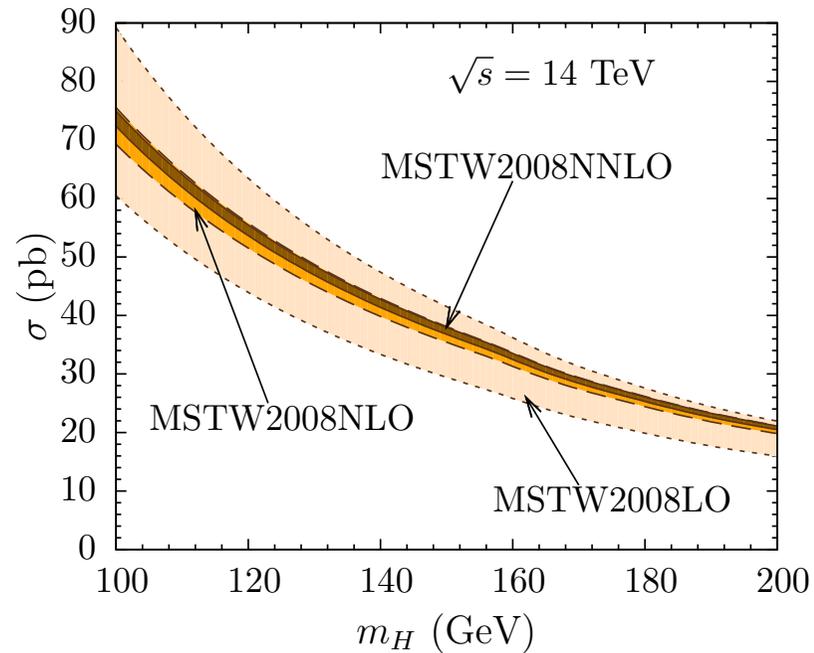
Anastasiou, Boughezal, Petriello '08

QCD Skalenabhängigkeit von Vorhersagen für $gg \rightarrow H$ (inklusive)

Moch, Vogt '05



Ahrens, Becher, Neubert, Yang '10



Standard-Skalenwahl, $\alpha_s(M_H^2)$:

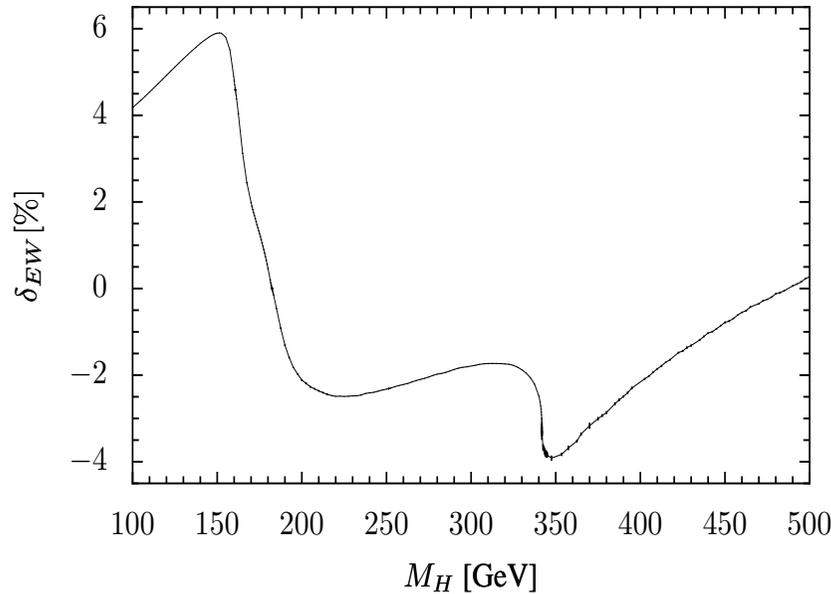
- große QCD-Korrekturen:
 $\frac{\delta_{NLO}}{LO} \sim 80\%$, $\frac{\delta_{NNLO}}{LO} \sim 30\%$,
- Soft-Gluon-Resummation
 \hookrightarrow gute Konvergenz
- Skalenabhängigkeit $\sim 5-10\%$

Alternative Resummation:

- SCET zur Ordnung NNNLL
- analyt. Fortsetzung zu $\alpha_s(-\mu^2)$ in Loop-Korrektur \rightarrow „ π^2 -Resummation“
- verbesserte Konvergenz
- Skalenabhängigkeit $\sim 3\%$

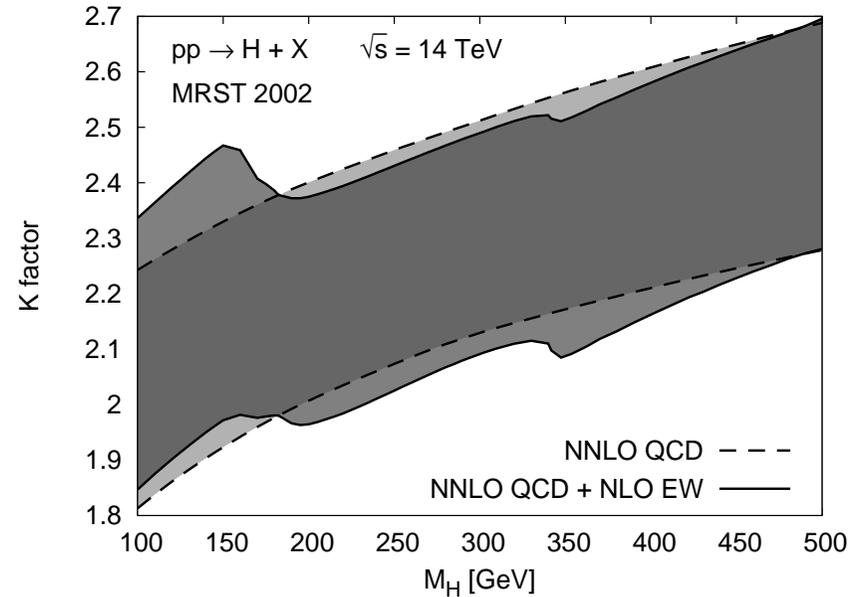
\hookrightarrow Theoretische Gesamtunsicherheit (\geq Skalenunsicherheit) ?! ... seit Langem diskutiert

Korrekturen zum partonischen Wq.:



K -Faktor zum pp-Wq.:

(Bandbreite: $M_H/2 < \mu_{R/F} < 2M_H$, $\mu_R/2 < \mu_F < 2\mu_R$)

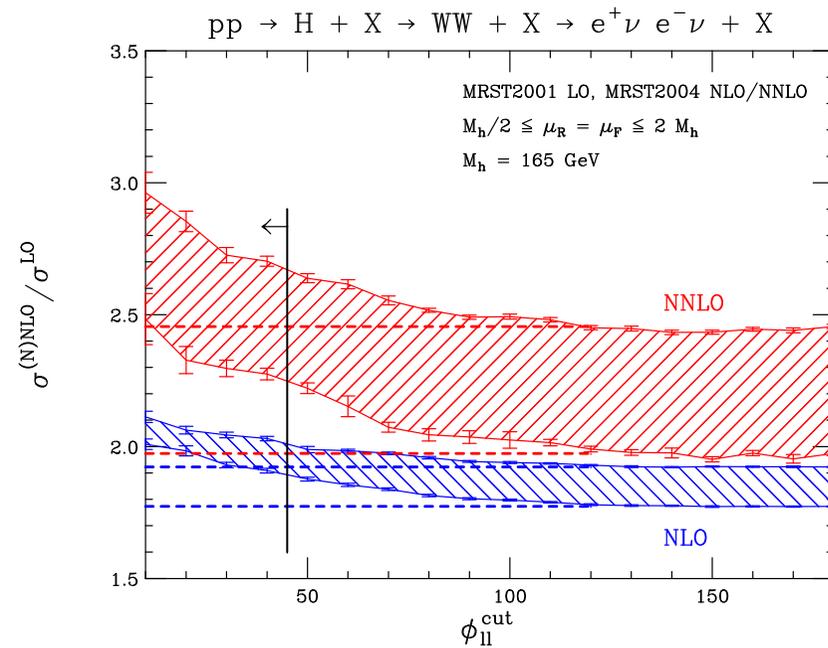
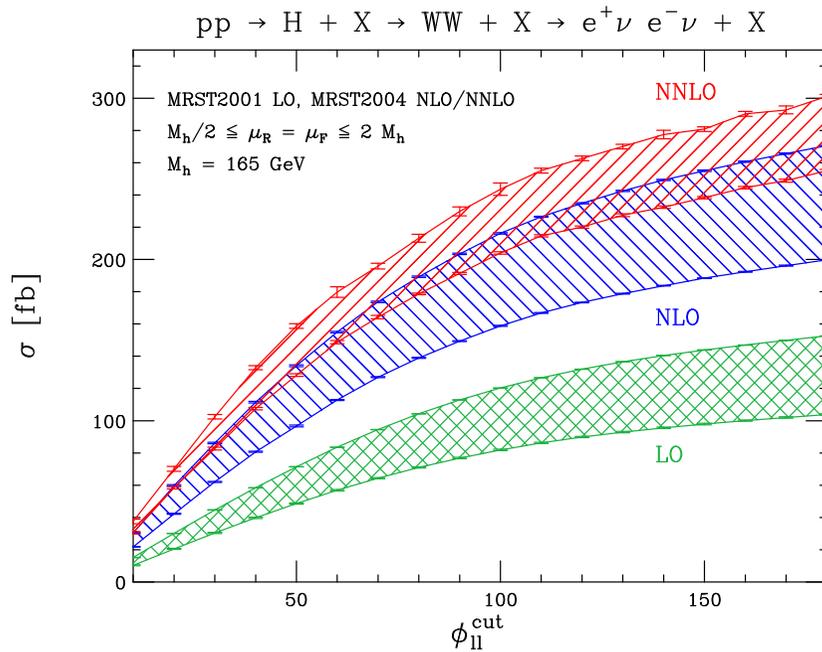


EW Korrekturen ...

- relevant auf **5%-Niveau**
- zeigen nicht-triviale Strukturen bei WW-/ZZ-/t \bar{t} -Schwellen
 \hookrightarrow korrekt beschrieben im “complex-mass scheme”
 (reelle Massen führen zu unphysikalischem Verhalten)
- gemischte $\mathcal{O}(\alpha\alpha_s)$ Korrekturen für kleine M_H Anastasiou, Boughezal, Petriello '08
 zeigen **Faktorisierung von QCD und EW Korrekturen** in guter Näherung

Kombination von Higgs-Production und Zerfall $H \rightarrow WW \rightarrow ll\nu\nu$

Anastasiou, Dissertori, Stöckli '07



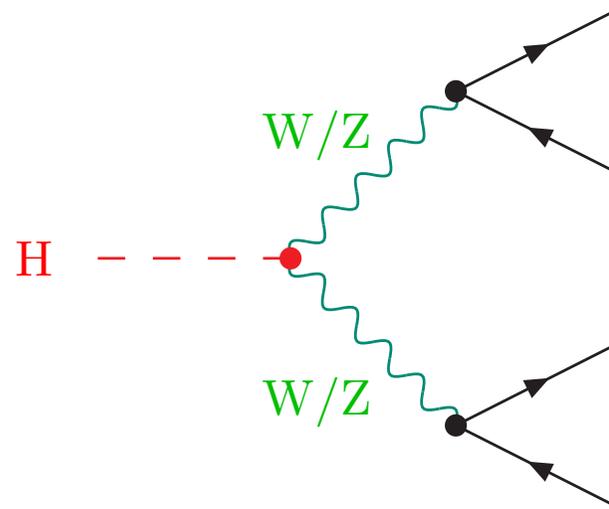
$\phi_{ll} =$ Winkel zwischen gel. Zerfallsleptonen in transversaler Ebene

K -Faktoren stark phasenraumabhängig.

Außerdem:

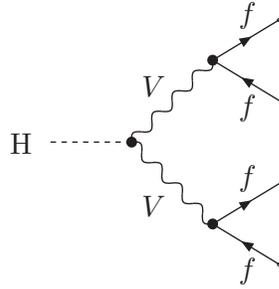
Korrekturen zum Zerfall sollten auch mit einbezogen werden !

Zum Higgs-Boson-Zerfall $H \rightarrow WW/ZZ \rightarrow 4f$



Feynman-Diagramme der NLO-Korrektur zu $H \rightarrow WW/ZZ \rightarrow 4f$

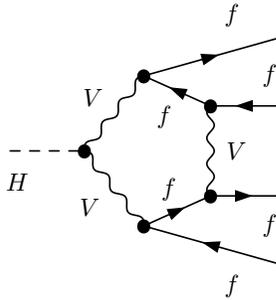
LO-Diagramme:



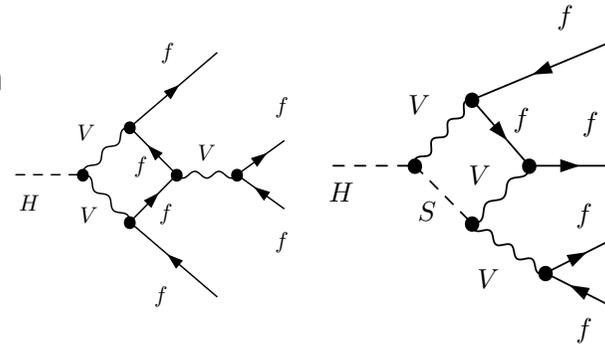
Typische NLO-Diagramme:

Diagramme = $\mathcal{O}(200-400)$

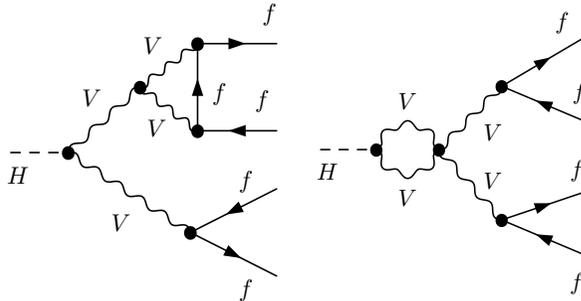
Pentagons



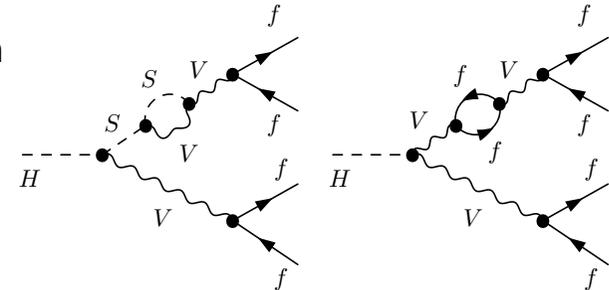
Boxen



Vertexkorr.



Selbstenergien



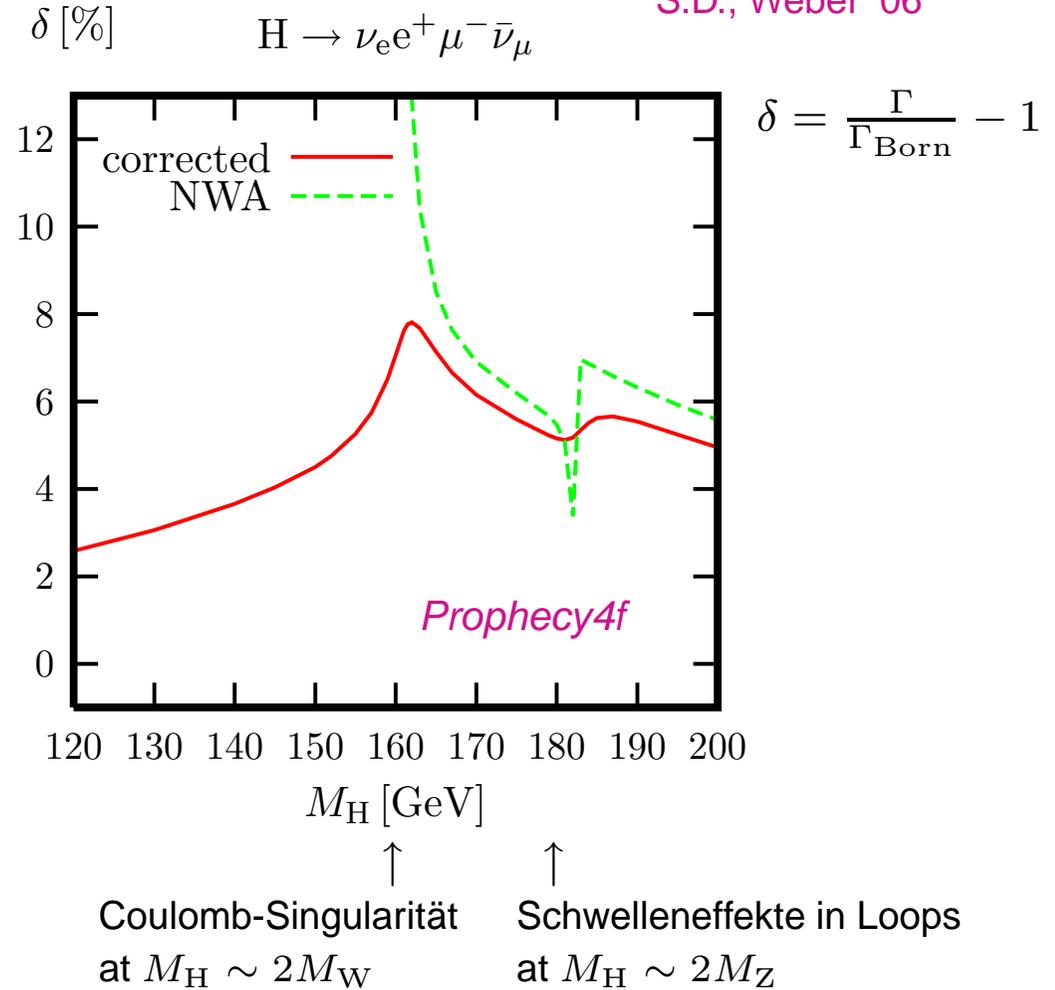
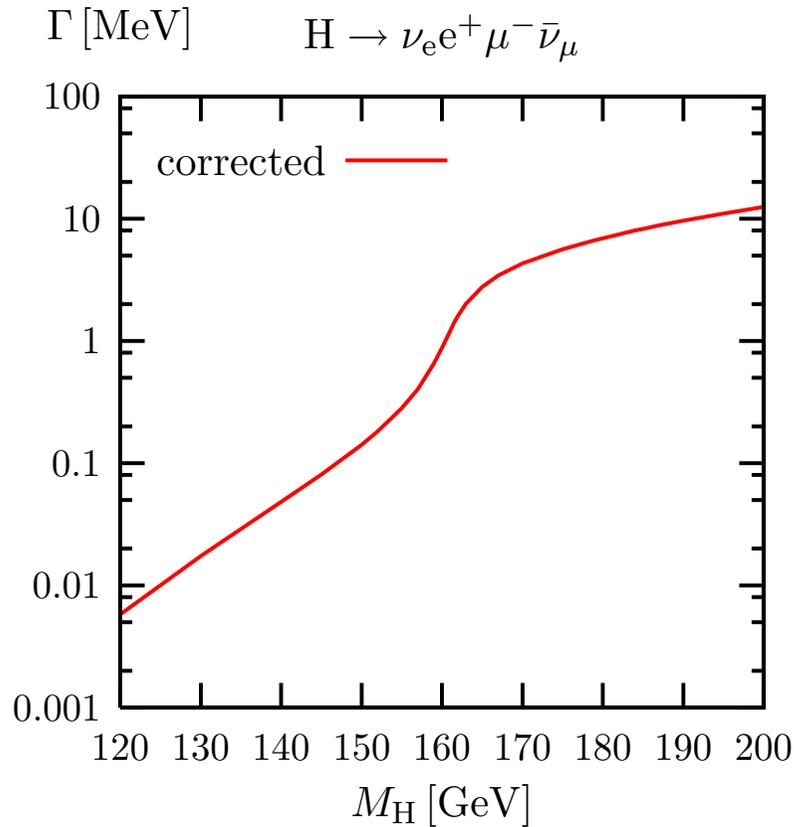
+ Baum-Graphen für Gluon-/Photon-Abstrahlung

... implementiert in **PROPHECY4F** = NLO-Event-Generator für alle $4f$ -Endzustände

Bredenstein, Denner, S.D., Weber '06

Partielle H-Breite für $H \rightarrow WW \rightarrow \nu_e e^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu$

Bredenstein, Denner,
S.D., Weber '06



$$\delta = \frac{\Gamma}{\Gamma_{\text{Born}}} - 1$$

NWA = "Narrow-Width Approximation" (on-shell W-Bosonen)

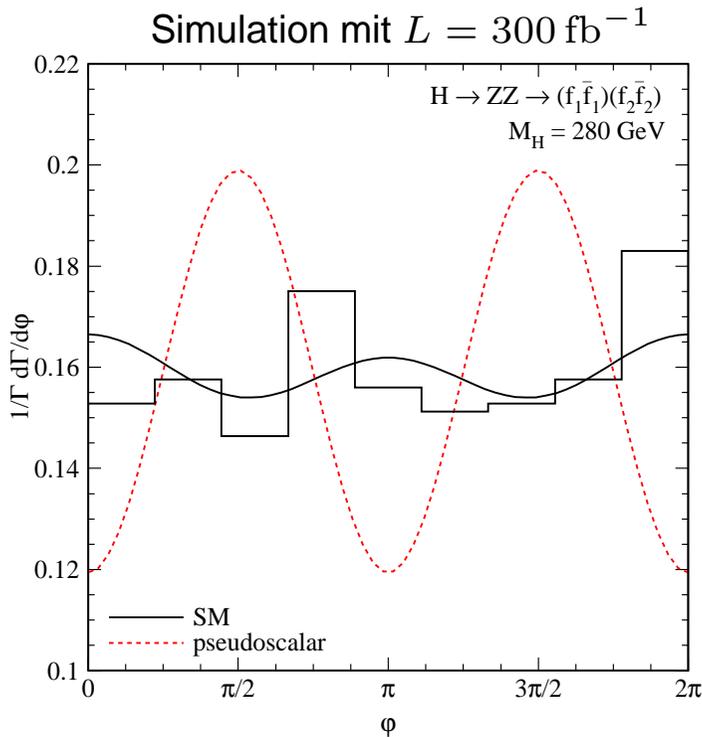
Korrekturen zur Breite moderat ($\sim 4-8\%$), aber größer in Verteilungen.

Beachte: für $M_H \lesssim 2M_W = 160 \text{ GeV}$ sind **W-Bosonen off-shell** !

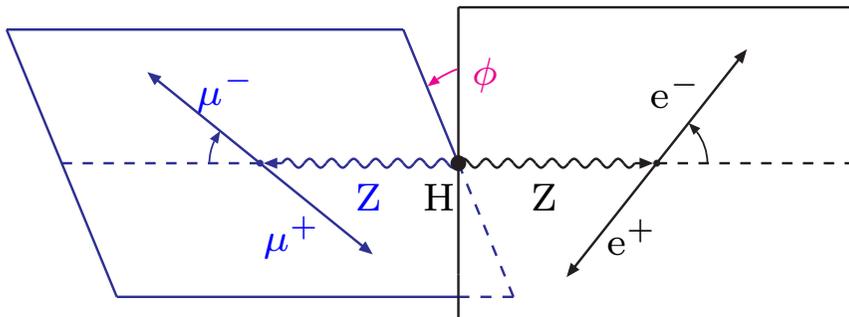
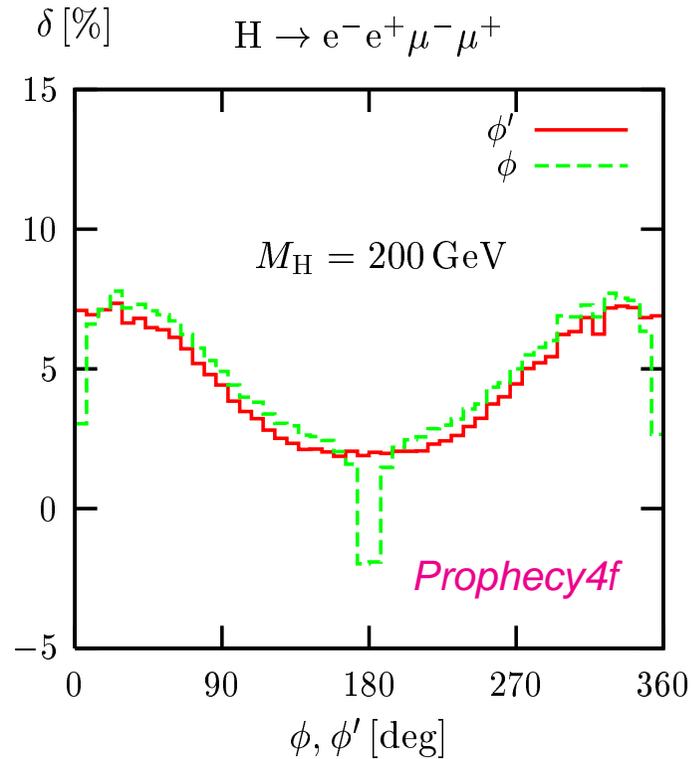
Verteilung im Zwischenwinkel der Z-Zerfallebenen

- Sensitivität auf BSM-Effekte → Verzerrungen der Verteilung
- EW Korrekturen → Verzerrungen der Verteilung um 5–10%

Choi, Miller, Mühlleitner, Zerwas '02



Bredenstein, Denner, S.D., Weber '06



$$\cos \phi = \frac{(\mathbf{p}_{e^- e^+} \times \mathbf{p}_{e^-}) \cdot (-\mathbf{p}_{\mu^- \mu^+} \times \mathbf{p}_{\mu^-})}{|\mathbf{p}_{e^- e^+} \times \mathbf{p}_{e^-}| \cdot |-\mathbf{p}_{\mu^- \mu^+} \times \mathbf{p}_{\mu^-}|}$$

$$\cos \phi' = \frac{(\mathbf{p}_{e^- e^+} \times \mathbf{p}_{e^-}) \cdot (\mathbf{p}_{e^- e^+} \times \mathbf{p}_{\mu^-})}{|\mathbf{p}_{e^- e^+} \times \mathbf{p}_{e^-}| \cdot |\mathbf{p}_{e^- e^+} \times \mathbf{p}_{\mu^-}|}$$

Top-Quark-Paarproduktion

—

neuere Entwicklungen



Präzisionsberechnungen zur hadronischen $t\bar{t}$ Production

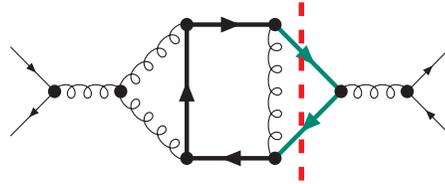
- NLO QCD Korrekturen Nason et al. '89; Beenakker et al. '91; Mangano et al. '92; Frixione et al. '95
- NLO EW Korrekturen Beenakker et al. '94; S.Moretti et al. '06; Kühn et al. '06; Hollik et al. '07–'11; Bernreuther et al. '08
- QCD-Resummationen Laenen et al. '92; Catani et al. '96; Berger et al. '96; Kidonakis et al. '97–'01; Bonciani et al. '98; Beneke et al. '09–'11; Czakon et al. '09–'11; Ahrens et al. '10–'11; Kidonakis '10–'11; Aliev et al. '10; Cacciari et al. '11
- Schritte zu NNLO QCD Czakon et al. '07–'08; S.D. et al. '07; Kniehl et al. '08; Anastasiou et al. '08; Bonciani et al. '08–'09; Gehrmann-De Ridder et al. '09; Czakon '10–'11

Neu: totaler Wq. zu $q\bar{q}/qg/\bar{q}g \rightarrow t\bar{t}$ @ NNLO Bärnreuther, Czakon, Mitov '12

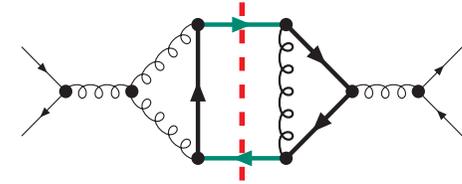
- NLO QCD – Einbeziehung der Top-Zerfälle in “NWA”
Bernreuther et al. '04–'10; Melnikov et al. '09
- NLO QCD – komplette $b\bar{b} + 2\ell 2\nu$ Endzustände
Denner et al. '10,'12; Bevilacqua et al. '10

Struktur der NNLO-Rechnung zu $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$: Bärnreuther, Czakon, Mitov '12

$$\Delta\hat{\sigma}_{\text{NNLO}} = \int_2 \left[2 \operatorname{Re} \left\{ \mathcal{M}_{2\text{-loop}}^{(2\rightarrow 2)} \mathcal{M}_{\text{tree}}^{(2\rightarrow 2)*} \right\} + \left| \mathcal{M}_{1\text{-loop}}^{(2\rightarrow 2)} \right|^2 \right]$$

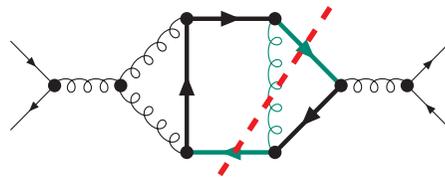


Bonciani et al. '08-'11; Czakon '08

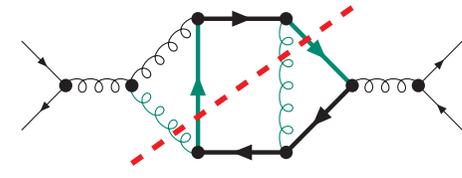


Körner et al. '06; Anastasiou, Aybat '08;
Kniehl et al. '08

$$+ \int_3 2 \operatorname{Re} \left\{ \mathcal{M}_{1\text{-loop}}^{(2\rightarrow 3)} \mathcal{M}_{\text{tree}}^{(2\rightarrow 3)*} \right\} + \int_4 \left| \mathcal{M}_{\text{tree}}^{(2\rightarrow 4)} \right|^2$$



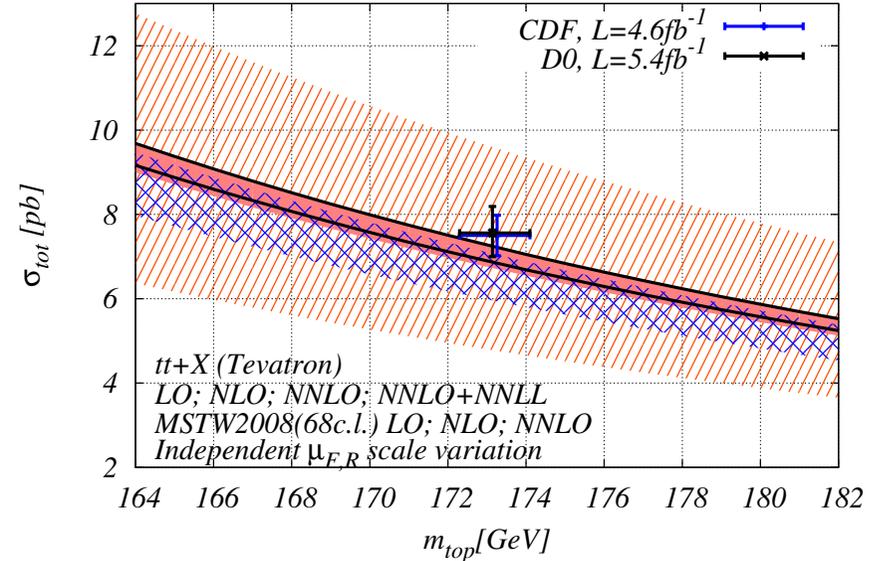
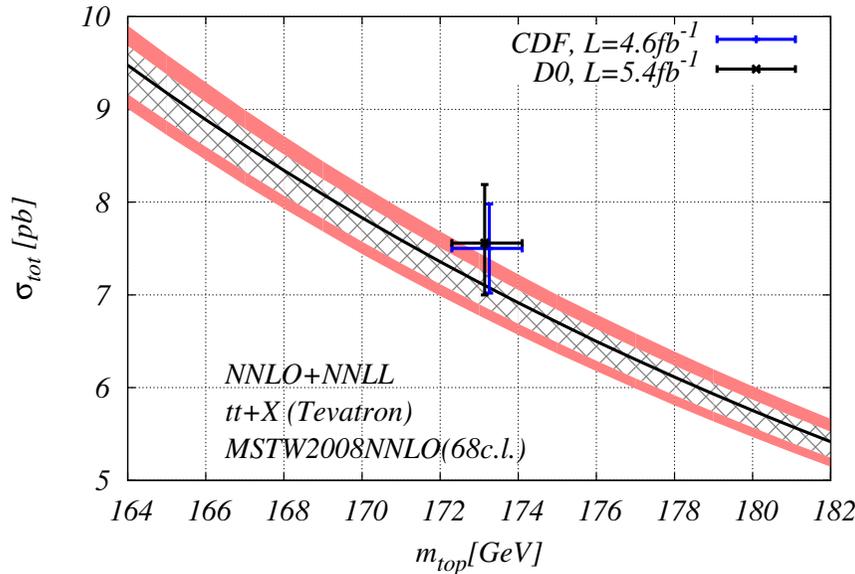
S.D., Uwer, Weinzierl '07,'08



Czakon '10,'11

Strategie:

- Endliche & singuläre Anteile (IR-Pole $1/\epsilon^4, \dots, 1/\epsilon$) **numerisch berechnet** ($D = 4 - 2\epsilon$)
- Check der singulären Anteile gegen bekannte Resultate
Bern et al. '99; Catani, Grazzini '00; Mitov, Sterman, Sung '09-'10;
Ferrogli et al. '09,'10; Bierenbaum, Czakon, Mitov '11
- Vergleich des Ergebnisses von $\hat{\sigma}_{\text{tot}}(\hat{s})$ mit bekannter Asymptotik für $\hat{s} \rightarrow 4m_t^2, \infty$
Czakon, Mitov, Moch '07; Czakon, Mitov, Moch '08; Beneke et al. '09



Unsicherheiten

- weißes Band: Skalenvariation
- rotes Band: Skalen+PDF-Variation

Skalenunsicherheit

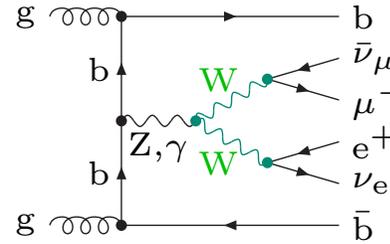
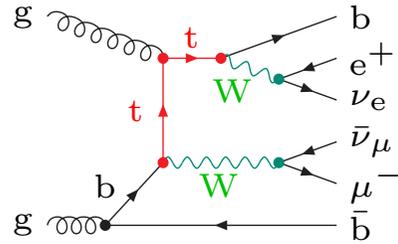
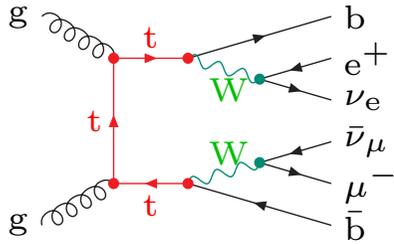
- orange: LO
- blau: NLO
- rot: NNLO

$$\text{NNLO}_{q\bar{q}} + \text{NNLO}_{g\bar{g}, \text{approx}} + \text{NNLL}: \quad \sigma_{\text{tot}} [\text{pb}] = 7.067 \begin{matrix} +0.143(2.0\%) \\ -0.232(3.3\%) \end{matrix} [\text{Skala}] \quad +0.186(2.6\%) \\ -0.122(1.7\%) [\text{PDF}]$$

↔ Jedes % zählt !

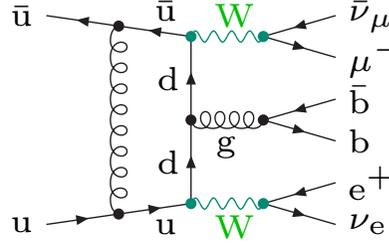
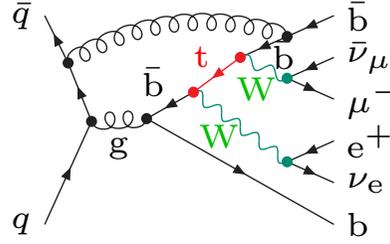
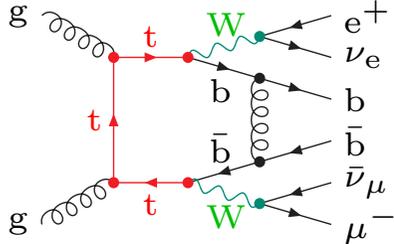
Zur Berechnung von $pp \rightarrow b\bar{b} + 2\ell 2\nu$ in NLO QCD

LO-Diagramme:



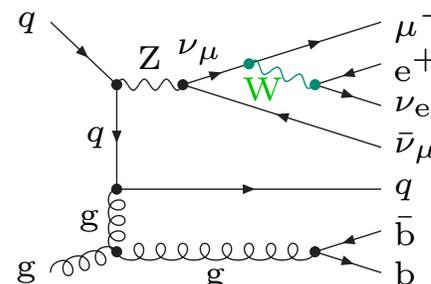
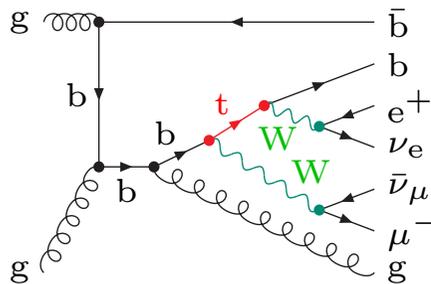
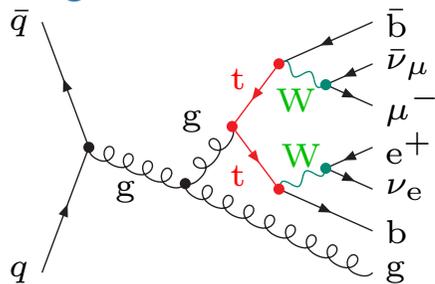
> 100 Diagramme

1-Loop-Diagramme:



> 1000 Diagramme
25 Hexagons
> 100 Pentagons

Diagramme für reelle NLO-Korrektur:



> 1000 Diagramme

Beachte: komplizierte Resonanz-Struktur !

0, 1, 2 Top-Resonanzen
1, 2 W-Resonanzen

$\left. \vphantom{\begin{matrix} 0, 1, 2 \text{ Top-Resonanzen} \\ 1, 2 \text{ W-Resonanzen} \end{matrix}} \right\} \rightarrow \text{“Complex-mass scheme”}$
Denner, S.D., Roth, Wieders '05

Zwei unabhängige Rechnungen – zwei unabhängige Methoden

- **diagrammatische Berechnung** Denner, S.D., Kallweit, Pozzorini '10,'12
 \hookrightarrow neuere Reduktionen von Tensor- auf Skalarintegrale
- **“OPP”-Reduktion** HELAC-NLO [Bevilacqua et al. '10]
 \hookrightarrow numerische Reduktion auf skalare Standardintegrale (“cut-inspiriert”)

Vergleich:

Kollider	Energie	σ_{LO} [fb]	σ_{LO} [fb]	σ_{NLO} [fb]	σ_{NLO} [fb]
		HELAC-NLO	DDKP	HELAC-NLO	DDKP
Tevatron	1.96 TeV	34.922(14)	34.921(5)	35.705(47)	35.850(45)
LHC	7 TeV	550.54(18)	550.29(7)	808.46(98)	806.0(1.0)
LHC	10 TeV	1394.72(75)	1394.6(2)	1993.3(2.5)	1984.6(3.4)
		$\Delta \sim 1\sigma < 0.1\%$		$\Delta \sim 2\sigma \sim 0.3-0.4\%$	

Gute Übereinstimmung

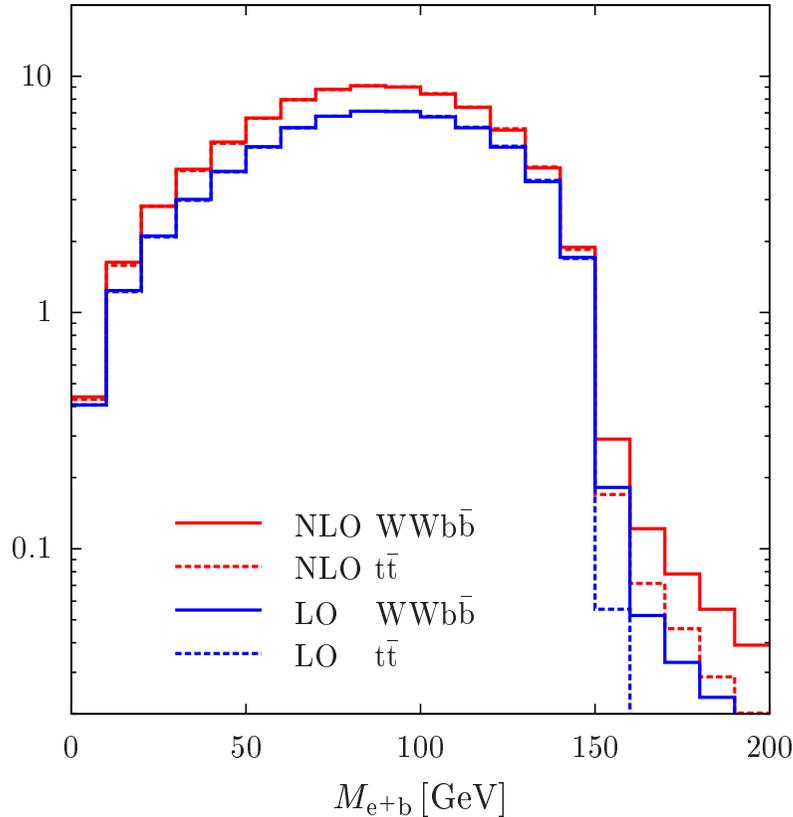
Offshell-Effekte des Top-Quarks in M_{e+b} -Verteilung

↪ wichtig für Präzisionsmessung von m_t

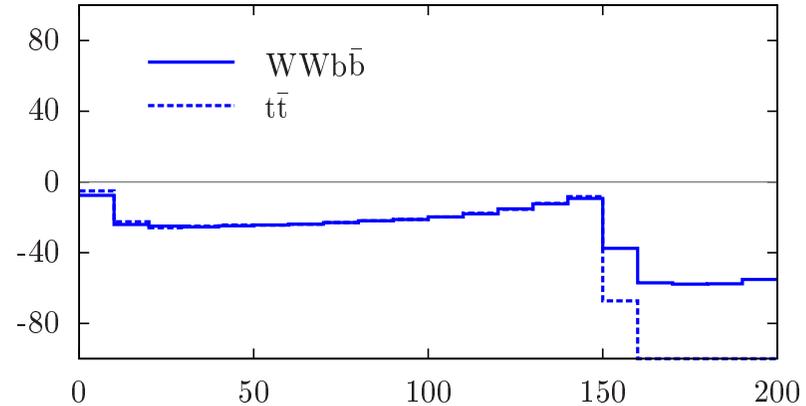
Denner, S.D., Kallweit, Pozzorini, Schulze
[arXiv:1203.6803]

$$\frac{d\sigma}{dM_{e+b}} \left[\frac{\text{fb}}{\text{GeV}} \right] \quad pp \rightarrow \nu_e e^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu b \bar{b} + X$$

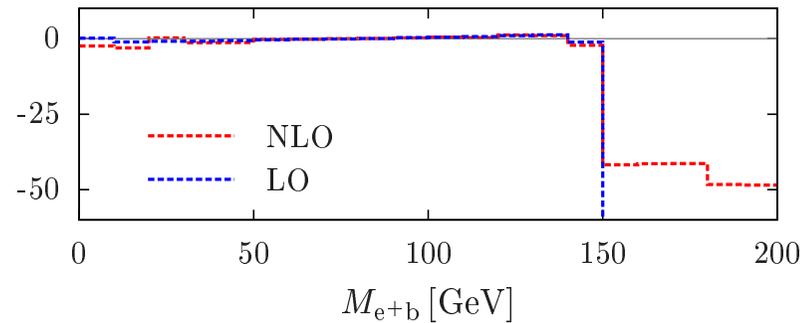
$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$



LO/NLO - 1 [%]



$t\bar{t}/WWb\bar{b} - 1$ [%]



- kinematische Kante für Onshell-Tops in LO: $M_{e+b} < \sqrt{m_t^2 - M_W^2} \sim 150 \text{ GeV}$
- Wq. und K -Faktor gut beschrieben durch NWA für $M_{e+b} \lesssim 150 \text{ GeV}$
- Top-Offshell-Effekte erreichen einige 10% für $M_{e+b} \gtrsim 150 \text{ GeV}$

Zusammenfassung



Präzisionsberechnungen für den LHC

... generell in gutem Zustand für SM-Prozesse

Paradebeispiel Higgs-Physik:

LHC Higgs XS Group koordiniert Bestandsaufnahme + Weiterentwicklung

... ermöglicht durch enorme Fortschritte in den letzten Jahren

- ◇ „NLO-Revolution“ → Prozesse mit ≥ 6 äußeren Teilchen
- ◇ Weiterentwicklung von NNLO-Techniken
↳ $\sigma_{\text{NNLO}}(q\bar{q} \rightarrow t\bar{t})$ komplett, $\sigma_{\text{NNLO}}(gg \rightarrow t\bar{t})$ kurz vor Abschluss (?)
- ◇ Verbesserte + neue Resummationskonzepte (z.B. SCET)
- ◇ Matching-Konzepte für Parton-Shower in NLO (MC@NLO, Powheg)

... bergen noch große Herausforderungen für die Zukunft

- ◇ Verfeinerungen von SM-Vorhersagen (höhere Ordnungen, Zerfälle, etc.)
↳ z.B. Hochpräzisionsphysik (M_W , $\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$, etc.)
- ◇ Anwendungsfeld: Higgs-Präzisionsphysik
↳ modellunabhängige Kopplungsanalysen, erweiterte Higgs-Sektoren, etc.
- ◇ Präzision für BSM-Physik = Schlüssel für kleine Abweichungen vom SM



Präzisionsberechnungen für den LHC

... generell in gutem Zustand für SM-Prozesse

Paradebeispiel Higgs-Physik:

LHC Higgs XS Group koordiniert Bestandsaufnahme + Weiterentwicklung

... ermöglicht durch enorme Fortschritte in den letzten Jahren

- ◇ „NLO-Revolution“ → Prozesse mit ≥ 6 äußeren Teilchen
- ◇ Weiterentwicklung von NNLO-Techniken
↪ $\sigma_{\text{NNLO}}(q\bar{q} \rightarrow t\bar{t})$ komplett, $\sigma_{\text{NNLO}}(gg \rightarrow t\bar{t})$ kurz vor Abschluss (?)
- ◇ Verbesserte + neue Resummationskonzepte (z.B. SCET)
- ◇ Matching-Konzepte für Parton-Shower in NLO (MC@NLO, Powheg)

... bergen noch große Herausforderungen für die Zukunft

- ◇ Verfeinerungen von SM-Vorhersagen (höhere Ordnungen, Zerfälle, etc.)
↪ z.B. Hochpräzisionsphysik (M_W , $\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$, etc.)
- ◇ Anwendungsfeld: Higgs-Präzisionsphysik
↪ modellunabhängige Kopplungsanalysen, erweiterte Higgs-Sektoren, etc.
- ◇ Präzision für BSM-Physik = Schlüssel für kleine Abweichungen vom SM

“In football as in watchmaking, talent and elegance mean nothing without rigour and precision.”
particle theory [Lionel Messi]

