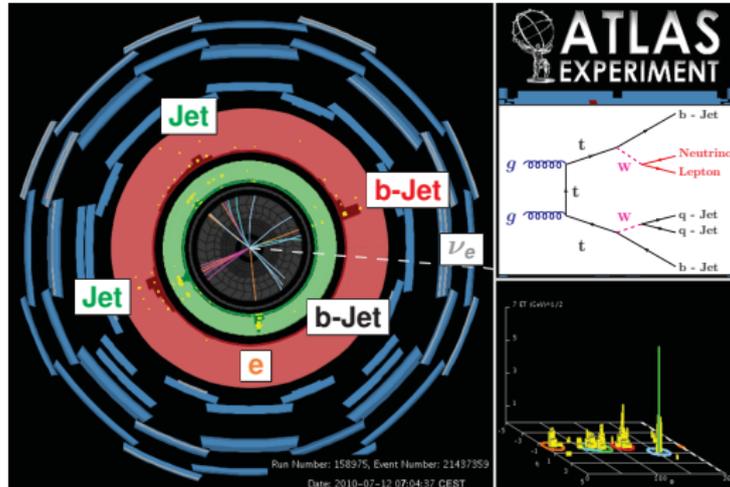


Messungen der Topquark-Masse im ATLAS-Experiment am LHC



LMU München, 11. Juli 2012

LMU

Richard.Nisius@mpp.mpg.de
(MPP München)



Übersicht

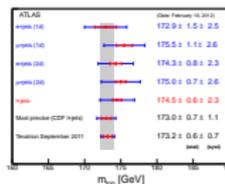
- Einführung



- Der LHC-Beschleuniger



- Das ATLAS-Experiment



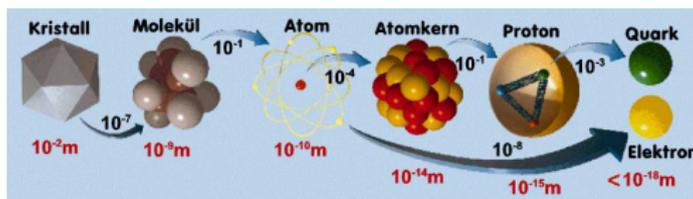
- Die Topquark-Masse



- Einschub aus aktuellem Anlass

- Zusammenfassung

Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält

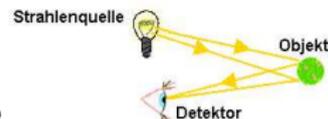


Die zwei Hauptfragen der Elementarteilchenphysik

- Welches sind die kleinsten Bausteine der Natur, und was sind ihre Eigenschaften?
- Was sind die fundamentalen Wechselwirkungen dieser Bausteine?

Der Weg der Beschleunigerphysik

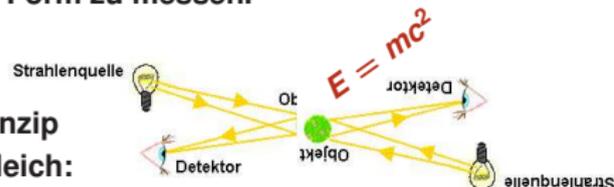
- Zur Lösung braucht man einen Weg kleinste Strukturen und ihre Wechselwirkungen zu sehen, d.h. in irgendeiner Form zu messen.



- Wir machen zwar ein

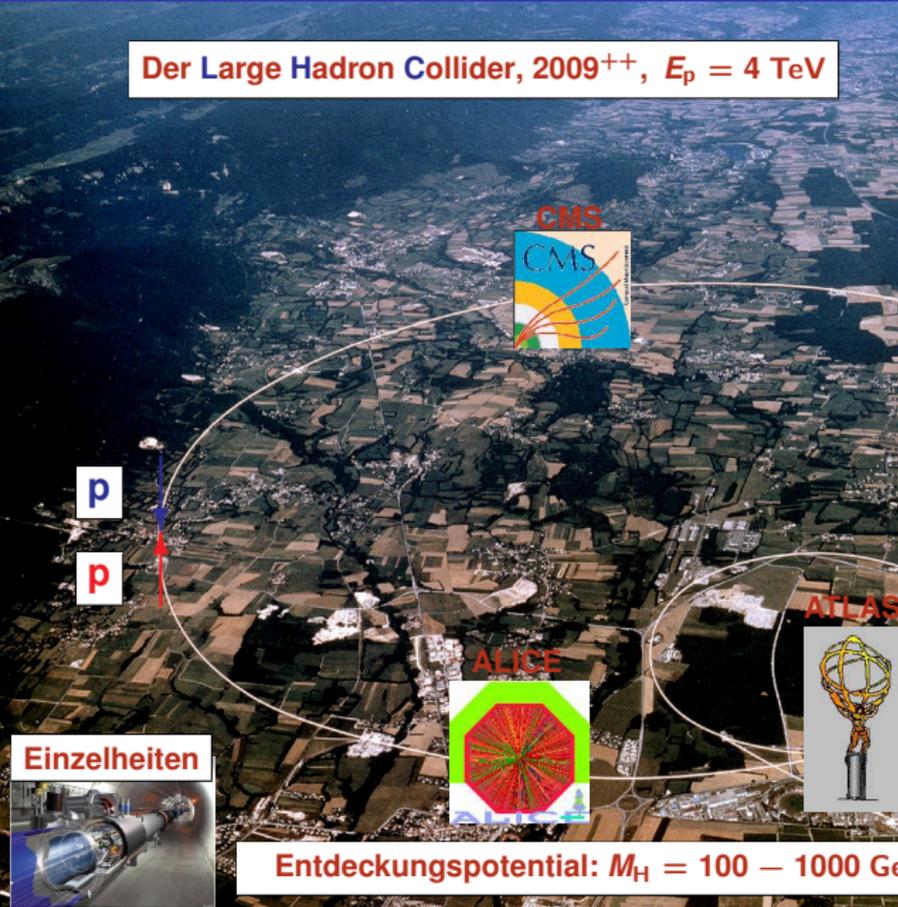


aber das Prinzip bleibt fast gleich:

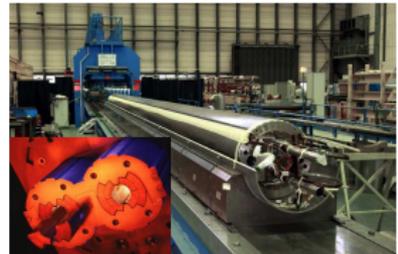


Bevor wir das Objekt bzw. seine Zerfallsprodukte sehen, erzeugen wir es.

Der Large Hadron Collider, 2009⁺⁺, $E_p = 4$ TeV



Die supraleitenden Magnete



Anzahl	1232
Länge	14.3 m
Gewicht	35 t
B-Feld	8.4 T
Temperatur	1.9 K
Strom	11700 A
Energie	7.1 MJ

Einzelheiten



Entdeckungspotential: $M_H = 100 - 1000$ GeV

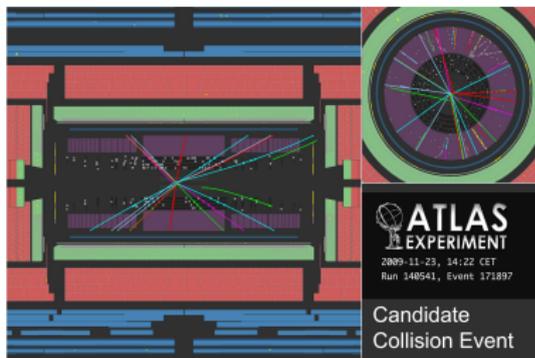
Ein Vergleichsobjekt



590 t

$v=18(620)$ km/h

Die Chronologie der Ereignisse



<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Public/EVTDISPLAY/events.html>

20.11.09 — Start des LHC.

← 23.11.09 — Kollisionen 2 x 0.45 TeV.

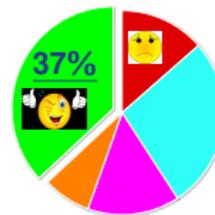
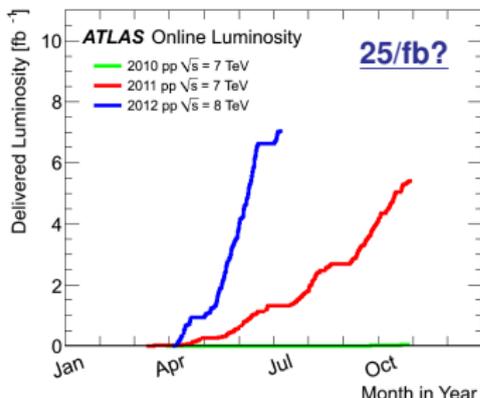
08.12.09 — Kollisionen 2 x 1.18 TeV.

28.03.10 — Start Datennahme 2 x 3.5 TeV.

30.03.12 — Start Datennahme 2 x 4 TeV.

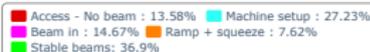
Die Effizienz des LHC

- Jahres-Luminositäten, **2010**: 0.045/fb, **2011**: 5.3/fb.
- $N_{\text{Ereignisse}} = \text{Luminosität} \cdot \text{Wirkungsquerschnitt}$
- $N(t\bar{t}, 1/\text{fb}) = 170.000$ Topquark-Paare.



← **LHC Status in 2012**

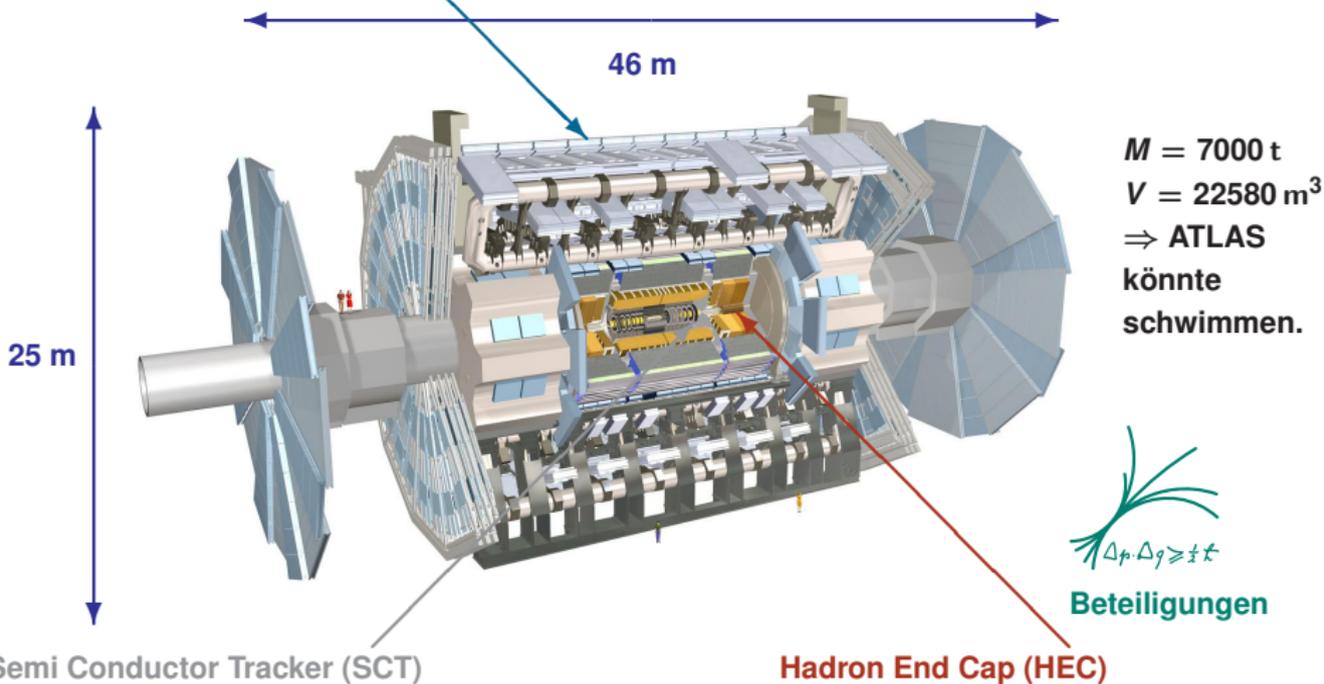
In 2012 bis dato
26 volle Tage
Datennahme, mit
7.18/fb (11.07.2012).



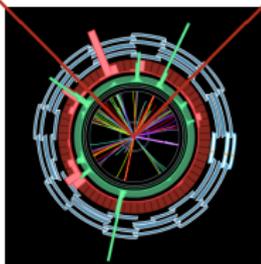
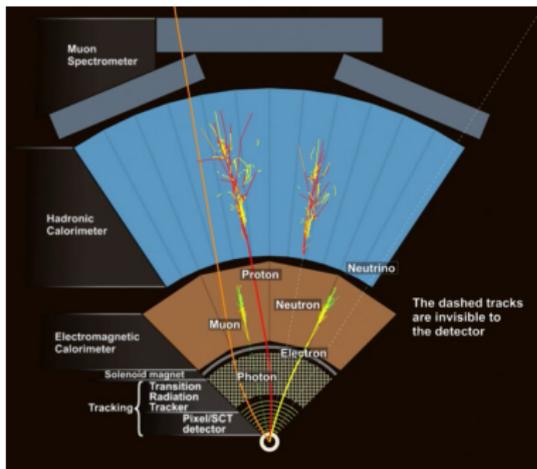
Die LHC Lernkurve ist sehr steil.

Der ATLAS-Detektor

Monitored Drift Tubes (MDT)



Das Bauprinzip von Teilchendetektoren



Das Prinzip

- In einer Art Zwiebelschalendesign um die Strahlröhre werden die verschiedenen Teilchen an Hand ihrer typischen Wechselwirkungen nachgewiesen.
- Die Messgrößen sind Ort, Impuls, Ladung, Energie...
- Bei komplizierten Zerfällen wird aus der Summe aller Zerfallsprodukte auf die Eigenschaften der primär erzeugten Teilchen geschlossen.
- Datenmenge einer 100 Megapixel Kamera mit 40 Millionen Schnappschussmöglichkeiten pro Sekunde.
- Ein 3-stufiger Entscheidungsprozess bringt uns von

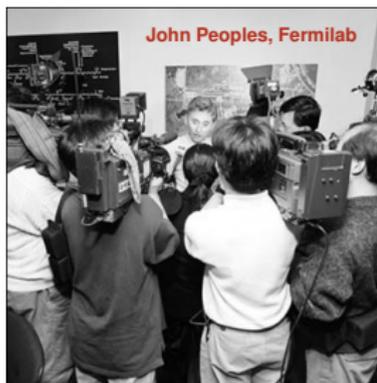
40 MHz →  ,  ,  → 300 Hz.

- Die jährliche Rohdatenmenge: 1000  à 2 TB.

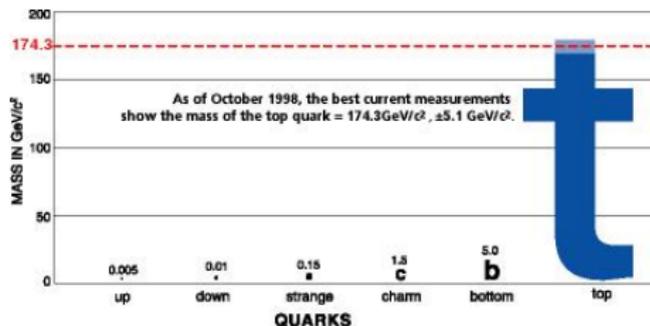
Bau und Betrieb von Teilchendetektoren sind sehr komplexe Aufgaben.

Das Topquark - seine kurze Geschichte

Pressekonferenz März 1995



- Die sechs Quarks: $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s \\ c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$.
- Nach der Entdeckung des Bottomquarks 1977 wurde das Topquark (Truthquark) als dessen Partner vorhergesagt.
- Nach erfolglosen Suchen z.B. am LEP-Beschleuniger, wurde es schließlich 1995 am Tevatron entdeckt.
- Es ist so kurzlebig, dass es als einziges Quark keine Hadronen bildet, sondern frei zerfällt.



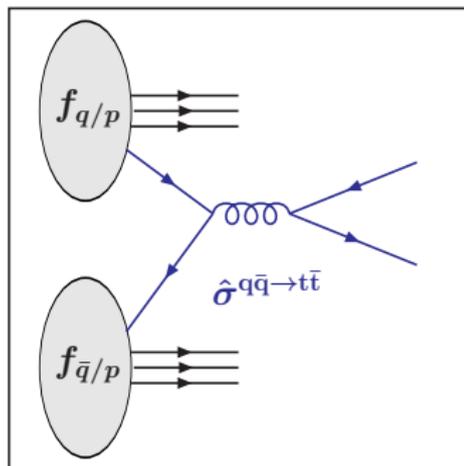
Die Massenhierarchie

- Die Massenhierarchie der Quarks ist mit $\frac{m(t)}{m(u)} \approx 100000$ sehr groß und bis heute auch unverstanden.

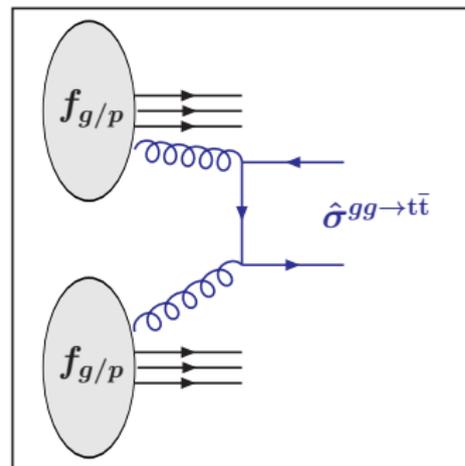
Topquarks werden detailliert vermessen.

Die Topquark-Paarproduktion am LHC

Quark induzierte Prozesse (ca 10%)



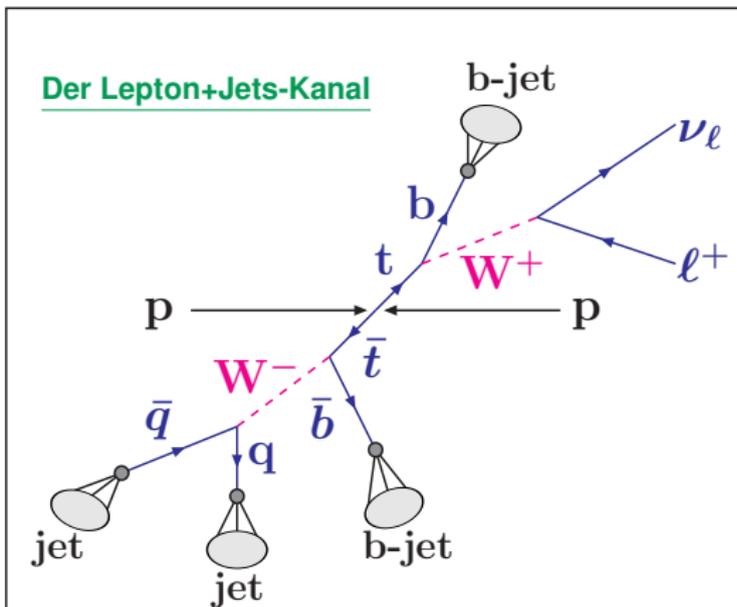
Gluron induzierte Prozesse (ca 90%)



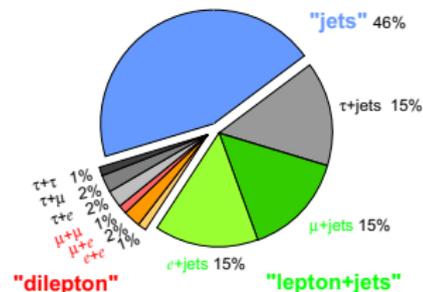
- Der Wirkungsquerschnitt ist: $\sigma(t\bar{t}) = 170 \text{ pb}$ für $m_{\text{top}} = 172.5 \text{ GeV}$ und $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$.
 ⇒ Im Jahr 2011 haben wir ca. 900.000 Topquark-Paare aufgezeichnet.

Der LHC-Beschleuniger ist eine Topquark-Fabrik

Der Zerfall des Topquark-Paars



- Topquarks zerfallen fast immer via $t \rightarrow W b$. Die Ereignisse werden deshalb nach W-Zerfällen klassifiziert.



- **Dilepton**: geringe Rate (4%), hohe Reinheit, kinematisch unterbestimmt.
- **Lepton+Jets**: mittlere Rate (30%), Lepton 'Tag', bester Kompromiss.
- **Jets**: höchste Rate (46%), aber auch größter Untergrund.

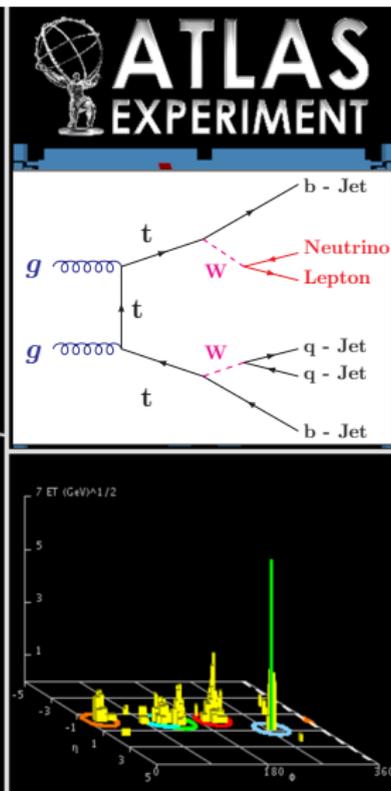
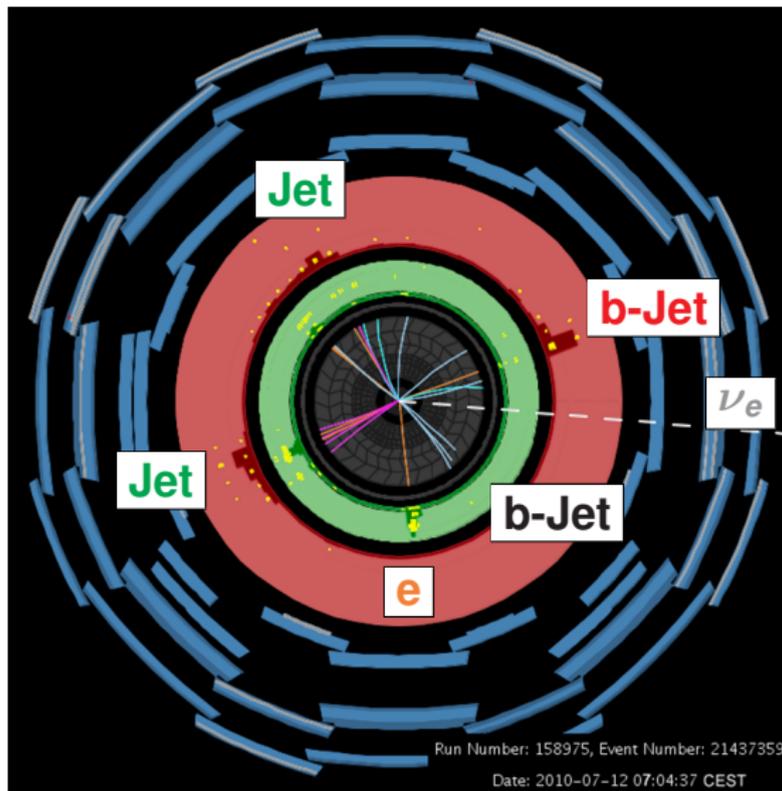
Der Lepton+Jets-Kanal liefert zur Zeit die kleinsten Fehler für die Topquark-Masse

Ein Topquark-Paarereignis

$$t\bar{t} \rightarrow (b e \nu) (b q q)$$

$$M(qq) = m_W$$

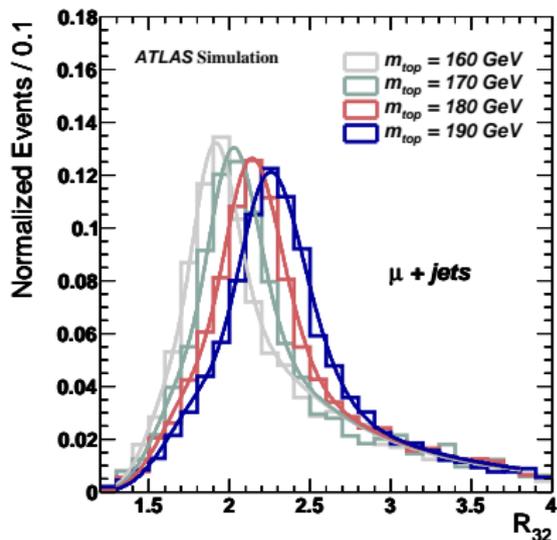
$$M(bqq) = m_{\text{top}}$$



Die Grundidee einer Template-Analyse

* Idee: Klaus Hermann, Diplomarbeit LMU

Signal Templates



– Observable: m_{top}

– Schätzfunktion: $R_{32} = \frac{m(3-Jet)}{m(2-Jet)}$ *

– Erwartung: $R_{32} = \frac{172.5}{80.4} = 2.15$.

– Sensitivität: $\Delta(m_{top}) = 1 \text{ GeV} \Leftrightarrow \Delta(R_{32}) = 0.012$.

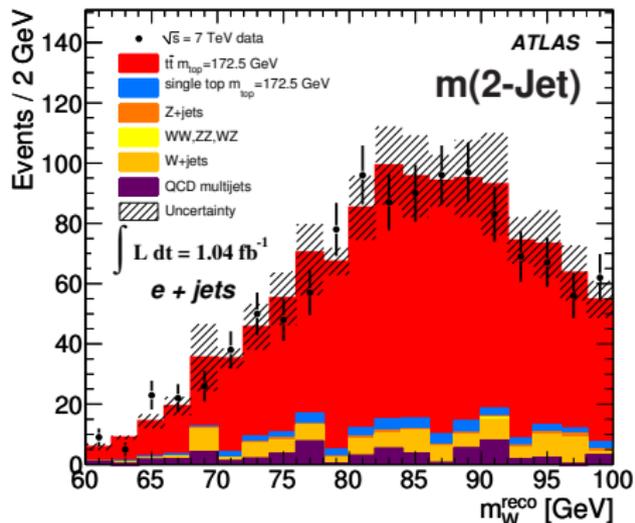
Die Schritte zur Messung

- Simulation von Verteilungen von Schätzfunktionen einer physikalischen Observablen als Funktion eines angenommenen Wertes dieser Observablen = **Templates** der Monte Carlo Erwartung.
- Anpassung der Templates mit Funktionen deren Parameter (z.B. $\mu = \mu_0 + m_{top} \cdot \mu_1$) linear von m_{top} abhängen = **Templatefit**.
- **Likelihood Anpassung der Daten** durch die Template-Fitfunktion allein durch Variation des Wertes der Observablen → **Der zentrale Messwert und der statistischer Fehler**.
- Wiederholung der Anpassung nach Variation systematischer Effekte in den Templates → **Die Größe der systematischen Unsicherheit**.

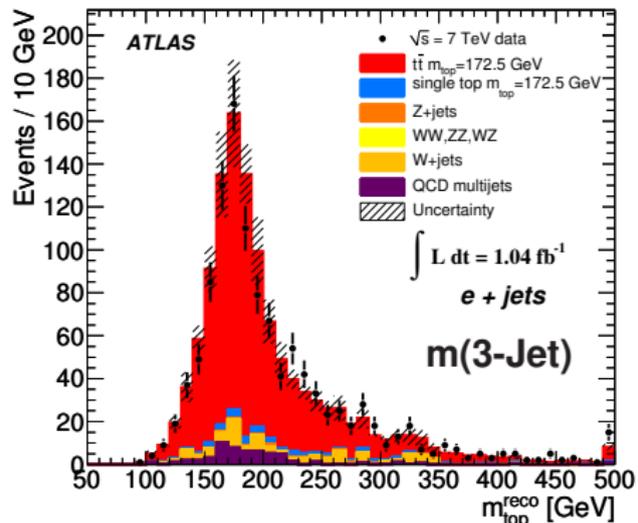
Diese Methode nutzt die gesamte Information der gemessenen Verteilung.

Die rekonstruierten Massen in den Daten

Die W-Boson-Masse



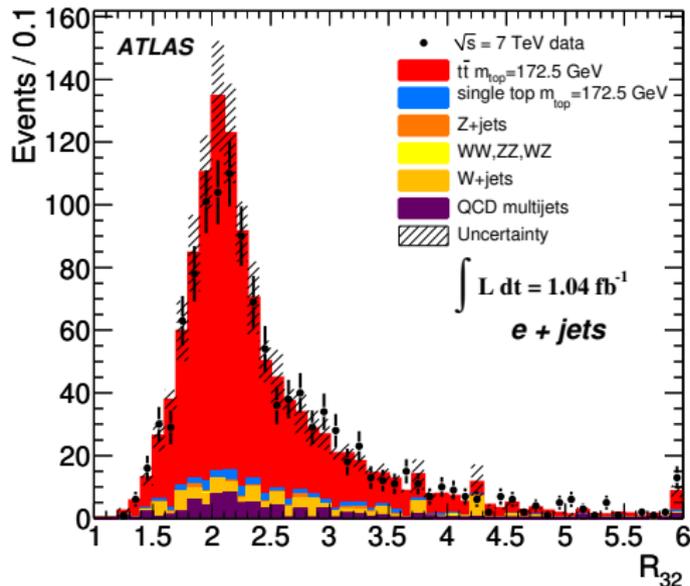
Die Topquark-Masse



- Die wichtigsten Untergrundreaktionen, W+Jets und QCD multijet, werden aus den Daten bestimmt, der Rest aus simulierten Ereignissen.
- Die Daten können durch die Vorhersagen gut beschrieben werden.

Aus diesen beiden Massen wird der Schätzfunktion für die Topquark-Masse gebildet.

Das Massenverhältnis R_{32}



Der Mechanismus zur JES-Stabilisierung

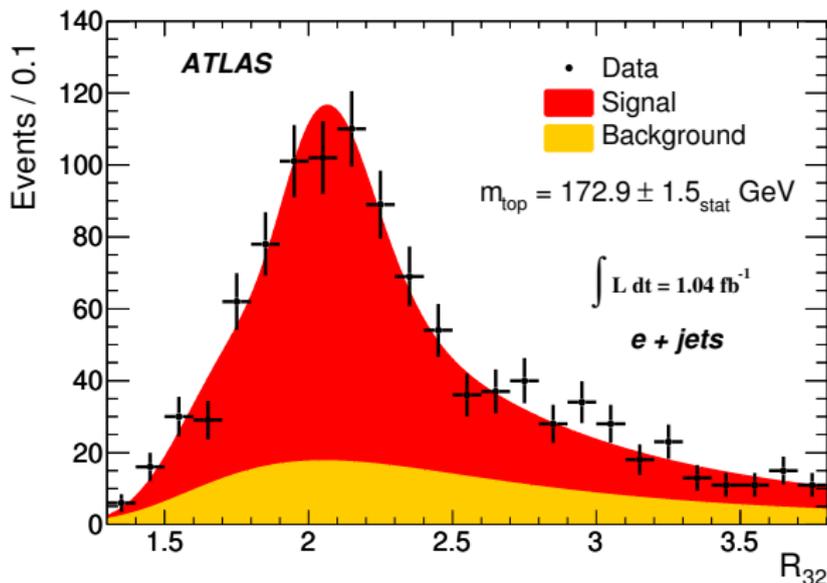
- $R_{32} \equiv \frac{m_{\text{top}}^{\text{reco}}}{m_{\text{W}}^{\text{reco}}} = \frac{M(\text{Jet}, \text{Jet}, \text{b-Jet})}{M(\text{Jet}, \text{Jet})}$
- Eine Änderung der Jet-Energieskala (JES), also $E'_{\text{Jet}} = f_{\text{Jet}} \cdot E_{\text{Jet}}$, ändert die Jets in $m_{\text{top}}^{\text{reco}}$ **und** $m_{\text{W}}^{\text{reco}}$.
- Eine Änderung der b-Jet-Energieskala (bJES) ändert **nur** einen Jet in $m_{\text{top}}^{\text{reco}}$.

Das Resultat

- Gute JES-Stabilität, aber bJES-JES-Unterschiede können nicht ausgeglichen werden.

Die bJES-JES-Unterschiede bleiben eine Quelle signifikanter Unsicherheit.

Die Messung im Elektron+Jets-Kanal aus 2011 Daten

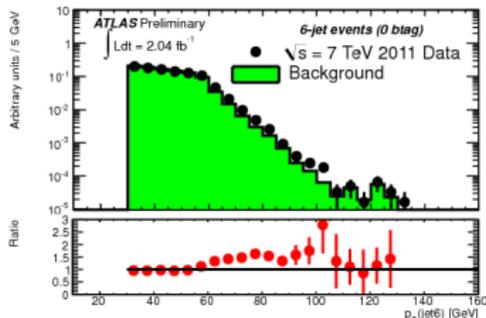


- Das Messresultat ist: $m_{\text{top}} = (172.9 \pm 1.5_{\text{stat}} \pm 2.5_{\text{syst}}) \text{ GeV}$. Wichtigste systematische Unsicherheiten: 1.4 GeV (QCD-Strahlung), 1.2 GeV (JES), 1.2 GeV (bJES).

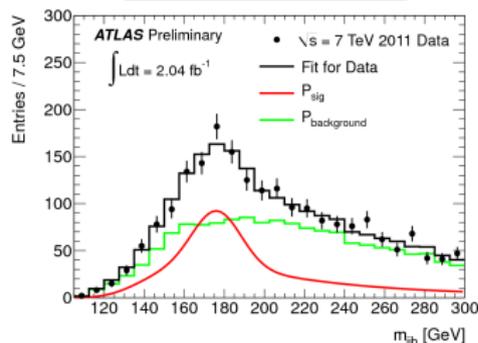
Die Kombination der Lepton+Jets-Kanäle liefert eine stat. Unsicherheit auf 0.9 GeV.

Messung im Jets-Kanal

Kontrolle des Ereignismischung



Die Datenverteilung



Die Untergrundbestimmung

- Die Simulation des dominanten QCD multijet Untergrunds ist nicht genau genug \Rightarrow 'Vorhersage' aus den ATLAS Daten mittels Ereignismischung.
- Nehme 5-Jet Ereignisse und mische 6-ten Jet aus einem anderem Ereignis \Rightarrow Statistisch unabhängige Referenzverteilung für den erwarteten Untergrund in den Daten.
- Zufriedenstellende Übereinstimmung mit echten 6-Jet Ereignissen. Der restliche Unterschied ist Teil der systematischen Unsicherheit von m_{top} .

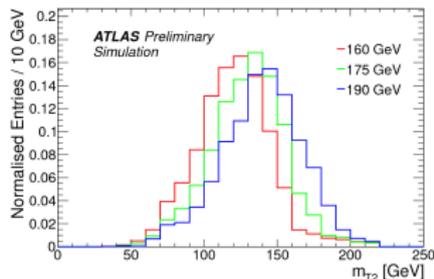
Das Ergebnis

- $m_{\text{top}} = (174.9 \pm 2.1_{\text{stat}} \pm 3.8_{\text{sys}}) \text{ GeV}$
- Wichtigste systematische Unsicherheiten: 2.1 GeV (JES), 1.9 GeV (Untergrund), 1.4 GeV (bJES)

Die erste Messung im Jets-Kanal am LHC.

Messung im Dilepton-Kanal

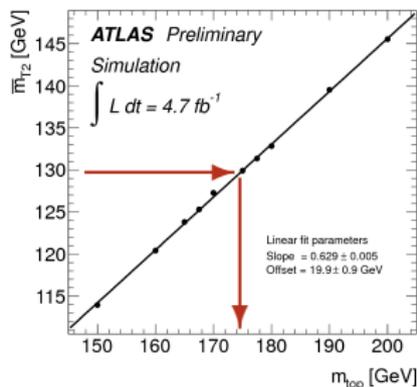
Die Sensitivität



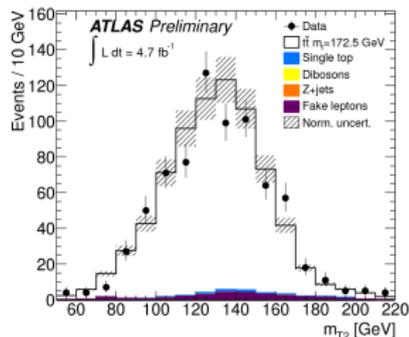
Die Datenauswertung

- Der Mittelwert der Verteilung der transversalen Masse $m_{T2} = m(bl\nu)$ ist die Schätzfunktion für m_{top} .
- Ablesen der gemessenen Masse aus der Kalibrationskurve.
- Resultat: $m_{\text{top}} = (175.2 \pm 1.6^{+3.1}_{-2.9}) \text{ GeV}$
- Wichtigste systematische Unsicherheiten: 1.5 GeV (JES), 1.3 GeV (Signal-MC), 1.3 GeV (bJES)

Die Kalibrationskurve



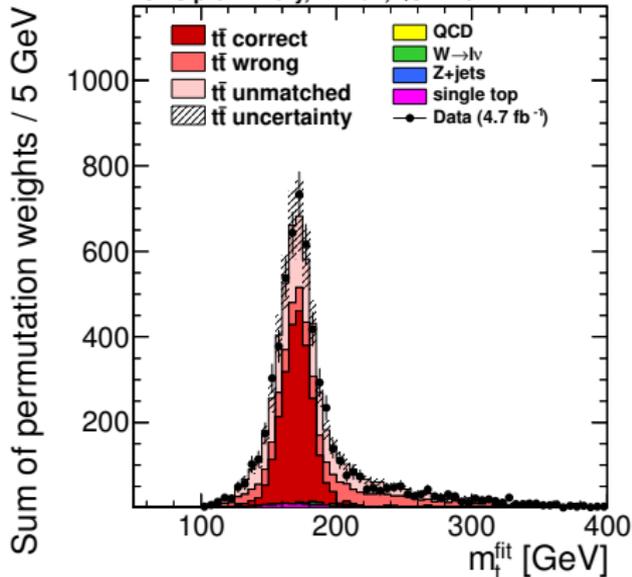
Die Datenverteilung



Erste ATLAS Messung im Dilepton Kanal.

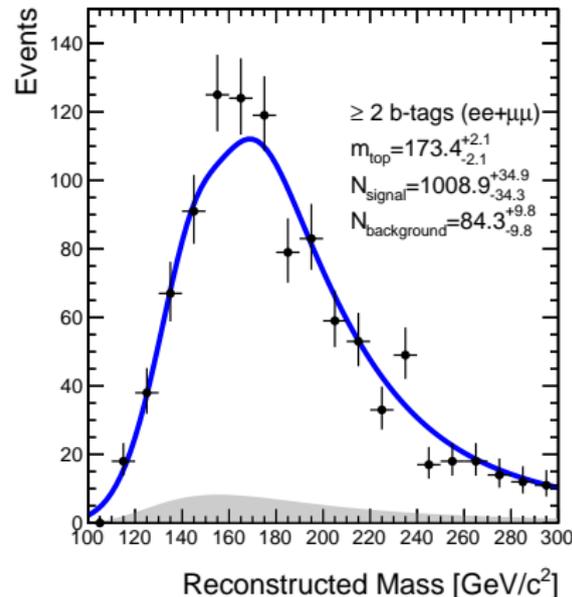
Die genauesten CMS Resultate

Myon+Jets-Kanal



$$- m_{\text{top}} = (172.6 \pm 0.6_{\text{stat}} \pm 1.2_{\text{sys}}) \text{ GeV}$$

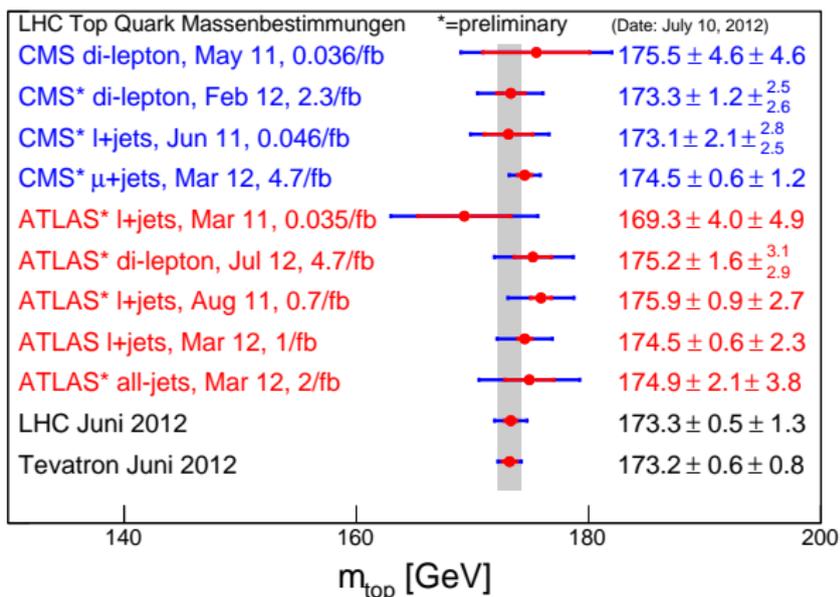
Dilepton-Kanal



$$- m_{\text{top}} = (173.3 \pm 1.2^{+2.5}_{-2.6}) \text{ GeV}$$

Die Messung im μ +Jets-Kanal ist zur Zeit diejenige mit dem kleinsten Fehler am LHC.

Zusammenfassung der Messungen am LHC

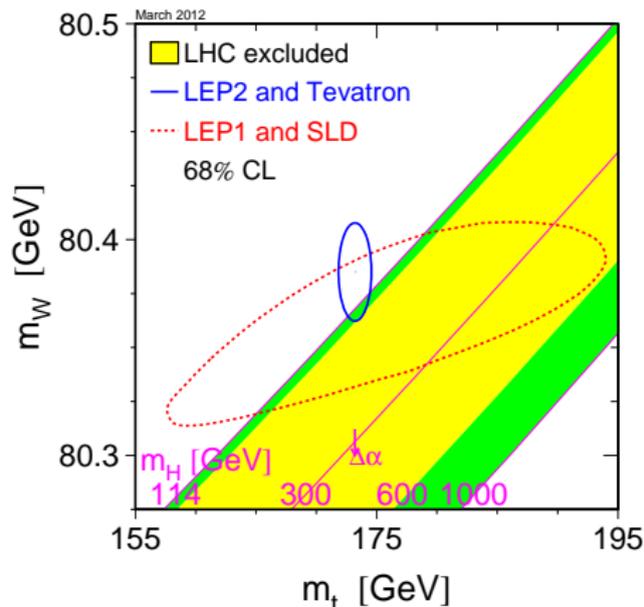


- Nach nur zwei Jahren Auswertung haben einige Messungen am LHC bereits recht kleine systematische Unsicherheiten.

Das nächste Ziel ist ein Fehler kleiner als 1 GeV.

Hinweise auf das Higgs-Boson

Status am 3. Juli 2012

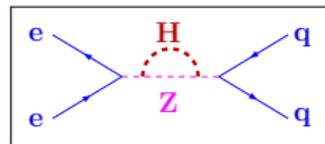
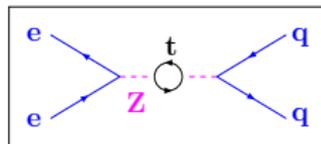


Direkte Messungen

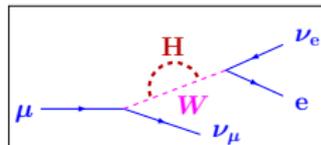
- 1) $p\bar{p} \rightarrow t\bar{t}$
- 2) $p\bar{p} \rightarrow W + X$ und $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$

Indirekte Bestimmungen

1) Die Z-Produktion



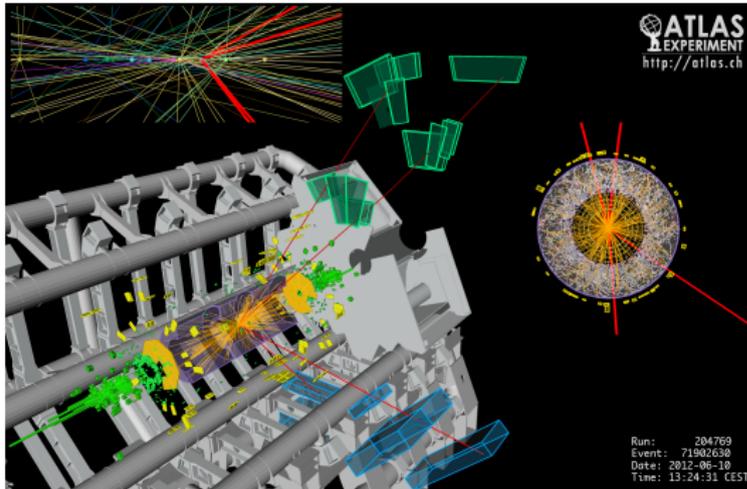
2) Der Myonzerfall



Diese gute Übereinstimmung ist einer der Gründe an ein leichtes Higgs-Boson zu glauben.

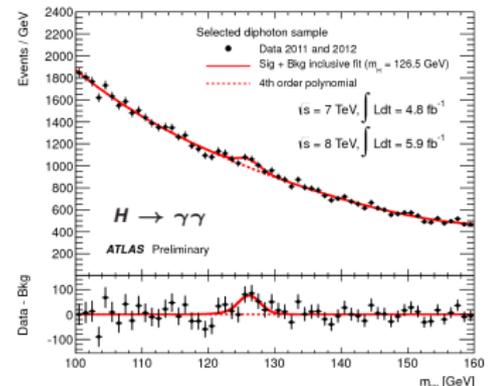
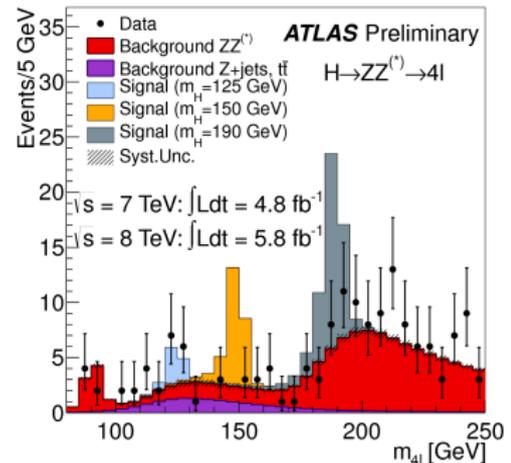
Auf der Suche nach dem Higgs-Boson

Ein $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4$ Myonen Kandidatereignis



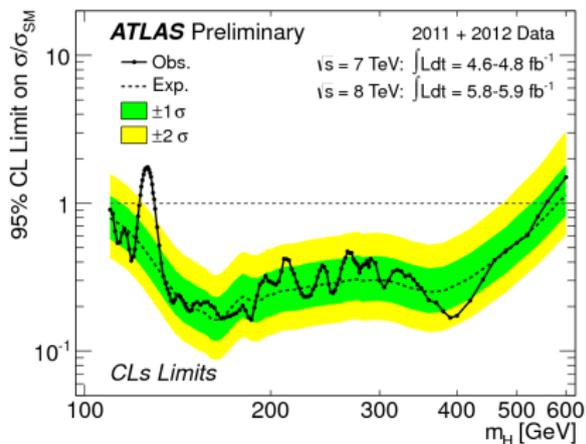
- Beobachtung in den Kanälen $4e$, 4μ und $2e2\mu$ mit $S/U \approx 1$ und ca. 2 GeV Massenauflösung.
- Beobachtung als Erhebung über $m_{\gamma\gamma}$ Kontinuum mit $S/U \approx 0.03$ und ca. 1.6 GeV Massenauflösung.

Die Kanäle mit der besten Massenauflösung.

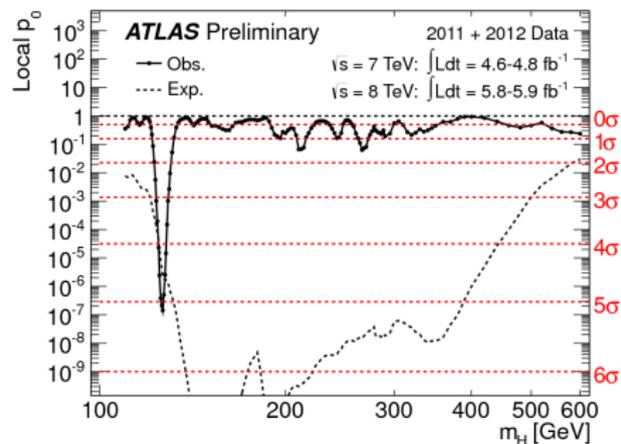


Auf der Suche nach dem Higgs-Boson

Die Higgs Ausschlussgrenzen



Lokale Wahrscheinlichkeit für reinen Untergrund

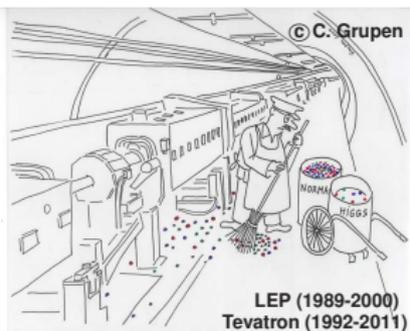


- Erwartetes 95CL Limit (gestrichelt, $\pm 1, 2 \sigma$) ohne Higgs, aber normiert auf den Higgs WQS.
- Falls das beobachtetes Limit (durchgezogen) $< 1 \equiv$ ist ist das SM(m_H) ausgeschlossen.
- Die Wahrscheinlichkeit, dass reiner Untergrund auf $N \geq S(m_H)+U = \text{Exp.}$ (gestrichelt) bzw. auf $N \geq \text{Daten} = \text{Obs.}$ (durchgezogen) fluktuiert.

Die statistische Wahrscheinlichkeit einer Erklärung der Daten durch Untergrund ist minimal.

Die Suche nach dem Higgs-Boson - Ein Zwischenstand

Die mühevollte Vergangenheit



LHC Resultate vom 4. Juli 2012

- ATLAS und CMS finden konsistente 5σ Effekte bei einer Bosonmasse von $m_H = (125 - 126)$ GeV.
- Das Wesen des Bosons ist noch unklar. Es wurden bis jetzt nur die Kopplung an Eichbosonen beobachtet. Auch der Wert des Spins ist noch unklar.
- Die Messungen der Kopplungen an Fermionen braucht mehr Geduld und Daten.

Die rosige? Zukunft

H^0 DECAY MODES	FRACTION	CL
bb	$(62 \pm 6)\%$	68%
WW	$(17 \pm 4)\%$	95%
$\tau\tau$	$(7 \pm 2)\%$	68%
ZZ	$(3 \pm 1)\%$	95%
$\gamma\gamma$	$(0.3 \pm 0.2)\%$	95%
$\mu\mu$	(observed)	68%

† Journal of Physics G Volxx, 201y.

Ein möglicher Handschlag



Erst die Zukunft wird endgültige Klarheit bringen.

Zusammenfassung

- Der LHC-Beschleuniger ist eine Topquark-Fabrik. Die ATLAS- und CMS-Kollaborationen haben schon eine Reihe präziser Messungen im Bereich der Topquark-Physik gemacht.
- Die Masse des Topquarks wurde von ATLAS und CMS in allen drei Kanälen bestimmt.
- Diese Messungen sind limitiert durch systematische Unsicherheiten. Einige Effekte wie die gleichzeitige Messung mehrerer überlagerter Ereignisse und mehr Phasenraum für QCD Gluonabstrahlung sind am LHC viel größer als am Tevatron.
- Die Kombinationen der gemessenen Topquark-Massen am **LHC** bzw. **Tevatron** liefern:
 $m_{\text{top}} = (173.3 \pm 0.5_{\text{stat}} \pm 1.3_{\text{syst}}) \text{ GeV}$ bzw. $m_{\text{top}} = (173.2 \pm 0.6_{\text{stat}} \pm 0.8_{\text{syst}}) \text{ GeV}$.
- Die Kombination der direkten Bestimmungen der Topquark- und W-Boson-Massen verlangen im Standardmodell ein leichtes Higgs Boson.
- ATLAS und CMS haben signifikante und konsistente Signale für ein Boson mit einer Masse von (125-126) GeV gefunden.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.