



# Präzisionsmessungen des Top Quark Paarproduktionswechselwirkungsquerschnittes im semileptonischen Zerfallskanal mit dem ATLAS Experiment

CERN-THESIS-2012-043, mostly based on ATLAS-CONF-2011-035, Phys. Lett. B711 (2012) p.244-263, ATLAS-CONF-2011-121

Anna Henrichs

(Yale University & Georg-August-Universität Göttingen)

Dissertationspreiskolloquium

Dresden, 04.März 2013

- ★ hier vorgestellte Analysen & Ergebnisse sind publiziert in ATLAS-CONF-2011-035, Phys. Lett. B711(2012) p. 244-263, ATLAS-CONF-2011-121
- ★ nicht alle Histogramme sind in diesen Veröffentlichungen enthalten (aber in CERN-THESIS-2012-043) - mit “ATLAS work in progress” gekennzeichnet
- ★ alle Analysen und Ergebnisse basieren auf der Arbeit der gesamten ATLAS Kollaboration & dem wissenschaftlichen Austausch dort

## ★ Wo?

- ★ ATLAS & der LHC

## ★ Warum?

- ★ Top Physik & das Standardmodell

## ★ Was?

- ★ Objekte & Prozesse

## ★ Wie?

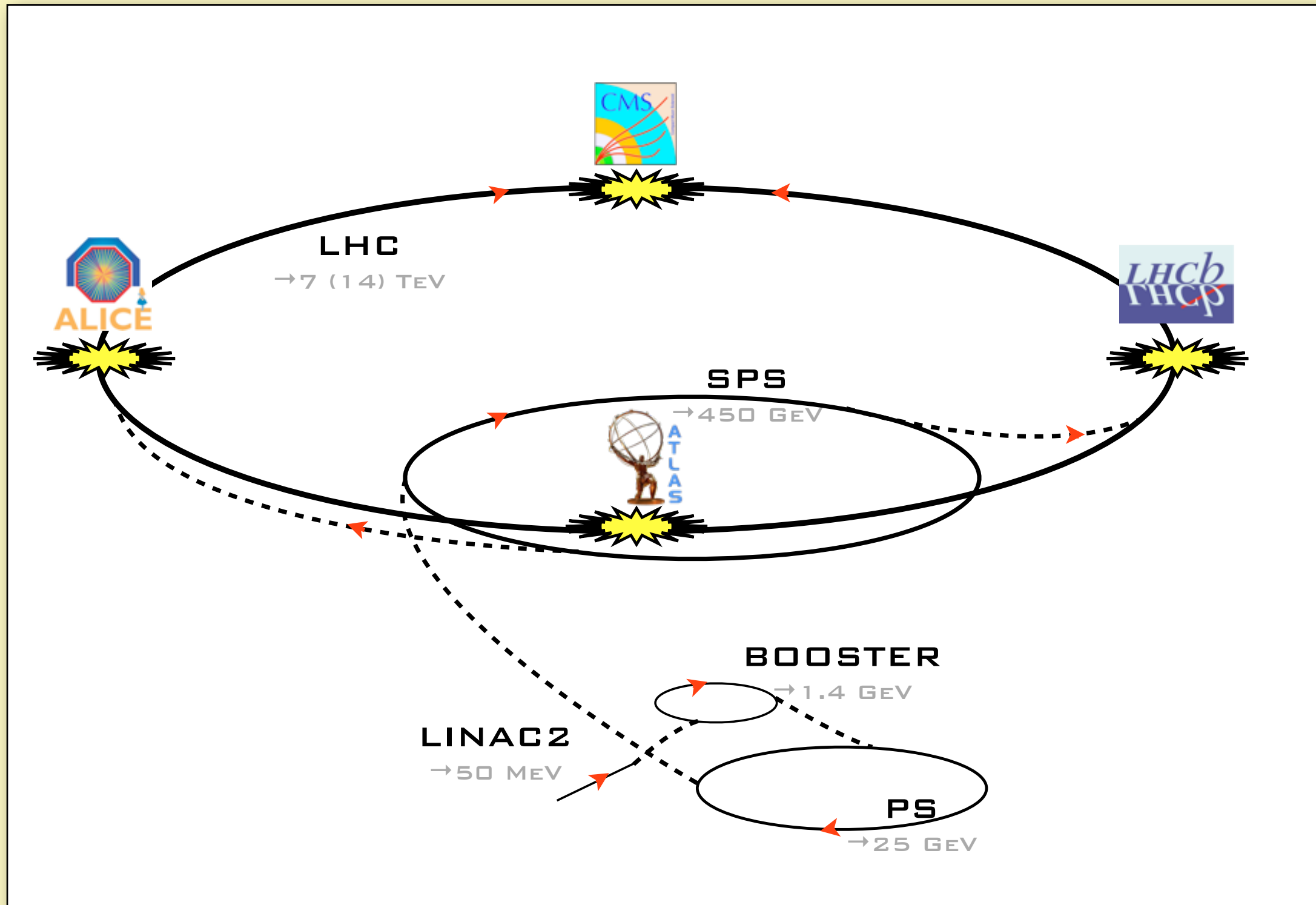
- ★ Analysestrategie

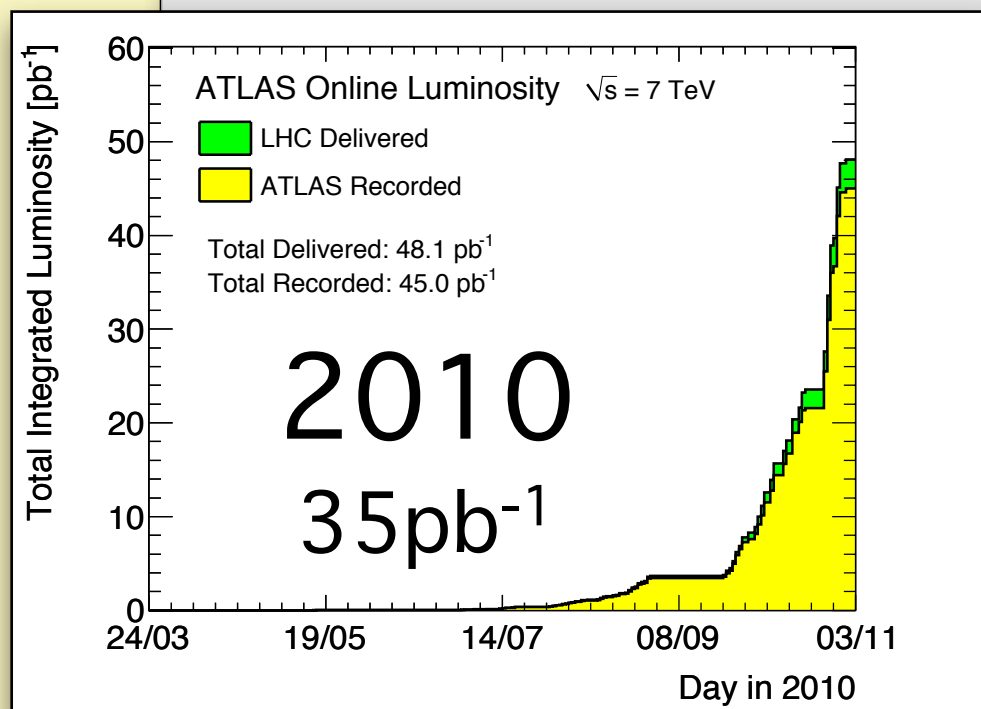
## ★ Messungen in Daten aus 2010 und 2011

## ★ Ausblick

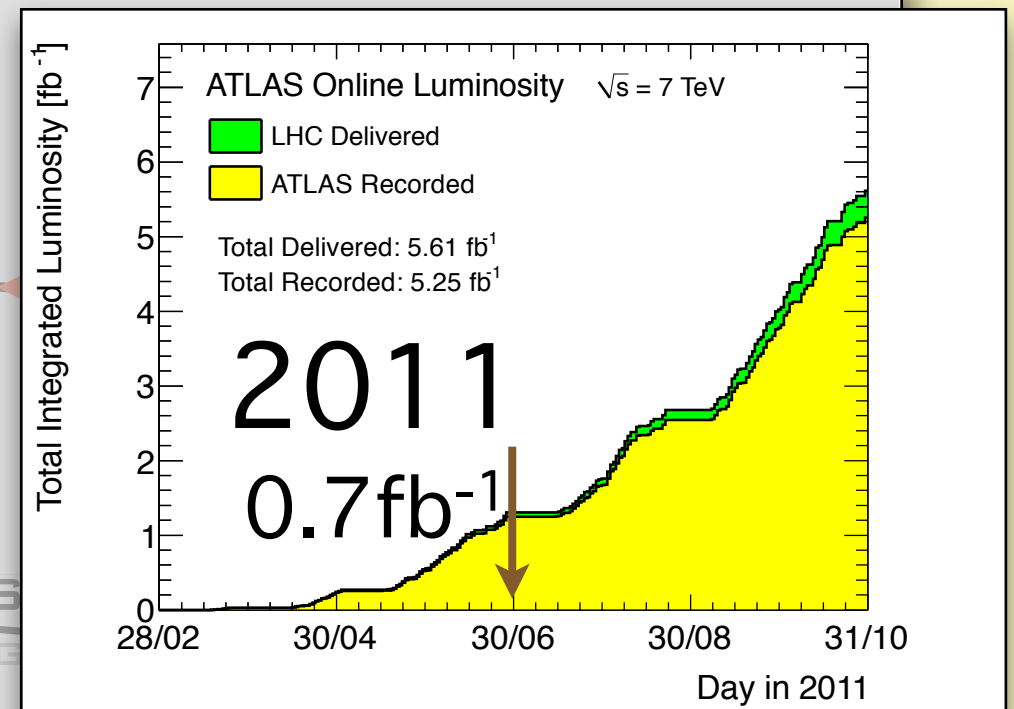
## ★ Zusammenfassung

# Der Large Hadron Collider (LHC)

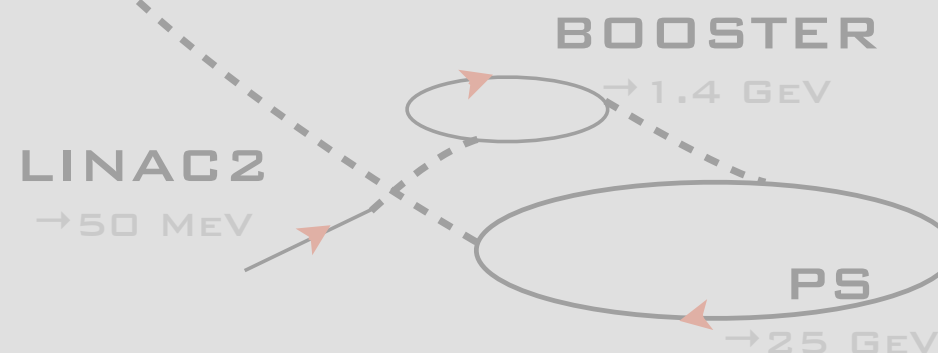




<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResults>

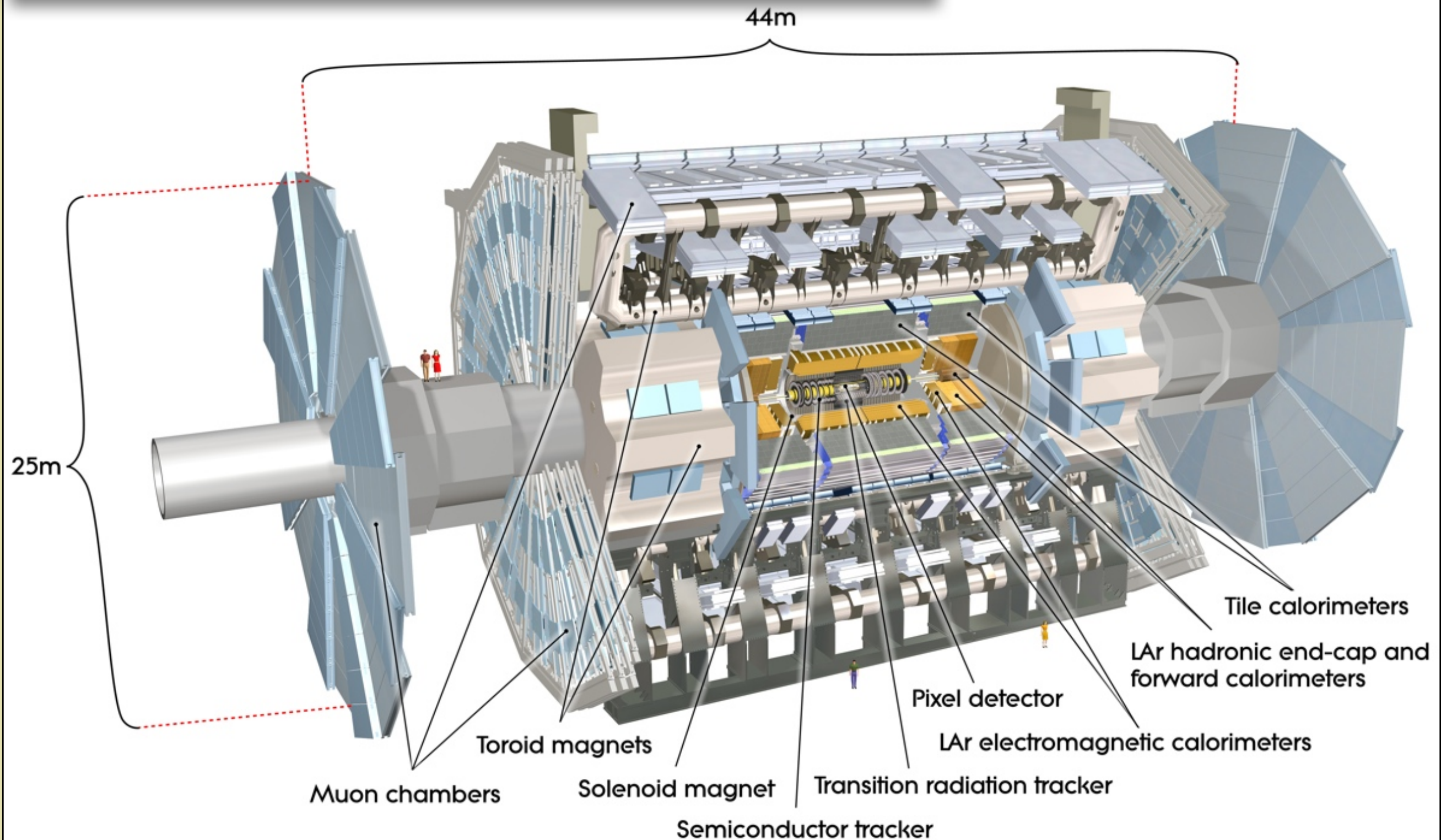


<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResults>



# Das ATLAS Experiment

Top Quark Physik benötigt alle Teile des Detektors!



## ★ Wo?

- ★ ATLAS & der LHC

## ★ Warum?

- ★ Top Physik & das Standardmodell

## ★ Was?

- ★ Objekte & Prozesse

## ★ Wie?

- ★ Analysestrategie

## ★ Messungen in Daten aus 2010 und 2011

## ★ Ausblick

## ★ Zusammenfassung

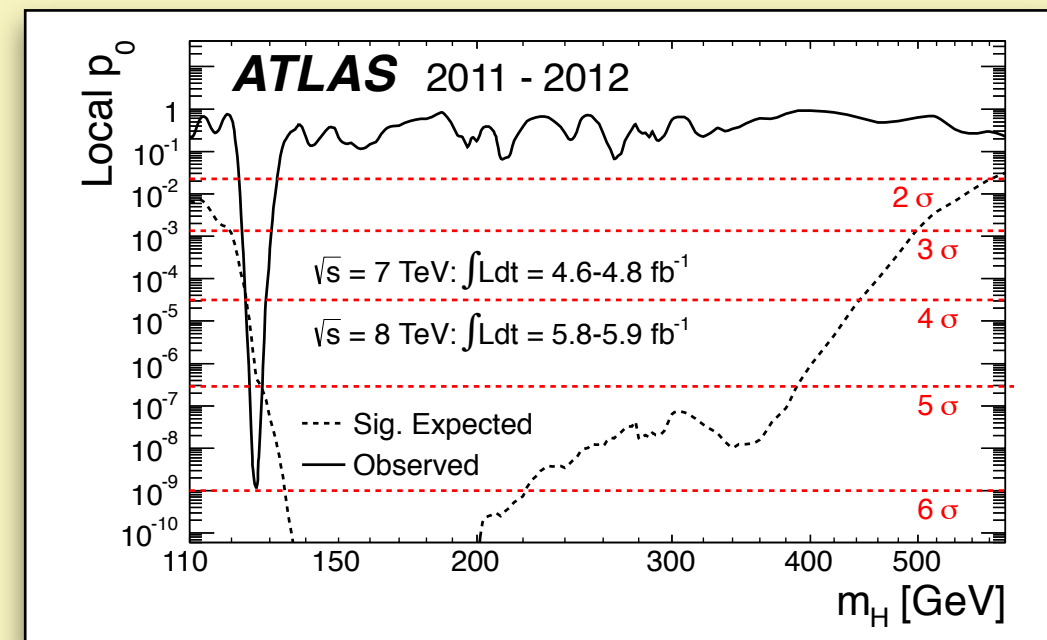


- 
- Three Generations of Matter (Fermions)
- |                | I                                         | II                                    | III                                  |                                 |
|----------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| mass →         | 2.4 MeV/c <sup>2</sup>                    | 1.27 GeV/c <sup>2</sup>               | 171.2 GeV/c <sup>2</sup>             | 0                               |
| charge →       | $\frac{2}{3}$                             | $\frac{2}{3}$                         | $\frac{2}{3}$                        | 0                               |
| spin →         | $\frac{1}{2}$                             | $\frac{1}{2}$                         | $\frac{1}{2}$                        | 1                               |
| name →         | <b>u</b><br>up                            | <b>c</b><br>charm                     | <b>t</b><br>top                      | <b>γ</b><br>photon              |
|                | 4.8 MeV/c <sup>2</sup>                    | 104 MeV/c <sup>2</sup>                | 4.2 GeV/c <sup>2</sup>               | 0                               |
|                | $-\frac{1}{3}$                            | $-\frac{1}{3}$                        | $-\frac{1}{3}$                       | 0                               |
|                | $\frac{1}{2}$                             | $\frac{1}{2}$                         | $\frac{1}{2}$                        | 1                               |
| <b>Quarks</b>  | <b>d</b><br>down                          | <b>s</b><br>strange                   | <b>b</b><br>bottom                   | <b>g</b><br>gluon               |
|                | <2.2 eV/c <sup>2</sup>                    | <0.17 MeV/c <sup>2</sup>              | <15.5 MeV/c <sup>2</sup>             | 91.2 GeV/c <sup>2</sup>         |
|                | 0                                         | 0                                     | 0                                    | 0                               |
|                | $\frac{1}{2}$                             | $\frac{1}{2}$                         | $\frac{1}{2}$                        | 1                               |
|                | <b>ν<sub>e</sub></b><br>electron neutrino | <b>ν<sub>μ</sub></b><br>muon neutrino | <b>ν<sub>τ</sub></b><br>tau neutrino | <b>Z<sup>0</sup></b><br>Z boson |
|                | 0.511 MeV/c <sup>2</sup>                  | 105.7 MeV/c <sup>2</sup>              | 1.777 GeV/c <sup>2</sup>             | 80.4 GeV/c <sup>2</sup>         |
|                | -1                                        | -1                                    | -1                                   | ±1                              |
|                | $\frac{1}{2}$                             | $\frac{1}{2}$                         | $\frac{1}{2}$                        | 1                               |
| <b>Leptons</b> | <b>e</b><br>electron                      | <b>μ</b><br>muon                      | <b>τ</b><br>tau                      | <b>W<sup>±</sup></b><br>W boson |
|                |                                           |                                       |                                      | <b>Gauge Bosons</b>             |

- ★ experimentell extrem gut getestet

- ★ aber:

- ★ Woher kommt Masse der Teilchen?  
Higgs-Mechanismus - Entdeckung eines Higgs-ähnlichen Teilchens im Juni 2012 durch CMS & ATLAS



Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29

- ★ experimentell extrem gut getestet
- ★ aber:
  - ★ Woher kommt Masse der Teilchen?  
Higgs-Mechanismus - gerade entdeckt?!
  - ★ keine Vereinheitlichung der Kräfte möglich
  - ★ keine Gravitation
  - ★ kein Modell für dunkle Materie
  - ★ ...
- ★ Erwartung: Higgs & neue Physik am LHC!
  - ★ Higgs: ✓ (SM Higgs?)
  - ★ sonstige “neue” Physik?

# Das Top Quark

- ★ schwerstes Elementarteilchen
- ★ sehr kurze Lebensdauer
- ★ zerfällt vor Hadronisation
- ★ daher Zugriff auf „freies Quark“ durch Zerfallsprodukte
- ★ starke Kopplung an Higgs-Boson ( $G_f \approx 1$ )



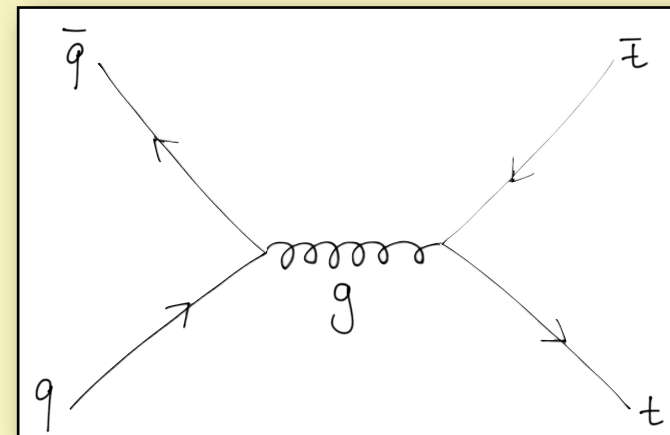
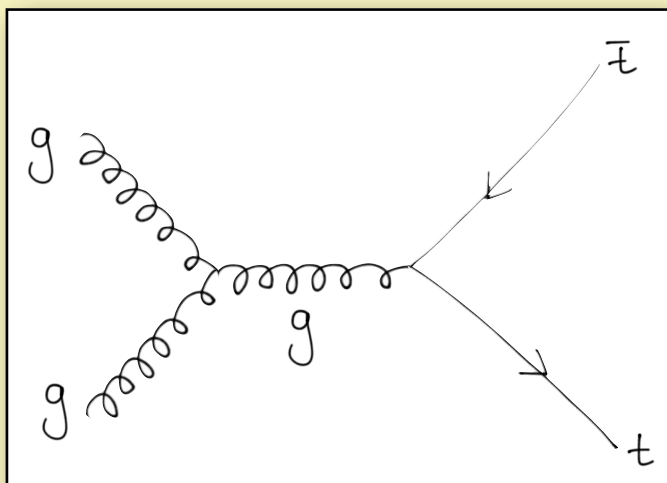
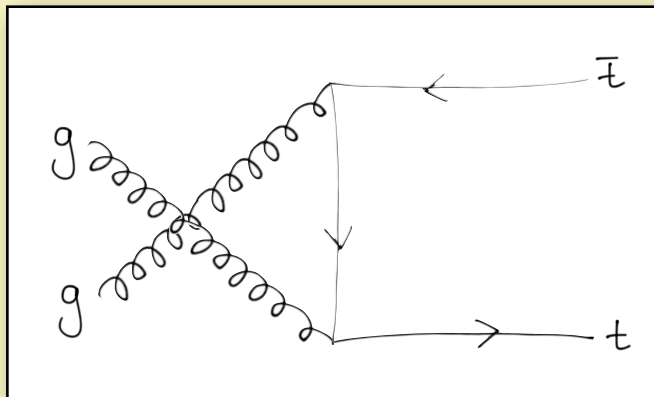
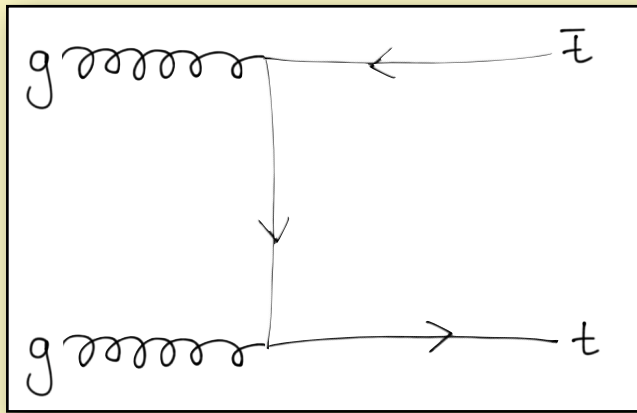


- 
- History of the Top Quark Mass Measurements**
- Status März 2012
- Top Quark Mass ( $\text{GeV}/c^2$ )
- Year
- Legend:
- from the EW fits
  - $e^+e^-$  colliders limit
  - hadron colliders limit
  - CDF Run 1
  - DØ Run 1
  - Run 1 world average
  - CDF Run 2 best measurement
  - DØ Run 2 best measurement
  - Atlas best measurement
  - CMS best measurement
- The plot shows the top quark mass measurements from 1988 to 2012. The y-axis represents the top quark mass in  $\text{GeV}/c^2$ , ranging from 0 to 250. The x-axis represents the year, ranging from 1988 to 2012. The data points are categorized by experiment and measurement type, as indicated in the legend. The plot shows a general trend of decreasing uncertainty and increasing precision over time, with the mass value converging around 173  $\text{GeV}/c^2$  by 2012.

12

# Top Quark Paar Produktion

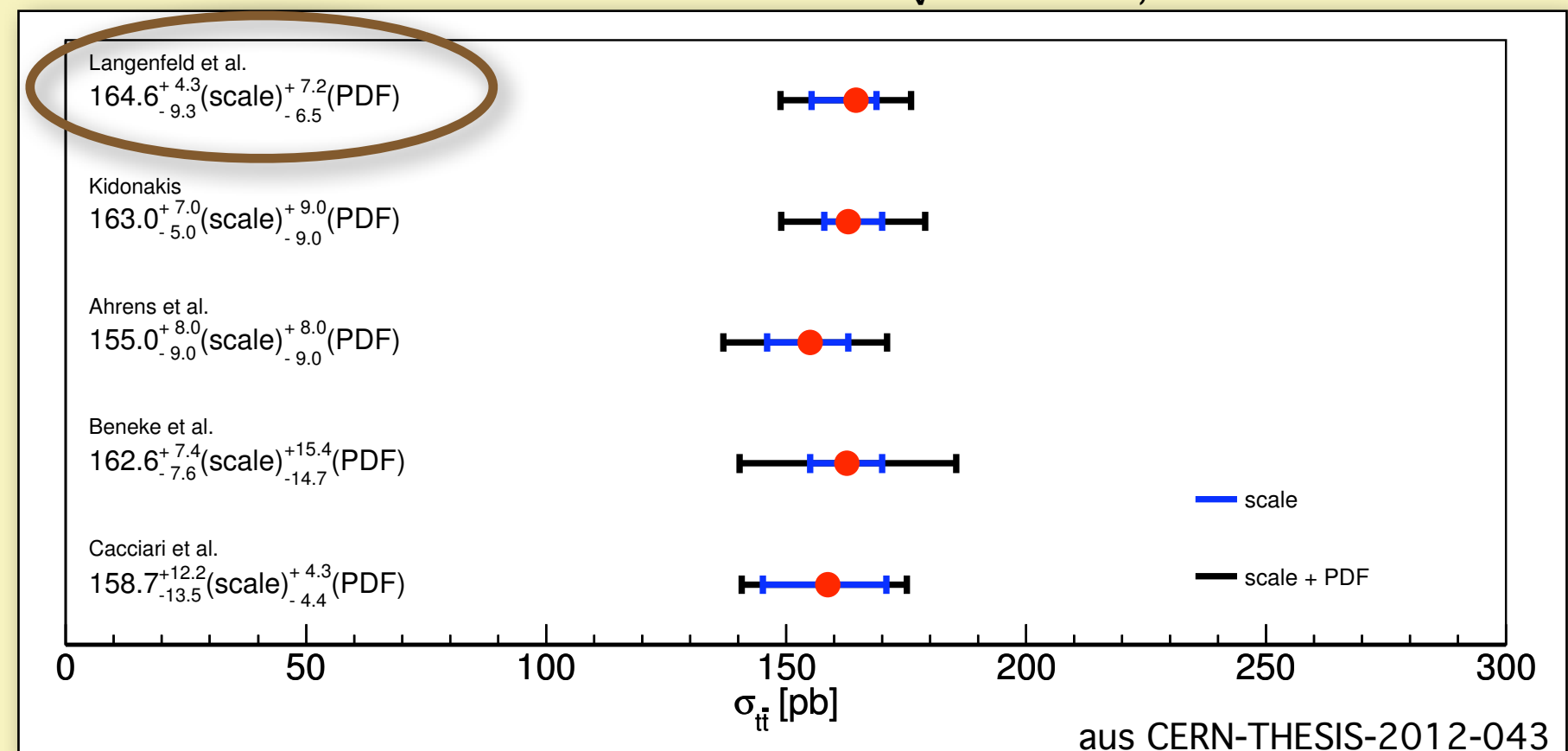
- ★ Paarproduktion via starker WW vs. Produktion einzelner Top Quarks via elektroschwacher WW
- ★ Gluonfusion (80%) vs. qq-Annihilation (20%)



# Top Quark Paar Produktion

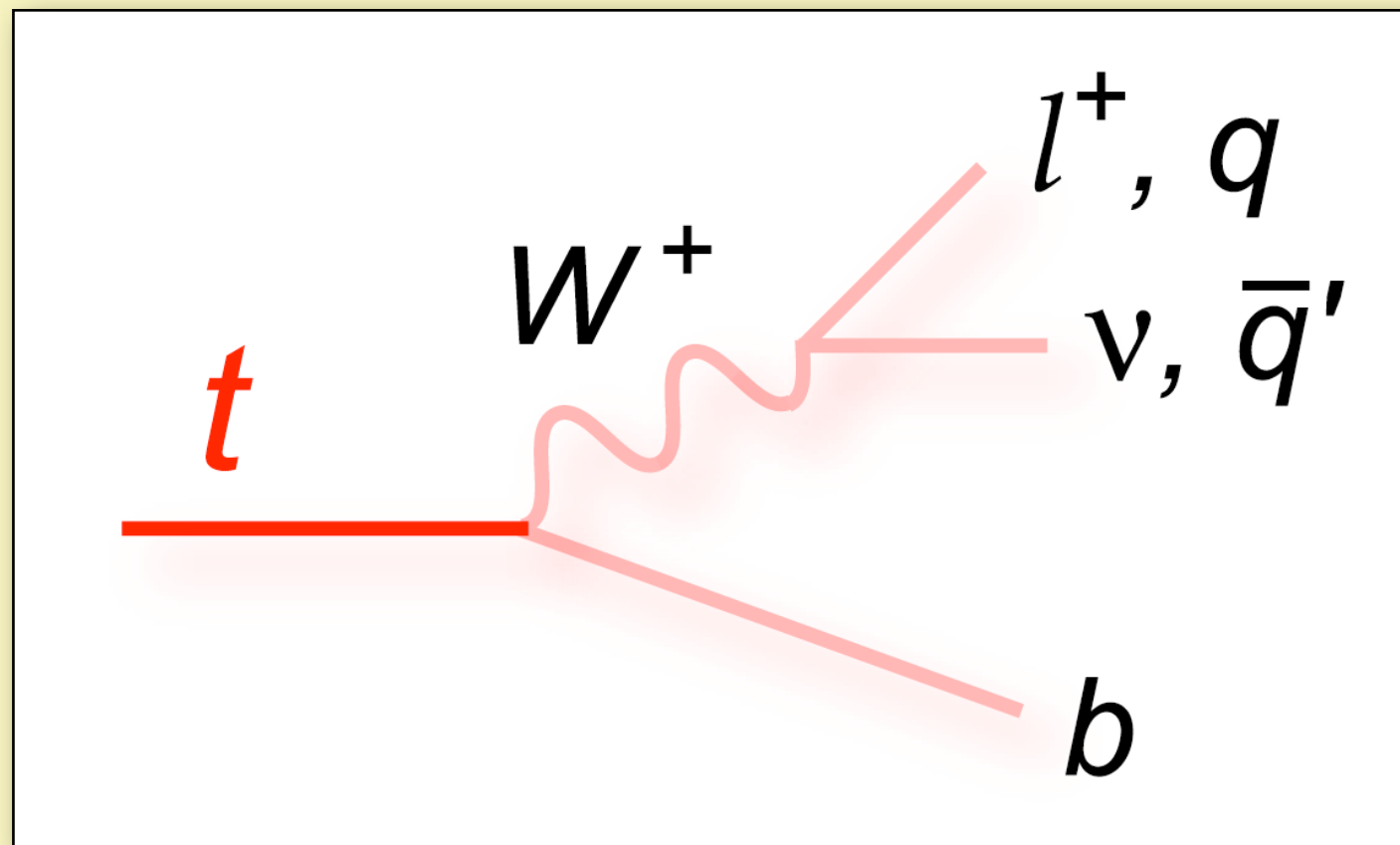
- ★ Paarproduktion via starker WW vs. Produktion einzelner Top Quarks via elektroschwacher WW
- ★ Gluonfusion (80%) vs. qq-Annihilation (20%)
- ★ Theorierechnungen komplett bis NLO (10% Unsicherheit) - Experimente werden präziser!
- ★ annähernde Rechnungen in NNLO beinhalten dominante Korrekturen

$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ , Status März 2012



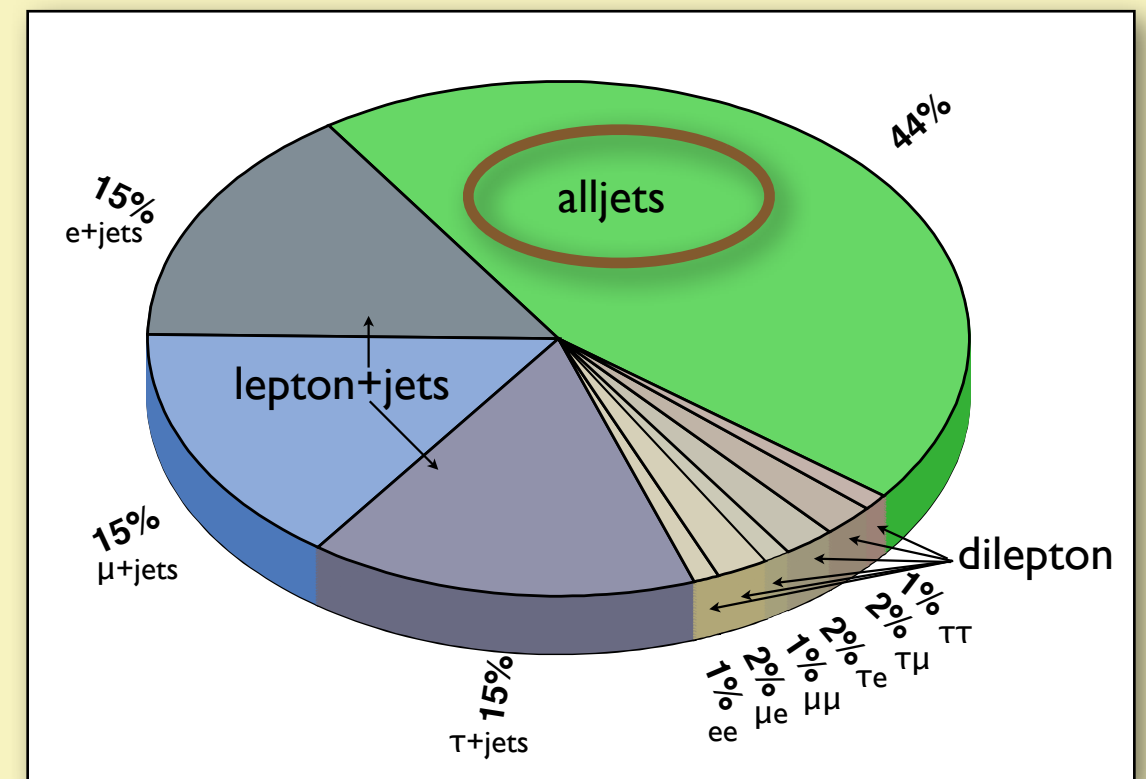
# Top Quark Zerfälle

- ★ Zerfall durch elektroschwache WW
- ★  $t \rightarrow Wq$  mit  $\approx 100\%$   $t \rightarrow Wb$
- ★  $W \rightarrow qq$  oder  $W \rightarrow lv$



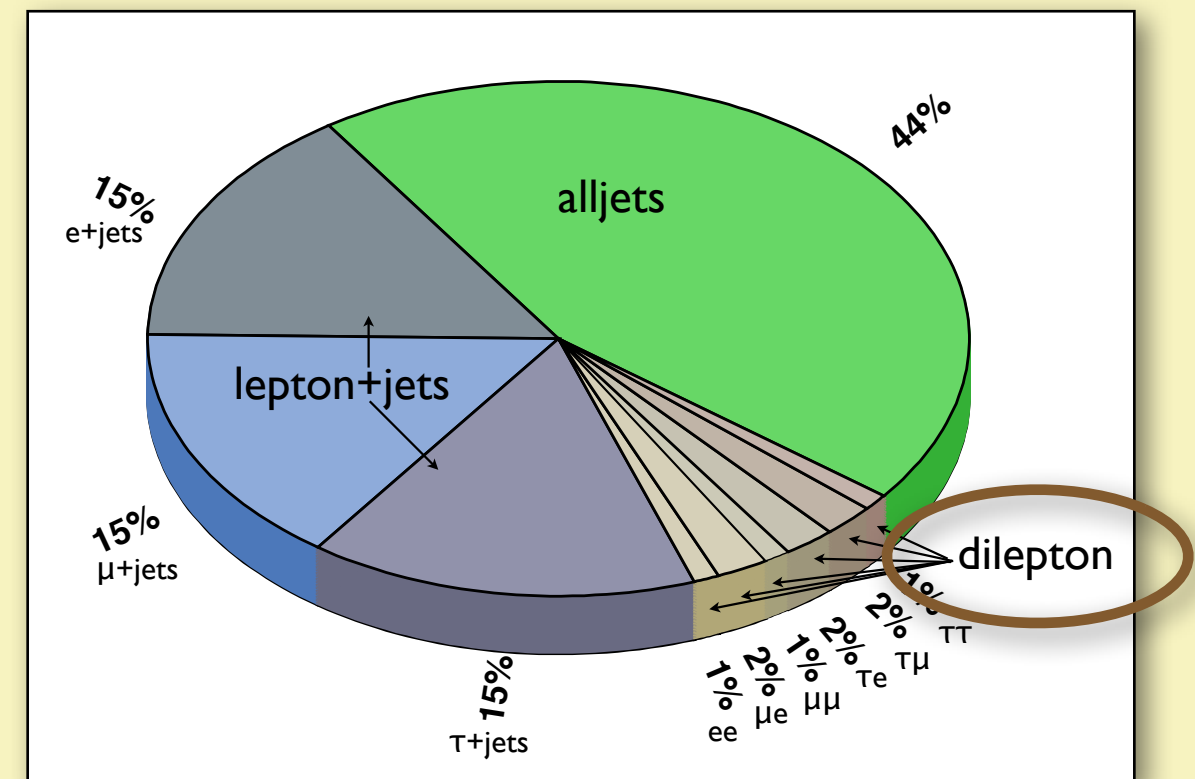
# Top Quark Zerfälle

- ★ Zerfall durch elektroschwache WW
- ★  $t \rightarrow Wq$  mit  $\approx 100\%$   $t \rightarrow Wb$
- ★  $W \rightarrow qq$  oder  $W \rightarrow lv$
- ★ klassifiziert Ereignisse aus Top Paarproduktion
- ★ beide Ws hadronisch
  - ★ (+) hohe Statistik
  - ★ (-) großer Untergrund



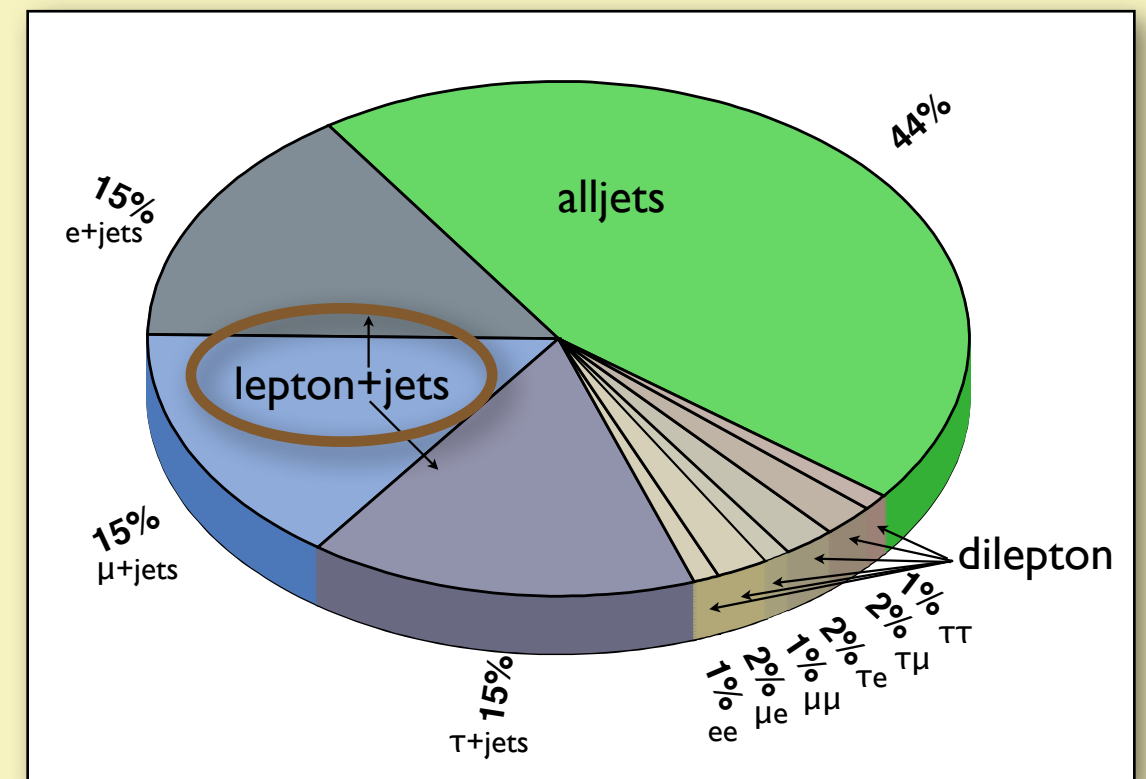
# Top Quark Zerfälle

- ★ Zerfall durch elektroschwache WW
- ★  $t \rightarrow Wq$  mit  $\approx 100\%$   $t \rightarrow Wb$
- ★  $W \rightarrow qq$  oder  $W \rightarrow lv$
- ★ klassifiziert Ereignisse aus Top Paarproduktion
- ★ beide Ws hadronisch
- ★ beide Ws leptonisch
  - ★ (+) klare Signatur
  - ★ (+) geringer Untergrund
  - ★ (-) geringe Statistik

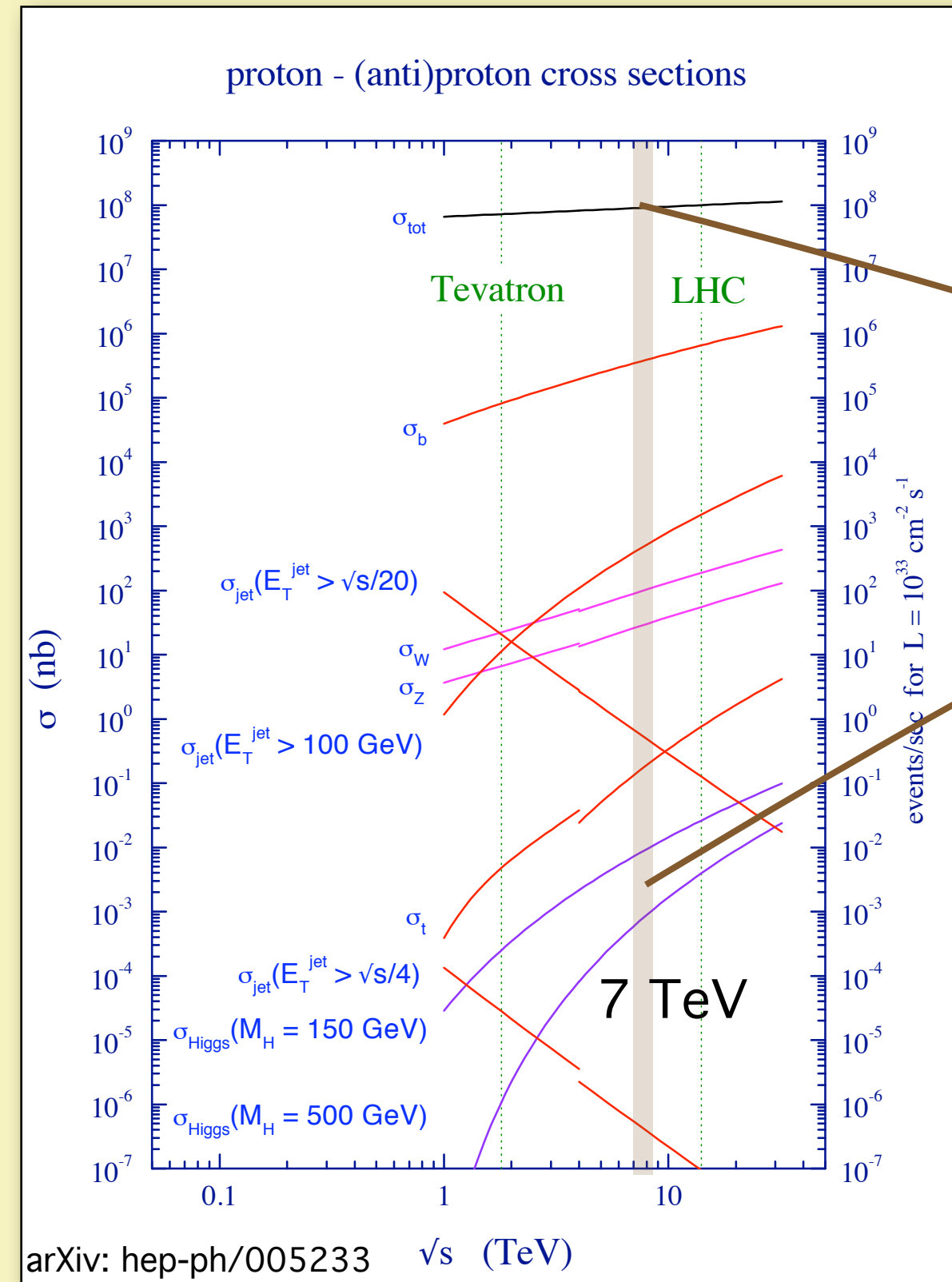


# Top Quark Zerfälle

- ★ Zerfall durch elektroschwache WW
- ★  $t \rightarrow Wq$  mit  $\approx 100\%$   $t \rightarrow Wb$
- ★  $W \rightarrow qq$  oder  $W \rightarrow lv$
- ★ klassifiziert Ereignisse aus Top Paarproduktion
- ★ beide Ws hadronisch
- ★ beide Ws leptonisch
- ★ je ein W hadronisch & leptonisch
  - ★ (+) klare Signatur
  - ★ (+) relativ hohe Statistik
  - ★ ( $\pm$ ) relativ geringer Untergrund

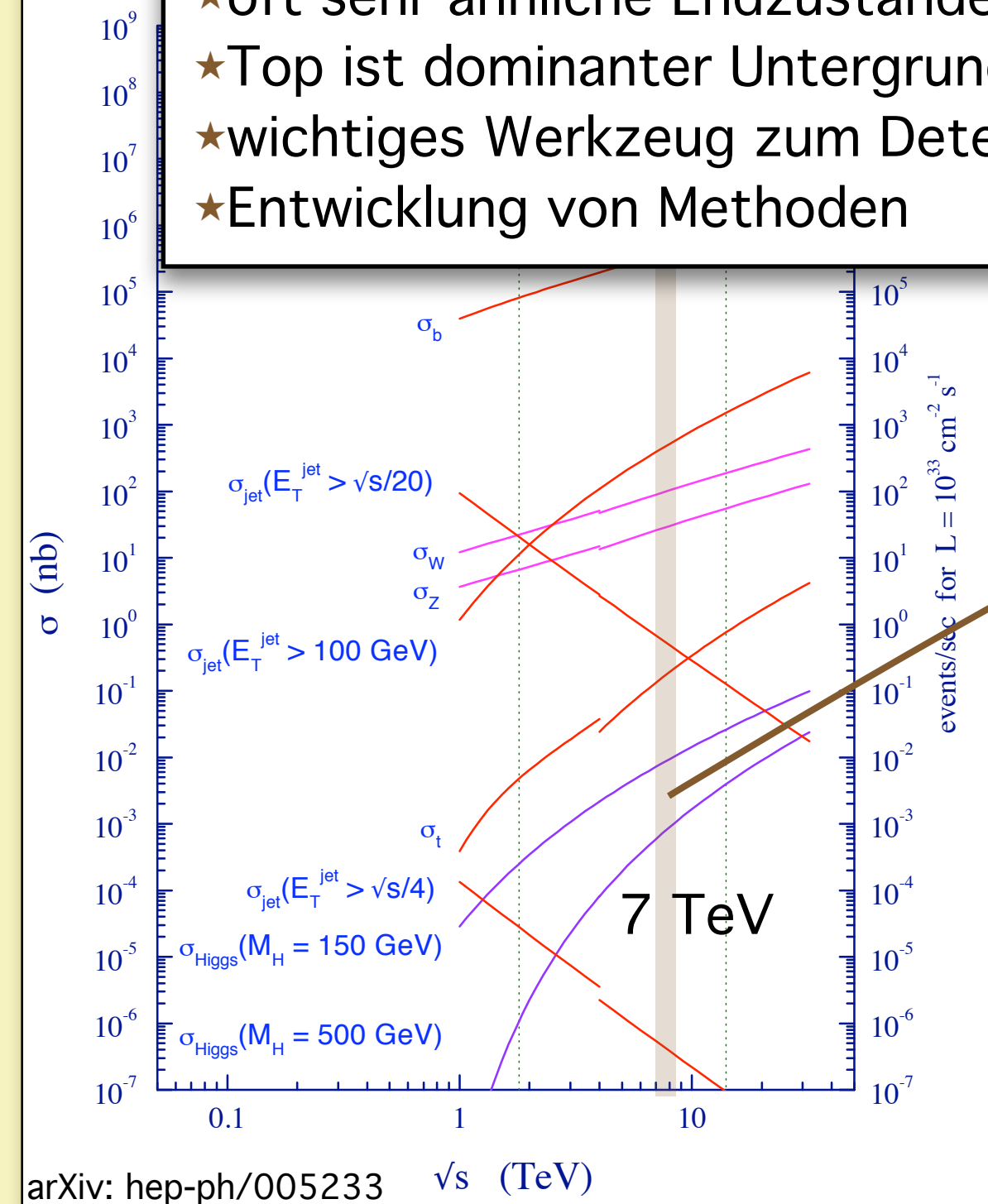


# Das Top Quark und neue Physik (1)



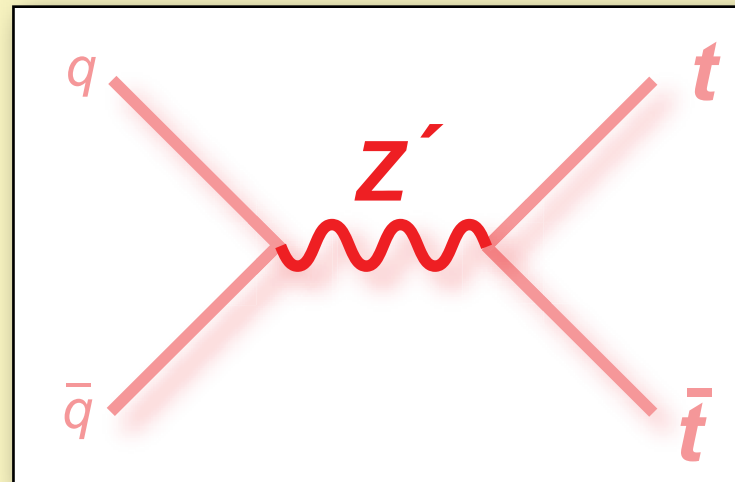
# Das Top Quark und neue Physik (1)

- ★ neue Physik (Higgs, Susy, ...) tritt selten auf
- ★ oft sehr ähnliche Endzustände wie Top Quark Ereignisse
- ★ Top ist dominanter Untergrund
- ★ wichtiges Werkzeug zum Detektorverständnis
- ★ Entwicklung von Methoden

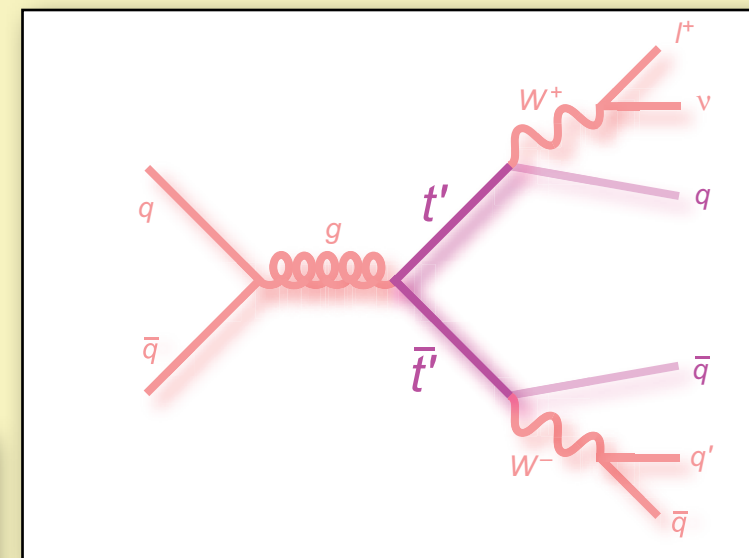


## ★ Kopplung des Top Quarks an neue Elementarteilchen

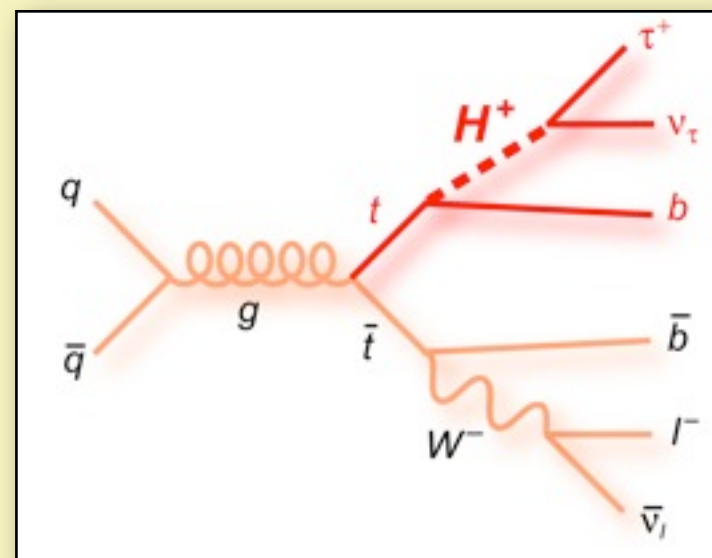
★ in der Produktion



★ mit gleicher Zerfallskette



★ im Zerfall



## ★ Wo?

- ★ ATLAS & der LHC

## ★ Warum?

- ★ Top Physik & das Standardmodell

## ★ Was?

- ★ Objekte & Prozesse

## ★ Wie?

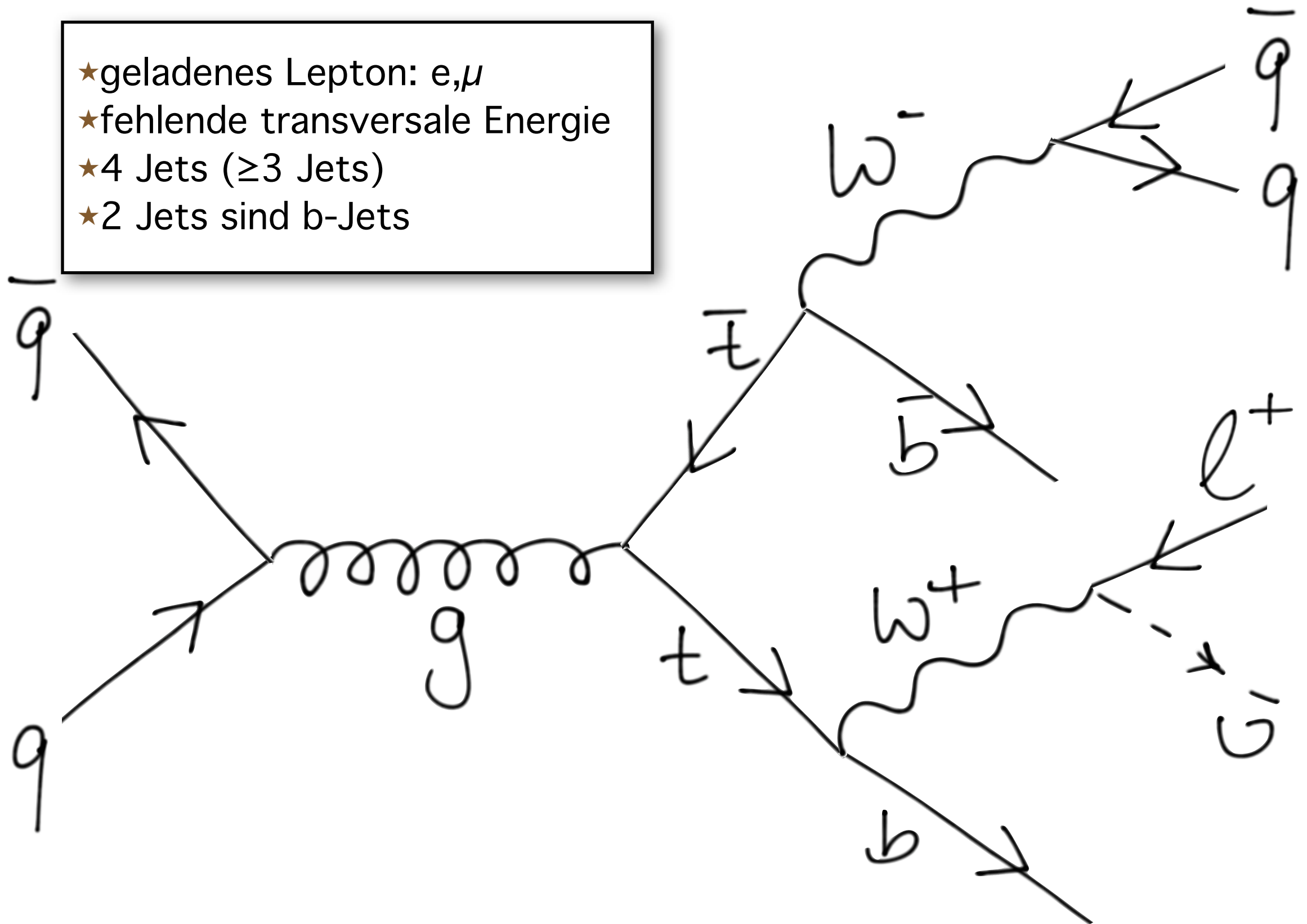
- ★ Analysestrategie

## ★ Messungen in Daten aus 2010 und 2011

## ★ Ausblick

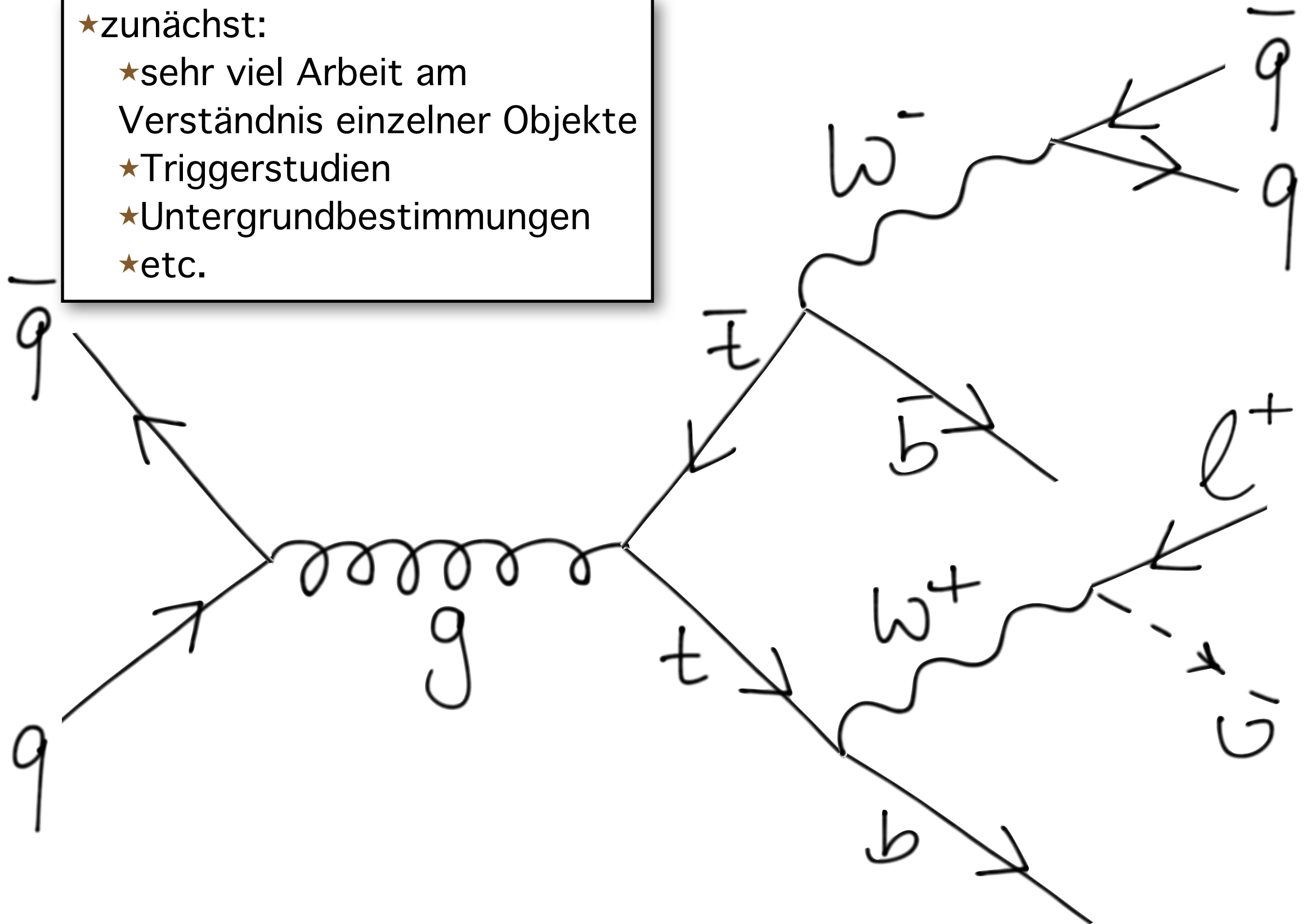
## ★ Zusammenfassung

- ★ geladenes Lepton:  $e, \mu$
- ★ fehlende transversale Energie
- ★ 4 Jets ( $\geq 3$  Jets)
- ★ 2 Jets sind b-Jets



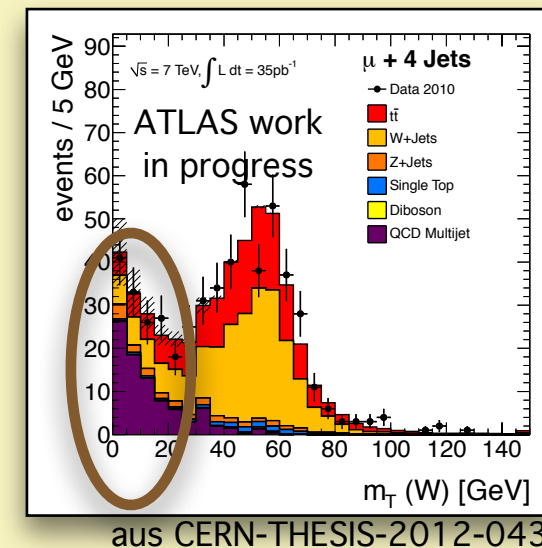
★zunächst:

- ★sehr viel Arbeit am Verständnis einzelner Objekte
- ★Triggerstudien
- ★Untergrundbestimmungen
- ★etc.



# Untergründe gleicher Signatur

- ★ W Bosonen mit zusätzlichen Jets
  - ★ zusätzliche Jets können von schweren Quarks (c,b) stammen
  - ★ Normierung wird im finalen Fit bestimmt
- ★ QCD Multijet Ereignisse mit fehlidentifizierten Leptonen
  - ★ direkt aus Daten bestimmt
- ★ Z Bosonen mit zusätzlichen Jets
- ★ einzelne Top Quarks
- ★ Zwei-Boson Ereignisse (WW,WZ,ZZ)



dominant

gering

## ★ Wo?

- ★ ATLAS & der LHC

## ★ Warum?

- ★ Top Physik & das Standardmodell

## ★ Was?

- ★ Objekte & Prozesse

## ★ Wie?

- ★ Analysestrategie

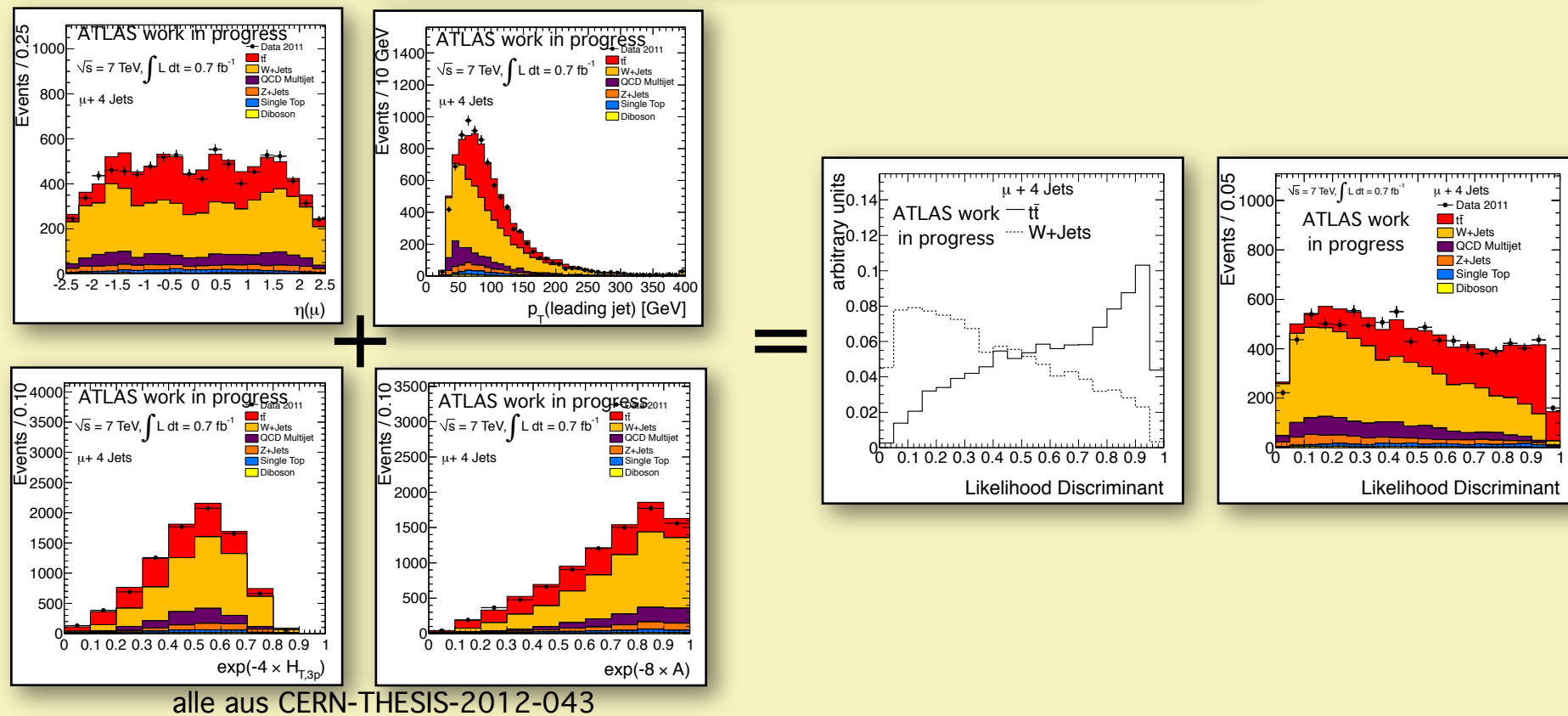
## ★ Messungen in Daten aus 2010 und 2011

## ★ Ausblick

## ★ Zusammenfassung

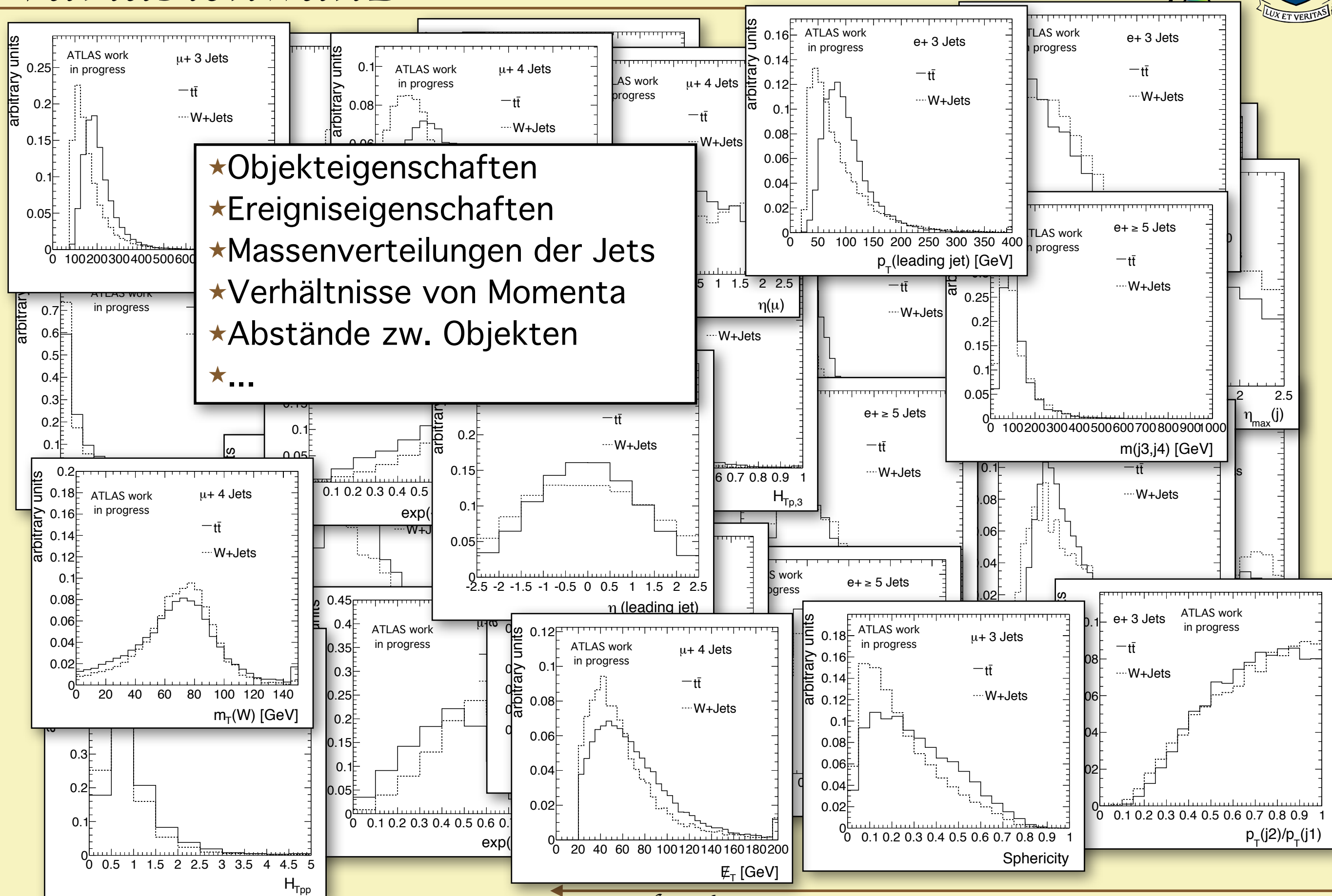
- ★ möglichst viele Ereignisse selektiert
- ★ Kombination mehrerer Variablen in Likelihood-Diskriminante

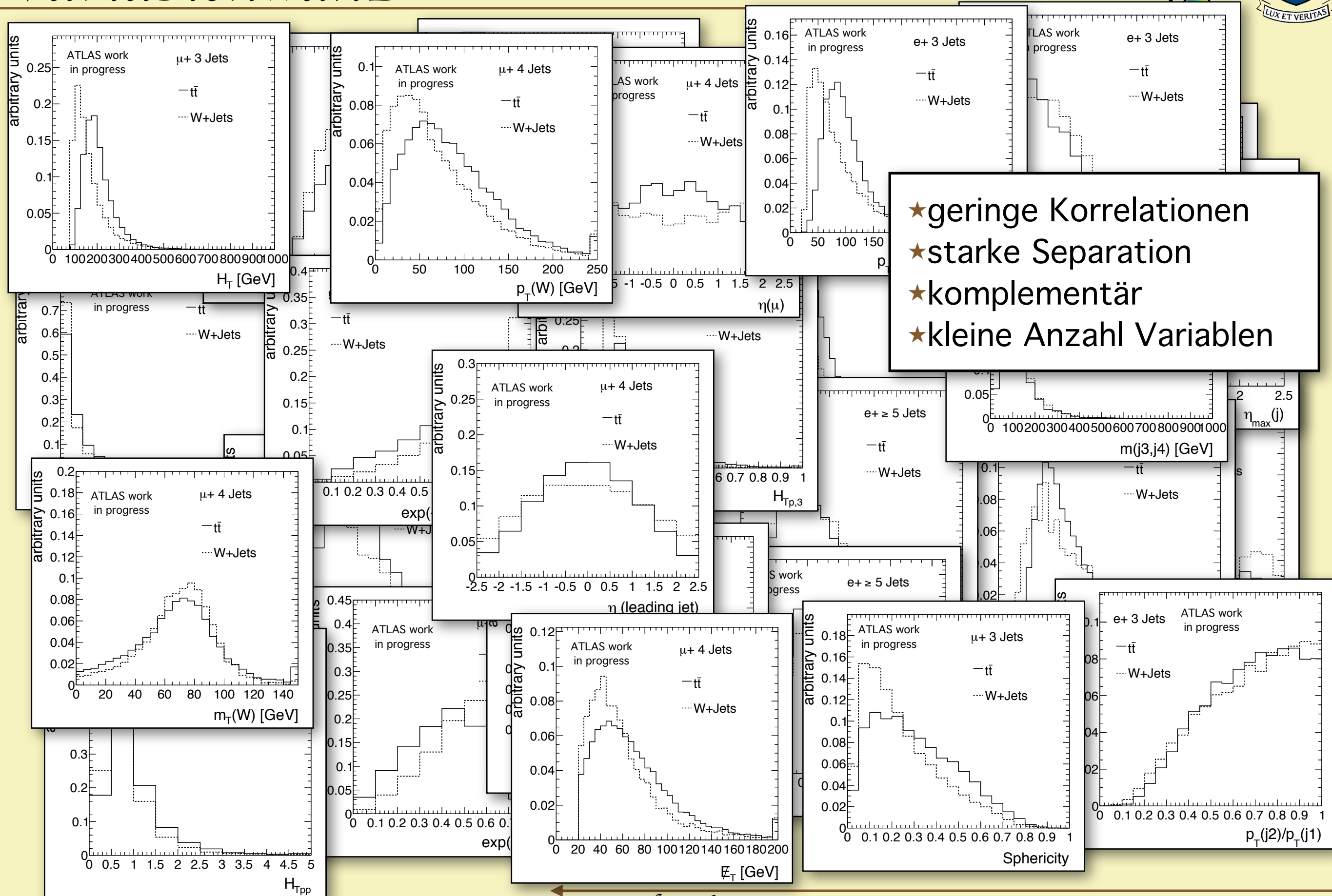
$$\mathcal{D}_i = \frac{\prod_{j=1}^k p_{i,S}(x_j)}{\prod_{j=1}^k p_{i,S}(x_j) + \prod_{j=1}^k p_{i,B}(x_j)}.$$



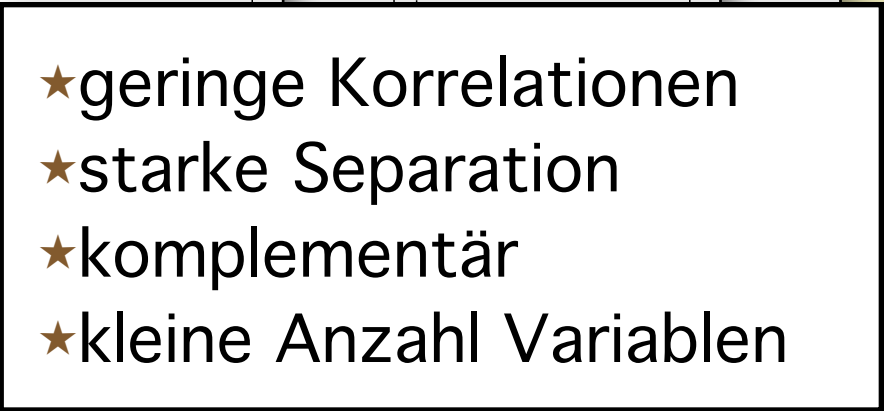
- ★ Fit der Signal- & Untergrundvorhersagen an Daten
- ★ systematische Unsicherheiten als Störparameter in Fit

- ★ Objekteigenschaften
- ★ Ereignisseigenschaften
- ★ Massenverteilungen der Jets
- ★ Verhältnisse von Momenta
- ★ Abstände zw. Objekten
- ★ ...



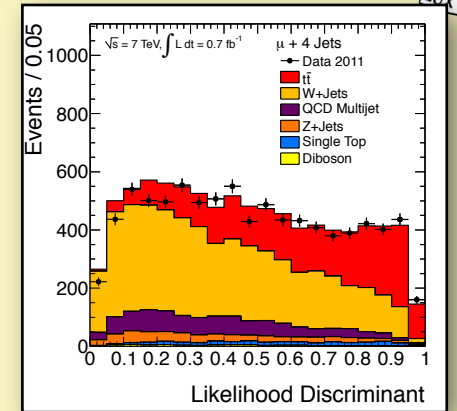


- ★geringe Korrelationen
- ★starke Separation
- ★komplementär
- ★kleine Anzahl Variablen

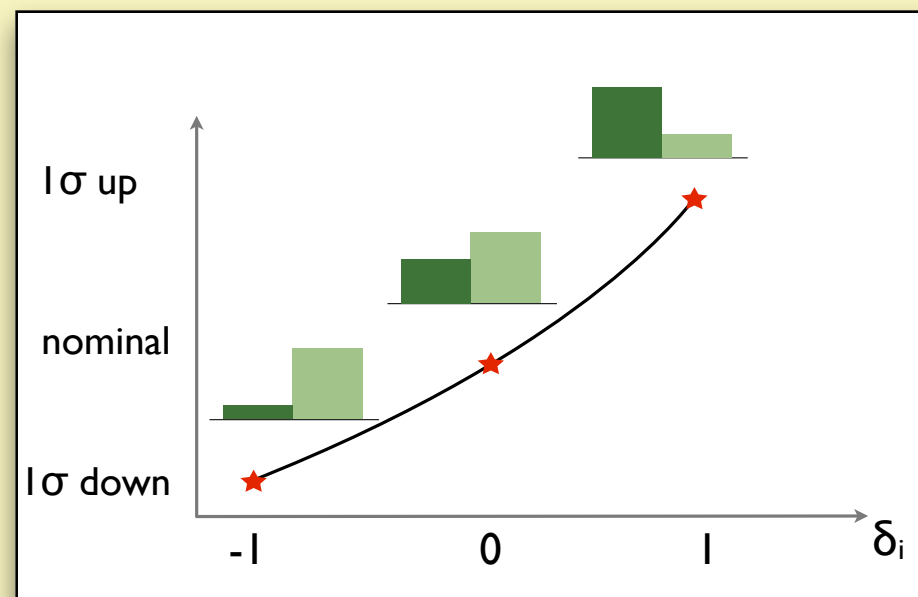


# Profile Likelihood Fit

- ★ Minimierung einer negativen log-likelihood Funktion zur Messung von  $\sigma_{tt}$
- ★ Messung von  $\sigma_{tt}$  in der Konfiguration von Normierungen und Systematiken, die Daten am besten unterstützt
- ★ Typen von Parametern:
  - ★  $\beta_i$ : Normierung der vorhergesagten Signal- und Untergrundprozesse ( $\beta_0 = \sigma_{tt, \text{Messung}} / \sigma_{tt, \text{Vorhersage}}$ )
  - ★  $\delta_i$ : Störparameter zur Beschreibung systematischer Unsicherheiten



- ★ Minimierung einer negativen log-likelihood Funktion zur Messung von  $\sigma_{tt}$
- ★ Messung von  $\sigma_{tt}$  in der Konfiguration von Normierungen und Systematiken, die Daten am besten unterstützt
- ★ Typen von Parametern:
  - ★  $\beta_i$ : Normierung der vorhergesagten Signal- und Untergrundprozesse ( $\beta_0 = \sigma_{tt, \text{Messung}} / \sigma_{tt, \text{Vorhersage}}$ )
  - ★  $\delta_i$ : Störparameter zur Beschreibung systematischer Unsicherheiten



## ★ Wo?

- ★ ATLAS & der LHC

## ★ Warum?

- ★ Top Physik & das Standardmodell

## ★ Was?

- ★ Objekte & Prozesse

## ★ Wie?

- ★ Analysestrategie

## ★ Messungen in Daten aus 2010 und 2011

## ★ Ausblick

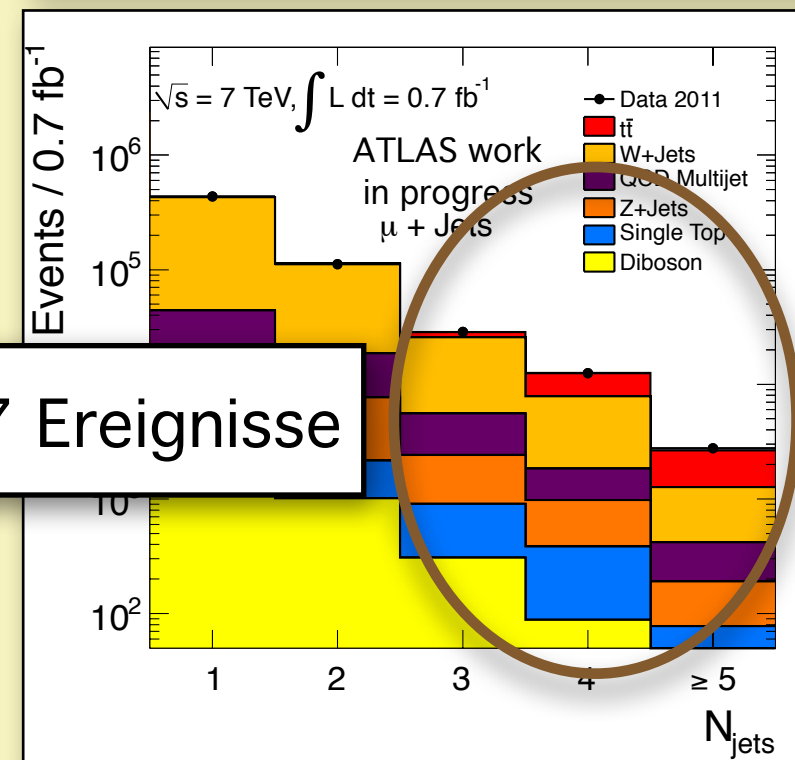
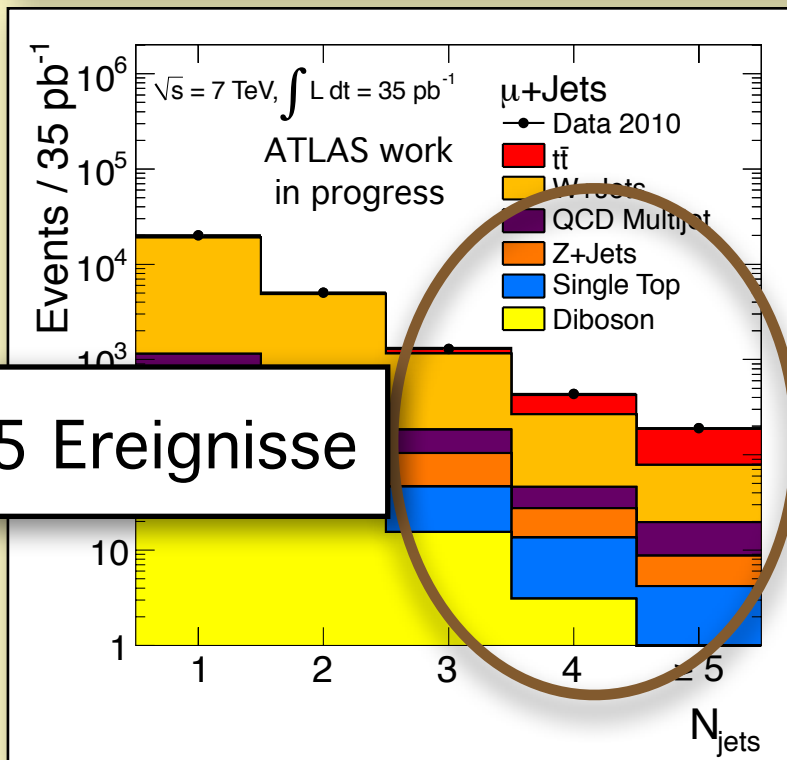
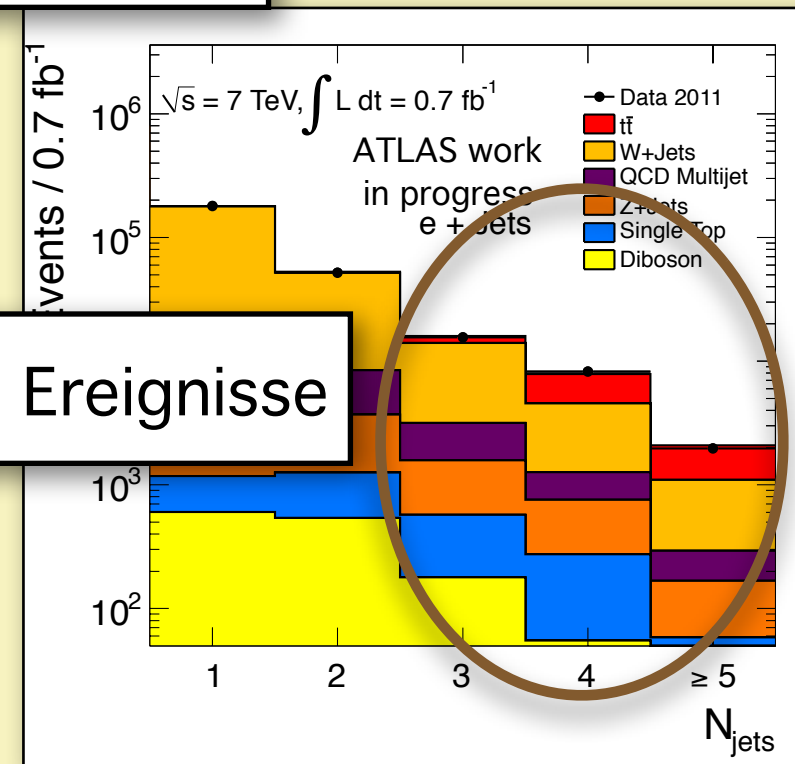
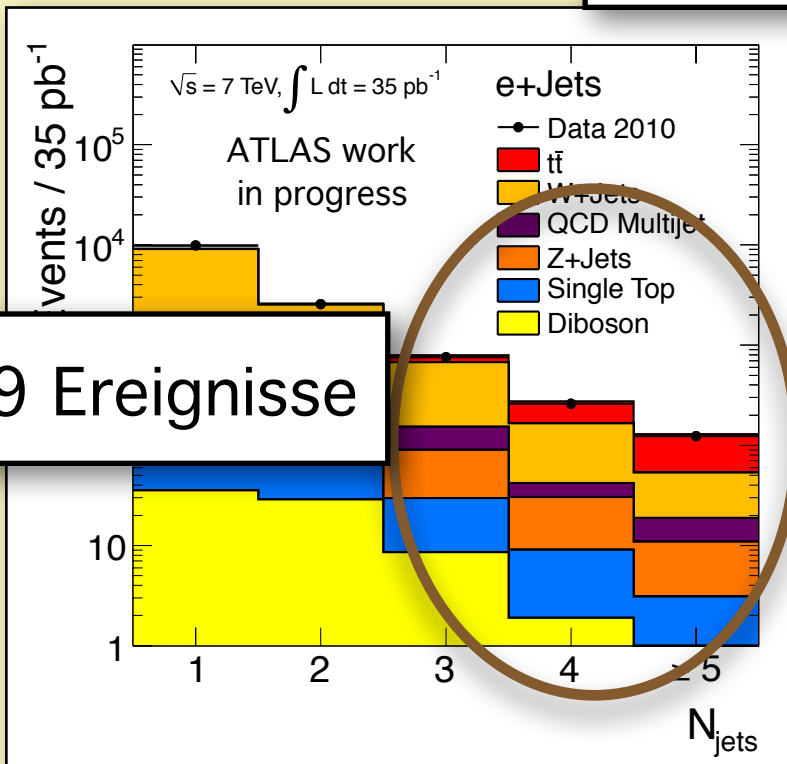
## ★ Zusammenfassung

# Selektierte Ereignisse

2010, 35 pb<sup>-1</sup>

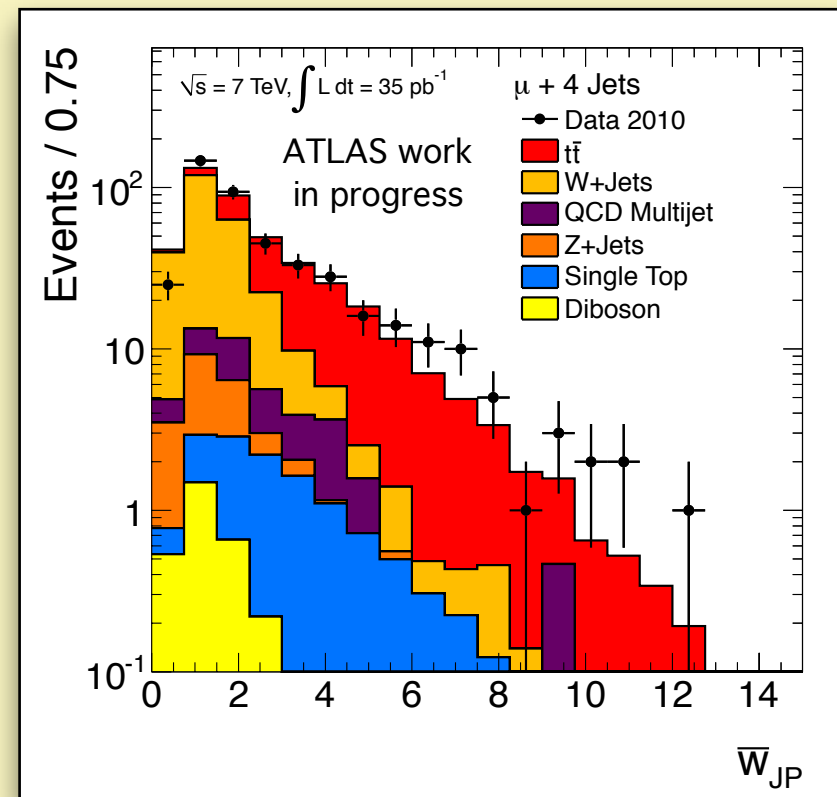
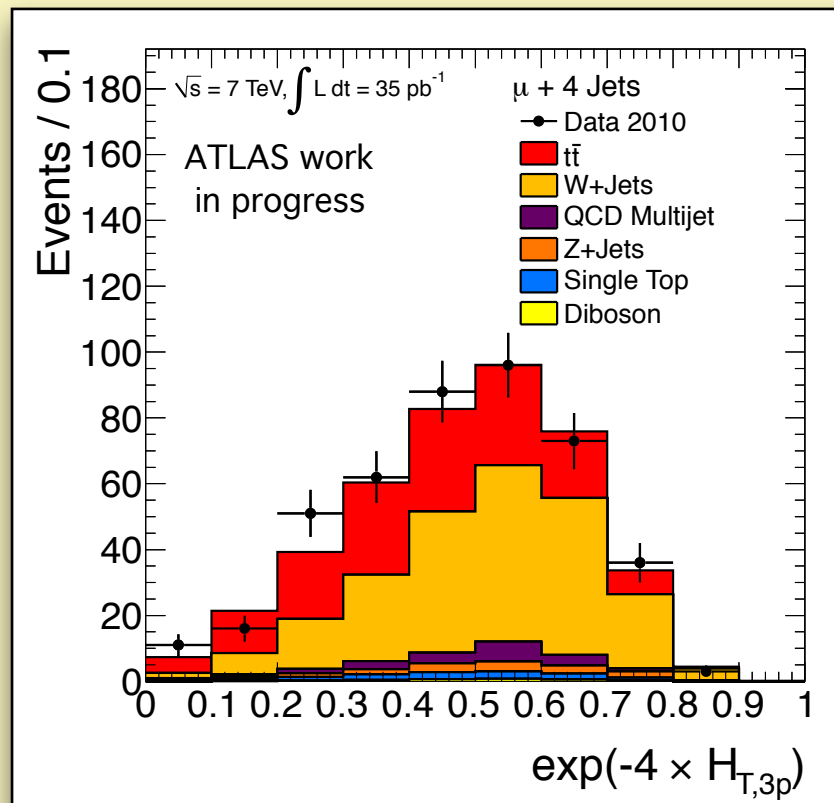
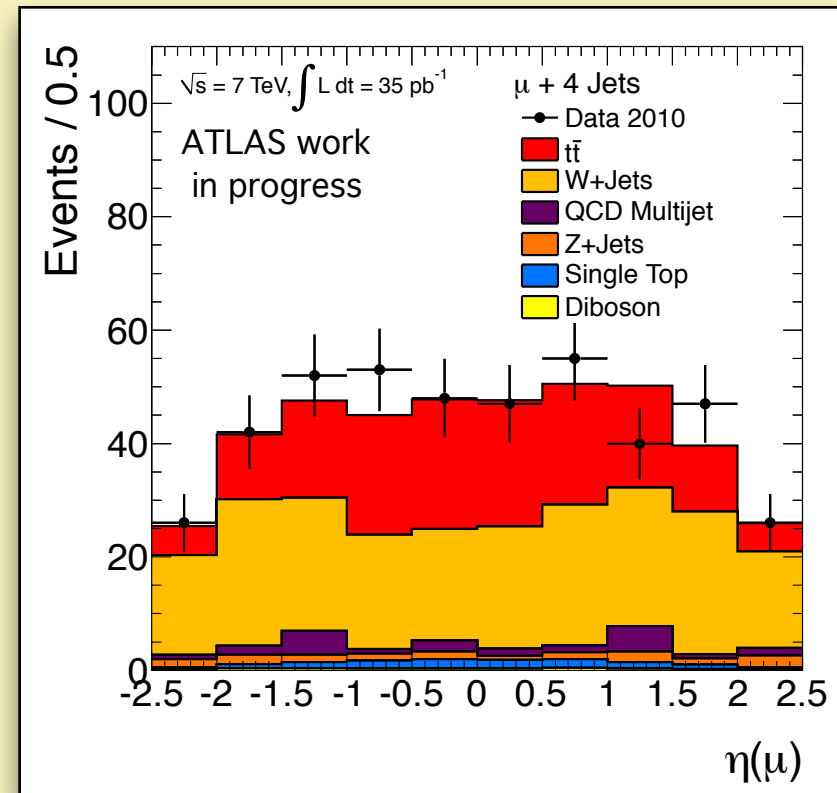
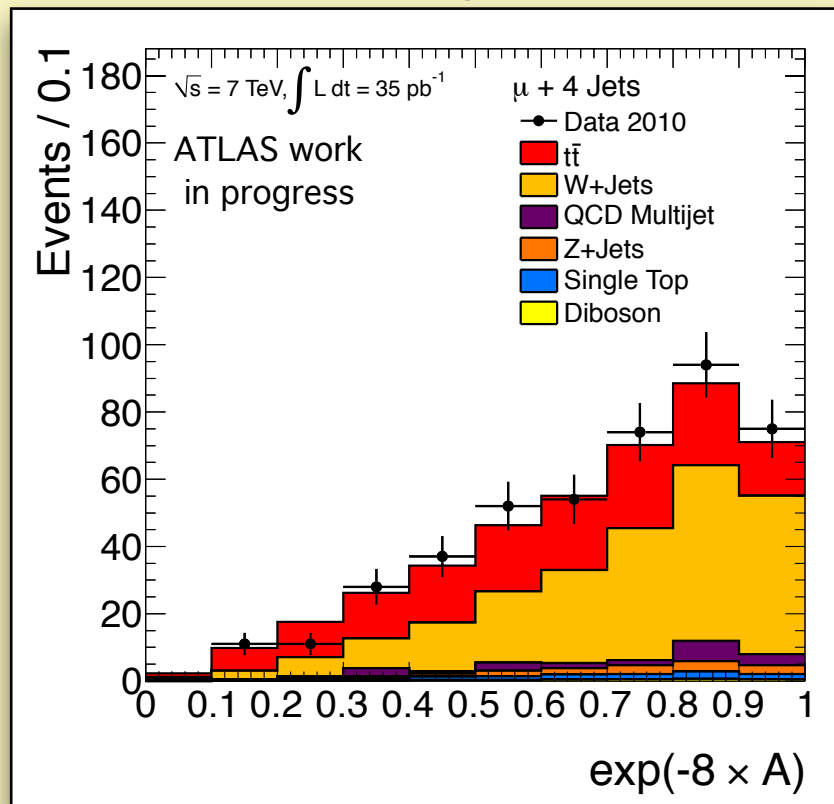
jeweils 6 Analysekatategorien

2011, 0.7 fb<sup>-1</sup>



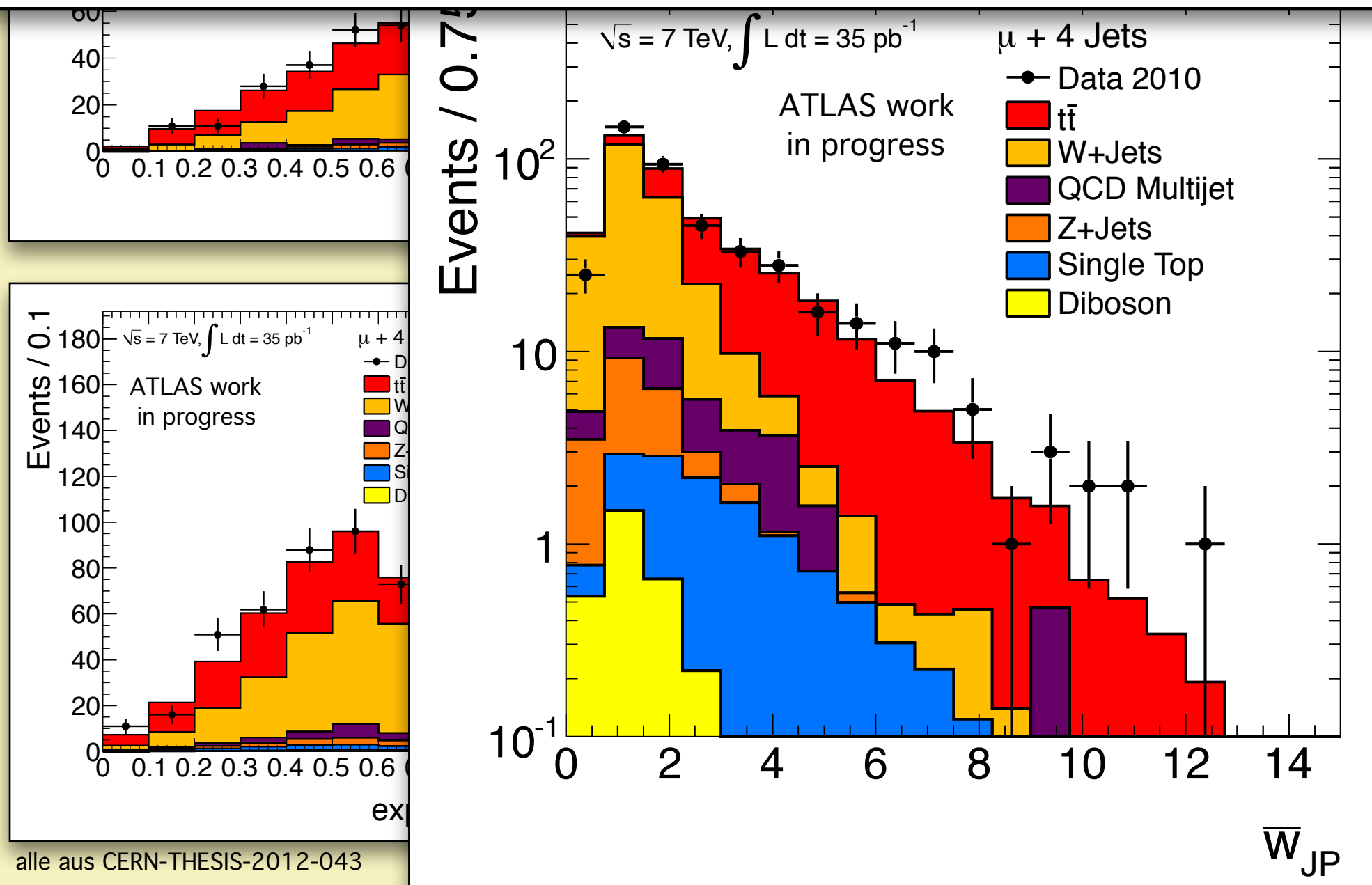
alle aus CERN-THESIS-2012-043

# Variablen $35 \text{ pb}^{-1}$

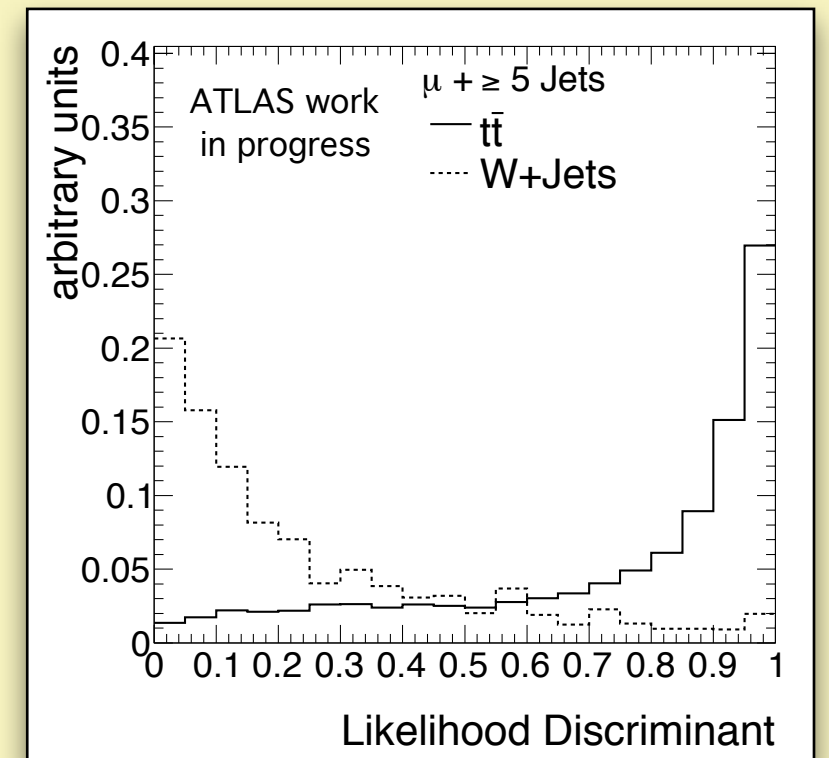
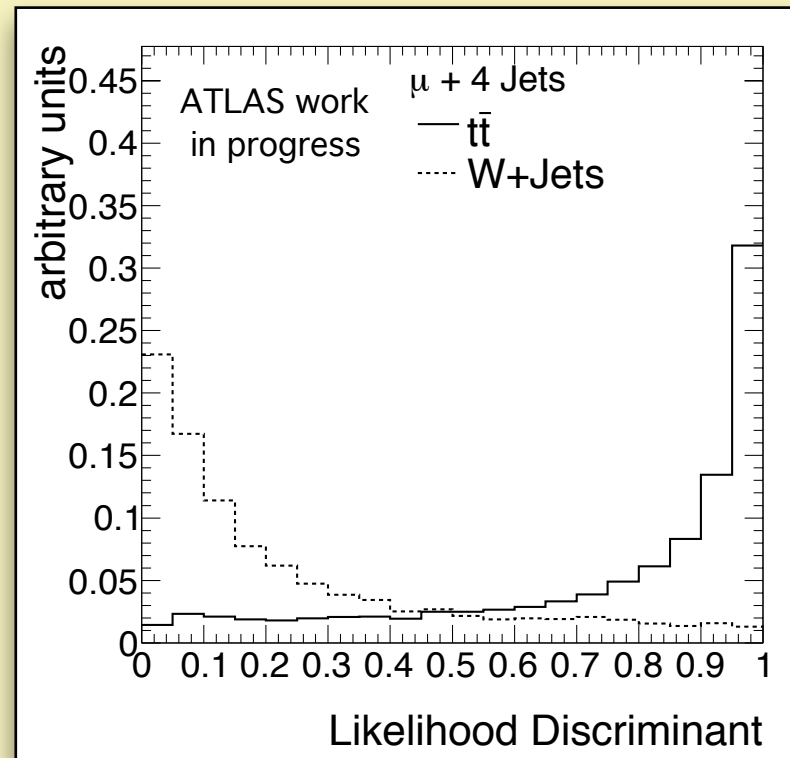
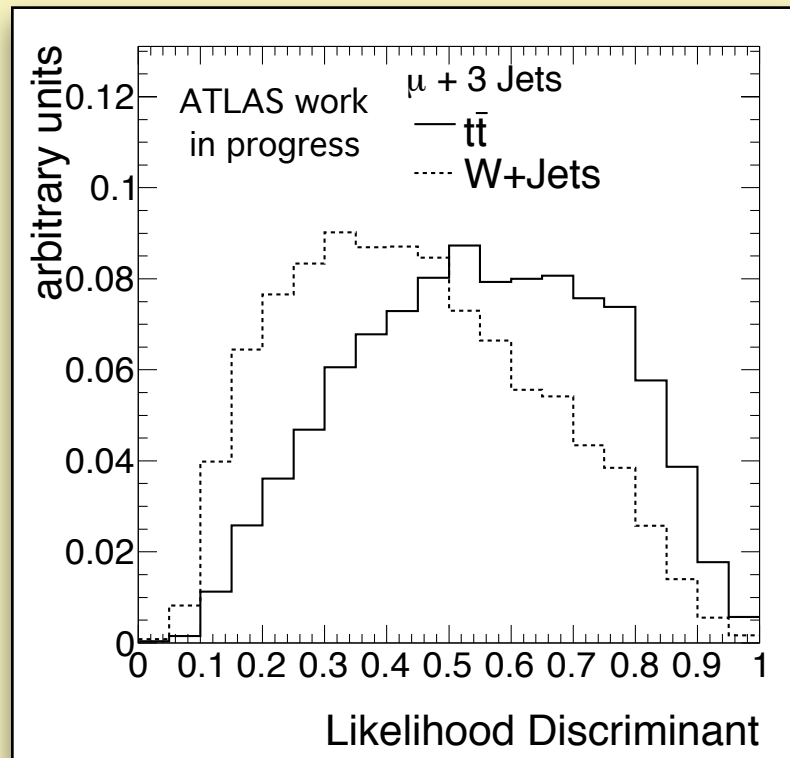


alle aus CERN-THESIS-2012-043

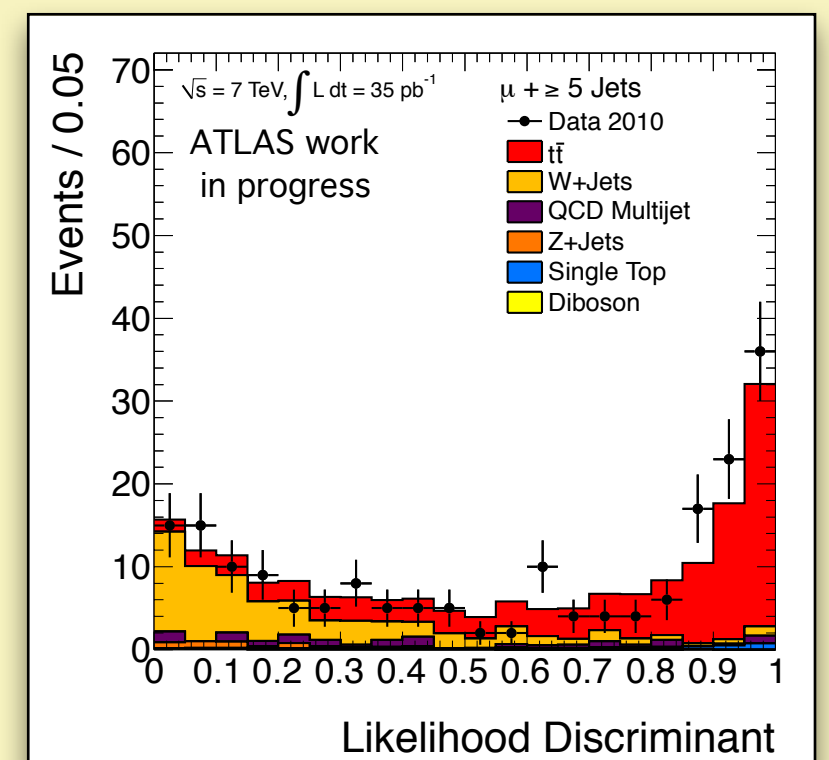
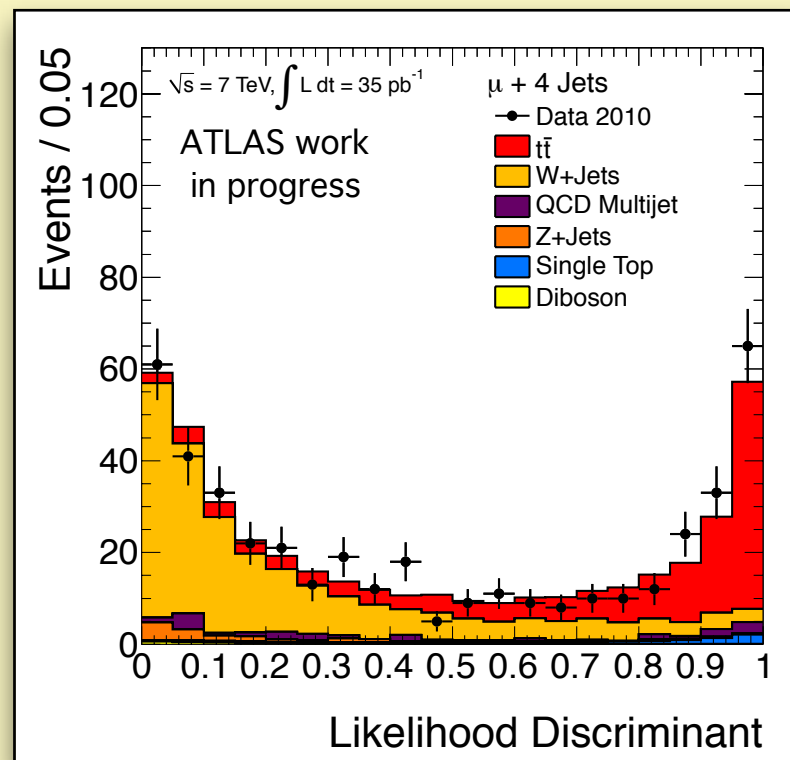
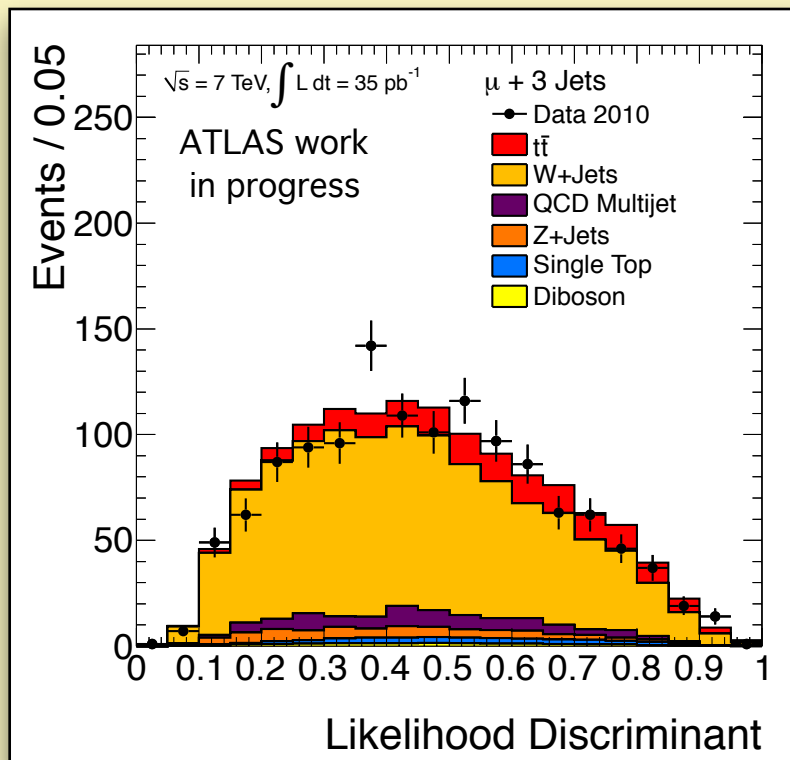
- ★Eigenschaften der Jets und ihr Ursprung erlauben Identifikation von b-Jets
- ★durchschnittliches b-Jet Wahrscheinlichkeitsgewicht der beiden Jets mit der höchsten Wahrscheinlichkeit
- ★kein Schnitt auf b-Jets - volle Statistik nutzbar
- ★nur für 4,  $\geq 5$  Jets verwendet

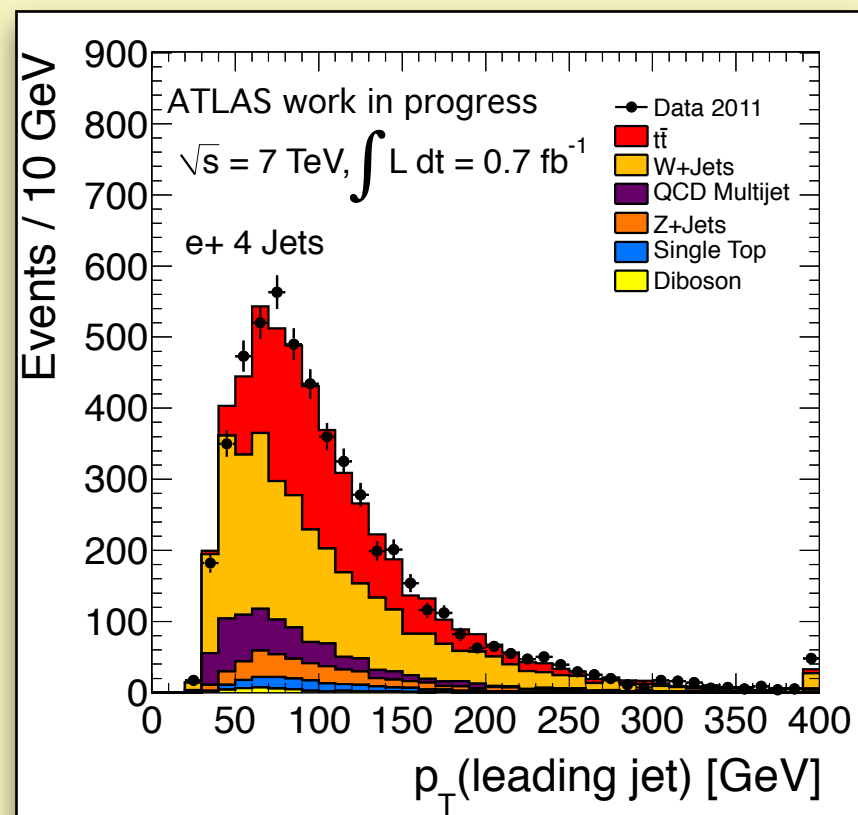
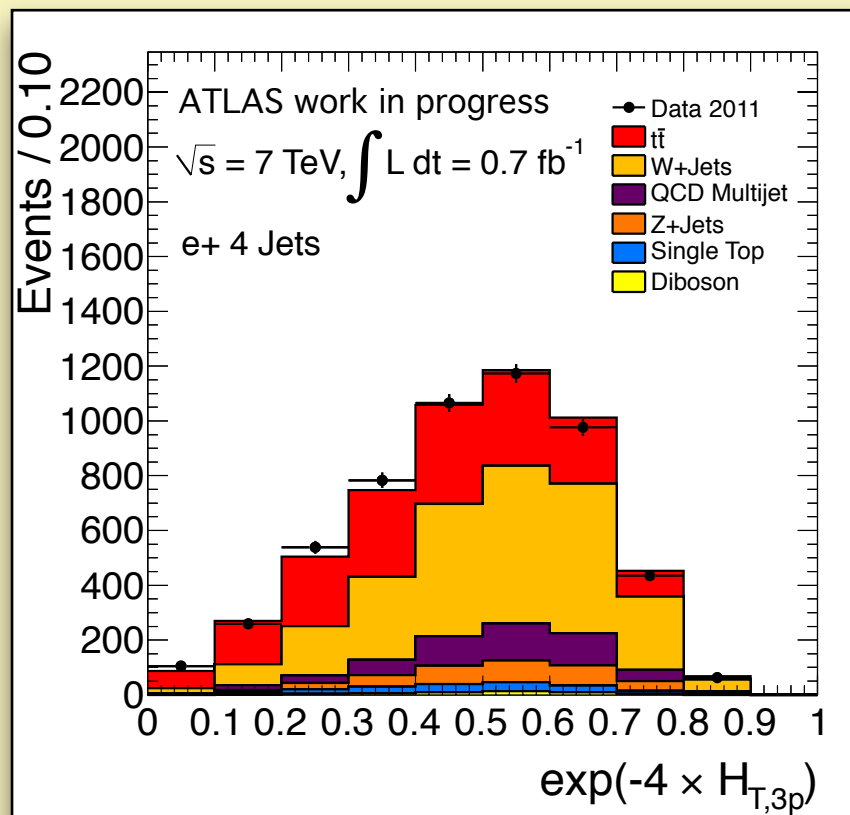
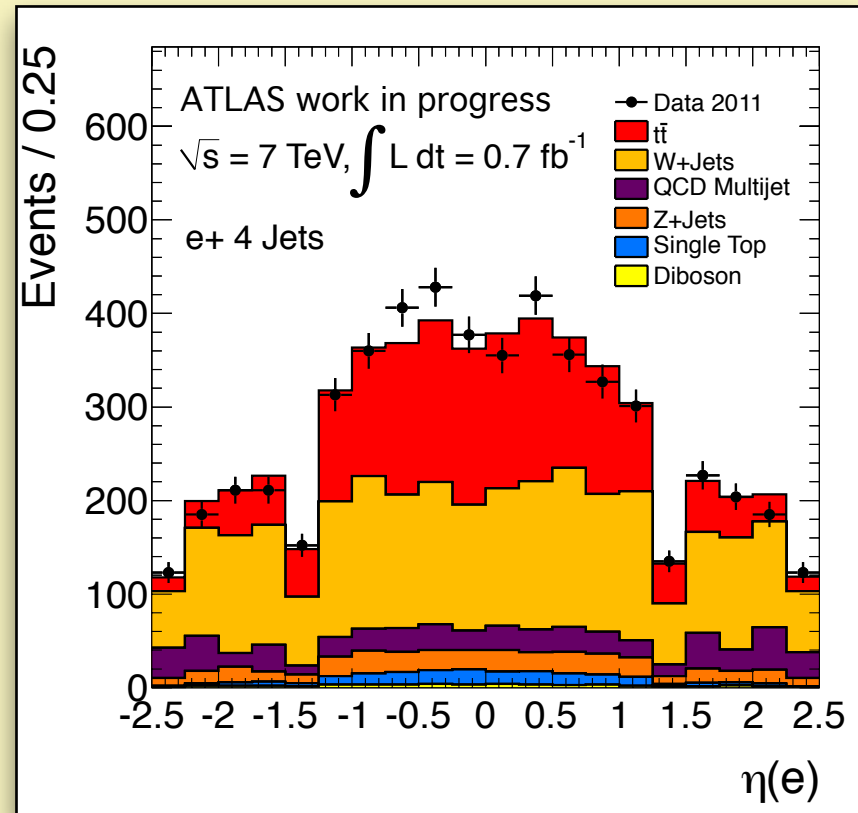
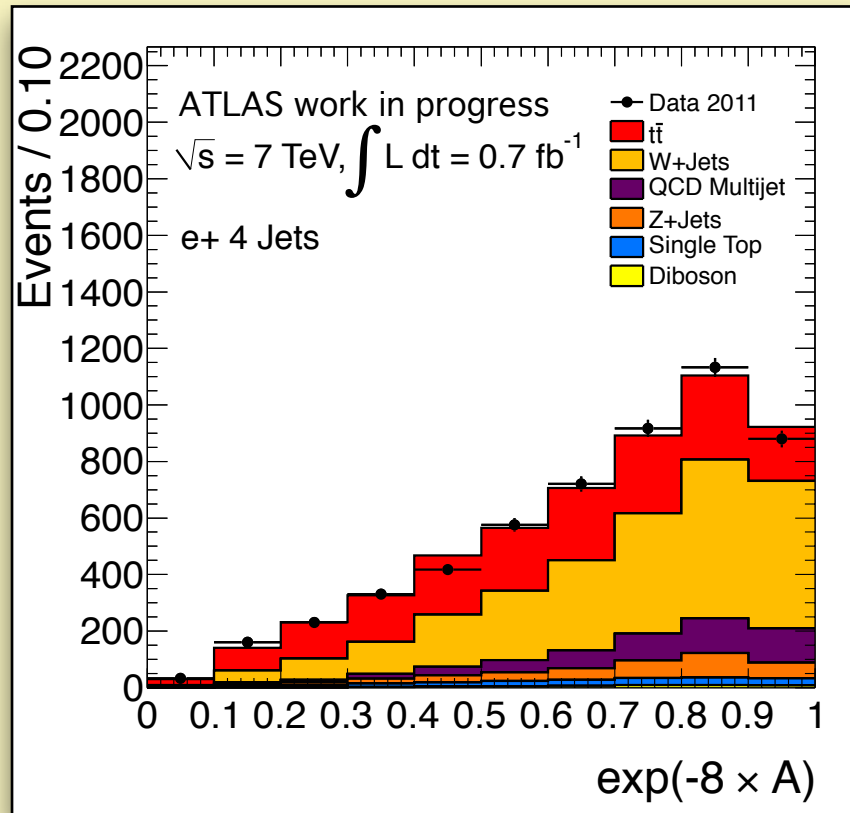


# Diskriminante $35 \text{ pb}^{-1}$



alle aus CERN-THESIS-2012-043

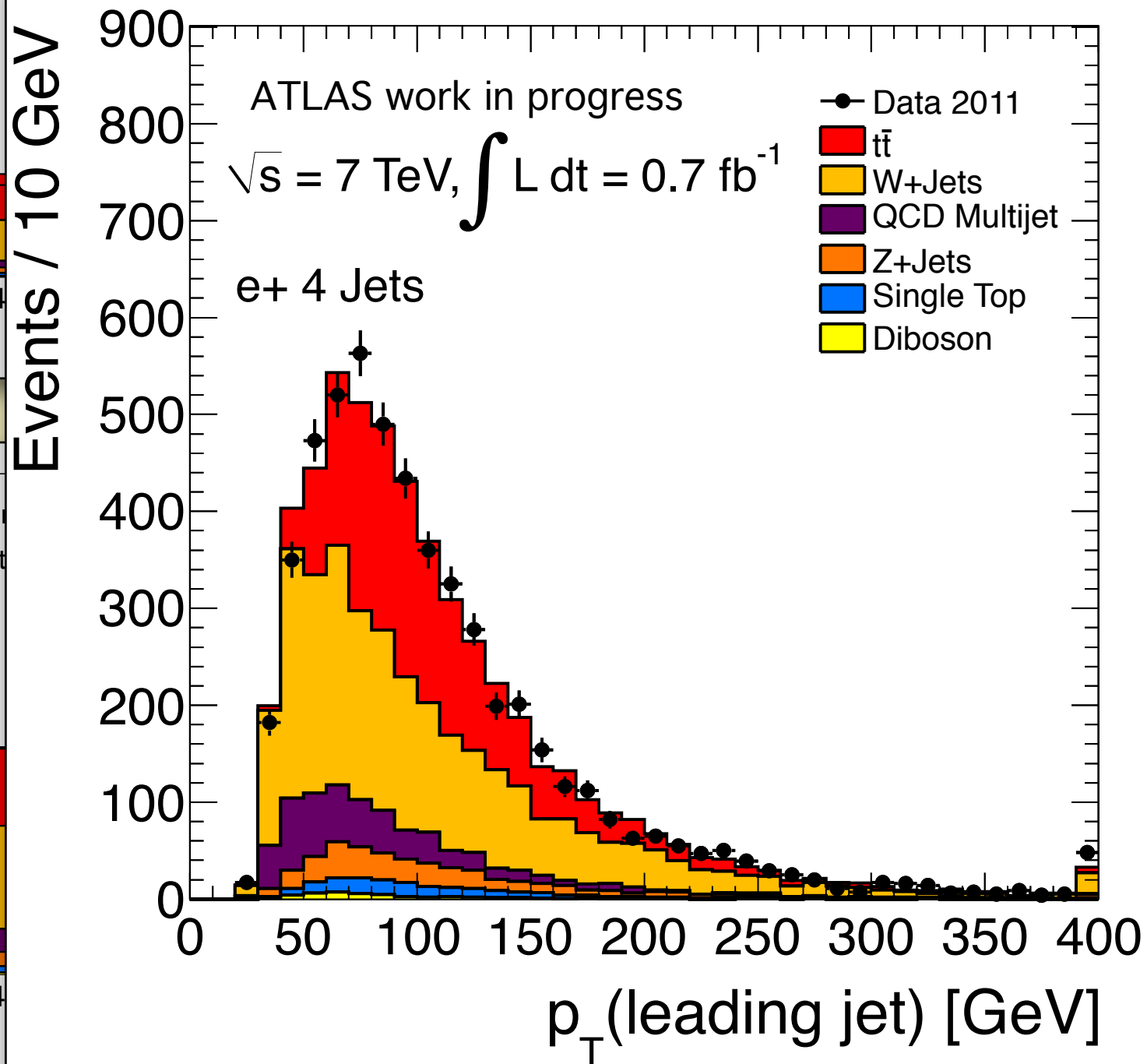
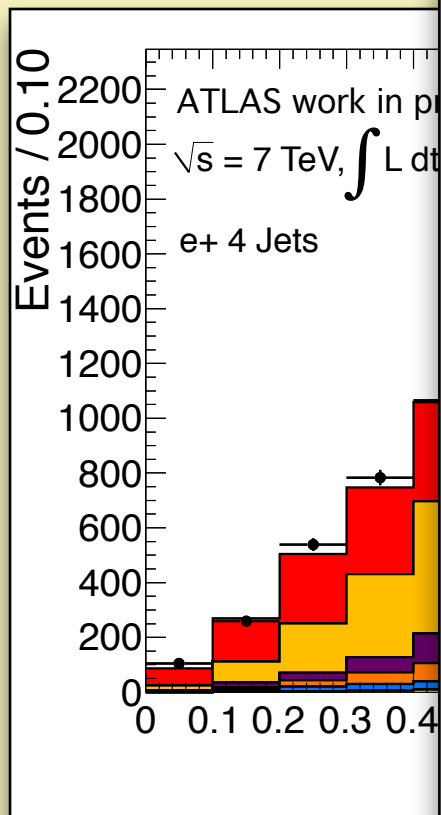
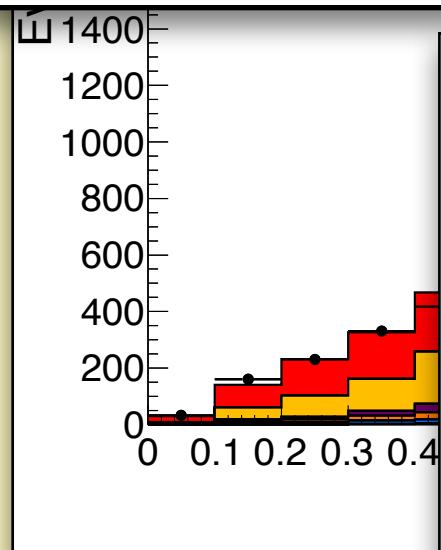




alle aus CERN-THESIS-2012-043

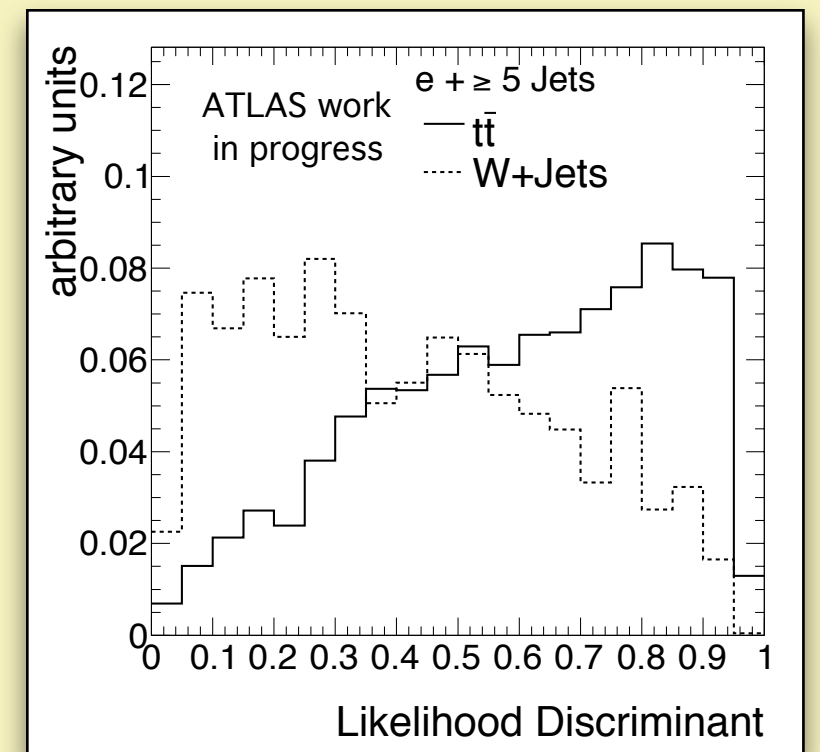
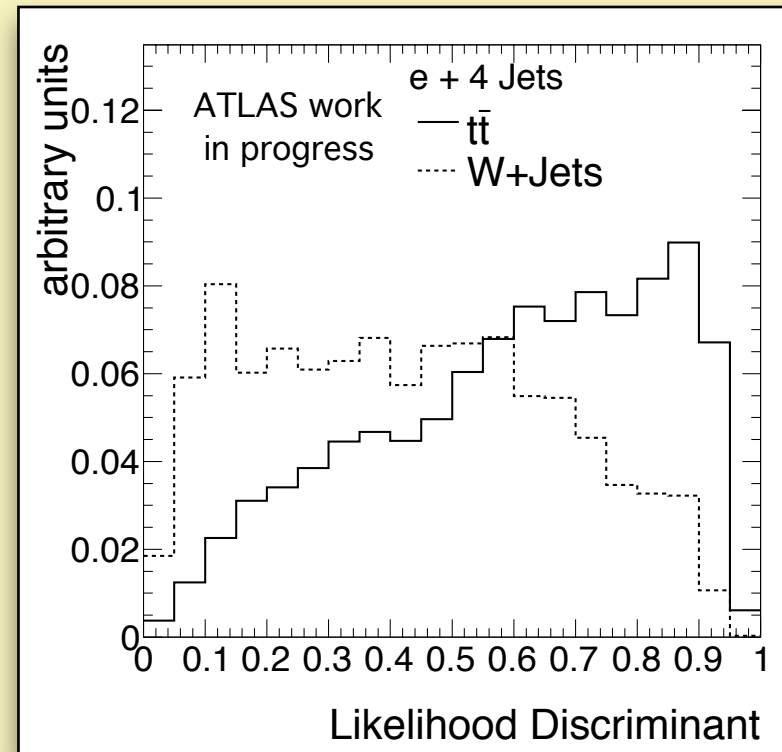
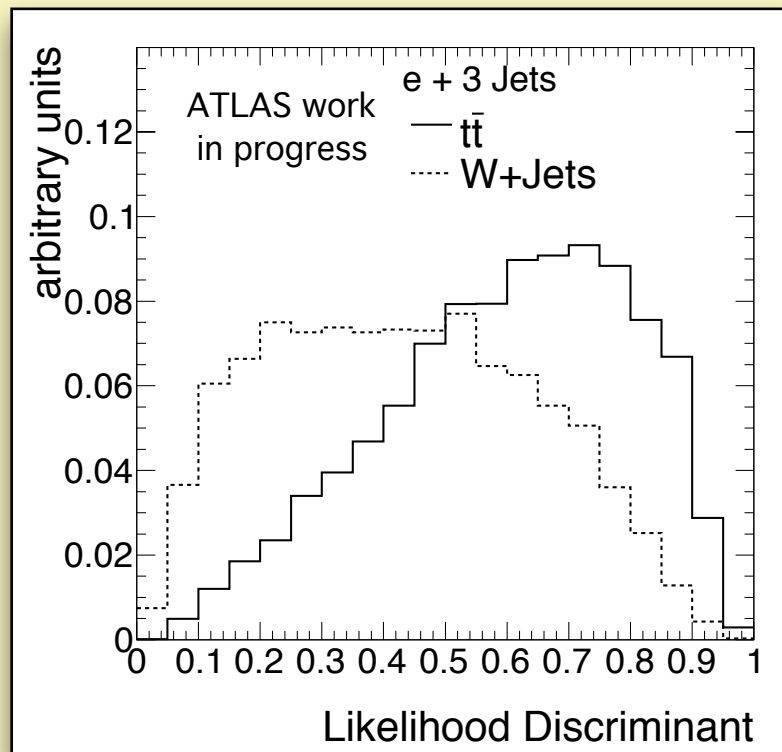
# Variablen $0.7 \text{ fb}^{-1}$

- ★ hohe Statistik - geringere Separationskraft notwendig
- ★ aber: zusätzliche Sensitivität auf dominante Unsicherheiten
- ★ ermöglicht Reduktion der Unsicherheiten auf Jets

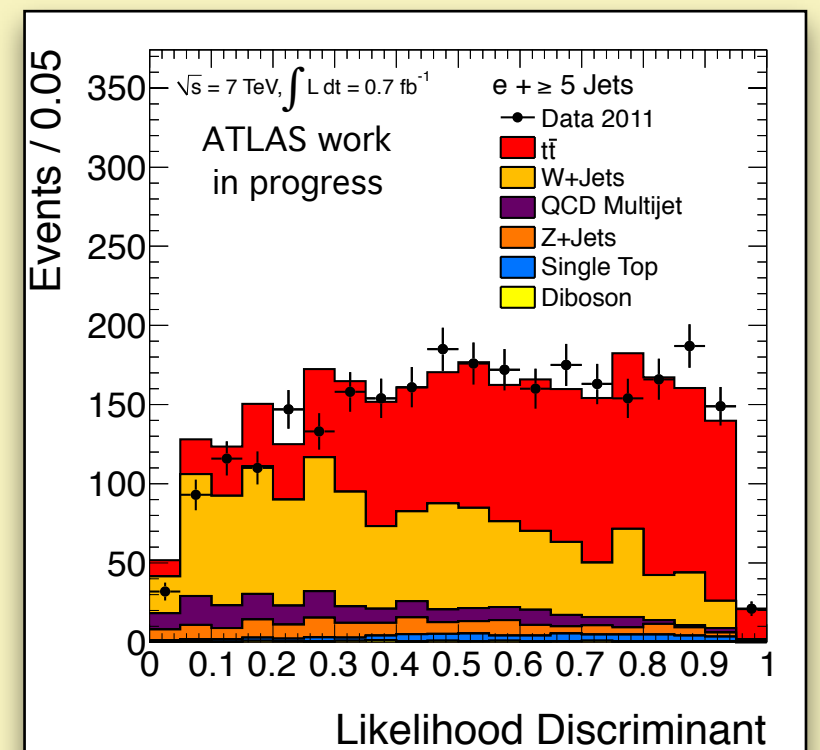
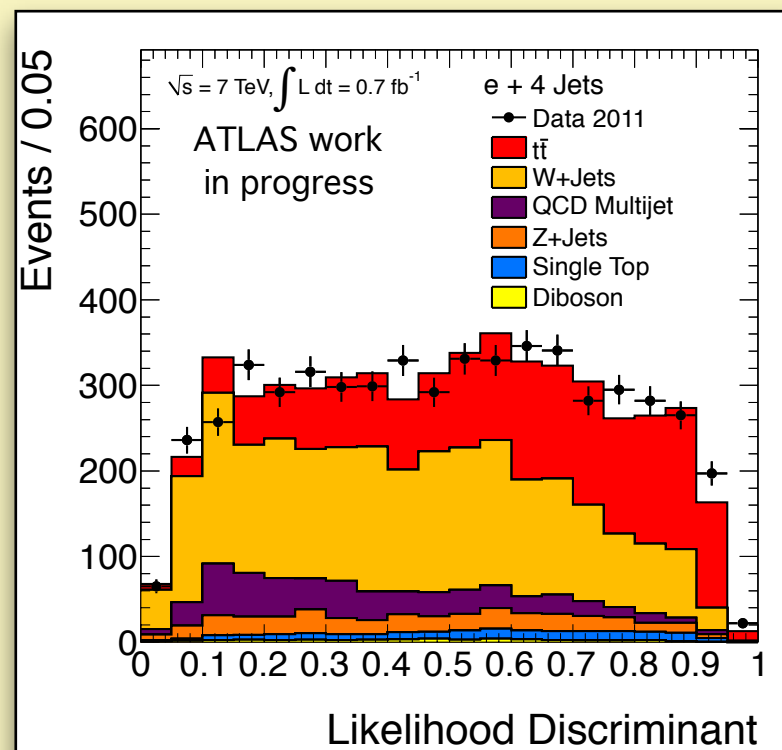
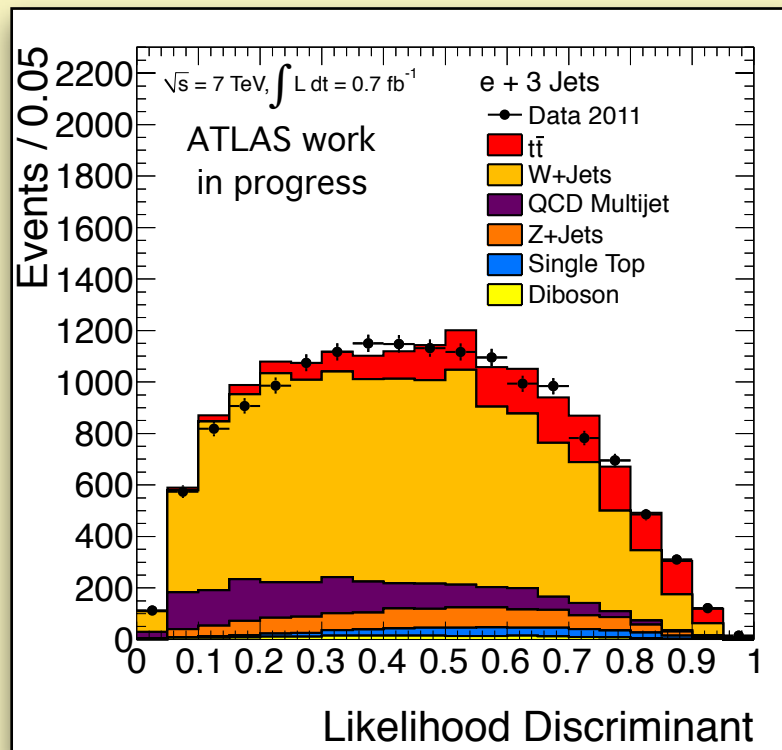


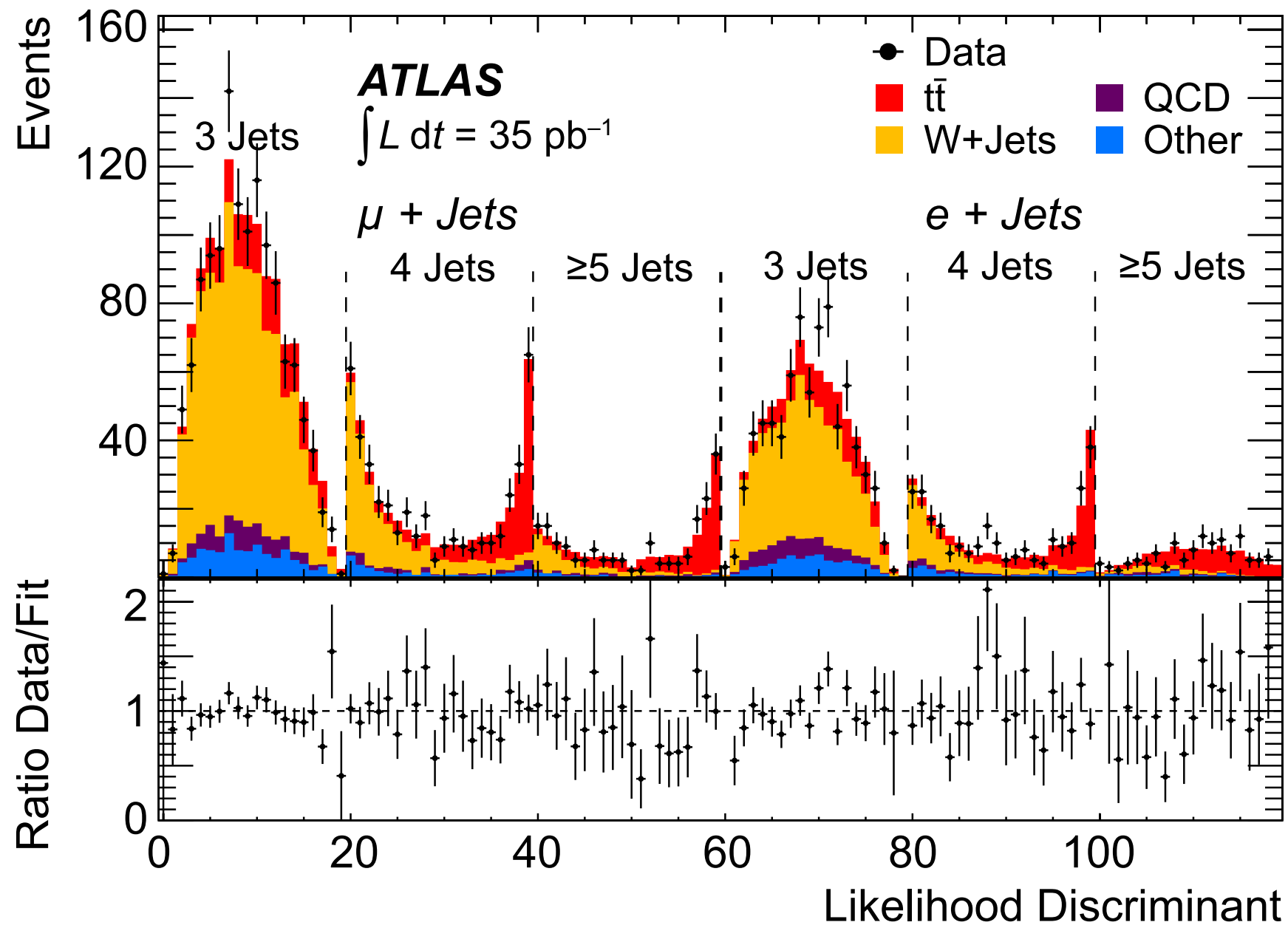
alle aus CERN-THESIS-2012-043

# Diskriminante $0.7 \text{ fb}^{-1}$



alle aus CERN-THESIS-2012-043

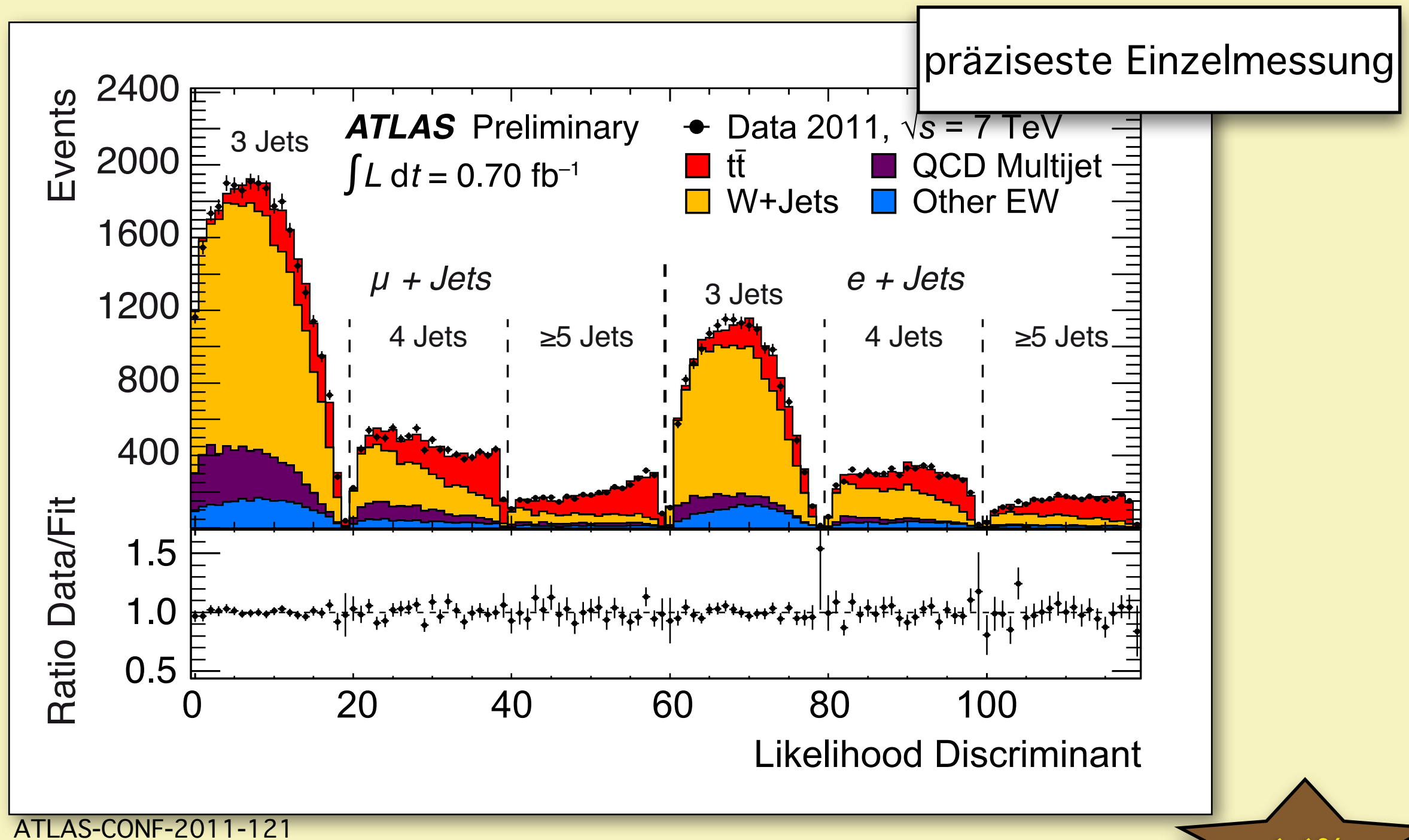




ATLAS-CONF-2011-035, Phys. Lett. B711(2012) p. 244-263

$$\sigma_{t\bar{t}} = 187 \pm 11(\text{stat.})_{-17}^{+18}(\text{syst.}) \pm 6(\text{lumi.}) \text{ pb} = 187_{-21}^{+22} \text{ pb},$$

12%



6.6%

$$\sigma_{t\bar{t}} = 179.0 \pm 4.1(\text{stat.}) \pm 8.8(\text{syst.}) \pm 6.6(\text{lumi.}) \text{ pb} = 179.0 \pm 11.8 \text{ pb.}$$

# Systematische Unsicherheiten

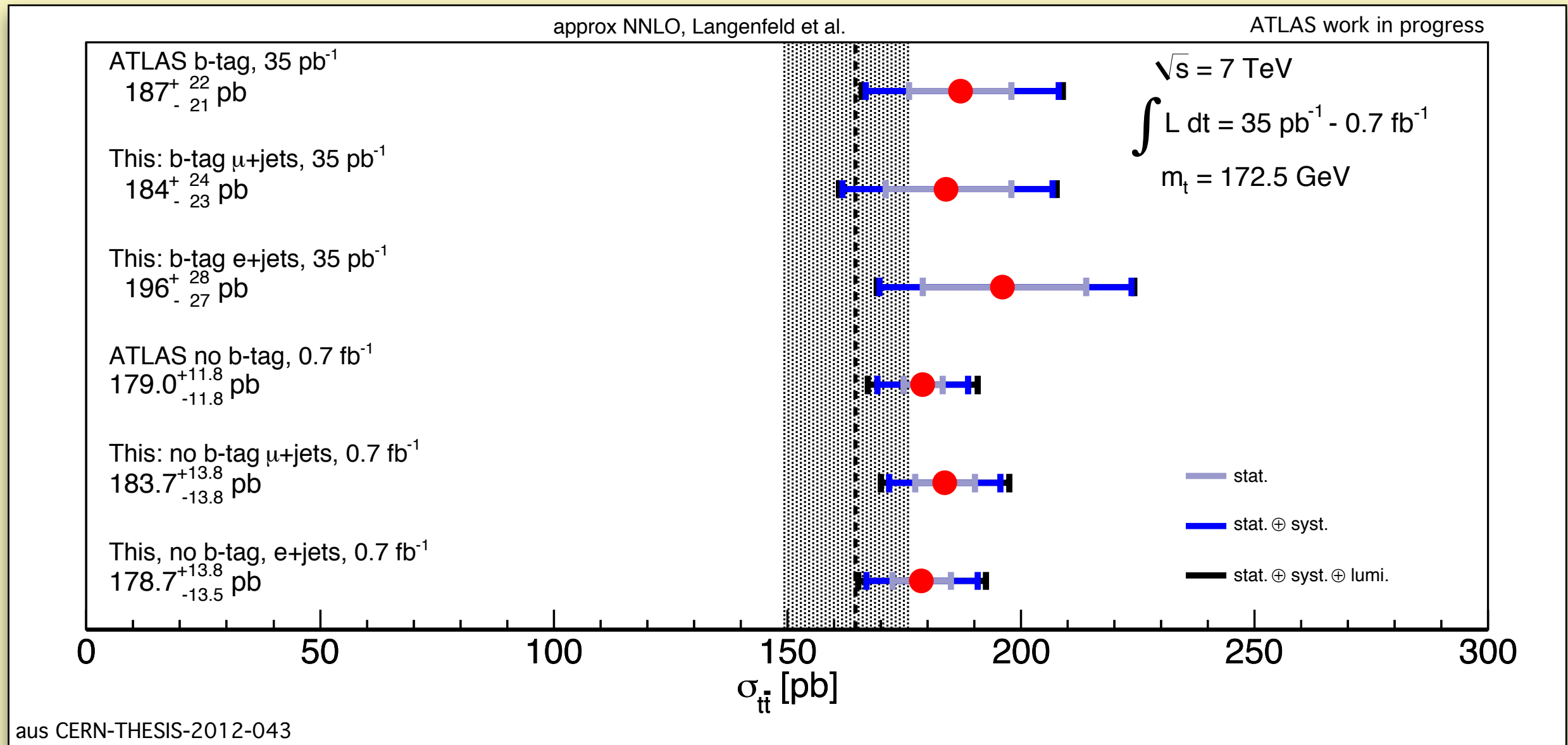
2010

x20

2011

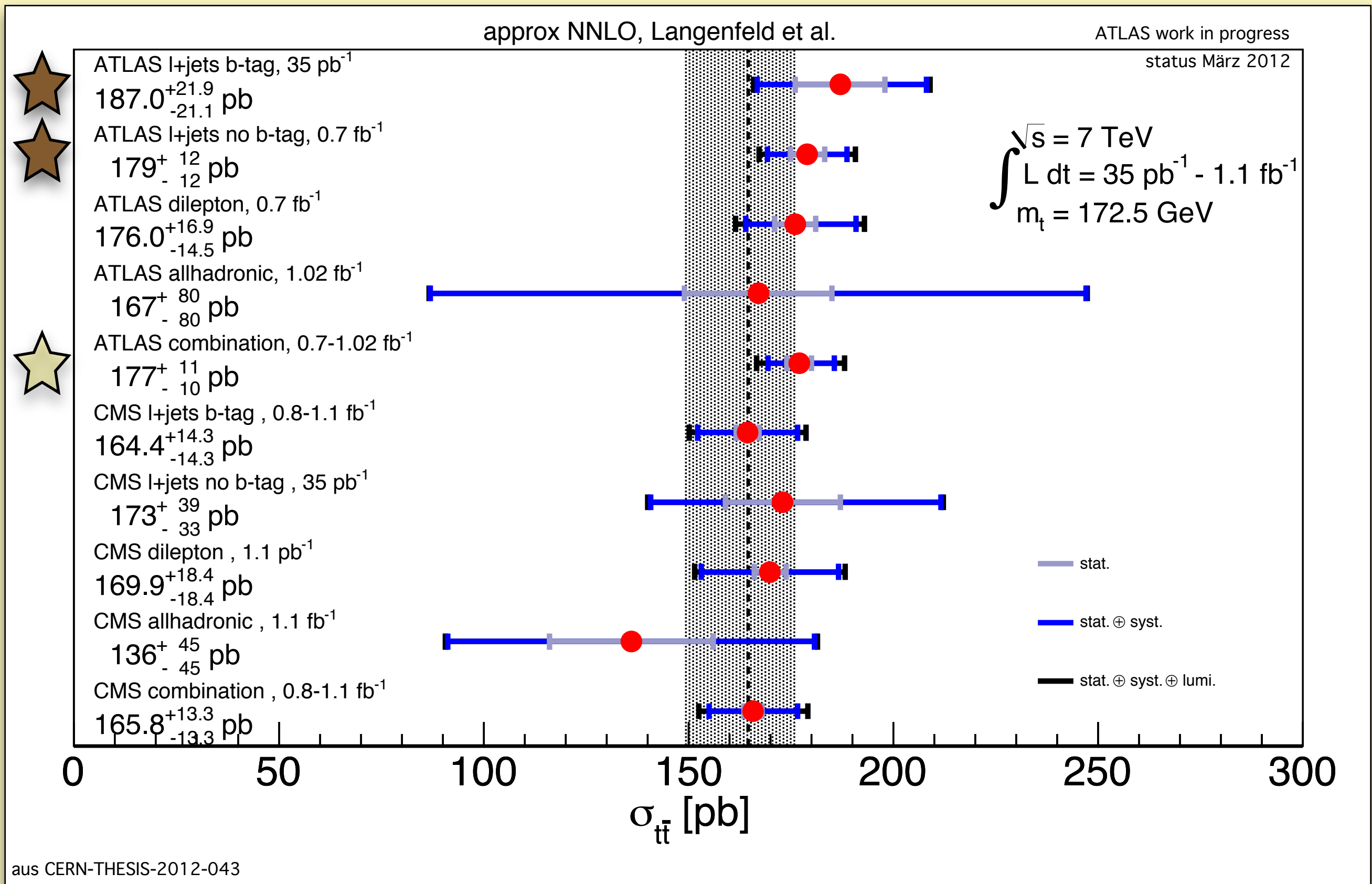
|                                 |   |      |   |      |
|---------------------------------|---|------|---|------|
| Statistical Uncertainty (%)     | + | 5.8  | - | 5.7  |
| Physics Objects (%)             |   |      |   |      |
| Jet Energy Scale                | + | 3.9  | - | 2.9  |
| Jet Reconstruction Efficiency   | + | 0.01 | - | 0.3  |
| Jet Energy Resolution           | + | 0.3  | - | 0.01 |
| Muon Scale Factors              | + | 1.2  | - | 1.1  |
| Muon Smearing                   | + | 0.4  | - | 0.4  |
| Electron Scale Factors          | + | 1.6  | - | 1.4  |
| Electron Smearing               | + | 0.0  | - | 0.0  |
| Electron Energy Scale           | + | 0.5  | - | 0.3  |
| Missing Transverse Energy       | + | 0.01 | - | 0.01 |
| Background Models (%)           |   |      |   |      |
| $W$ + Jets Heavy Flavor Content | + | 2.7  | - | 2.4  |
| $W$ + Jets Shape (*)            | + | 1.0  | - | 1.0  |
| QCD Multijet Shape (*)          | + | 0.8  | - | 0.8  |
| Signal Models (%)               |   |      |   |      |
| ISR/FSR (*)                     | + | 5.2  | - | 5.2  |
| NLO Generator (*)               | + | 4.2  | - | 4.2  |
| Hadronisation (*)               | + | 0.4  | - | 0.4  |
| PDF (*)                         | + | 1.5  | - | 1.5  |
| Others (%)                      |   |      |   |      |
| $b$ -Tagging Calibration        | + | 4.1  | - | 3.8  |
| Pile-Up Simulation              | + | 0.01 | - | 0.01 |
| MC Template Statistics (*)      | + | 1.1  | - | 1.1  |
| Total Systematic (%)            | + | 9.7  | - | 9.0  |

|                               |   |      |   |      |
|-------------------------------|---|------|---|------|
| Statistical Uncertainty (%)   | + | 2.19 | - | 2.18 |
| Physics Objects (%)           |   |      |   |      |
| Jet Energy Scale              | + | 1.57 | - | 2.14 |
| Jet Reconstruction Efficiency | + | 0.28 | - | 0.72 |
| Jet Energy Resolution         | + | 0.87 | - | 0.87 |
| Muon Scale Factors            | + | 1.81 | - | 1.93 |
| Muon Smearing and Scale       | + | 1.01 | - | 0.93 |
| Muon Momentum Scale           | + | 0.90 | - | 0.82 |
| Electron Scale Factors        | + | 1.24 | - | 1.37 |
| Electron Smearing             | + | 0.43 | - | 0.50 |
| Electron Energy Scale         | + | 0.76 | - | 0.80 |
| Missing Transverse Energy     | + | 1.10 | - | 0.93 |
| Background Models (%)         |   |      |   |      |
| $W$ + Jets Shape (*)          | + | 0.49 | - | 0.49 |
| QCD Multijet Shape (*)        | + | 0.37 | - | 0.37 |
| Signal Models (%)             |   |      |   |      |
| ISR/FSR                       | + | 1.68 | - | 1.27 |
| NLO Generator (*)             | + | 3.06 | - | 3.06 |
| Hadronization (*)             | + | 0.53 | - | 0.53 |
| PDF (*)                       | + | 1.01 | - | 1.01 |
| Others (%)                    |   |      |   |      |
| MC Template Statistics (*)    | + | 1.80 | - | 1.80 |
| Total Systematic (%)          | + | 4.99 | - | 4.95 |



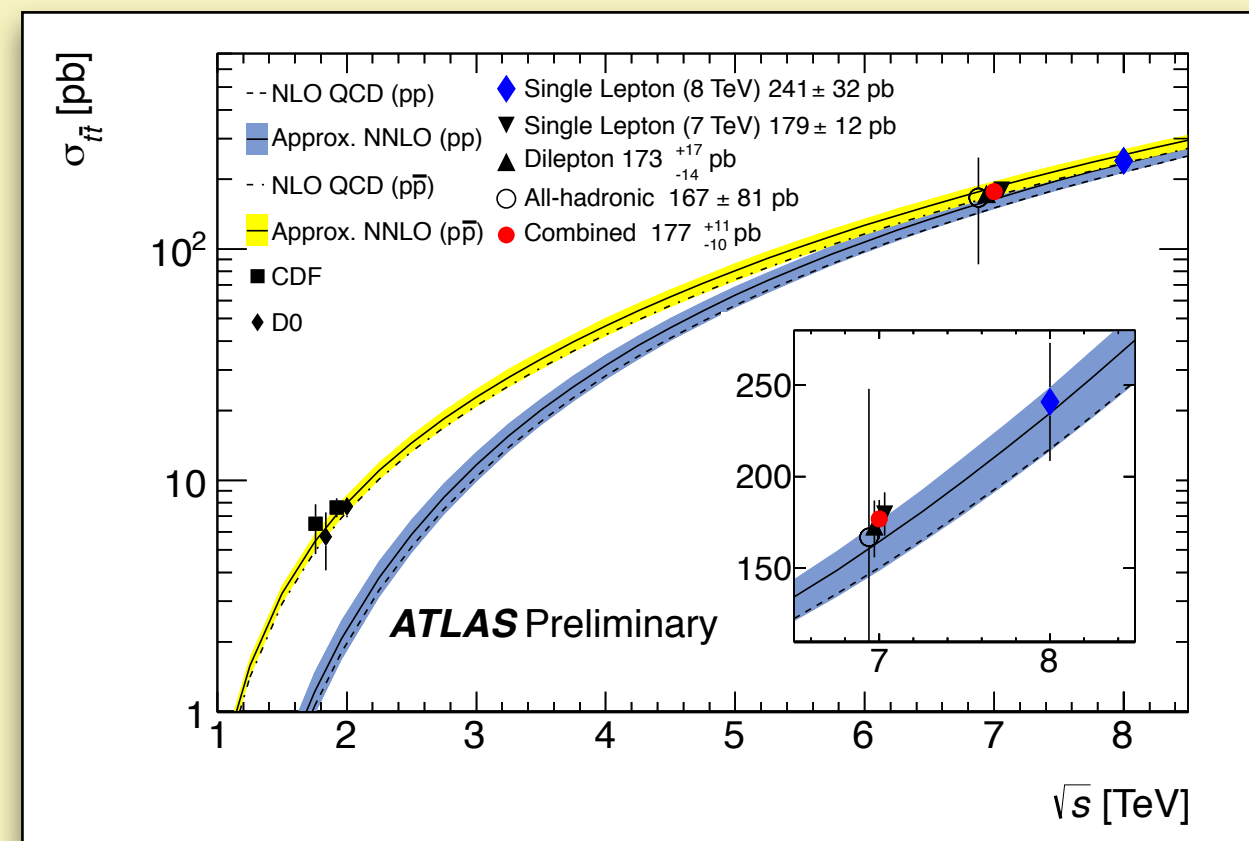
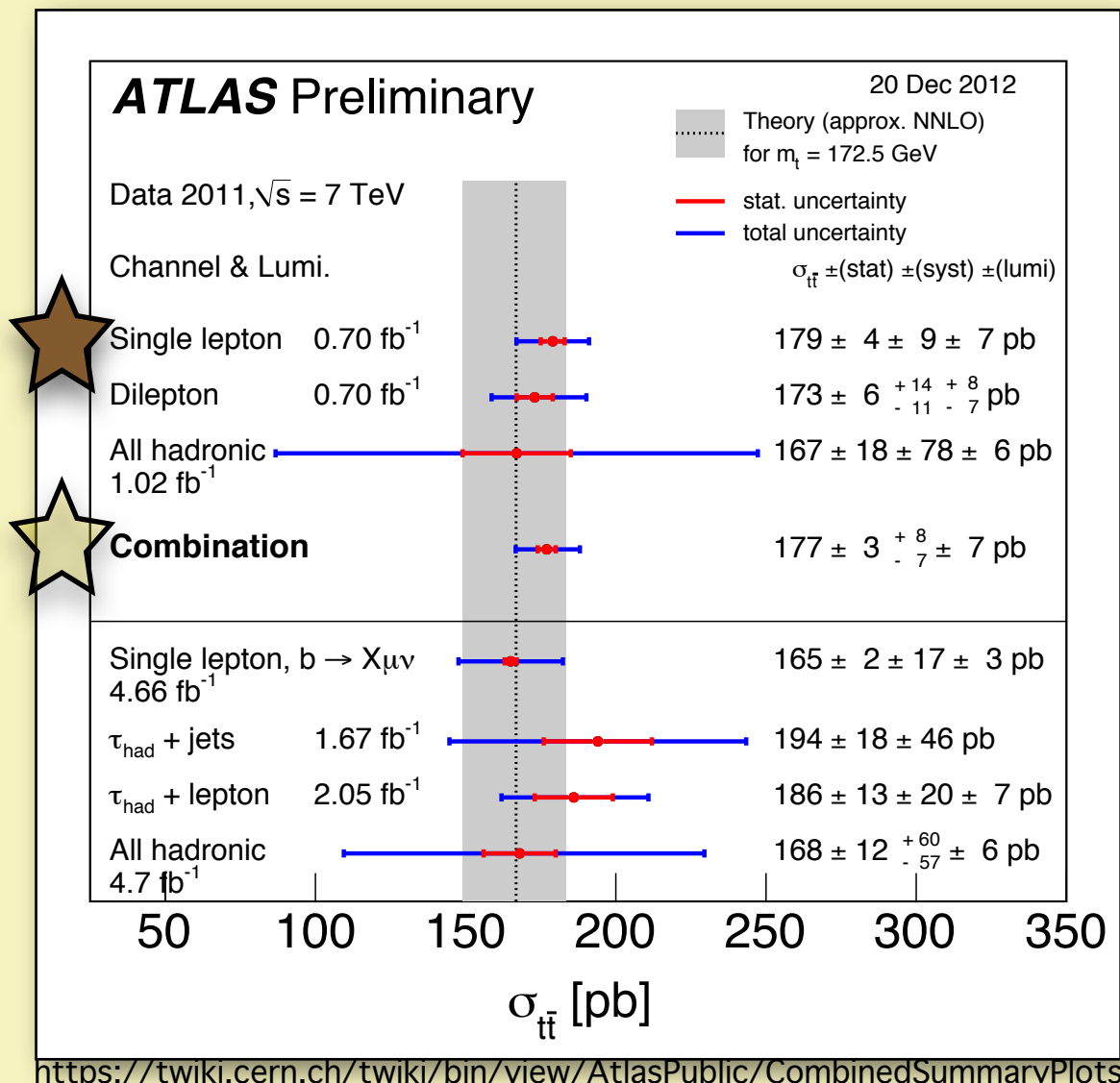
- ★ beide Messungen und einzelne Kanäle konsistent
- ★ limitiert durch systematische Unsicherheiten

# Übersicht der Ergebnisse bei $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$

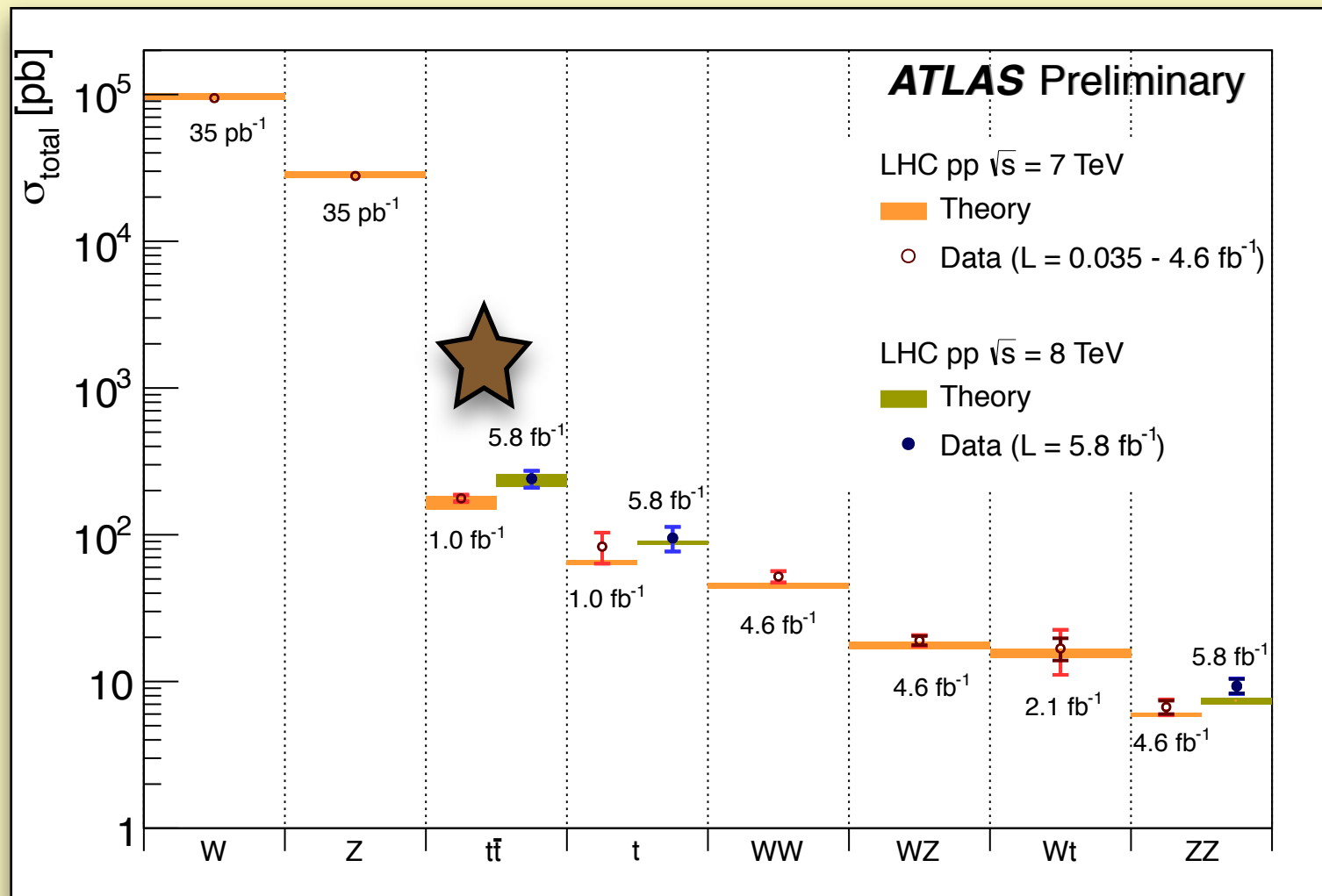


# Status bei ATLAS heute

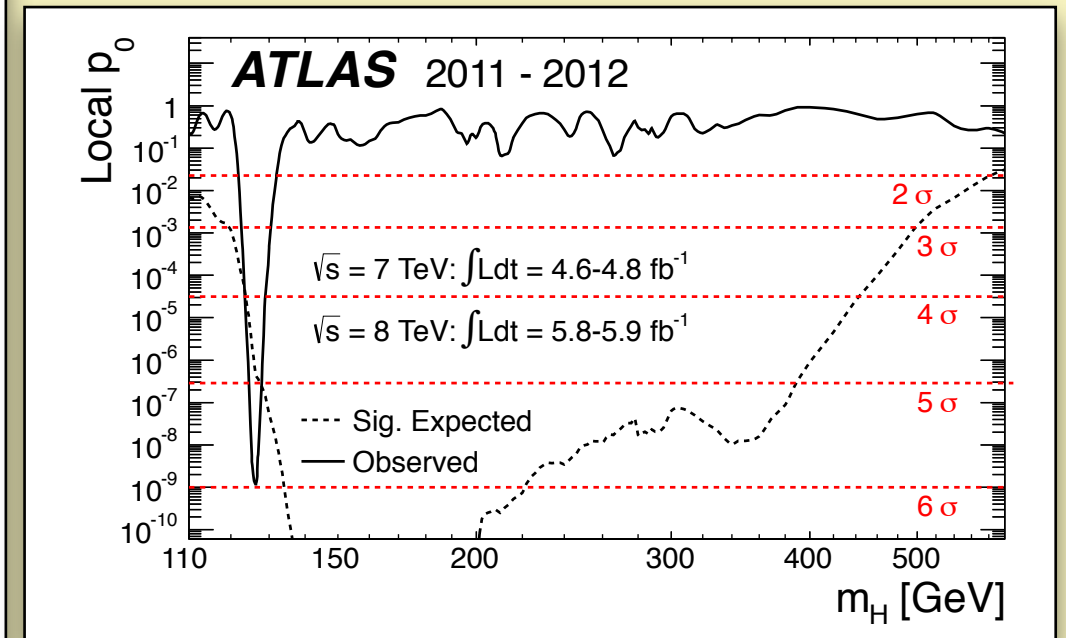
- ★  $\sqrt{7}$  TeV: mehr Messungen in verschiedenen Zerfallskanälen und mit verschiedenen Methoden
- ★  $\sqrt{8}$  TeV: erste Messungen mit Teilen des Datensatzes aus 2012 veröffentlicht



## ★ Standardmodell extrem gut verstanden



<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/CombinedSummaryPlots>

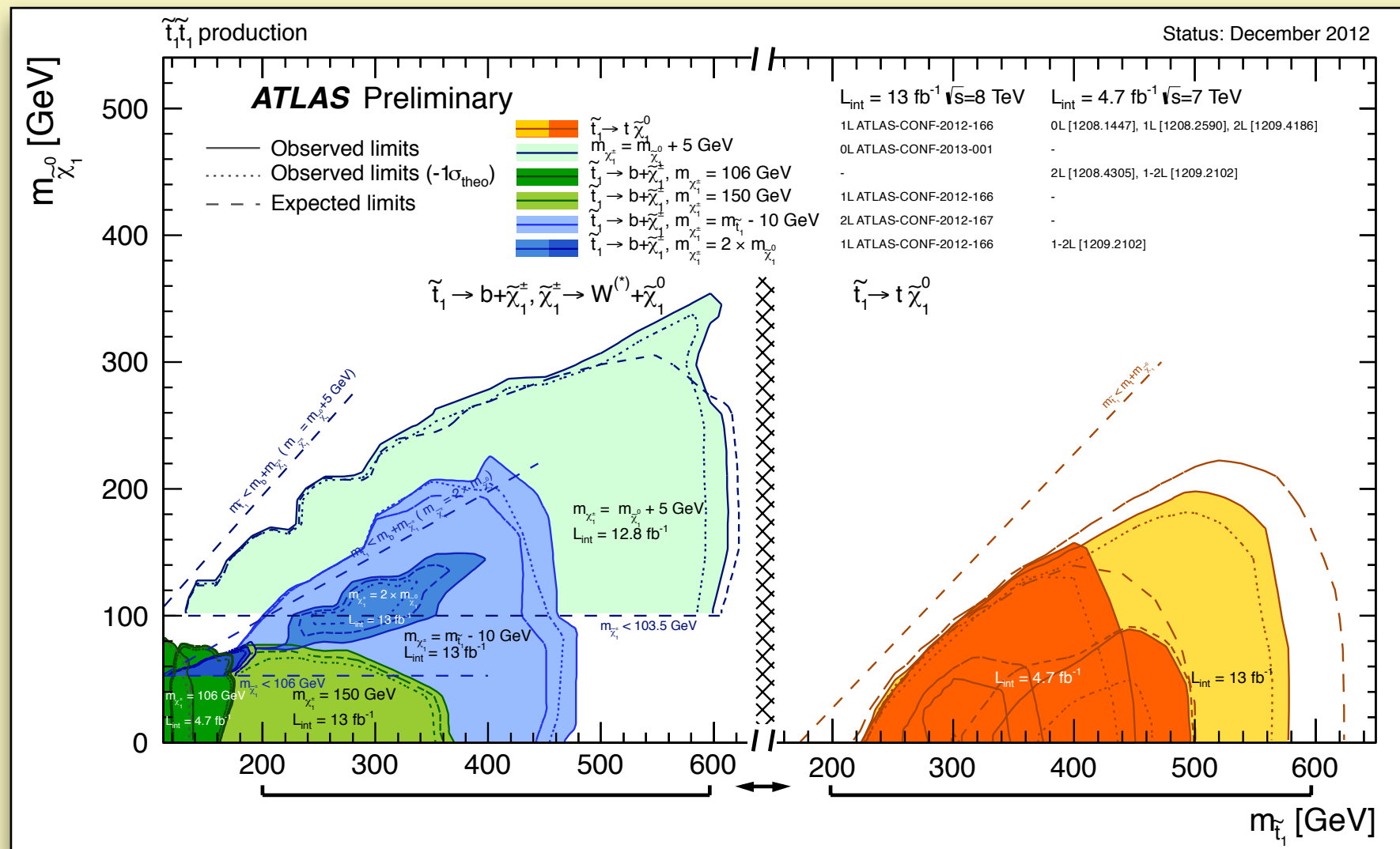


Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29

## ★ aber noch viele Messungen auf vollen Datensätzen mit sehr hoher Präzision geplant

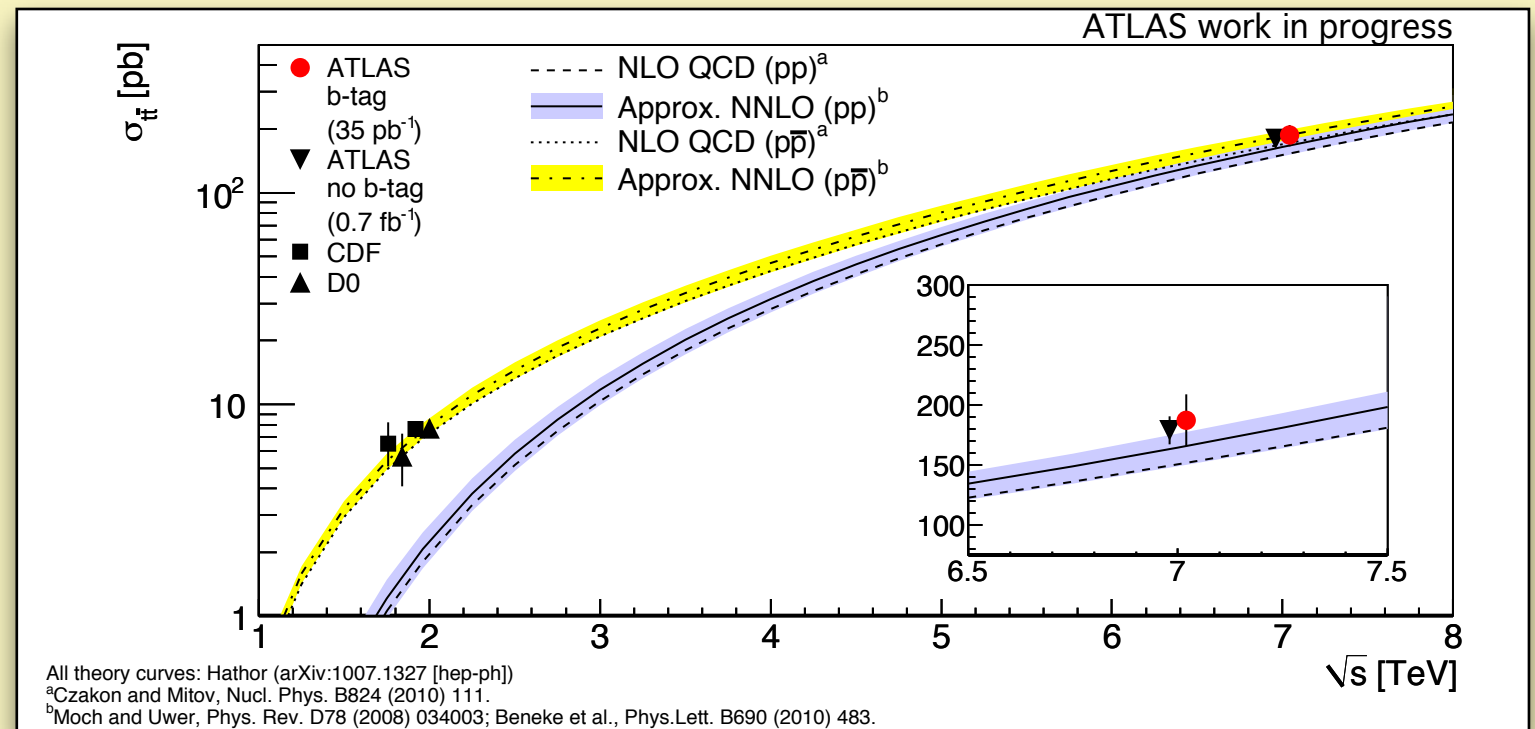
- ★ Standardmodell extrem gut verstanden
- ★ Suche nach neuer Physik geht weiter

- ★ Standardmodell extrem gut verstanden
- ★ Suche nach neuer Physik geht weiter
- ★ z.B. supersymmetrischer Top Partner



<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/CombinedSummaryPlots>

## ★ Präzisionsmessungen zur Produktion von Top Quark Paaren in Daten des ATLAS Experiments



aus CERN-THESIS-2012-043

- ★ 2011-Analyse ist eine der präzisesten Einzelmessungen und präziser als Theorievorhersagen
- ★ guter Übereinstimmung mit SM Vorhersagen
- ★ erlaubt präzise Vermessung der Eigenschaften des Top Quarks & Suche nach neuer Physik
- ★ fortschrittliche Analysemethoden kalibriert & etabliert