

# Vom Wiegen schwerer Jungs - die Bestimmung der Top-Quark Masse



Kolloquium der Fachgruppe Physik  
Wuppertal, 26. Juni 2017



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



# Übersicht

## – Einführung

## – Der LHC Beschleuniger

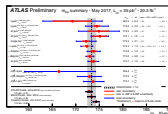


## – Das ATLAS Experiment



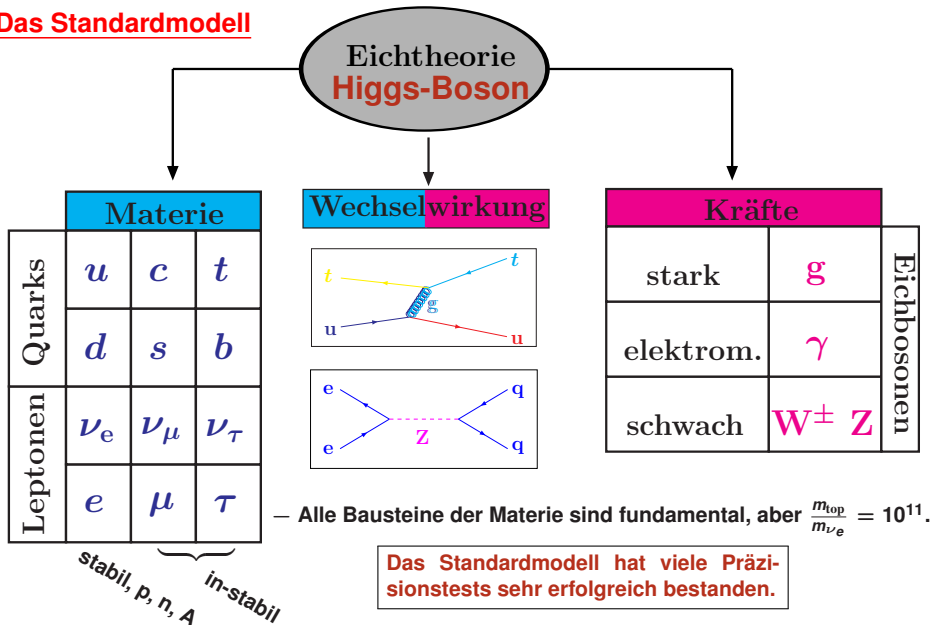
## – Ergebnisse

- Top-Quark Physik
- Top-Quark Masse
- Kombination



## – Zusammenfassung

## Das Standardmodell



Der Large Hadron Collider, 2009<sup>++</sup>,  $E_p = 6.5 \text{ TeV}$



p

p



ATLAS



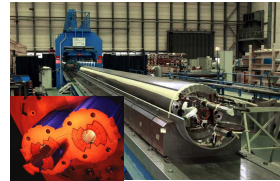
LHCb  
THCP  
LHCb

Einzelheiten



Bis heute wurden 39M Top-Quark Paare erzeugt.

## 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

Ein Vergleichsobjekt

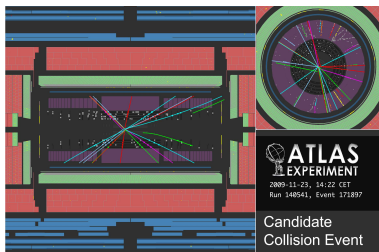


590 t

$v=18(620) \text{ km/h}$



## 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 (0.045/fb).

2011 — Haupt Datennahme 2 x 3.5 TeV.

30.03.12 — Start Datennahme 2 x 4 TeV.

03.06.15 — Start Datennahme 2 x 6.5 TeV.

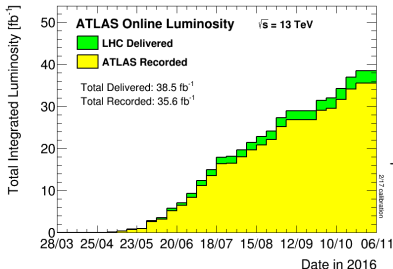
### Die Ausbeute an Top-Quark Paaren

—  $N_{\text{Ereignisse}} = \text{Luminosität} \cdot \text{Wirkungsquerschnitt (WQS)}$

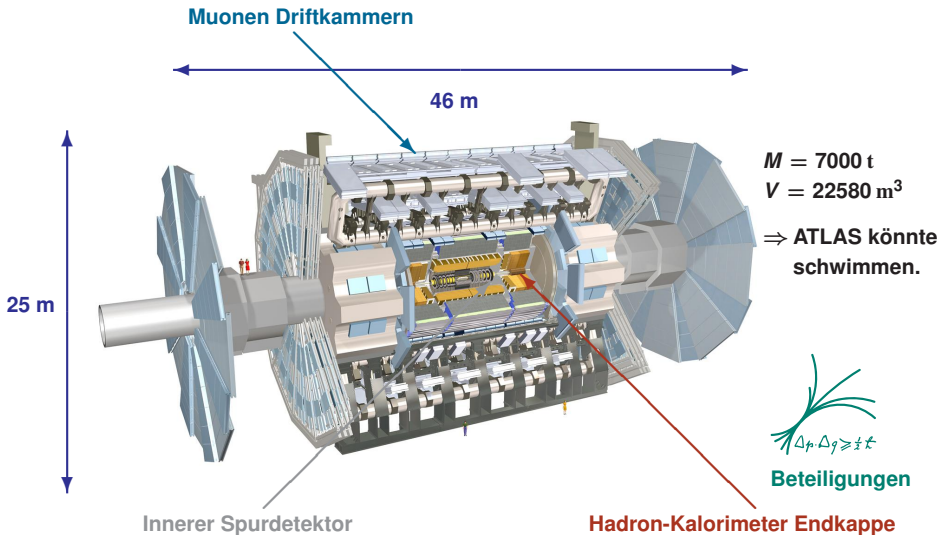
Jahre	Energie [TeV]	Luminosität [1/fb]	WQS [pb]	$N(\bar{t}t)$ Mio
2011	7	5.3	177	0.9
2012	8	21.7	252	5.5
2015+16	13	39.5	831	32.8

— Das sind 39.2 Millionen Top-Quark Paare.

Die Lernkurve am Beschleuniger ist sehr steil.

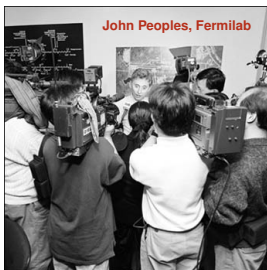


## Der ATLAS-Detektor



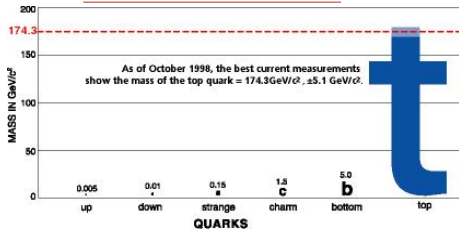
## Das Top-Quark - seine kurze Geschichte

### 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 Bottom-Quarks (b) 1977 wurde das Top-Quark (Truth-Quark) 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 *quasi-frei* zerfällt.

### Der Stand der Dinge 1998



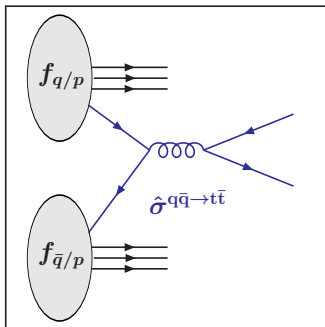
### Die Massenhierarchie

- Die Massenhierarchie der Quarks ist mit  $\frac{m(t)}{m(u)} = \mathcal{O}(10^5)$  sehr groß und bis heute auch nicht fundamental verstanden.

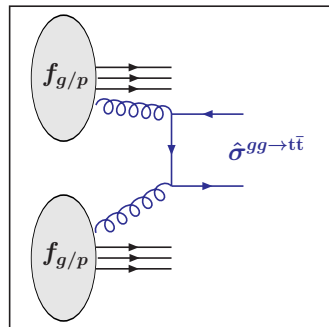
Top-Quarks werden detailliert vermessen.

## Die Produktion von Top-Quark Paaren am LHC

### Quark-induzierte Prozesse (ca 10%)



### Gluon-induzierte Prozesse (ca 90%)

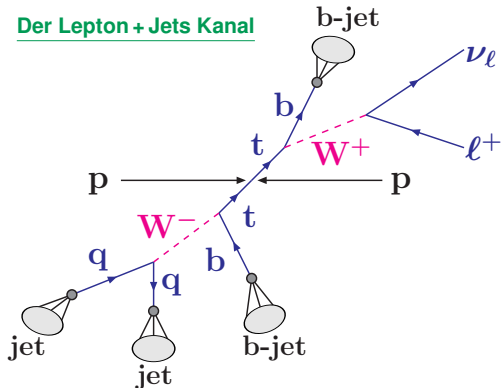


- Der Wirkungsquerschnitt ist:  $\sigma(t\bar{t}) = 831 \text{ pb}$  für  $m_{\text{top}} = 172.5 \text{ GeV}$  und  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ .
- Am Tevatron ( $p\bar{p}$  bei 2 TeV) war die Produktion von Quark-induzierten Prozessen dominiert.

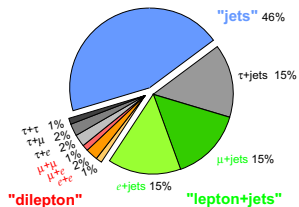
**Der LHC Beschleuniger ist eine Fabrik für Top-Quark Paare.**

## Der Zerfall der Top-Quark Paare

### Der Lepton + Jets Kanal



- Top-Quarks zerfallen fast immer über  $t \rightarrow W b$ . Die Ereignisse werden daher nach W-Zerfällen klassifiziert.



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

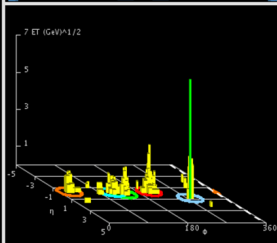
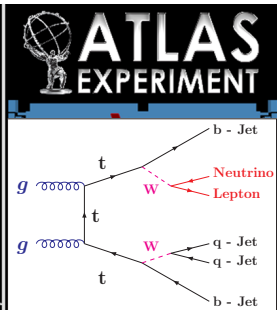
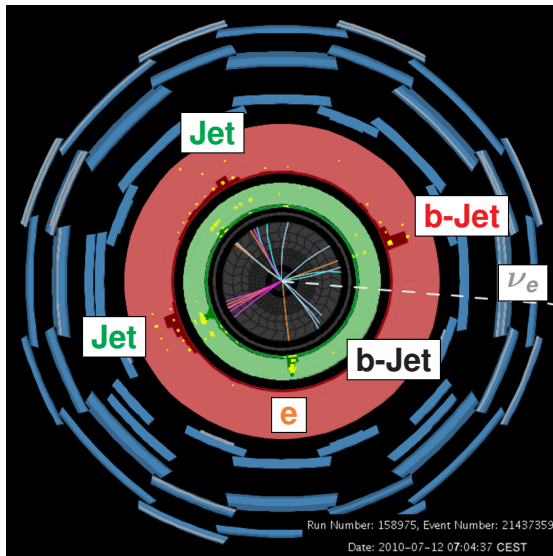
Die Lepton + Jets und Dilepton Kanäle liefern die kleinsten Fehler in der Top-Quark Masse

## Ein Top-Quark Paarereignis

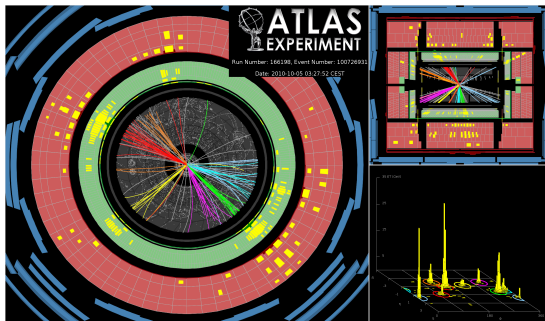
$$\bar{t}\bar{t} \rightarrow (b e \nu) (b q q)$$

$$M(qq) = m_W$$

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



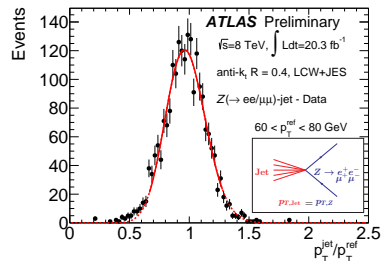
## Die Unsicherheit in der Jetenergie Skala (JES)



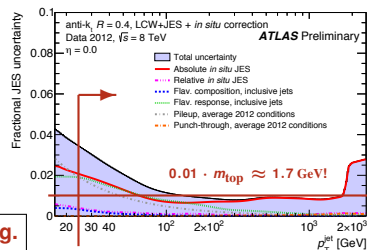
- Ein Ereignis mit acht Jets mit  $p_T \geq 60$  GeV.
- Die transversalen Impulse der zwei Jets mit höchstem  $p_T$  sind 290 GeV und 220 GeV.
- Das Ereignis hat  $\Sigma E_T = 890$  GeV und  $E_T^{\text{miss}} = 21$  GeV.
- Für hohe Präzision in  $m_{\text{top}}$  ist die Möglichkeit einer in-situ Eichung basierend auf  $M_W$  extrem hilfreich.

**Eine kleine JES-induzierte Unsicherheit in  $m_{\text{top}}$  ist wichtig.**

## Eichung über $p_T$ -Balance



## JES Unsicherheit versus Jet- $p_T$



## Vom Wiegen schwerer Jungs

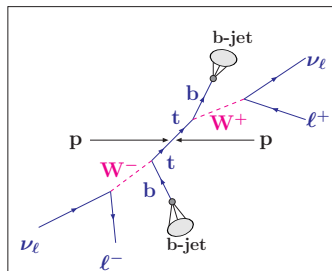
### Unser Modell vom Wiegen

- Eine Waage und Personen (oder Objekte) zum Wiegen.



- Vorsicht, Messunsicherheiten beachten und Kontrollmessungen machen.

### Vom Wiegen der Top-Quarks



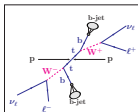
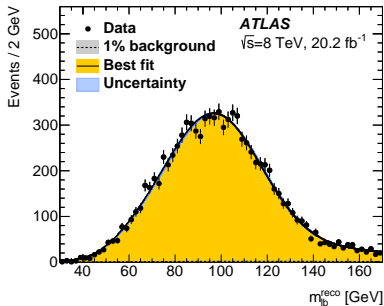
- Genügend Ereignisse und ein gut zu kontrollierender Untergrund.
- Da  $\tau = 10^{-24}\text{s}$ , sehen wir nur Zerfallsprodukte.
- Die Bestimmung von  $m_{\text{top}}$  ist mehr eine Spurensuche im Schnee als das Wiegen von Panzerknackern auf einer Waage.

**Die Messung von  $m_{\text{top}}$  bedeutet eine Rekonstruktion aller Zerfallsprodukte.**



# Die Grundidee einer Template-Analyse

## Templates von $t\bar{t}$ Ereignissen



Observable:  $m_{\text{top}}$

Schätzfunktion:  $m_{\ell b}^{\text{reco}} = m(\ell, \text{b-Jet})$

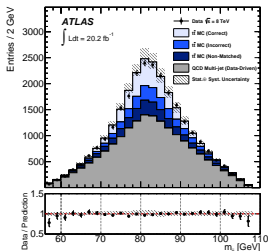
## Die Schritte zur Messung

- 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.  $G(\mu, \sigma)$  mit  $\mu = \mu_0 + m_{\text{top}} \cdot \mu_1$ , linear von  $m_{\text{top}}$  abhängen = **Templatefit**.
- **Likelihood Anpassung der Daten** durch die Template-Fitfunktion nur durch Variation des Wertes der Observablen  $\Rightarrow$  **Der zentrale Messwert und die statistische Unsicherheit**.
- Wiederholung der Anpassung nach Variation systematischer Effekte in den Templates, unter Nutzung der **originalen** Template-Fitfunktion.  $\Rightarrow$  **Die Größe der systematischen Unsicherheit**.

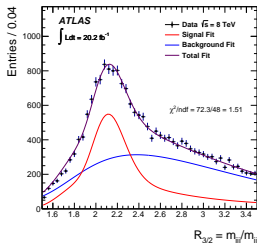
**Diese Methode nutzt die gesamte Information der gemessenen Verteilung.**

# Messung im Jets Kanal

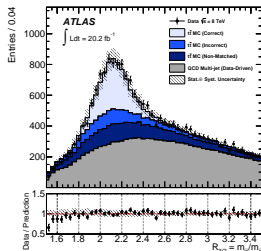
## Die $m_{jj}$ Verteilung



## Der Fit an die Daten



## Die $R_{32}$ Verteilung



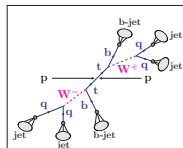
## Das Ergebnis

- $m_{top} = 173.72 \pm 0.55$  (stat)  $\pm 1.01$  (syst) GeV.
- Wichtigste systematische Unsicherheiten: JES (0.60 GeV) bJES (0.34 GeV) und Hadronisierung (0.64 GeV).

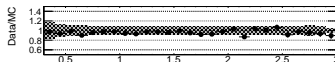
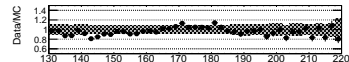
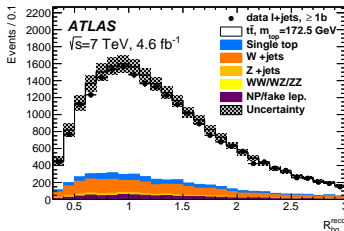
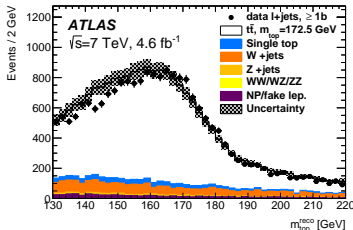
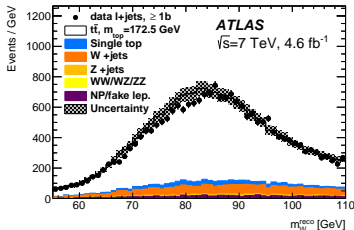
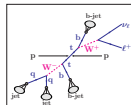
**Der Zerfallskanal mit der größten Messunsicherheit.**

## Details zur Analyse

- Die Anzahl der  $b$ -tagged Jets und  $\Delta\Phi(b, W)$  in der Signal- und in drei Kontrollregionen wird genutzt um die Form der Untergrundverteilung aus den Daten zu bestimmen.
- Die  $R_{32} = \frac{m_{jj}}{m_{jj}} = \frac{m_{bqq}}{m_{qq}}$  Verteilung mit Erwartung:  $\frac{172.5}{80} = 2.16$  stabilisiert  $m_{top}$  gegen eine globale Jetenergie Unsicherheit.



# Drei-dimensionale Analyse im Lepton + Jets Kanal bei 7 TeV



## Die Idee

### Skalierte Jets

$$p_t'(q) = \text{JSF} \cdot p_t(q)$$

$$p_t'(b) = \text{bJSF} \cdot \text{JSF} \cdot p_t(b)$$

### Nuisance Parameter

$$m_W^{\text{reco}} = 2E_1 E_2 (1 - \cos\theta_{12})$$

$$\propto \text{JSF}^2$$

$$R_{\text{bq}}^{\text{reco}} = \frac{\sum p_t(b)}{\sum p_t(q)}$$

$$\propto \frac{\text{bJSF} \cdot \text{JSF}}{\text{JSF}} = \text{bJSF}$$

$$- m_{\text{top}}^{\text{reco}} = f(m_{\text{top}}, \text{JSF}, \text{bJSF}).$$

$$- m_W^{\text{reco}} = f(\text{JSF}).$$

$$- R_{\text{bq}}^{\text{reco}} = f(\text{bJSF}) \text{ mit schwacher } m_{\text{top}} \text{ Abhängigkeit.}$$

– Eine 2-dim.  $(m_{\text{top}}^{\text{reco}}, m_W^{\text{reco}})$  oder 3-dim (+  $R_{\text{bq}}^{\text{reco}}$ ) Anpassung reduziert die JES und bJES induzierten Fehler.

– Da JSF (bJSF) global ist, aber JES (bJES) =  $f(p_t, \eta)$ , bleibt noch eine Restunsicherheit.

**Dies ist die erste 3D  $m_{\text{top}}$  Analyse weltweit.**

## The Liste der systematischen Unsicherheiten

Statistik  
Model  
Unterg.  
Experimentell

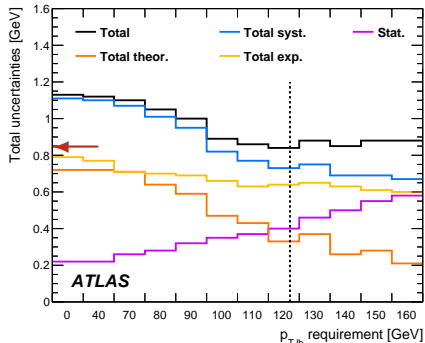
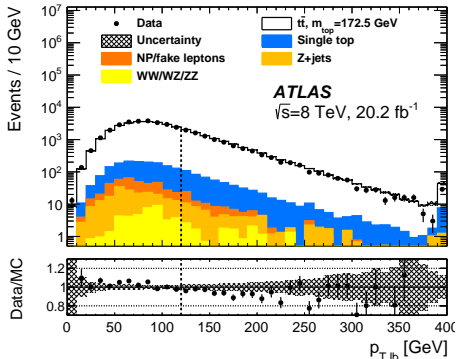
	$t\bar{t} \rightarrow \text{lepton} + \text{jets}$		
	$m_{\text{top}}^{\ell+\text{jets}}$ [GeV]	JSF	bJSF
Results	172.33	1.019	1.003
Statistics	0.75	0.003	0.008
– Stat. comp. ( $m_{\text{top}}$ )	0.23	n/a	n/a
– Stat. comp. (JSF)	0.25	0.003	n/a
– Stat. comp. (bJSF)	0.67	0.000	0.008
Method	$0.11 \pm 0.10$	0.001	0.001
Signal MC	$0.22 \pm 0.21$	0.004	0.002
Hadronisation	$0.18 \pm 0.12$	0.007	0.013
ISR/FSR	$0.32 \pm 0.06$	0.017	0.007
Underlying event	$0.15 \pm 0.07$	0.001	0.003
Colour reconnection	$0.11 \pm 0.07$	0.001	0.002
PDF	$0.25 \pm 0.00$	0.001	0.002
W/Z+jets norm	$0.02 \pm 0.00$	0.000	0.000
W/Z+jets shape	$0.29 \pm 0.00$	0.000	0.004
NP/fake-lepton norm.	$0.10 \pm 0.00$	0.000	0.001
NP/fake-lepton shape	$0.05 \pm 0.00$	0.000	0.001
Jet energy scale	$0.58 \pm 0.11$	0.018	0.009
b-Jet energy scale	$0.06 \pm 0.03$	0.000	0.010
Jet resolution	$0.22 \pm 0.11$	0.007	0.001
Jet efficiency	$0.12 \pm 0.00$	0.000	0.002
Jet vertex fraction	$0.01 \pm 0.00$	0.000	0.000
b-Tagging	$0.50 \pm 0.00$	0.001	0.007
$E_{\text{T}}^{\text{miss}}$	$0.15 \pm 0.04$	0.000	0.001
Leptons	$0.04 \pm 0.00$	0.001	0.001
Pile-up	$0.02 \pm 0.01$	0.000	0.000
Total	$1.27 \pm 0.33$	0.027	0.024

Eur. Phys. J. C75 (2015) 330

- Die dritte Dimension **reduziert** die **bJES induzierte Unsicherheit** in  $m_{\text{top}}$  von **0.88 auf  $0.67 = \sqrt{0.06^2 + 0.67^2}$ , ABER sie ist nun im wesentlichen statistisch!**
- Als Nebeneffekt reduziert dies einige **MC-Model Unsicherheiten**. Das liegt daran, dass ein anderer bJSF MC Unterschiede besser beschreibt als eine andere Top-Quark Masse.
- Leider gleichen **MC-Model Unsicherheiten** oft einer **schwarzen Kiste**, die Änderungen in  $m_{\text{top}}$  sind schwer vorhersehbar, man muss Vieles ausprobieren.
- Am Ende sind die verschiedenen **MC-Model Unsicherheiten** ähnlich gross.
- Der Messfehler ist dadurch wieder von der JES induzierten Unsicherheit dominiert.

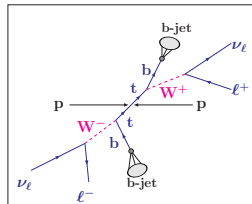
In diesem Kanal hat die bJES induzierte Unsicherheit ihren Schrecken verloren.

## Optimierung zum Erreichen der kleinsten Unsicherheit in $m_{\text{top}}$

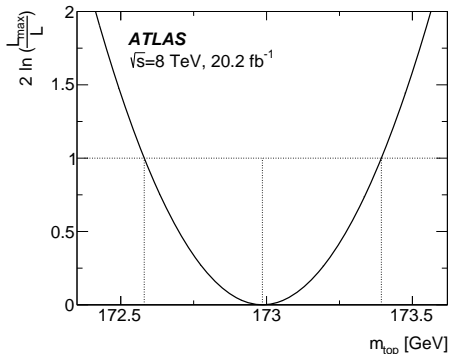
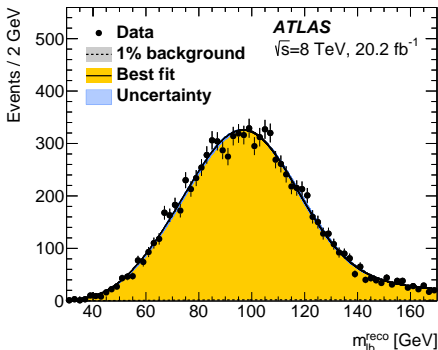


- Die Variable  $p_{T,lb}$  bezeichnet den mittleren transversalen Impuls der beiden Lepton- $b$ -Jet Paare.
- Die Verteilungen enthalten nur statistische Unsicherheiten.
- Mit  $p_{T,lb} > 120$  GeV ergibt sich die kleinste Unsicherheit in  $m_{\text{top}} \Rightarrow$  endgültige Selektion.

**Diese Optimierung reduziert die totale Unsicherheit signifikant.**



## Die Likelihood Anpassung an die Daten



- Die Likelihood Anpassung ergibt  $m_{\text{top}} = 172.99 \pm 0.41$  (stat) GeV.
- Der Untergrund (grau) ist verschwindend gering.
- Das blaue Band um die angepasste Funktion zeigt die totale Unsicherheit in  $m_{\text{top}}$  an.
- Die Form der Likelihood um das Minimum ist parabolisch.

Die beobachtete  $m_{\text{lb}}^{\text{reco}}$  Verteilung wird von der Anpassung gut beschrieben

## The Liste der systematischen Unsicherheiten

	$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$		$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$
	$m_{\text{top}}^{\ell+\text{jets}}$ [GeV]	$m_{\text{top}}^{\text{dii}}$ [GeV]	$m_{\text{top}}^{\text{dii}}$ [GeV]
Results	172.33	173.79	172.99
Statistics	0.75	0.54	0.41
Method	$0.11 \pm 0.10$	$0.09 \pm 0.07$	$0.05 \pm 0.07$
Signal Monte Carlo generator	$0.22 \pm 0.21$	$0.26 \pm 0.16$	$0.09 \pm 0.14$
Hadronisation	$0.18 \pm 0.12$	$0.53 \pm 0.09$	$0.22 \pm 0.08$
Initial and Final State QCD Radiation	$0.32 \pm 0.06$	$0.47 \pm 0.05$	$0.23 \pm 0.05$
Underlying Event	$0.15 \pm 0.07$	$0.05 \pm 0.05$	$0.10 \pm 0.11$
Colour Reconnection	$0.11 \pm 0.07$	$0.14 \pm 0.05$	$0.03 \pm 0.11$
Parton Distribution Function	$0.25 \pm 0.00$	$0.11 \pm 0.00$	$0.05 \pm 0.00$
Background normalisation	$0.10 \pm 0.00$	$0.04 \pm 0.00$	$0.03 \pm 0.00$
W/Z+jets shape	$0.29 \pm 0.00$	$0.00 \pm 0.00$	0
Fake leptons shape	$0.05 \pm 0.00$	$0.01 \pm 0.00$	$0.08 \pm 0.00$
Jet Energy Scale	$0.58 \pm 0.11$	$0.75 \pm 0.08$	$0.54 \pm 0.04$
relative b-to-light-Jet Energy Scale	$0.06 \pm 0.03$	$0.68 \pm 0.02$	$0.30 \pm 0.01$
Jet Energy Resolution	$0.22 \pm 0.11$	$0.19 \pm 0.04$	$0.09 \pm 0.03$
Jet Reconstruction Efficiency	$0.12 \pm 0.00$	$0.07 \pm 0.00$	$0.01 \pm 0.00$
Jet Vertex Fraction	$0.01 \pm 0.00$	$0.00 \pm 0.00$	$0.02 \pm 0.00$
b-tagging	$0.50 \pm 0.00$	$0.07 \pm 0.00$	$0.03 \pm 0.02$
Leptons	$0.04 \pm 0.00$	$0.13 \pm 0.00$	$0.14 \pm 0.00$
$E_{\text{T}}^{\text{miss}}$	$0.15 \pm 0.04$	$0.04 \pm 0.03$	$0.01 \pm 0.01$
Pile-up	$0.02 \pm 0.01$	$0.01 \pm 0.00$	$0.05 \pm 0.01$
Total systematics	$1.03 \pm 0.31$	$1.31 \pm 0.23$	$0.74 \pm 0.25$
Total	$1.27 \pm 0.33$	$1.41 \pm 0.24$	$0.84 \pm 0.25$

7 TeV: [Eur. Phys. J. C75 \(2015\) 330](#)

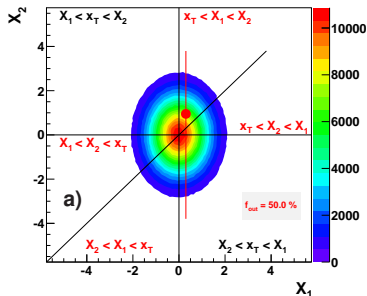
8 TeV: [Phys. Lett. B761 \(2016\) 350](#)

- Die systematischen Unsicherheiten werden mit Pseudo-Experimenten aus Paaren von Datensätzen bestimmt.
- Sie werden mit ihren statistischen Unsicherheiten, unter Berücksichtigung der statistischen Korrelation, angegeben.
- Diese statistischen Unsicherheiten erlauben die Bestimmung der numerischen Stabilität der Kombination.
- Die **Korrelationen** der Schätzwerte für alle Quellen systematischer Unsicherheit werden **berechnet** und nicht (wie sonst üblich) zugewiesen.
- Die größten experimentellen Unsicherheiten kommen von den **Jetenergie Skalen**, die größten Modell Unsicherheiten von der **Hadronisation** und von **ISR/FSR**.

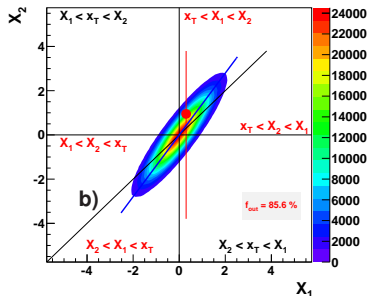
**Dieses Resultat aus den 8 TeV Daten ist die präziseste Messung von  $m_{\text{top}}$  in diesem Kanal.**

## Die bedingte Wahrscheinlichkeit = die zugrunde liegende Wahrheit

### Der unkorrelierte Fall



### Der stark korrelierte Fall



Beispiel:

$$x_T = 0$$

$$\langle X_1 \rangle = 0$$

$$\langle X_2 \rangle = 0$$

$$\sigma_1 = 0.85$$

$$\sigma_2 = 1.15$$

a)  $\rho = 0$

b)  $\rho = 0.9$

● = (0.30, 0.95)

- Für  $x_T = 0$  ist die PDF:  $\mathcal{P}(X_1, X_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \frac{1}{\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{1}{1-\rho^2} \left( \frac{X_1^2}{\sigma_1^2} + \frac{X_2^2}{\sigma_2^2} - \frac{2\rho X_1 X_2}{\sigma_1 \sigma_2} \right) \right\}$ .
- Für zwei unkorrelierte Schätzwerte ist  $x_T$  in 50% der Fälle nicht innerhalb von  $[x_1, x_2]$ .
- Für  $X_1 = x_1$  ist die bedingte Wahrscheinlichkeit:  $\mathcal{P}(x_1, X_2) \propto \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{(X_2 - \rho\sigma_2/\sigma_1 x_1)^2}{(1-\rho^2)\sigma_2^2} \right) \right\}$ .
- Diese PDF ist um  $\langle X_2 \rangle = \rho \frac{\sigma_2}{\sigma_1} x_1$  (nicht  $x_T = 0$ ) zentriert, mit Varianz  $(1 - \rho^2)\sigma_2^2$  (nicht  $\sigma_2^2$ ).

In den meisten Fällen liegt  $x_T$  nicht innerhalb des Gebiets  $[x_1, x_2]$  der zwei Messwerte.



## Die zu lösende Aufgabe

### Die Eingangsgrößen

- Einige erwartungstreue, aber korrelierte Schätzwerte  $x_j$  für den wahren Wert  $x_T$ .

### Kombination korrelierter Schätzwerte

- Bestimme einen **optimalen, erwartungstreuen** Schätzwert  $x$  von  $x_T$  aus den  $x_j$ .
- Eine Lösung: **BLUE** = **B**est **L**inear **U**nbiased **E**stimator (**B**ester **L**inearer **E**rwartungstreuer **S**chätzwert).

**B:**  $\sigma_x^2$  ist die kleinst mögliche Varianz.

**E:**  $\sigma_x^2$  ist die kleinst mögliche Varianz.

**L:**  $x = \vec{\alpha} \cdot \vec{x} = \sum \alpha_j \cdot x_j$  mit  $\sum \alpha_j = 1$ .

**UE:**  $\langle x \rangle = x_T$ .

### Punkte zum Merken

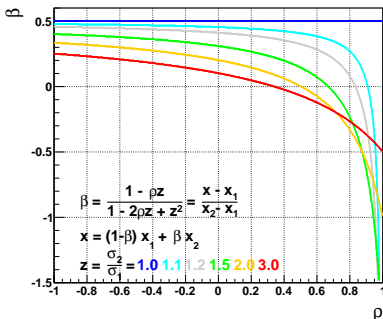
- **BLUE**  $\equiv$  minimiere  $\chi^2 = \left[ \begin{pmatrix} x \\ x \\ x \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \right]^T V^{-1}(\vec{x}) \left[ \begin{pmatrix} x \\ x \\ x \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \right]$
- $\sigma_x \neq f(x_j)$  und  $\alpha_j \neq f(x_j)$  **nur**  $x = f(x_j)$ .
- Ein gegebenes  $x_j$  ist **nur ein mögliches Resultat = Schätzwert** der PDF. Es kann wahrscheinlich oder unwahrscheinlich sein und  $x_T$  kann in Bezug auf  $x_j$  überall liegen.

**BLUE ist eine einfache, transparente und richtige Methode für diese Aufgabe.**

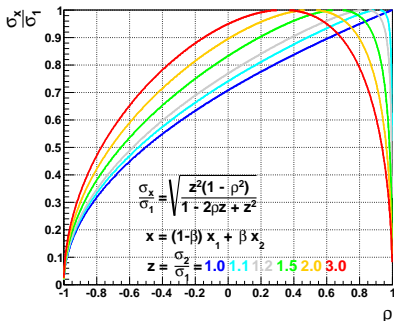
## Möglicher Gewinn und relative Wichtigkeit von Schätzwerten

- Der einfachste Fall zweier Schätzwerte ( $x_1, x_2$ ) einer Observablen ( $x_T$ ) sagt fast Alles.
- Das Verhältnis der Unsicherheiten sei  $z = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} > 1$ , und die Korrelation  $-1 \leq \rho \leq 1$ .
- Kombination:  $x = (1 - \beta) x_1 + \beta x_2$ , mit  $\sigma_x^2 = \text{Min.}$

Koeffizient von  $x_2$ :  $\beta = \frac{1 - \rho z}{1 - 2\rho z + z^2}$



Unsicherheit:  $\frac{\sigma_x}{\sigma_1} = \sqrt{\frac{z^2(1 - \rho^2)}{1 - 2\rho z + z^2}}$



- Beachte:  $\frac{1}{1-z} < \beta = \frac{x_2 - x_1}{x_2 - x_1} < \frac{1}{z+1} < \frac{1}{2}$  for  $z \neq 1$ .

BLUE = Best Linear Unbiased Estimator  
<http://blue.hepforge.org/>

Der Koeffizient  $\beta$  ist der Abstand von  $x$  von  $x_1$  in Einheiten von  $x_2 - x_1$

## Ein paar Worte zur Korrelation von Schätzwerten per Unsicherheit



- Möchte seine Goldsäcke wiegen,  $\langle x_i \rangle = 10$  kg.
- Er hat zwei Waagen mit  $\sigma(\mu_1) = 0.4$  g bzw.  $\sigma(\mu_2) = 0.6$  g bei **4000** Messungen.
- Jemand muss diese Arbeit tun!

System. Unsicherheit



Ich nehme immer 4 g von (1) weg und tu sie auf (2).  $\Rightarrow \rho = -1$

Nominal  $\Leftrightarrow x_i$



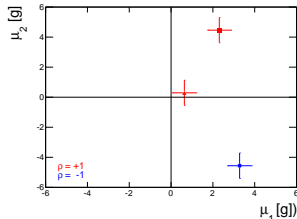
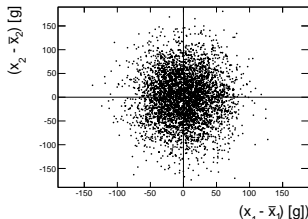
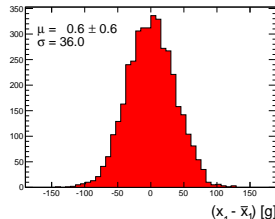
Ich nehme immer 2 g von (1) weg aber 4 g von (2).  $\Rightarrow \rho = +1$

Variiert  $\Leftrightarrow \bar{x}_i$ .



Ich nehme immer 1 g von (1) und von (2) weg.  $\Rightarrow \rho = +1$  (aber häufig  $\rho = -1$ )

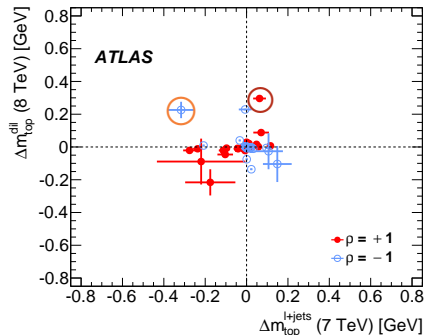
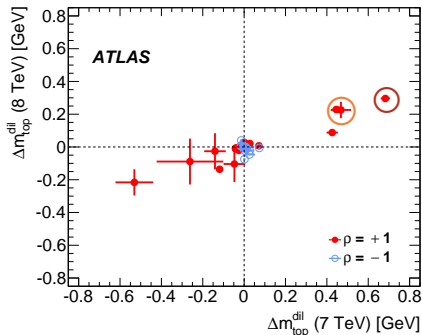
Entries



- Die Größe einer Unsicherheit sagt rein gar nichts über die Korrelation der Schätzwerte.
- Die statistische Präzision und Korrelation der Pseudo-Experimente bestimmt  $\sigma(\mu_i)$ .

**Die Bestimmung der Korrelation ist wichtig zur richtigen Durchführung der Kombination.**

## Die Korrelation der Schätzwerte für individuelle Quellen



- Jeder Punkt symbolisiert eine (Sub-) Komponente mit  $\rho = 1$  or  $\rho = -1$ .

**bJES:**  $0.30 \pm 0.01$  (Dil, 8),  $0.68 \pm 0.02$  (Dil, 7,  $\rho = 1$ ),  $0.06 \pm 0.03$  (Lep. + Jets, 7,  $\rho = 1$ ).

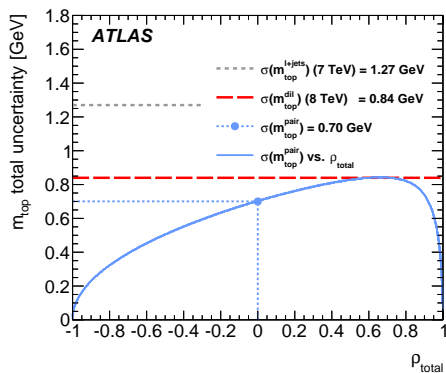
**ISR/FSR:**  $0.23 \pm 0.07$  (Dil, 8),  $0.47 \pm 0.05$  (Dil, 7,  $\rho = 1$ ),  $0.32 \pm 0.06$  (Lep. + Jets 7,  $\rho = -1$ ).

- Für nicht signifikante Unsicherheiten wechselt das Vorzeichen der Korrelation bei Variation der Unsicherheiten innerhalb ihrer Präzision beim Test der Stabilität der Kombination.

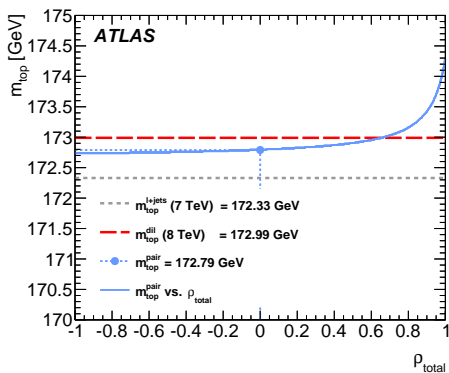
Durch das Design der Analyse ist die Korrelation zur Lepton + Jets Analyse viel kleiner.

## Kombination - Dilepton Kanal 8 TeV mit Lepton + Jets Kanal 7 TeV

### Die Unsicherheit in $m_{top}$



### Der kombinierte Wert von $m_{top}$



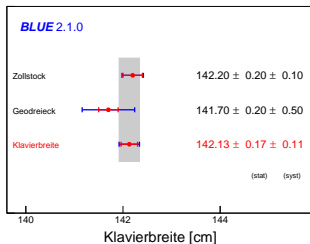
- Große Verbesserung im Vergleich zum präziseren Resultat, da die Korrelation der Messungen klein ist,  $\rho = 0.00 \ll \frac{0.84}{1.27} = 0.66 \Leftrightarrow$  der Punkt keiner Verbesserung.

Die Nutzung der 3-dim Analyse zusammen mit der 1-dim Analyse zahlt sich aus.

## Passt das Klavier in die Nische?



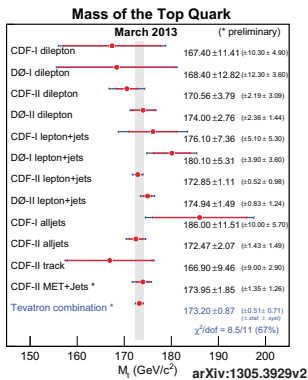
- Das Klavier sah in der Nische schön aus. Sieht eng aus und Klaviertransporte sind teuer  $\Rightarrow$  Besser mal messen!
- Mein **Elle** (bis zu welchem Finger?) ist ca. 48 cm lang. Die Breite ist 3 Ellen also:  $B_1 = 144 \pm 3$  cm.
- Gut genug? Ich hab doch ein **A4-Blatt**,  $29.7 \cdot 21.0$  cm<sup>2</sup>. Die Breite ist  $4L+B$  also:  $B_2 = 139.8 \pm 1.5$  cm.
- Gut genug? Ich hab doch ein **Geodreieck**,  $L = 14$  cm. Die Breite ist  $10L+1.4$  cm. Besser fünf mal messen, und die Breite ist:  $B_3 = 141.7 \pm 0.2 \pm 0.5$  cm.
- Gut genug? Wo ist der **Zollstock**? Fünf mal messen, und die Breite ist:  $B_4 = 142.2 \pm 0.2 \pm 0.1$  cm.
- Was nun? Sind wirklich alle **Messungen** wichtig?
- Ah, einige sind wohl eher eine **Gegenprobe**. Mist, dass ich die Länge meiner Elle erinnerte, war doch so super, und wer kennt schon die A4 Maße auswendig, wie cool.
- Wie sehr man auch an seinen Resultaten hängt ...  
... man sollte nur **signifikante Messungen kombinieren**.



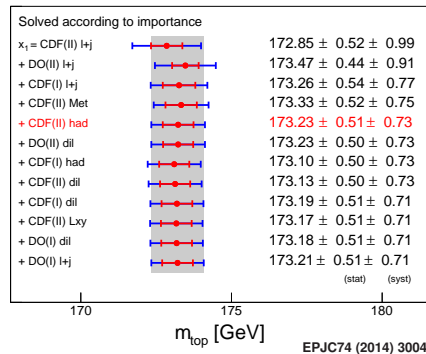
**Signifikante Messungen verbessern die Kombination, Gegenproben das Vertrauen.**

## Ein Beispiel aus 2013

### Die Tevatron Kombination



### Die Kombination signifikanter Messungen

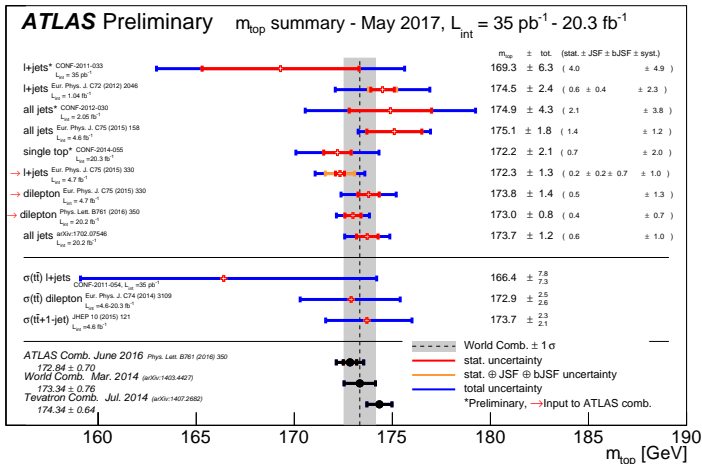


– Nur fünf Messungen tragen signifikant bei!

- Die Resultate spannen 15 Jahre (1997–2012). Das Verhältnis der Fehler ist bis zu 11.5!
- Zur Kombination müssen die Korrelationen der Messungen für alle systematischen Unsicherheiten gut bekannt sein. Nach 15 Jahren Entwicklung wohl eher unmöglich.

**Das traurige Schicksal von Messungen – Von der Weltneuheit zur Gegenprobe.**

# Die Entwicklung der ATLAS $m_{\text{top}}$ Messungen



– Eine Reihe von Messungen hat nach wenigen Jahren nur noch historischen Wert.

**Ein kontinuierlicher Weg von 6.3 GeV zu 0.8 GeV Unsicherheit in der Einzelmessung.**



## Zusammenfassung

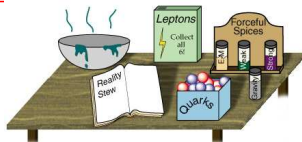
- Der LHC Beschleuniger ist eine Top-Quark Fabrik. Die Messungen der LHC Kollaborationen der Top-Quark Masse sind mittlerweile präziser als die Tevatron Resultate.
- Die Top-Quark Masse wurde in allen Zerfallskanälen von Top-Quark Paaren bestimmt.
- Die ATLAS Top-Quark Masse ist:  $m_{\text{top}} = 172.84 \pm 0.34$  (stat)  $\pm 0.61$  (syst) GeV.
- Diese Messungen sind durch systematische Unsicherheiten limitiert. Bei der Auswertung jedes neuen Datensatzes sollten daher statistische und systematische Präzision gut austariert werden, um die kleinstmögliche Unsicherheit zu erlangen.
- Die Kombinationen von Messungen (auch der Top-Quark Masse) muss mit Sorgfalt durchgeführt werden. Die Planung von nur wenig-korrelierten Messungen ist ratsam.
- Der Einschluss aller Messungen in die Kombinationen ist nicht zielführend. Einige Messungen sind mittlerweile von einer Weltneuheit zur Gegenprobe transformiert.
- Das nächste ATLAS Ziel ist ein Einzelfehler kleiner als 0.5 GeV.

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.**

# Backup - Folien

## Die elementaren Materiebausteine

– Unser heutiges Bild der Rezeptur



der Natur, ist:

### Materie

	Materie		
Quarks	$u$	$c$	$t$
	$d$	$s$	$b$
Leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	$e$	$\mu$	$\tau$

- Es gibt drei Familien von Leptonen und Quarks.
- Sie sind Fermionen (Spin = 1/2) und nur die erste Familie bildet stabile Materie,  $p = uud$  und  $n = udd$ .
- Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit umgekehrten Ladungen aber sonst identischen Eigenschaften.
- Die Massen sind sehr verschieden und niemand weiß warum. Die Massen reichen von weniger als 1 eV für das  $\nu_e$  bis zu 173 GeV (etwa 185 Protonmassen) für das schwerste Quark, das Top-Quark.
- Die Theorie zur Erklärung der Massen ist der Higgs Mechanismus. Das erforderliche Teilchen, das Higgs-Boson, wurde kürzlich am LHC gefunden.

**Das Spektrum der Teilchenmassen ist extrem groß.**

## Die fundamentalen Kräfte

Wechselwirkung	Beispiel	Boson	Masse [GeV]	el. Ladung [e]	rel. Stärke (Reichweite)
Gravitation	Erdanziehung	Graviton? G ?	0	0	$10^{-38}$ ( $\infty$ )
schwach	Kernzerfall	Z $W^{\pm}$	91.2 80.4	0 $\pm 1$	$10^{-5}$ ( $10^{-3}$ ) fm
elektromagnetisch	Coulombanziehung	Photon $\gamma$	0	0	$10^{-2}$ ( $\infty$ )
stark	Quark-Einschluss	Gluon g	0	0	1 (1 fm)

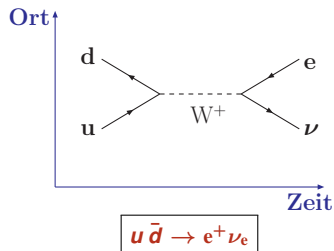
Diagramm zur Standardmodell-Gravitation:

- Ein grüner Pfeil zeigt von der Beschriftung "Standardmodell" auf die schwach-, elektromagnetischen und starken Wechselwirkungen.
- Ein roter Pfeil zeigt von der Beschriftung "elektro-schwach" auf die schwach- und elektromagnetischen Wechselwirkungen.
- Ein blauer Pfeil zeigt von der Beschriftung "??", die sich auf die Gravitation bezieht, auf die gesamte Tabelle.

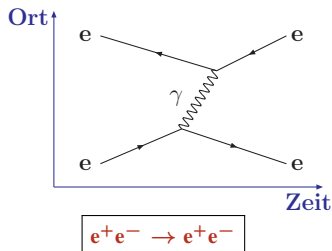
Außer für die Gravitation haben wir eine vereinheitlichte mathematische Beschreibung.

## Wechselwirkungen im Standardmodell

### Paarvernichtung und Paarerzeugung



### Emission und Absorption

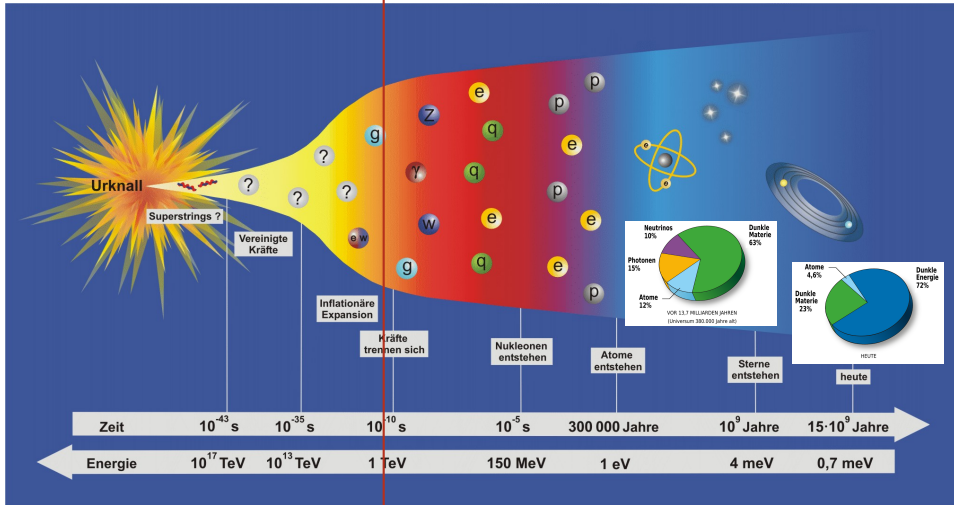


### Das mathematische Konzept

- Eine Kombination von Eichgruppen:  $U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)_C$  mit lokaler Eichinvarianz und drei laufenden Kopplungskonstanten, eine für jede Eichgruppe:  $\alpha_1 = \frac{5}{3} \left( \frac{e}{\cos \theta_W} \right)^2$ ,  $\alpha_2 = \left( \frac{e}{\sin \theta_W} \right)^2$  und  $\alpha_3 = \alpha_s$ .

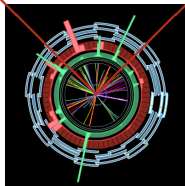
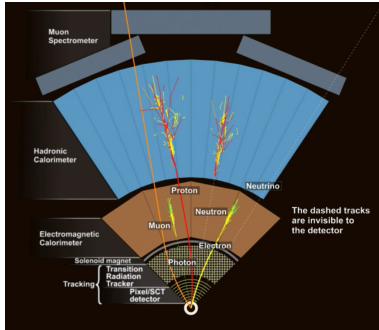
Zur Beschreibung der Wechselwirkungen genügen vier fundamentale Vertices.

## Mit dem Large Hadron Collider (LHC) in Richtung Urknall



Der LHC bietet eine Zeitreise bis etwa hier.

## Das Bauprinzip von Teilchendetektoren



### Das Prinzip

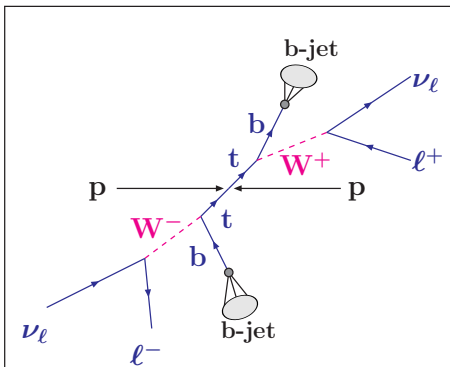
- In einer Art Zwiebelschalendesign um die Strahlröhre werden die verschiedenen Teilchen an Hand ihrer typischen Wechselwirkungen nachgewiesen.
- Die Messgrößen sind Ort, Impuls, Ladung, Energie...
- Bei komplizierten Zerfällen wird aus der Summe aller Zerfallsprodukte auf die Eigenschaften der primär 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.**

## Der dileptonische Kanal - Ereignis Vorselektion



### Vorselektion in 8 TeV Daten

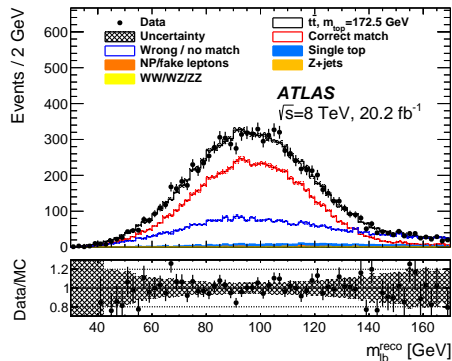
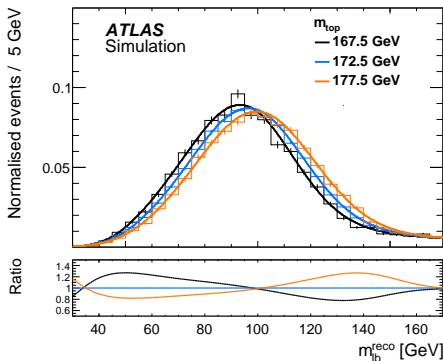
- Nutze  $W^+W^- \rightarrow \ell^+\ell^-\nu\bar{\nu}$  mit  $\ell = e, \mu$ .
- Gute Datenqualität  $\Rightarrow 20.2 \pm 0.4 \text{ fb}^{-1}$ .
- Trigger und primärer Vertex mit  $\geq 5$  Spuren.
- Elektronen:  $E_T > 25 \text{ GeV}$ ,  $|\eta| < 2.47$ .
- Myonen:  $p_t > 25 \text{ GeV}$ ,  $|\eta| < 2.5$ .
- $ee, \mu\mu$  Kanal:  $E_T^{\text{miss}} > 60 \text{ GeV}$   
 $m_{\ell\ell} > 15 \text{ GeV}$ ,  $|m_{\ell\ell} - M_{Z^0}| > 10 \text{ GeV}$ .
- $e\mu$  Kanal:  $H_T > 130 \text{ GeV}$ .
- Mindestens zwei Jets mit  $p_t > 25 \text{ GeV}$   
 und  $|\eta^{\text{jet}}| < 2.5$ .
- Mindestens ein  $b$ -tagged Jet ( $\epsilon_b = 70\%$ ).

- Die Produktion einzelner Top-Quarks wird zum Signal hinzugerechnet, wodurch der Untergrund von  $m_{\text{top}}$  unabhängig wird.

**Diese Vorselektion ergibt 36 Tausend Ereignisse mit etwa 1% Untergrund.**



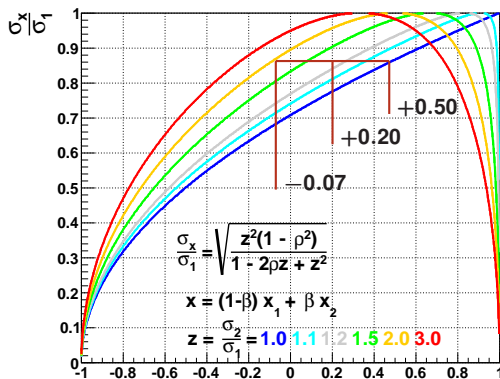
## Die Signal Templates und die $m_{lb}^{reco}$ Verteilung



- Das Signal besteht zu 96.4% aus  $t\bar{t}$  und zu 3.6% aus Ereignissen mit einzelnen Top-Quarks.
- Die Schätzfunktion ist erwartungstreu  $\Leftrightarrow$  Pull Verteilung mit Mittelwert Null, Breite Eins.
- Die  $m_{top}$  Sensitivität ergibt  $\sigma_{m_{top}}(stat) = 0.41$  GeV für  $20.2$  fb $^{-1}$ .
- Die Daten werden von der Verhersage mit  $m_{top} = 172.5$  GeV gut beschrieben.

**Diese Übereinstimmung weist auf eine ähnliche Top-Quark Masse in den Daten hin.**

## Warum Korrelationen so wichtig sind



– Die Reduktion der Schätzwert Korrelation von 30 (57)% ist so gut wie die Reduktion der Unsicherheit des weniger genauen Schätzwerts  $x_2$  von 30% (einem Faktor 2), aber oft viel einfacher.

– Da die Korrelationen  $\rho_i$  so wichtig sind, sollten sie für alle Quellen  $i$  **bestimmt** und nicht zugewiesen werden.

– Beispiel: Kombination der 7 TeV Resultate:  $\rho$

(1)  $m_{\text{top}} = 172.91 \pm 0.50$  (stat)  $\pm 1.05$  (syst) GeV, für  $\rho = +0.51$  (bei Zuweisung von  $\rho_i$ ).

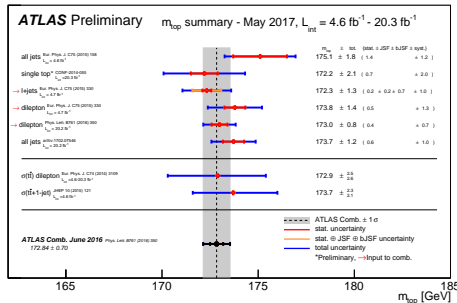
(2)  $m_{\text{top}} = 172.99 \pm 0.48$  (stat)  $\pm 0.78$  (syst) GeV, für  $\rho = -0.07$  (bei **Bestimmung** der  $\rho_i$ ).

– Für  $z = 1.11$  ist  $m_{\text{top}}$  aus (2) 26% präziser als  $m_{\text{top}}$  aus (1).

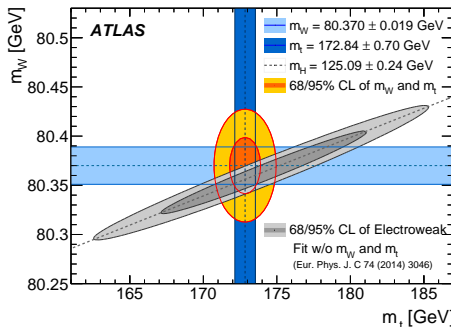
**Im Zweifel sollte man immer für eine Reduktion der Korrelation der Schätzwerte entscheiden.**

# Präzisionsmessungen und das Standardmodell

## Die Kombination von $m_{top}$



## Die Konsistenz des Standardmodells



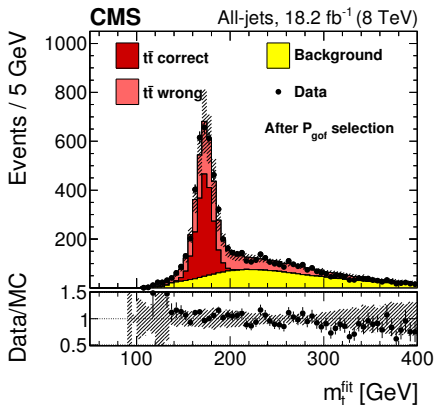
- Die Kombination dreier ATLAS Messungen hat eine totale Unsicherheit von 0.7 GeV (0.4%).
- Die gute Beschreibung der präzisen Messungen von  $m_W$  mit  $\sigma(m_W) = 0.02\%$ ,  $m_{top}$  mit  $\sigma(m_{top}) = 0.4\%$  und  $M_H$  (vom LHC) mit  $\sigma(M_H) = 0.2\%$  ist ein Erfolg des Standardmodells.

**Das Standardmodell hält unseren Präzisionstests weiterhin erfolgreich Stand.**

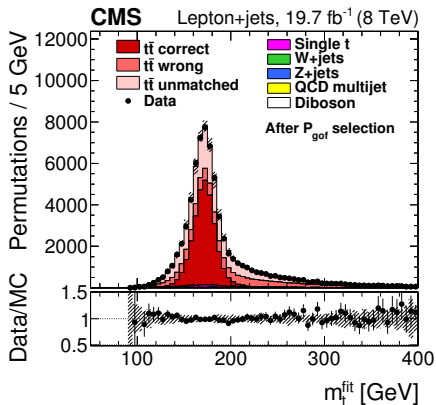
## Die genauesten CMS Resultate

### Der Jets Kanal

### Der Lepton + Jets Kanal



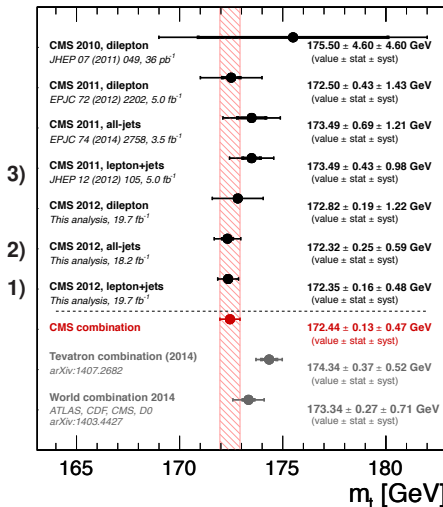
$$m_{\text{top}} = 172.32 \pm 0.25 \text{ (stat)} \pm 0.59 \text{ (syst)} \text{ GeV}$$



$$m_{\text{top}} = 172.35 \pm 0.16 \text{ (stat)} \pm 0.48 \text{ (syst)} \text{ GeV}$$

**Die Messung im Lepton + Jets ist zur Zeit diejenige mit der kleinsten Unsicherheit.**

## Die Resultate von CMS und ihre Kombination



– Resultat dominiert von:

- 1) 2012 lepton+jet 73%
- 2) 2012 all-jets 17%
- 3) 2011 dilepton 7%

der Rest trägt weniger als +3% bei.

– Die Korrelationen sind:

- |    |      |      |      |
|----|------|------|------|
| 1) | 1.00 | 0.61 | 0.21 |
| 2) |      | 1.00 | 0.20 |
| 3) |      |      | 1.00 |

– Die Verhältnisse der Unsicherheiten sind:

$$z_{12} = 1.27, z_{13} = 2.26.$$

⇒ Nur eine 4% Verbesserung gegenüber dem präzisesten Schätzwert!

Die Korrelationen der CMS Messungen sind weniger vorteilhaft als die von ATLAS.