

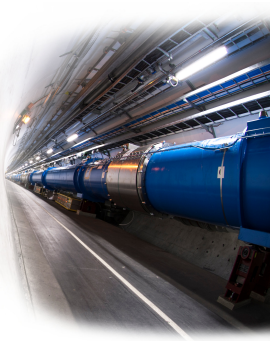


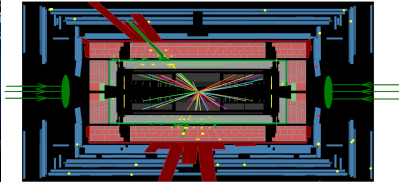
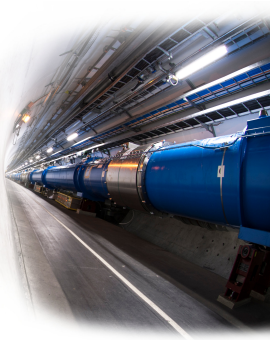
Mehr als reiner Zufall

Neue Entwicklungen in Monte Carlo-Ereignisgeneratoren für den LHC

Frank Siegert

4. März 2016, DPG-Frühjahrstagung, Hamburg

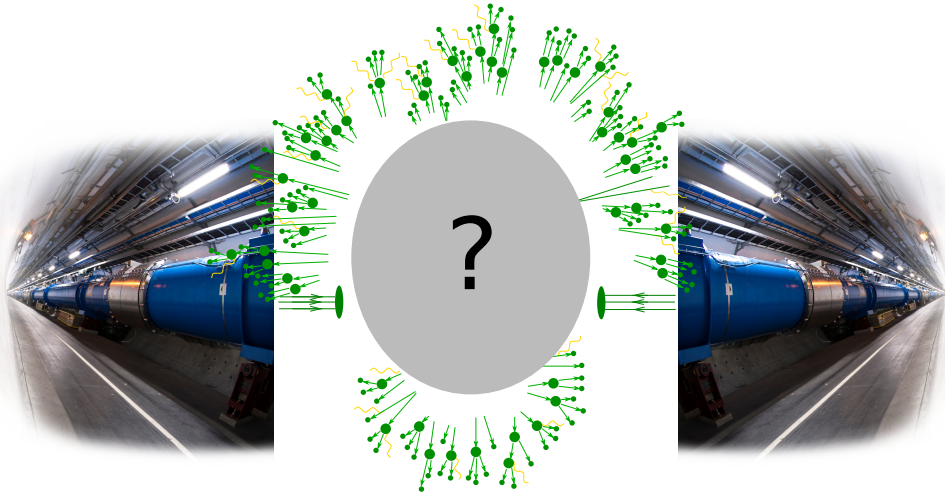




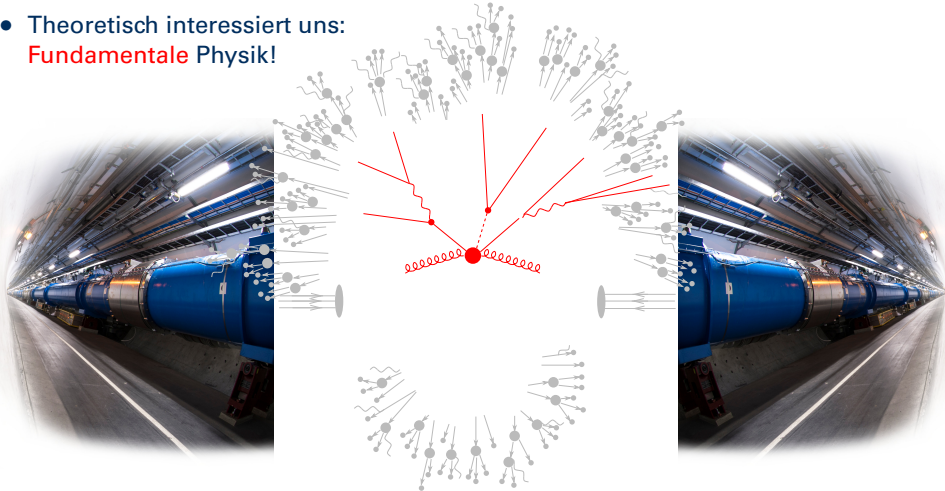
[ATLAS event display from 13 TeV collisions]



- Im Detektor messen wir:
stabile Hadronen

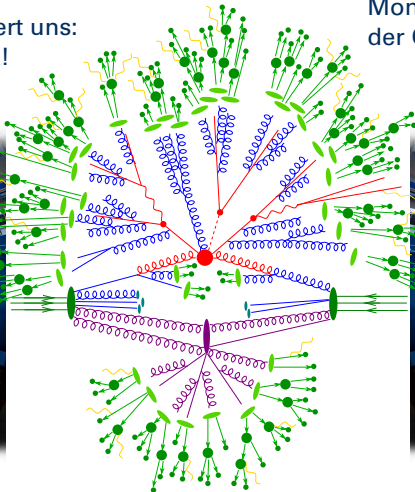


- Im Detektor messen wir:
stabile Hadronen
- Theoretisch interessiert uns:
Fundamentale Physik!



- Im Detektor messen wir:
stabile Hadronen
- Theoretisch interessiert uns:
Fundamentale Physik!

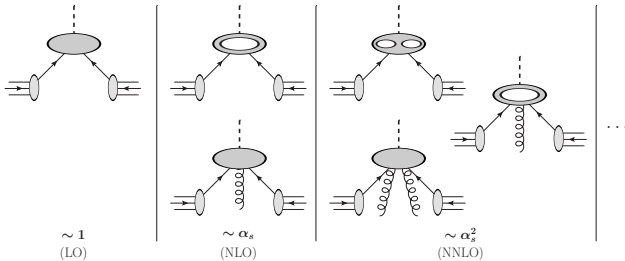
- Verbindung:
Monte Carlo-Simulation
der QCD-Dynamik



- Exakte Berechnung von QCD-Effekten nicht möglich

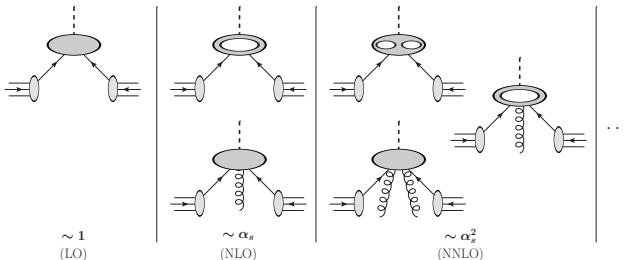


- Exakte Berechnung von QCD-Effekten nicht möglich
- Nur Störungsreihe in α_s :

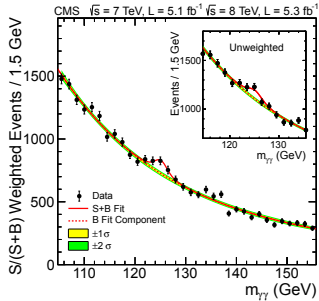




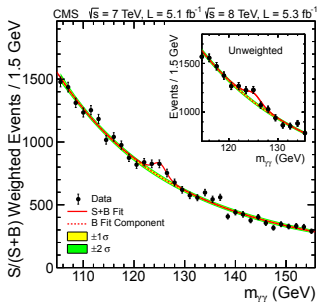
- Exakte Berechnung von QCD-Effekten nicht möglich
- Nur Störungsreihe in α_s :



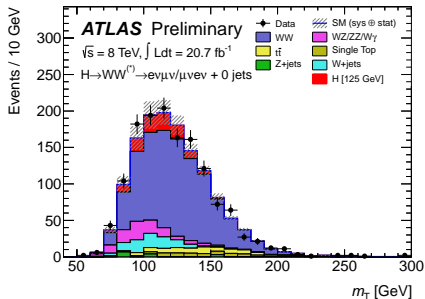
- Für Vorhersagen auf **Hadronenniveau**: Keine Konvergenz!
- Resummation der Reihe notwendig
- Enorme Komplexität!
 - Näherung: Resummiere nur universelle große Beiträge jeder Ordnung
- Konkret in unserem Fall: **Parton-Shower (PS)**
= QCD-Bremsstrahlung entsprechend der großen Beiträge



Präzision der
 Untergrundsimulation egal?



Präzision der
Untergrundsimulation egal?



Signal = 10%-Effekt \Rightarrow Präzise
Untergrundsimulation notwendig!

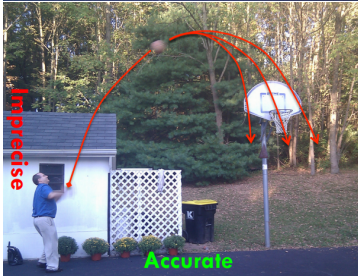
from Andre David



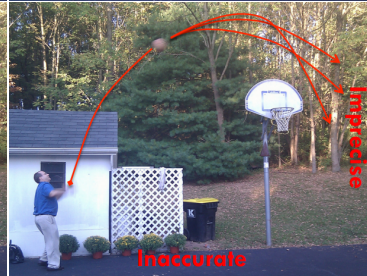
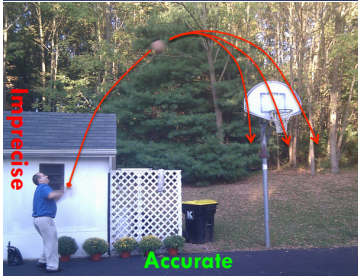
from Andre David

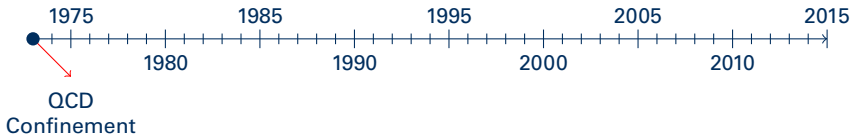


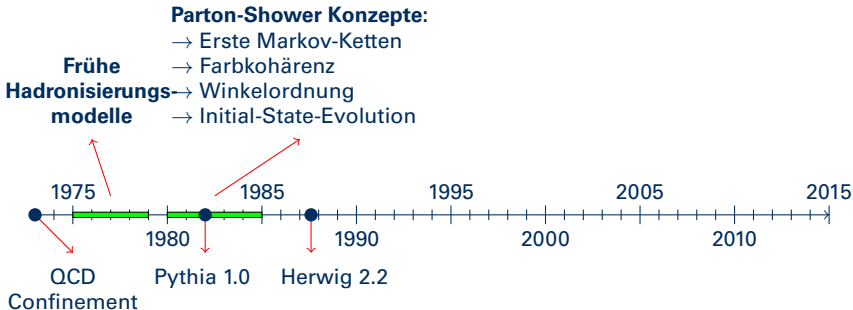
from Andre David

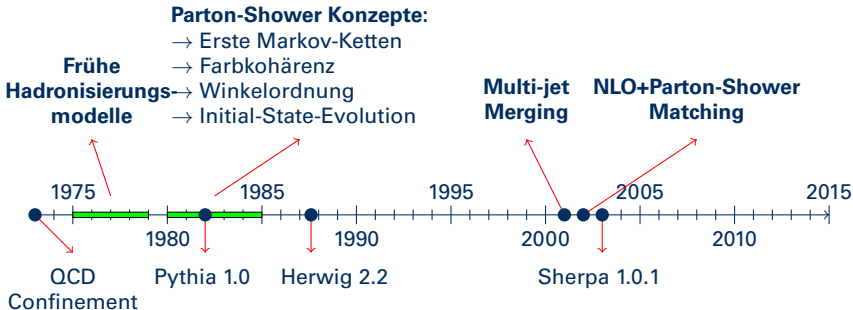


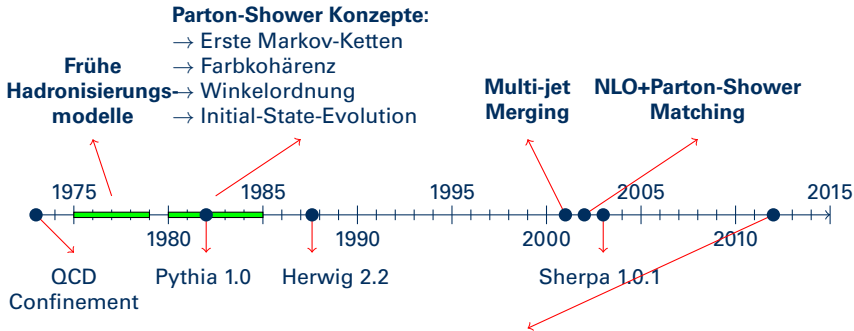
from Andre David



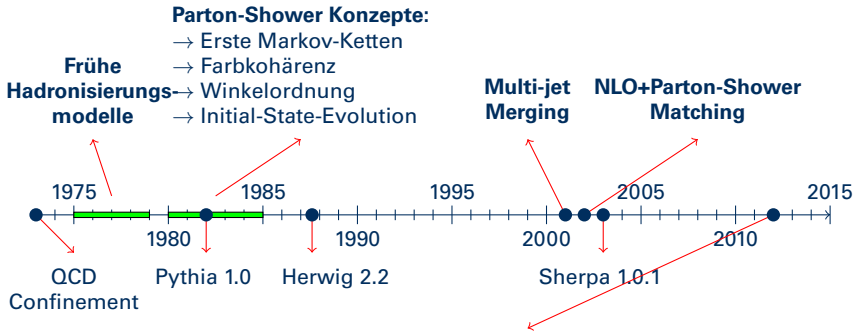








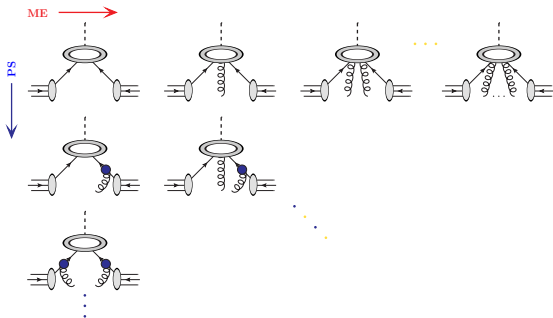
2012 – Das Jahr des Higgs



2012 – Das Jahr des Higgs Multi-Jet Merging auf NLO

- Lavesson, Lönnblad (2008)
- Höche, Krauss, Schönherr, FS (2012)
- Frederix, Frixione (2012)
- Plätzer (2012)
- Alioli, Bauer, Berggren, Hornig, Tackmann, Vermilion, Walsh, Zuberi (2012)
- Lönnblad, Prestel (2012)
- Hamilton, Nason, Oleari, Zanderighi (2012)

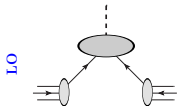
NLO-Genauigkeit für Multi-Jet-Observablen in **inklusive** Simulation:



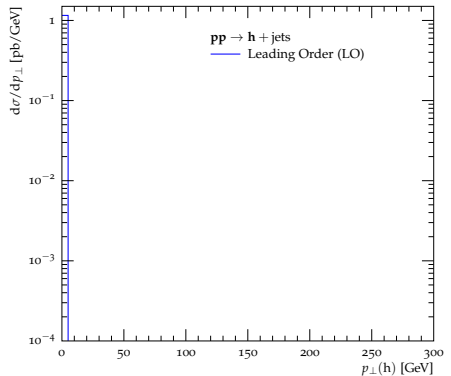
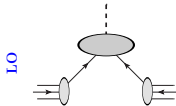
- Phasenraum der Jet-Emission aufgespalten, komplementär mit Matrixelement und Parton-Shower gefüllt
- Shower auf Multi-Parton-Konfigurationen ausgeführt → resummierte Verteilungen/Vetos

⇒ Jet-Produktion mit exakten Matrixelementen, Intrajet-Evolution mit Parton-Shower

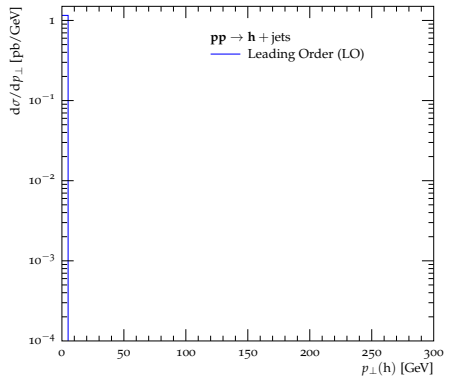
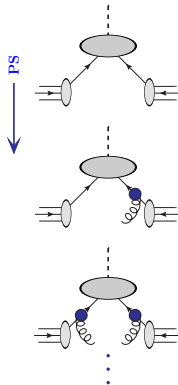
Parton-Shower-Visualisierung



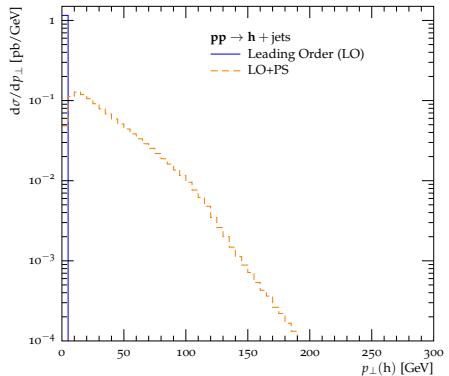
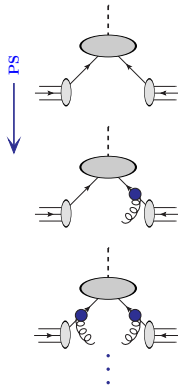
Parton-Shower-Visualisierung



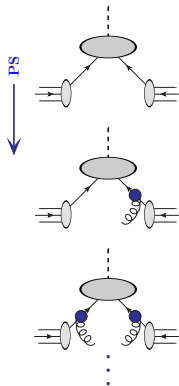
Parton-Shower-Visualisierung



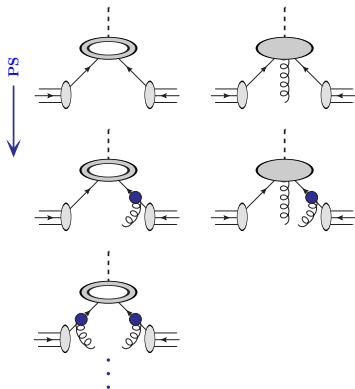
Parton-Shower-Visualisierung



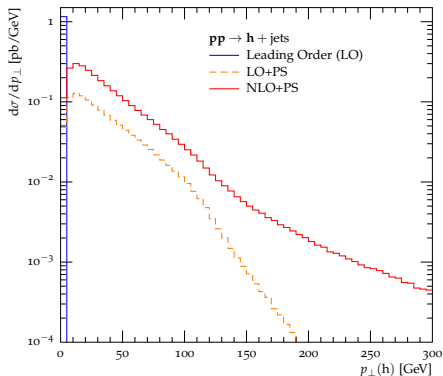
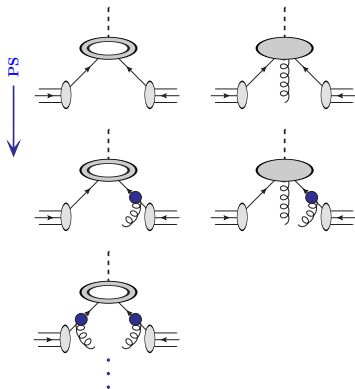
Erweiterung auf NLO-Genauigkeit



Erweiterung auf NLO-Genauigkeit

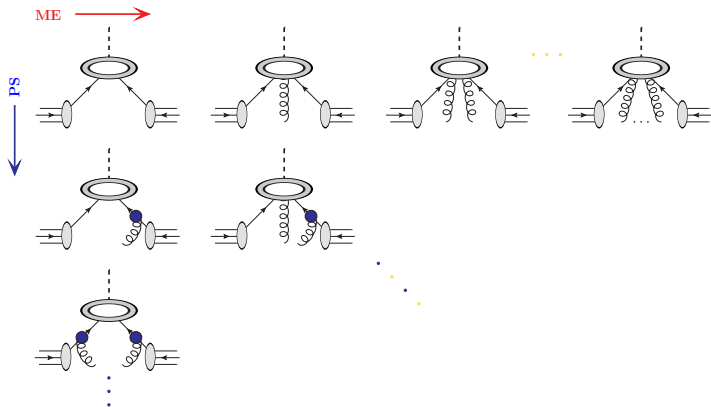


Erweiterung auf NLO-Genauigkeit

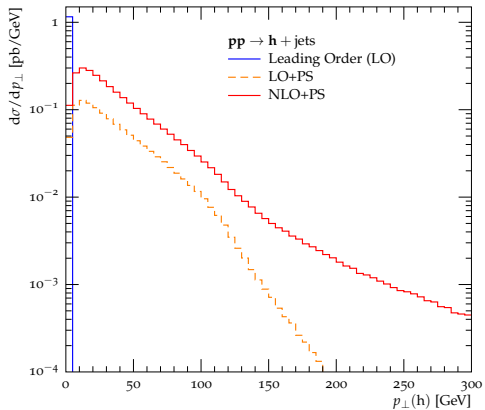


Fraxione, Webber (2002)

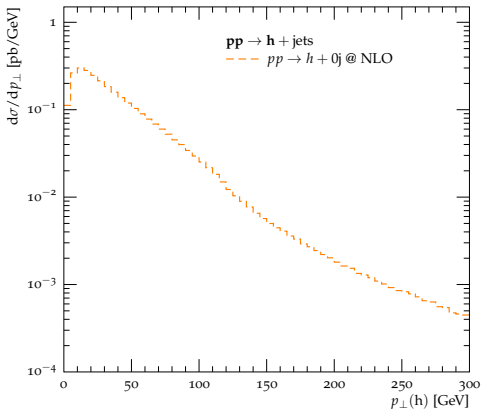
Multi-Jet Merging mit NLO-Genauigkeit



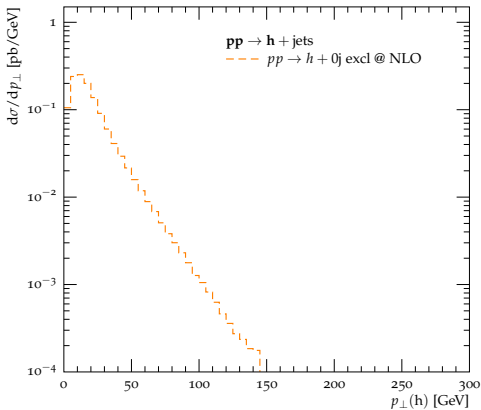
Multi-Jet Merging mit NLO-Genauigkeit



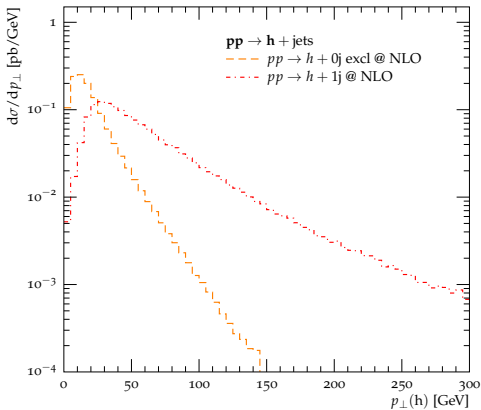
Multi-Jet Merging mit NLO-Genauigkeit



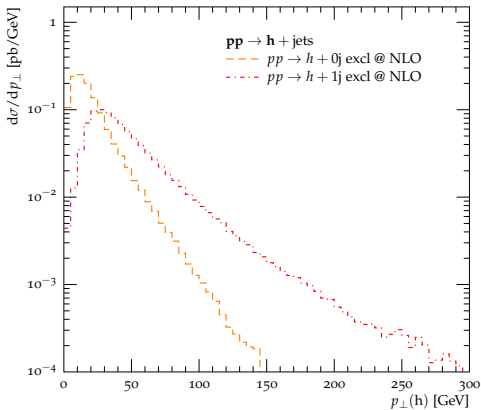
Multi-Jet Merging mit NLO-Genauigkeit



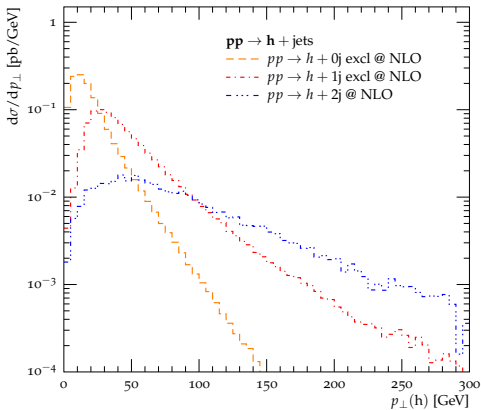
Multi-Jet Merging mit NLO-Genauigkeit



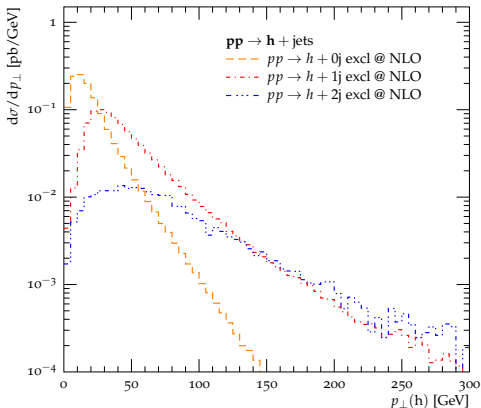
Multi-Jet Merging mit NLO-Genauigkeit



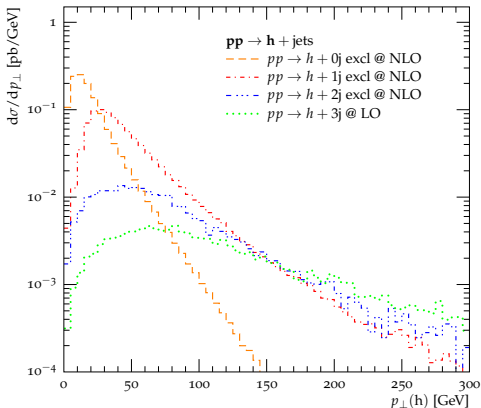
Multi-Jet Merging mit NLO-Genauigkeit



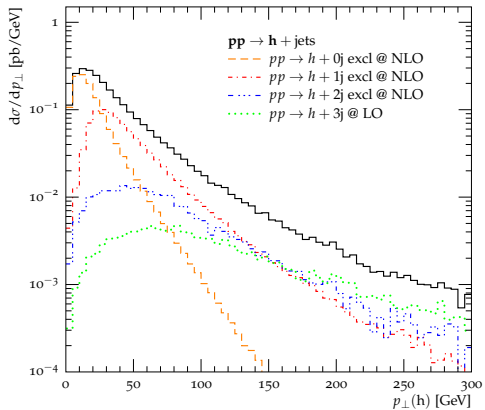
Multi-Jet Merging mit NLO-Genauigkeit



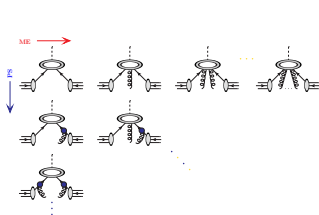
Multi-Jet Merging mit NLO-Genauigkeit



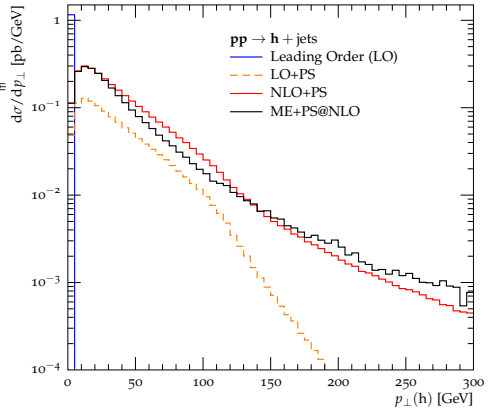
Multi-Jet Merging mit NLO-Genauigkeit



Multi-Jet Merging mit NLO-Genauigkeit

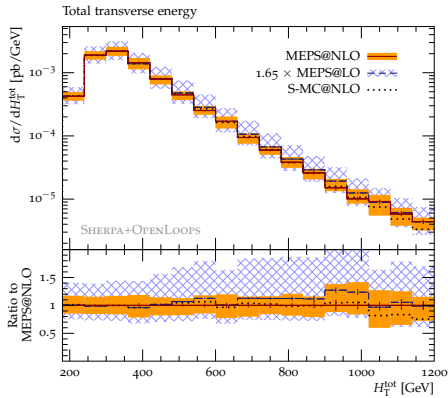


$pp \rightarrow h + \text{jets}$
Vorhersage
in höchster Präzision



Höche, Krauss, Maierhöfer, Pozzorini, Schönherr, FS (2014)

Top-Quark-Paarproduktion

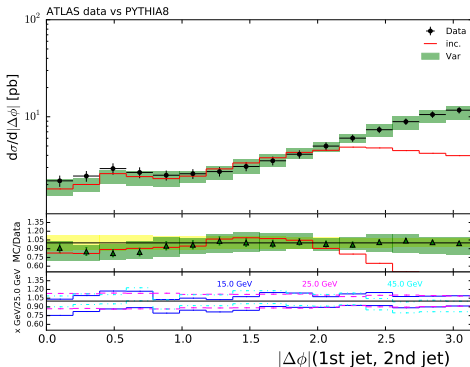


- Dominanter Untergrund für Suchen nach neuer Physik
- Relevant: $H_T^{\text{tot}} > 500$ GeV
→ Unsicherheiten von **80%** auf **20%** reduziert!

Frederix, Frixione, Papaefstathiou, Prestel, Torrielli (2015)

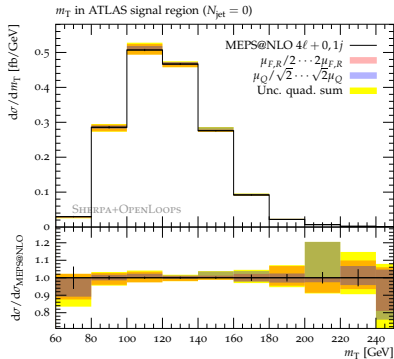
Vektorboson-Produktion

- Resultate von **MadGraph5_aMC@NLO + Pythia8(/Herwig++)**
- Vergleich mit **inklusive NLO+PS-Simulation** und **Daten**
- Variation der (unphysikalischen) Merging-Skala \rightarrow stabile Vorhersage



Vorhersagen als Untergrund für Higgsproduktion

- $pp \rightarrow l\nu l\nu + \text{jets}$ in Signalregionen der $H \rightarrow WW^*$ -Analysen:

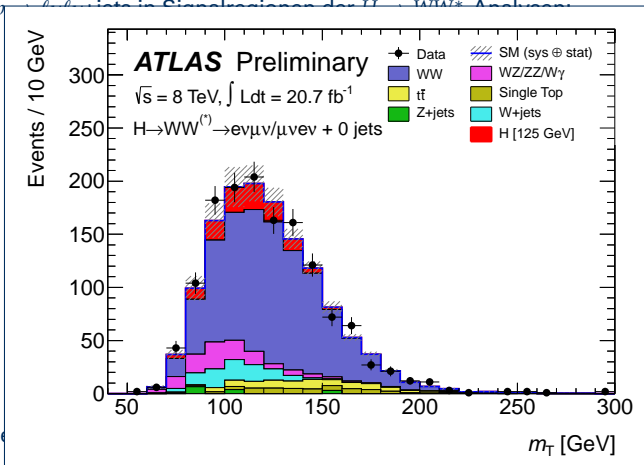


- Gesamt: $\approx 3\%$ Unsicherheit der MEPS@NLO-Vorhersage

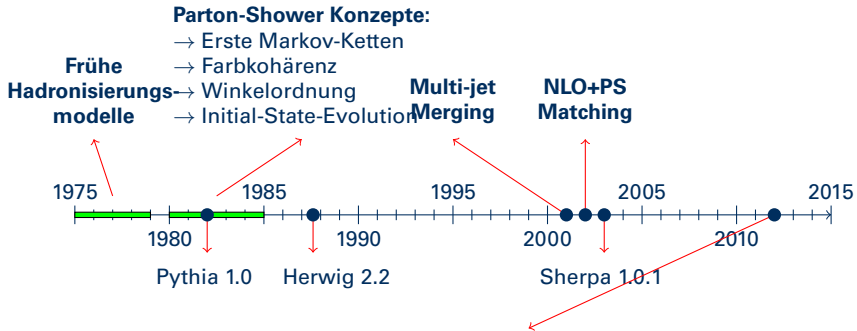
Cascioli, Höche, Krauss, Maierhöfer, Pozzorini, FS (2013)

Vorhersagen als Untergrund für Higgsproduktion

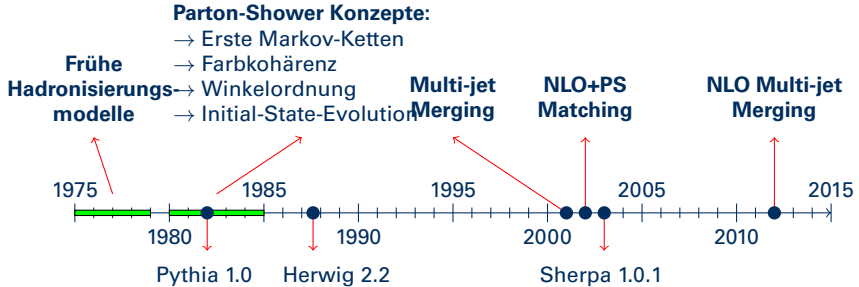
- $pp \rightarrow l\nu l\nu + \text{jets}$ in Signalregionen der $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ Analysen



- Ge



2012 – Das Jahr des Higgs Multi-Jet Merging auf NLO



Parton-Shower Konzepte:

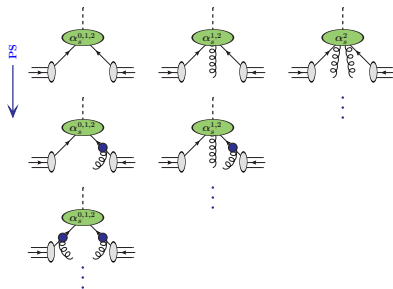
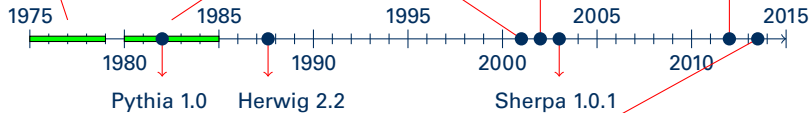
- Erste Markov-Ketten
- Farbkohärenz
- Winkelordnung
- Initial-State-Evolution

Frühe Hadronisierungs- modelle

Multi-jet Merging

NLO+PS Matching

NLO Multi-jet Merging



**Jenseits von NLO:
Parton-Shower mit
NNLO-Genauigkeit**

NNLO-Matching mit dem Parton-Shower

- NNLO-Präzision notwendig für Prozesse mit großem K -Faktor oder hoher experimenteller Genauigkeit

NNLOPS

Hamilton, Nason, Re, Zanderighi (2013)

- matching scheme based on **MinLO** method
 - use $pp \rightarrow X + j$ NLO+PS simulation
 - apply scale choice and Sudakov form factor (like in multi-jet merging)
- ⇒ **finite** for $p_{\perp}^j \rightarrow 0$
- reweight with fully-differential $pp \rightarrow X @$ NNLO

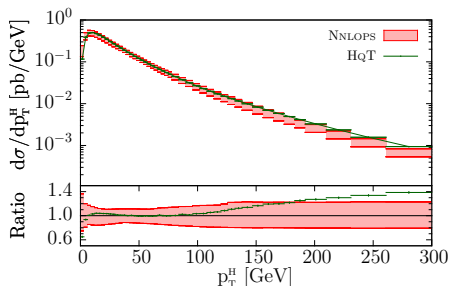
UN²LOPS

Höche, Li, Prestel (2014)

- matching scheme based on **unitarised merging method**
Lönnblad, Prestel (2012)
- dedicated NNLO calculation using q_T -cutoff subtraction

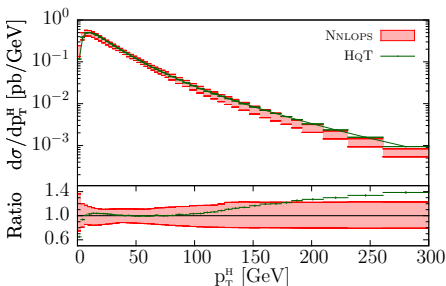
Higgs-Produktion in Gluon-Fusion

- NNLOPS-Vorhersagen
 - Hamilton, Nason, Re, Zanderighi (2013)
 - Hamilton, Nason, Zanderighi (2015)
- Vergleich mit analytischer Resummation in HqT (NNLL+NLO)



Higgs-Produktion in Gluon-Fusion

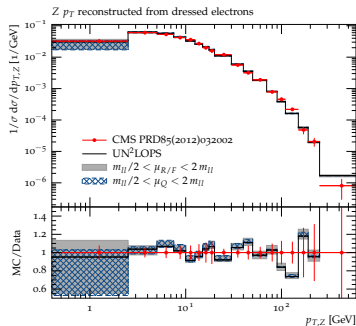
- NNLOPS-Vorhersagen
Hamilton, Nason, Re, Zanderighi (2013)
Hamilton, Nason, Zanderighi (2015)
- Vergleich mit analytischer Resummation in HqT (NNLL+NLO)



Vektorboson-Produktion

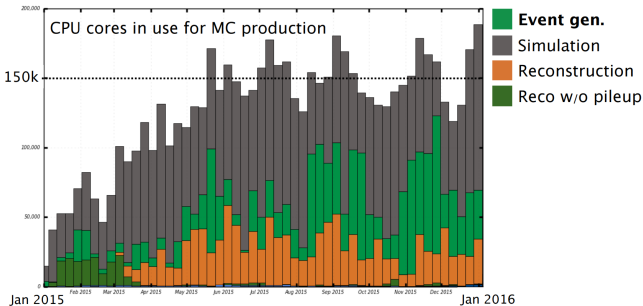
- UN²LOPS-Vorhersagen
Höche, Li, Prestel (2014)

→ Vergleich mit experimentellen Daten

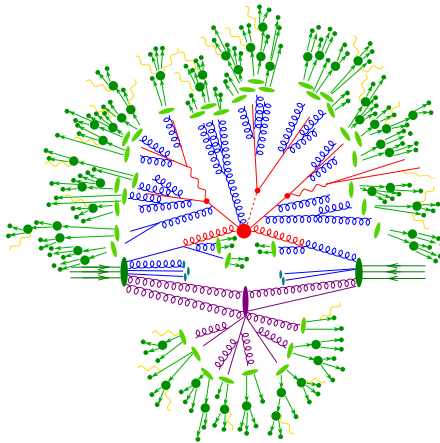


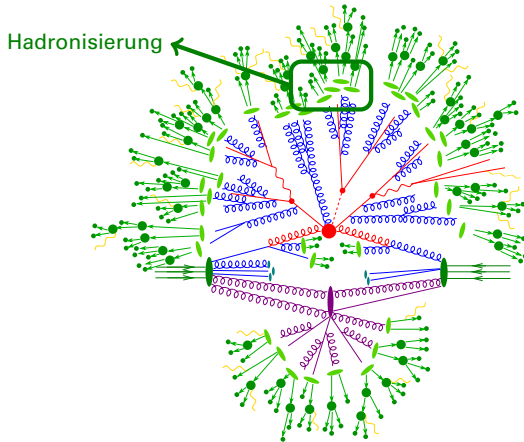
Neue Herausforderungen

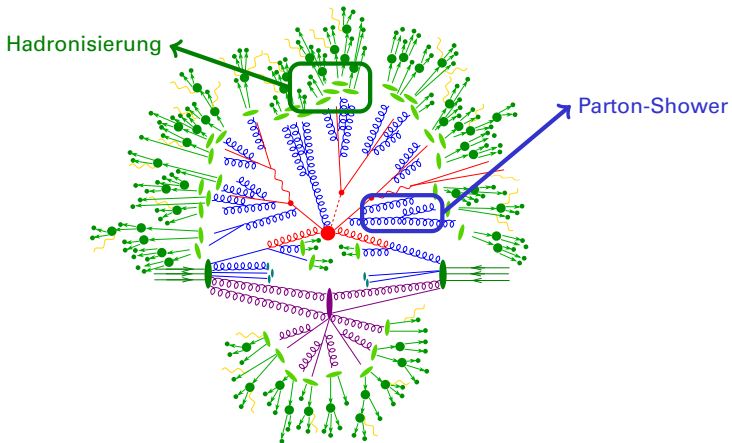
Josh McFayden, ATLAS (2016)

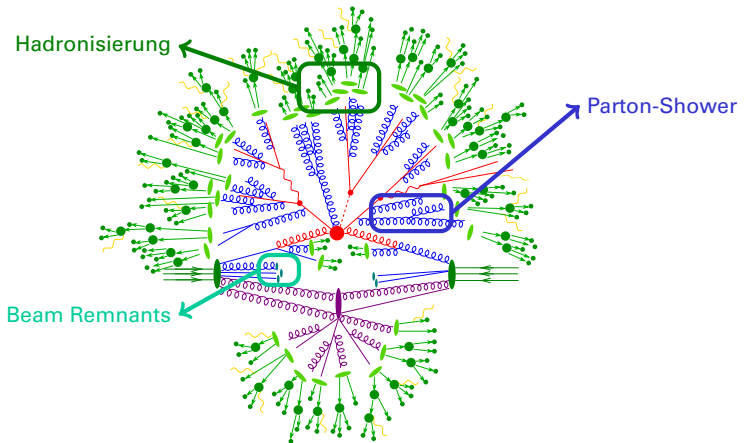


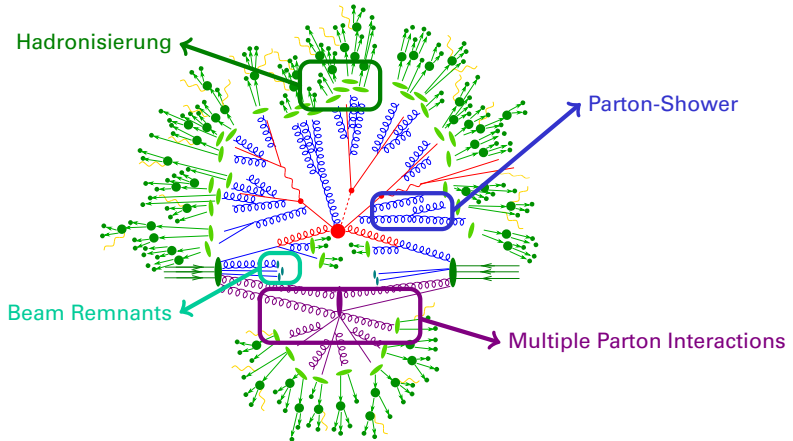
- CPU-intensive Rechnungen: Multiparton-Matrixelemente @ NLO
- Negative Gewichte aus NLO-Subtraktion
⇒ effektiv schlechtere Statistik











- **Pile-up Simulation**

- mehrere *simultane pp*-Interaktionen in einem Crossing:
Modellierung sehr inklusiver inelastischer Kollisionen
- Tuning auf Daten mit sehr inklusivem Trigger (“Minimum Bias”)

- **Pile-up Simulation**

- mehrere *simultane pp -Interaktionen* in einem Crossing:
Modellierung sehr inklusiver inelastischer Kollisionen
- Tuning auf Daten mit sehr inklusivem Trigger (“*Minimum Bias*”)

- **Kalibration**

- z.B. in *Jet-* oder τ -Identifikation und Rekonstruktion

- **Pile-up Simulation**

- mehrere *simultane pp-Interaktionen* in einem Crossing:
Modellierung sehr inklusiver inelastischer Kollisionen
- Tuning auf Daten mit sehr inklusivem Trigger (“Minimum Bias”)

- **Kalibration**

- z.B. in *Jet-* oder τ -Identifikation und Rekonstruktion

- **Unfolding**

- Korrektur von Detektoreffekten aus Messungen
- *Abhängigkeit vom MC-Modell* normalerweise klein, aber Teil der systematischen Unsicherheiten → Bedarf zuverlässiger Tunes

- **Pile-up Simulation**
 - mehrere *simultane pp-Interaktionen* in einem Crossing:
Modellierung sehr inklusiver inelastischer Kollisionen
 - Tuning auf Daten mit sehr inklusivem Trigger (“Minimum Bias”)
- **Kalibration**
 - z.B. in *Jet-* oder τ -Identifikation und Rekonstruktion
- **Unfolding**
 - Korrektur von Detektoreffekten aus Messungen
 - *Abhängigkeit vom MC-Modell* normalerweise klein, aber Teil der systematischen Unsicherheiten → Bedarf zuverlässiger Tunes
- **Untergundabschätzung**
 - Analysen subtrahieren Untergründe entweder *direkt aus MC* oder aus *Extrapolation mit Hilfe von MC*
 - Heikel: Tuning notwendig für Präzisionsmessungen/Entdeckungen?
Nur nicht-perturbative Aspekte, um Bias zu vermeiden!

Mammutaufgabe

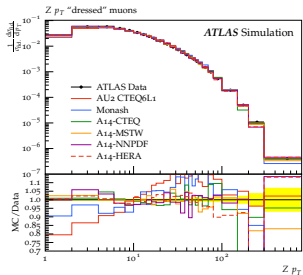
- **Simultanes** Tuning von Multiple Parton Interactions (MPI) und Parton-Shower in Pythia8 \Rightarrow 10 Parameter!

Parameter	Definition	Sampling range
<code>SigmaProcess:alphaSvalue</code>	The α_S value at scale $Q^2 = M_Z^2$	0.12 – 0.15
<code>SpaceShower:pT0Ref</code>	ISR p_T cutoff	0.75 – 2.5
<code>SpaceShower:pTmaxFudge</code>	Mult. factor on max ISR evolution scale	0.5 – 1.5
<code>SpaceShower:pTdampFudge</code>	Factorisation/renorm scale damping	1.0 – 1.5
<code>SpaceShower:alphaSvalue</code>	ISR α_S	0.10 – 0.15
<code>TimeShower:alphaSvalue</code>	FSR α_S	0.10 – 0.15
<code>BeamRemnants:primordialKThard</code>	Hard interaction primordial k_\perp	1.5 – 2.0
<code>MultipartonInteractions:pT0Ref</code>	MPI p_T cutoff	1.5 – 3.0
<code>MultipartonInteractions:alphaSvalue</code>	MPI α_S	0.10 – 0.15
<code>BeamRemnants:reconnectRange</code>	CR strength	1.0 – 10.0

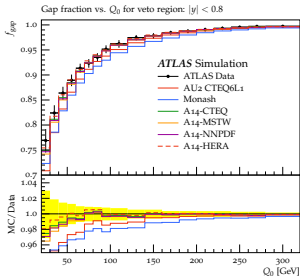
- Umfangreicher Input aus ATLAS-Messungen:
 - Underlying Event
 - Jet-Substruktur
 - Jet-Produktion
- Separate Tunes für 4 verschiedene PDFs

Simultan verbesserte Beschreibung von:

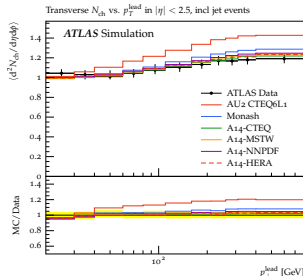
Z-Produktion



$t\bar{t}$ -Produktion



Underlying Event



Zusammenfassung

- Monte Carlo-Ereignisgeneratoren sind
 - im Experiment unverzichtbar
 - und State-of-the-art Theorievorhersagen.

Ausblick

Viele weitere aktuelle Entwicklungen heute nicht diskutiert:

- Elektroschwache Korrekturen
→ Stefano Pozzorinis Vortrag heute Morgen
- Anwendungen in BSM-Prozessen
- Verbesserung der Resummationsgenauigkeit des Showers
→ erste Schritte (VINCIA, DIRE, ...)

Zusammenfassung

- Monte Carlo-Ereignisgeneratoren sind
 - im Experiment unverzichtbar
 - und State-of-the-art Theorievorhersagen.

Ausblick

Viele weitere aktuelle Entwicklungen heute nicht diskutiert:

- Elektroschwache Korrekturen
→ Stefano Pozzorinis Vortrag heute Morgen
- Anwendungen in BSM-Prozessen
- Verbesserung der Resummationsgenauigkeit des Showers
→ erste Schritte (VINCIA, DIRE, ...)

Thank You!