

# Teilchenphysik am MPP am Beispiel von ATLAS



München, 26. Jun 2012



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



## Die Organisation der Max-Planck-Gesellschaft



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

- Die Max-Planck-Gesellschaft (MPG) ist eine unabhängige Forschungs-Organisation.
- Die MPG fördert Forschung hauptsächlich in ihren eigenen Instituten, den MPIs.
- Zur Zeit hat die MPG 80 Forschungsinstitute mit etwa 17000 Beschäftigten.  
Die MPG hat 5200 Wissenschaftler, zusammen mit mehr als 3700 Doktoranden, 1300 Post-Doktoranden, und 800 Gastwissenschaftlern.
- Die Forschungsthemen sind aufgeteilt in drei Sektionen. Dies sind die Sektionen für **Biologie und Medizin**, für **Chemie, Physik and Technik (CPT)**, und für **Geisteswissenschaften**.
- Fünf Institute der CPT Sektion befinden sich im Münchner Raum, und zwar die MPIs für Astrophysik, Extraterrestrische Physik, Plasmaphysik, und Quantumoptik in Garching, und in München das MPI for Physik (MPP) das (**Werner-Heisenberg-Institut**).

## Das MPP - Aufgabe und Geschichte

### Die Ziele

- Am MPP betreiben wir Grundlagenforschung in Elementarteilchen- and Astroteilchenphysik, sowohl auf theoretischem als auch auf experimentellem Gebiet.

### Die Geschichte

- 1917 Gegründet als **Kaiser-Wilhelm Institut für Physik** in Berlin.  
Der Vorsitzende des Direktoriums war Albert Einstein.
- 1946 Wieder-gegründet in Göttingen. Seit 1948 ist das Institut Teil der MPG, und zwar als **MPI für Physik (MPP)**. Der Direktor war Werner Heisenberg.
- 1958 Umzug von Göttingen zum heutigen Standort (Architekt Sep Ruf) in München.
- 1960 Ausgliederung des Instituts für Plasmaphysik (IPP) in Garching.
- 1991 Ausgliederung der Institute für Extraterrestrische Physik (MPE) and für Astrophysik (MPA) in Garching.

### Einige frühere Kollegen

- Peter Debye, Albert Einstein (NP 1922), Werner Heisenberg (NP 1933), Léon van Hove, Max von Laue (NP 1914), Gerhart Lüders, Carl Friedrich von Weizsäcker, Julius Wess, ...

## Das MPP - Personal und Forschungsgebiete

### Die heutigen Kollegen

- Das MPP hat etwa 160 festangestellte Mitarbeiter, von denen sind etwa 60 Wissenschaftler, 80 Personen arbeiten in den technischen Abteilungen, und 20 Personen in der Verwaltung.
- Zusätzlich haben wir im Mittel etwa 20 Gastwissenschaftler.
- Zur Zeit haben wir 60 Doktoranden und Diplomanden sowie 20 Auszubildende (Mechaniker, Elektroniker, Mechatroniker, ...).

### Die Haupt-Forschungsgebiete

- Die Forschungsarbeiten umfassen theoretische Arbeiten auf verschiedenen Gebieten des Standardmodells und darüber hinaus, sowie Forschung in der Astroteilchenphysik, z.B. WIMPS (dunkle Materie) und Neutrinos, aber auch Stringtheorie.
- Das MPP hat Beteiligungen an verschiedenen Experimenten der Hochenergiephysik an Beschleunigern, aber auch in einer Reihe von Nicht-Beschleuniger Experimenten.
- Zusätzlich betreiben MPE und MPP ein Halbleiterlabor (HLL) in München-Neuperlach zur Entwicklung neuer, strahlenharter Spurdetektoren zum Nachweis geladener Teilchen.

**Das MPP hat ein breites Forschungsspektrum in theoretischer und experimenteller Physik.**



## Das MPP - Gruppen und Forschungsgebiete

### Direktoren

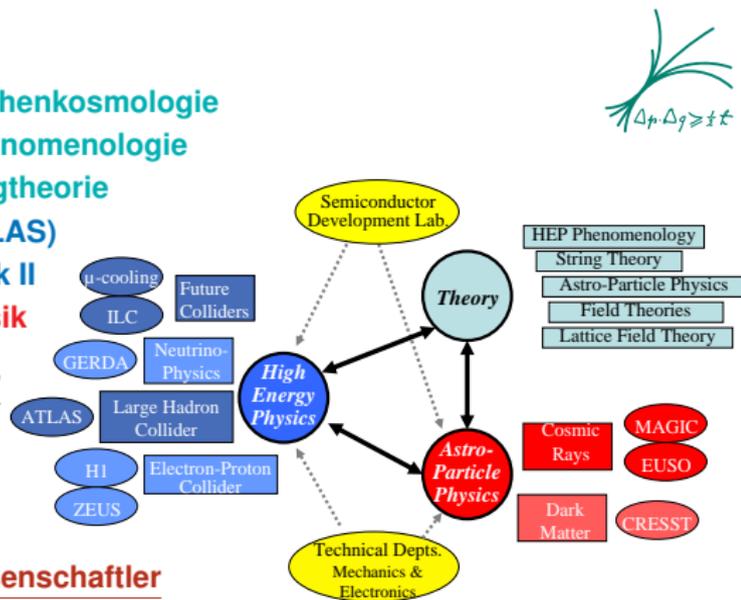
- G. Dvali - Theo. Teilchenphysik - Teilchenkosmologie
- W. Hollik - Theo. Teilchenphysik - Phänomenologie
- D. Lüst - Theo. Teilchenphysik - Stringtheorie
- S. Bethke - Exp. Teilchenphysik I (ATLAS)
- A. Caldwell (GD) - Exp. Teilchenphysik II
- M. Teshima - Exp. Astro-Teilchenphysik

### Externe Wissenschaftliche Mitglieder

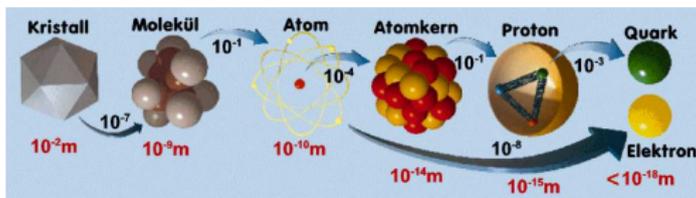
- H. Abramowicz - Exp. Teilchenphysik - Protonstruktur.

### Forschungsgruppen Nachwuchswissenschaftler

- Emmy Noether Gruppen.
- MPG Program für hochqualifizierte Wissenschaftlerinnen.
- MPG unabhängige Forschungsgruppe.
- Junior Forschungsgruppe im Münchner Exzellenzcluster.



## Dass ich erkenne, was die Welt, im Innersten zusammenhält

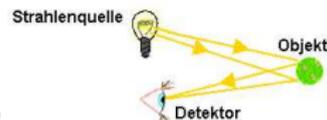


### Die zwei Hauptfragen der Elementarteilchenphysik

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

### Der Weg der Beschleunigerphysik

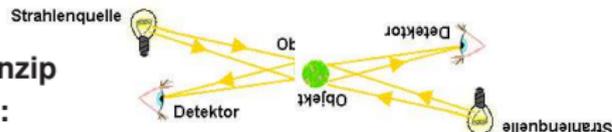
- Zur Lösung braucht man einen Weg kleinste Strukturen und ihre Wechselwirkungen zu sehen, d.h. in irgendeiner Form zu messen.



- Wir machen zwar ein



aber das Prinzip bleibt gleich:



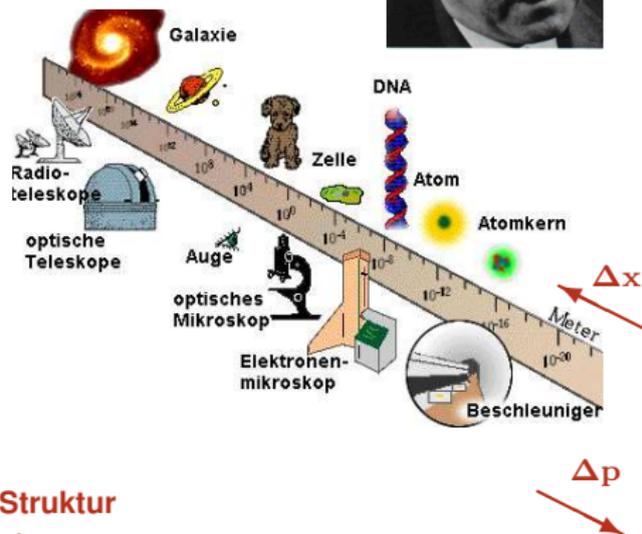
**Was immer man tut, sehen ist und bleibt ein Streuprozess.**

## Die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation



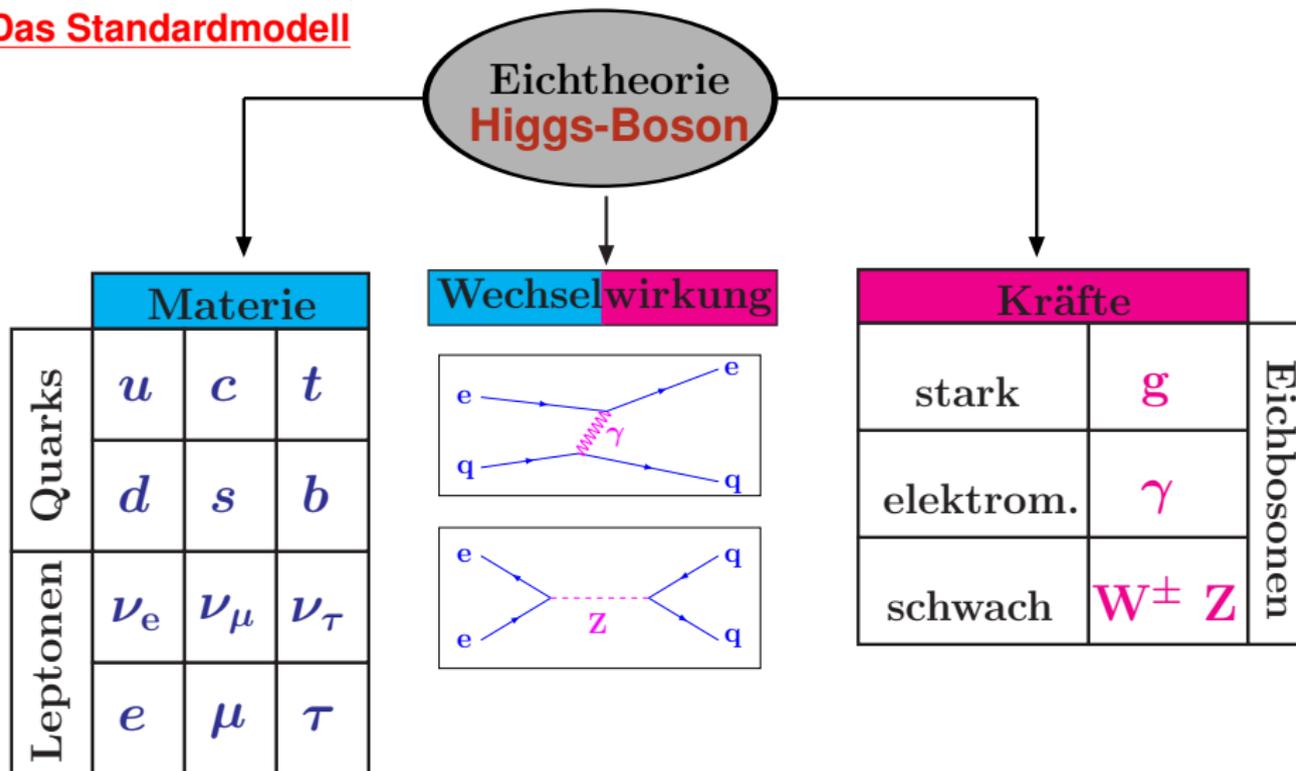
- Die Quantenmechanik macht nur Wahrscheinlichkeitsaussagen, d.h. Aussagen über das mittlere Ergebnis vieler Ereignisse. Das Einzelereignis jedoch ist völlig unbestimmt!
- Mit der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation kann man das Auflösungsvermögen abschätzen.

**Faustformel:  $\Delta x \Delta p = 0.2 \text{ fm GeV}$ . Ein Teilchen mit Impuls 1 GeV kann also eine Struktur der Größe 0.2 fm auflösen. (1 fm =  $10^{-15} \text{ m}$ )**



**Um diese kleinen Strukturen sehen zu können, brauchen wir Teilchenbeschleuniger.**

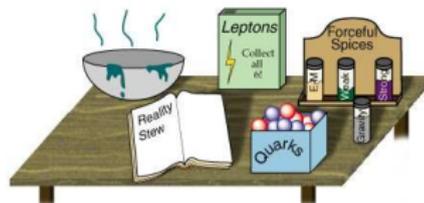
## Das Standardmodell



**Das Standardmodell hat viele Präzisionstests sehr erfolgreich bestanden.**

## Die elementaren Materiebausteine

– Unser heutiges Bild der Rezeptur



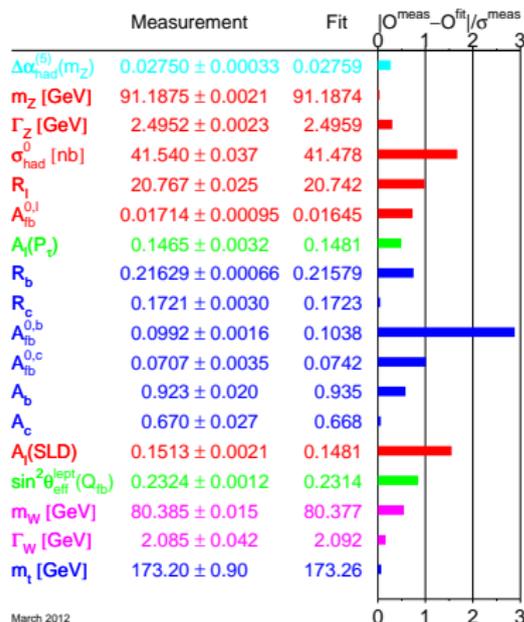
der Natur, ist:

Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom
Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
	I	II	III

- 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 (fast die Masse eines Gold-Atoms) für das top Quark.
- Eine Theorie zur Erklärung der Massen ist der Higgs-Mechanismus. In dieser Theorie wird ein zusätzliches Teilchen, das noch zu findende Higgs-Boson, vorhersagt.

**Wir wollen das Massenspektrum erklären können.**

## Das Standardmodell - seine Stärken



March 2012

### Eine Erfolgsgeschichte (Stand 2012)

- Daten und Theorie stimmen perfekt überein.
- Messungen auf sub Promille Genauigkeit, z.B.  $m_Z = (91.1875 \pm 0.0021)$  GeV.  
Dies entspricht 0.02 Promille Genauigkeit!!

### Konsistenz direkter und indirekter Messungen

- Direkt:  $m_W = (80.385 \pm 0.015)$  GeV
- Indirekt:  $m_W = (80.363 \pm 0.020)$  GeV
- Direkt:  $m_{\text{top}} = (173.2 \pm 0.9)$  GeV
- Indirekt:  $m_{\text{top}} = (172.6^{+13.5}_{-10.4})$  GeV

Wir haben die Massen zwar genau gemessen, verstehen ihre Ursache aber nicht.

## Probleme mit der Masse?



- Wieso habe ich eine so große Masse? **Wildschweine?**
- Klar, Wildschweine haben innere Struktur, sie bestehen z.B. aus **Fleisch**. Fleisch hat eine Masse, also haben Wildschweine eine Masse. Aber wieso hat Fleisch eine Masse?
- Klar, Fleisch besteht aus **Eiweißen**. Eiweiße haben eine Masse, also .... Aber wieso ... ?
- Klar, Eiweiße bestehen aus **Molekülen**. Moleküle haben eine Masse, also .... Aber wieso ... ?
- Klar, Moleküle bestehen aus **Atomen**. Atome haben eine Masse, also .... Aber wieso ... ?
- Klar, Atome bestehen aus **Protonen** und **Neutronen**. P und n haben eine Masse, also .... Aber wieso ... ?
- Klar, Protonen und Neutronen bestehen aus **Quarks**.  
**Aber wieso haben Quarks eine Masse?**

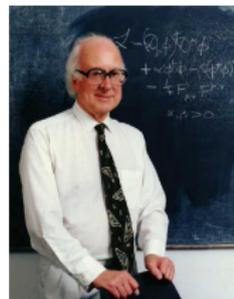
**Wir brauchen eine andere Erklärung als den Aufbau aus kleineren massiven Bausteinen.**

## Das Higgs-Boson - die Idee

### Die Vermutung (1965)

- Fundamentale Teilchen, sowohl Materie- als auch Kraft-Teilchen, sind an sich masselos.
- Massen werden erst durch Wechselwirkungen mit einem Hintergrundfeld, dem **Higgsfeld**, erzeugt.
- Je stärker die Kopplung, um so größer die Masse.
- Die Eichbosonen erhalten ihre Massen durch spontane Symmetriebrechung und den Higgs-Mechanismus.

### Der Vater des Gedankens



Peter Higgs

### Die Konsequenz

- Die Existenz des **Higgs-Bosons** als Anregung des **Higgsfeldes**.

### Die Vorhersagen des Standardmodells

- Die Kopplungen des **Higgs-Bosons** an alle Teilchen sind vorhergesagt, und damit liegen die Zerfalls-Kanäle und -Raten des **Higgs-Bosons** bei gegebener Masse fest.

**Die Masse des Higgs-Bosons ist nicht vorhergesagt und muß gemessen werden.**

Der Large Hadron Collider, 2009<sup>++</sup>,  $E_p = 4 \text{ TeV}$

## 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

p

p



ALICE



ATLAS

LHCb  
THCP

LHCb

### Einzelheiten



Entdeckungspotential:  $M_H = 100 - 1000 \text{ GeV}$

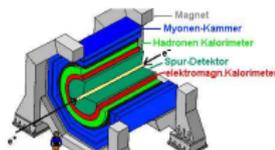
### Ein Vergleichsobjekt



590 t

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

## Das Bauprinzip von Teilchen-Detektoren und ein Beispiel

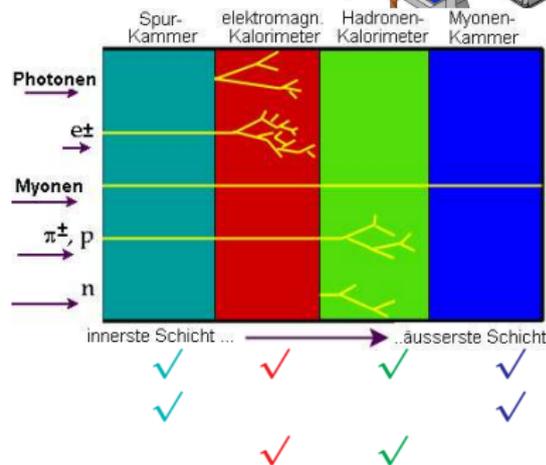


### Das Prinzip

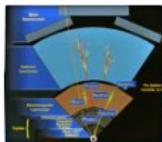
- Mit einer Art Zwiebelschalenanordnung um die Strahlröhre werden die verschiedenen Teilchen an Hand ihrer typischen Wechselwirkungen nachgewiesen.

### Die Messgrößen

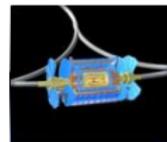
- Ort
- Impuls bzw. Geschwindigkeit
- Energie



### Ein Beispiel LHC und der ATLAS Detektor



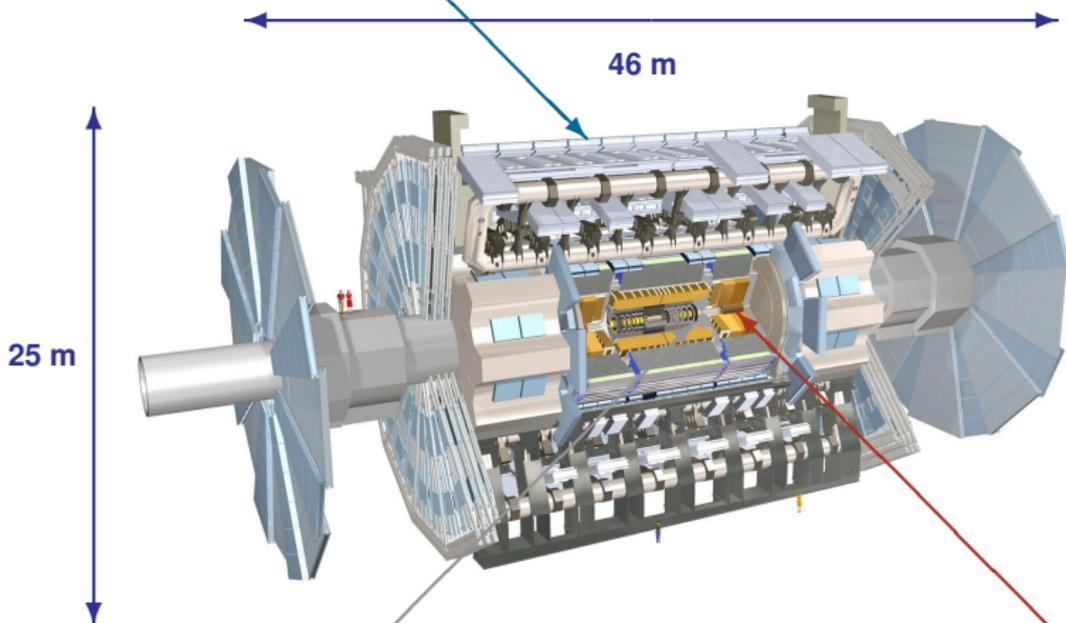
- Bei komplizierten Zerfällen wird aus der Summe aller Zerfallsprodukte auf die Eigenschaften der primär erzeugten Teilchen geschlossen.



**Erst die Rekonstruktion aller Reaktionsprodukte gibt Aufschluß über die Reaktion.**

## Der ATLAS Detektor

Monitored Drift Tubes (MDT), ( $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2\mu^+\mu^-$ )



$M = 7000 \text{ t}$   
 $V = 22580 \text{ m}^3$   
 $\Rightarrow$  ATLAS  
 könnte  
 schwimmen.



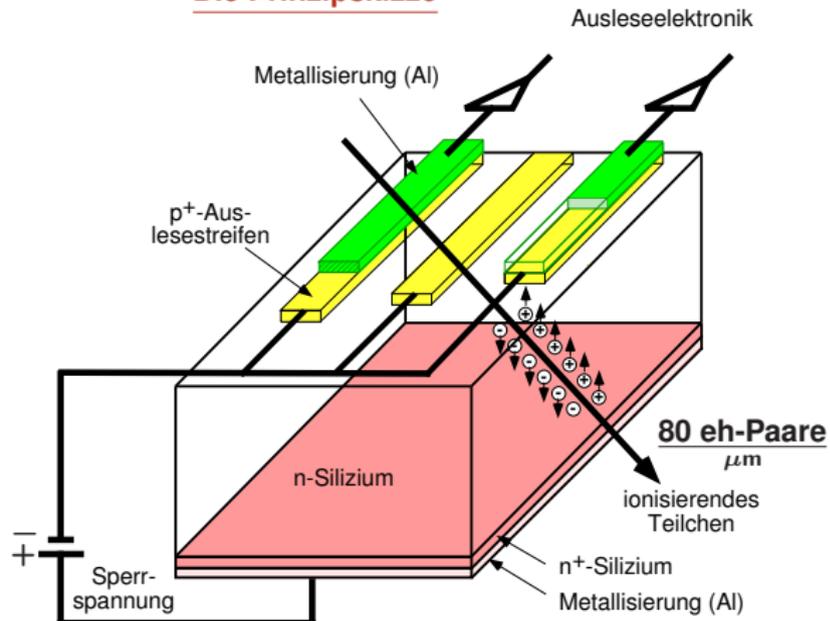
Beteiligungen

Semi Conductor Tracker (SCT), ( $H \rightarrow b\bar{b}$ )

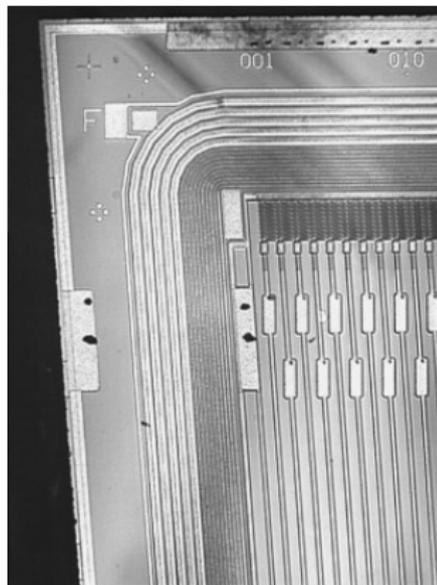
Hadron End Cap (HEC), ( $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ )

## Ein Siliziumstreifendetektor

### Die Prinzipskizze



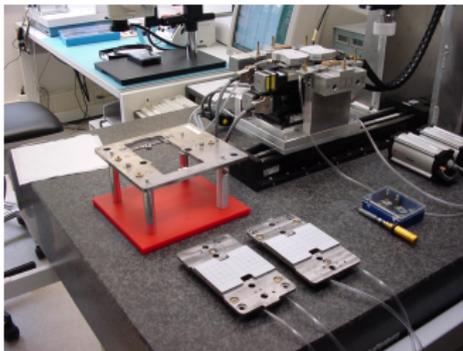
### Ein ATLAS SCT Sensor



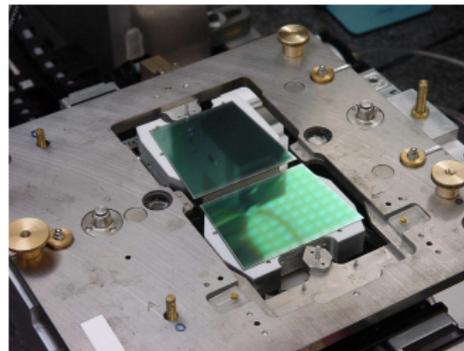
Mit Halbleiterdetektoren werden Spuren und Zerfallspunkte gemessen.

## Bilder von der Modulproduktion am MPP

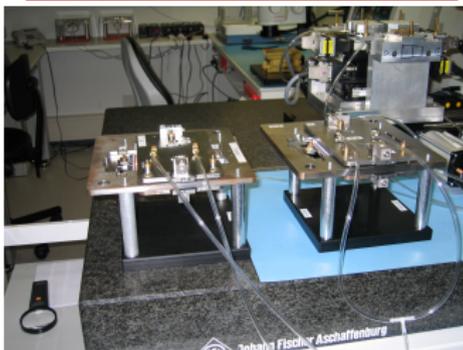
### Der Roboter zur Ausrichtung



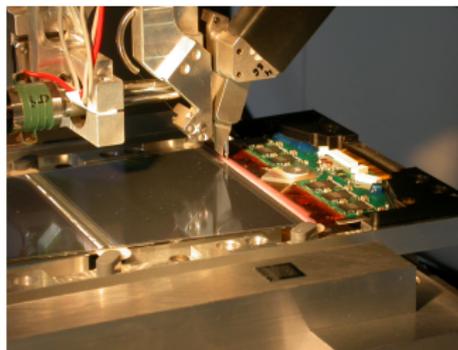
### Ausrichtung der Wafer



### Parallelproduktion der Module

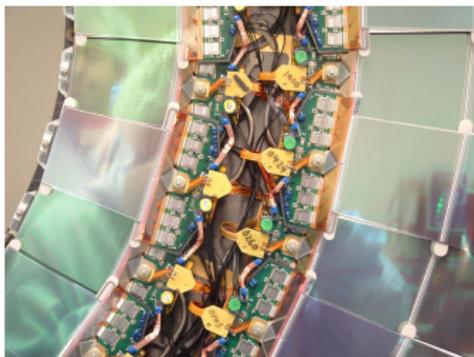
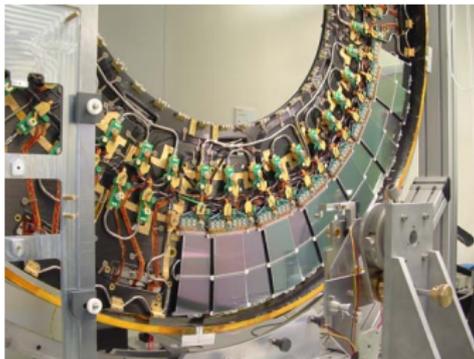


### Die Bondmaschine

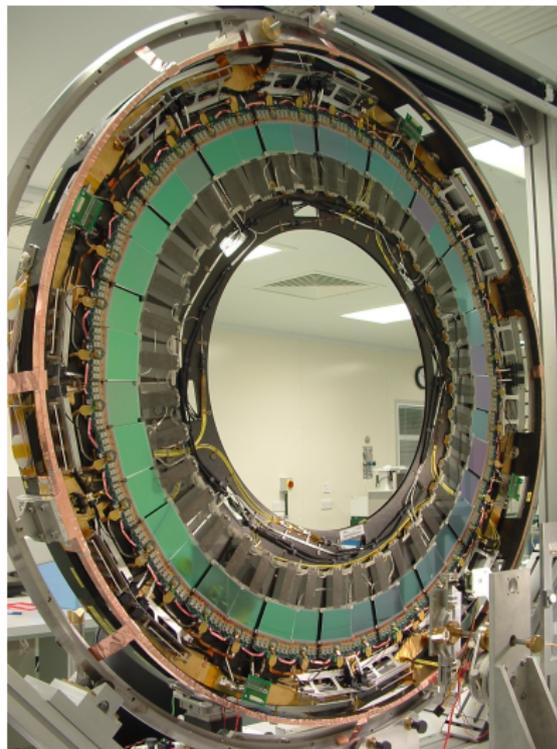


## Von Modulen zu Scheiben

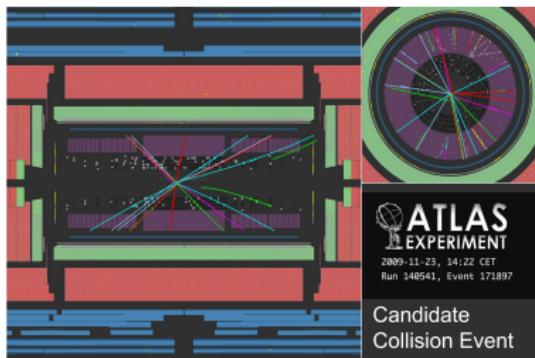
### Die Vorderseite einer Scheibe



### Die Rückseite einer Scheibe



## Die Chronologie der Ereignisse



20.11.09 — Start des LHC.

← 23.11.09 — Kollisionen 2 x 0.45 TeV.

08.12.09 — Kollisionen 2 x 1.18 TeV.

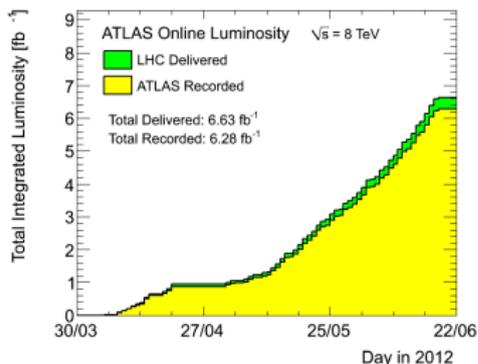
28.03.10 — Start Datennahme 2 x 3.5 TeV.

— Jahres-Luminosität, 2010: 0.045/fb, 2011: 5.3/fb.

30.03.12 — Start Datennahme 2 x 4 TeV.

— Luminosität = Anzahl Ereignisse für Reaktion mit  
1 fb =  $10^{-43} \text{m}^2$  Wirkungsquerschnitt.

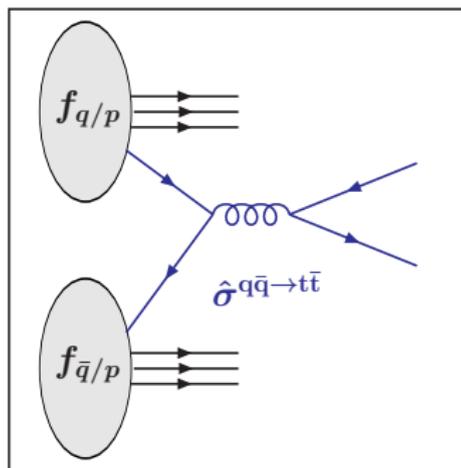
### Ein simples Luminositätsmodell



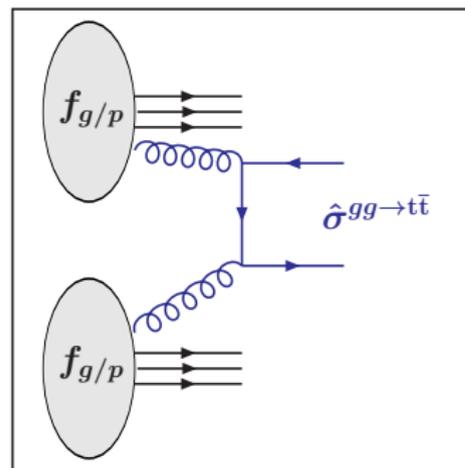
Die LHC Lernkurve ist etwa exponentiell, und es fehlt nur noch ein Faktor 2.

## Die Top Quark Paarproduktion

### Quark induzierte Prozesse (ca 10%)



### Gluron induzierte Prozesse (ca 90%)

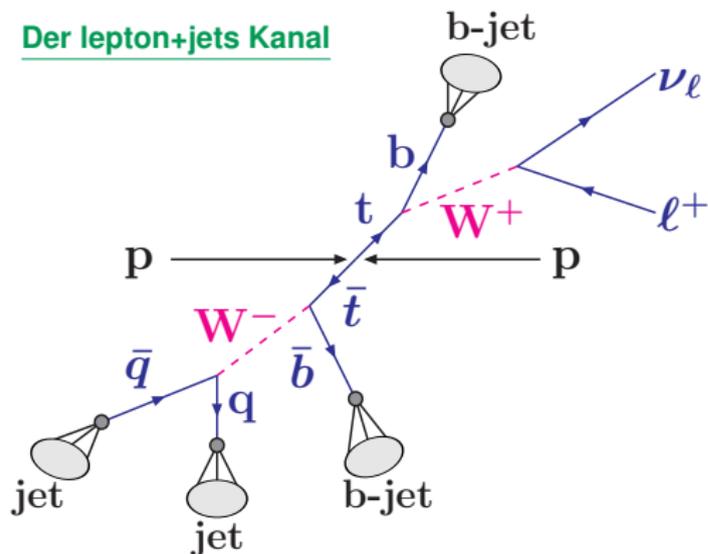


- Der Wirkungsquerschnitt ist:  $\sigma(t\bar{t}) = 170 \text{ pb}$  für  $m_{\text{top}} = 172.5 \text{ GeV}$  und  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ .  
 $\Rightarrow$  Im Jahr 2011 haben wir ca. 900.000 Top Quark Paare aufgezeichnet.
- Die Lebensdauer:  $\tau = \frac{\hbar}{\Gamma} = \frac{6.58 \cdot 10^{-16}}{1.55 \cdot 10^9} \text{ s} = 4.2 \cdot 10^{-25} \text{ s}$  ist wesentlich kleiner als die Zeit zur Hadronformation  $t \approx \frac{\hbar}{\Lambda} \approx 6 \cdot 10^{-24}$ . Das Top-Quark zerfällt als einziges Quark frei.

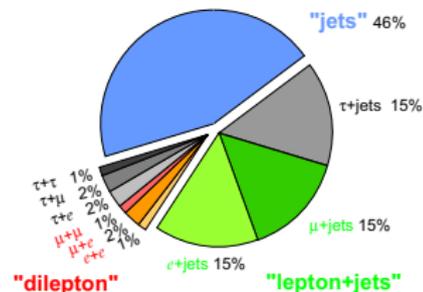
**Der Wirkungsquerschnitt am LHC ist mehr als 20 mal so groß wie am Tevatron.**

## Der Zerfall des Top Quark Paares

### Der lepton+jets Kanal



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

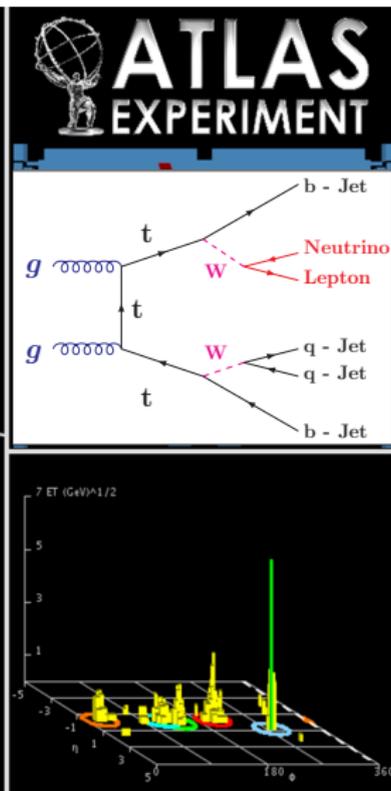
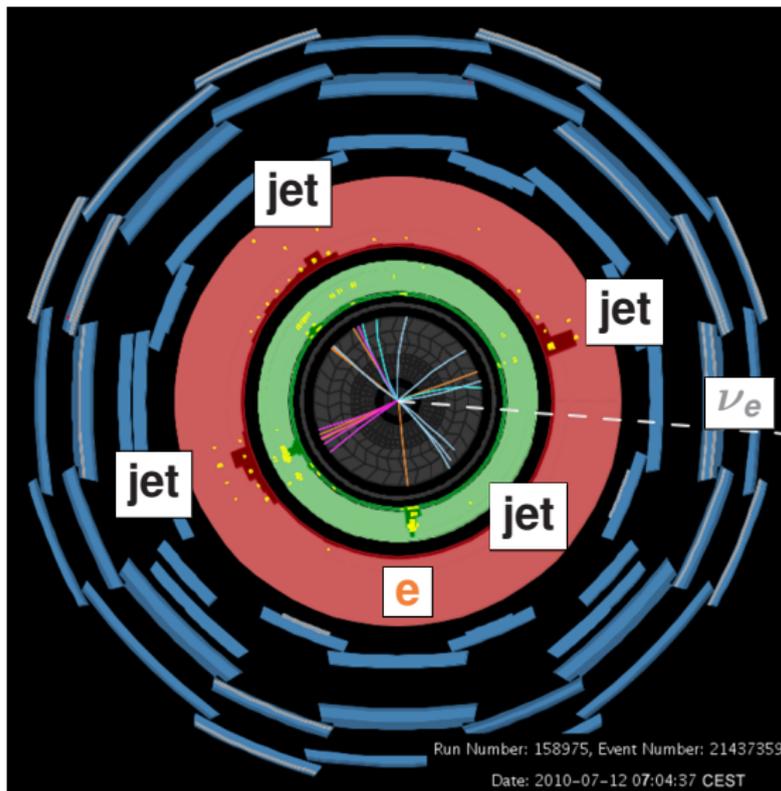


- **Dilepton**: geringe Rate (4%), hohe Reinheit, kinematisch unterbestimmt.
- **Lepton+jets**: mittlere Rate (30%), Lepton 'Tag', bester Kompromiss.
- **Jets**: höchste Rate (46%), aber auch größter Untergrund.

Der Lepton + Jets Kanal liefert zur Zeit die kleinsten Fehler für die Top Quark Masse

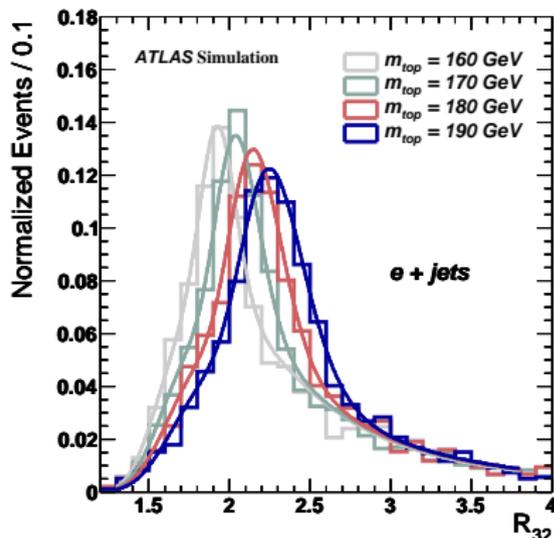
## Ein Top-Quark Paarereignis

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



## Die Messung im Lepton+jets Kanal

### Signal-Erwartung als Fkt. von $m_{top}$



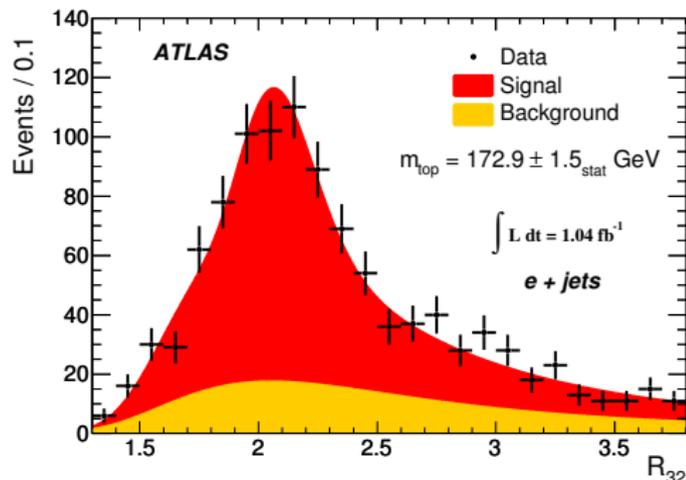
– Testgröße:  $R_{32} = \frac{m_{top}^{reco}}{m_W^{reco}} = \frac{m(3-jet)}{m(2-jet)}$

– Messgröße:  $m_{top}$

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

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

### Eine Messung im Elektronkanal

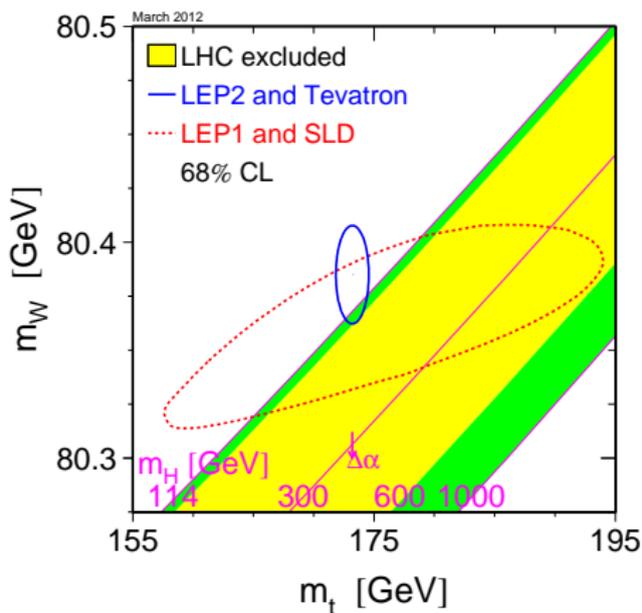


– Resultat (1/fb 2011 Daten):

$$m_{top} = (172.9 \pm 1.5_{stat} \pm 2.5_{syst}) \text{ GeV}$$

**Nächstes Ziel ist die Verbesserung der systematischen Unsicherheit auf etwa 1 GeV.**

## Hinweise auf das Higgs-Boson

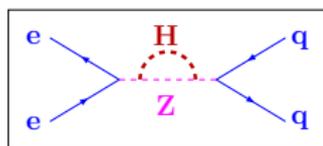
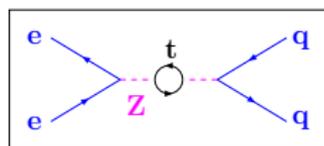


### Direkte Messungen

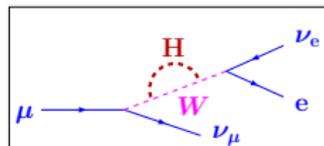
- 1)  $p\bar{p} \rightarrow t\bar{t}$
- 2)  $p\bar{p} \rightarrow W + X$  und  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$

### Indirekte Bestimmungen

#### 1) Die Z-Produktion



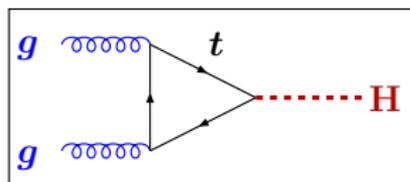
#### 2) Der Muonzerfall



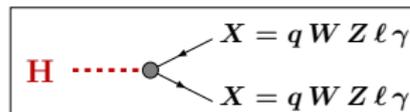
Diese gute Übereinstimmung ist einer der Gründe an ein leichtes Higgs-Boson zu glauben.

# Das Higgs - Entdeckungspotential am LHC

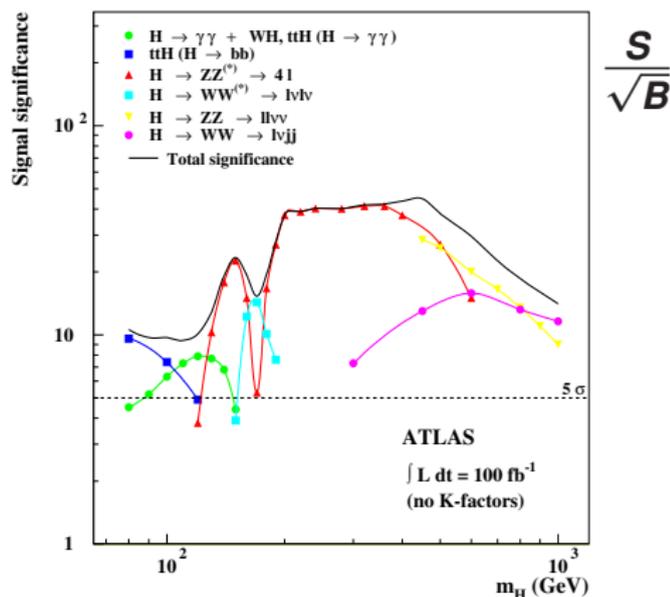
## Der Haupt-Produktionskanal



## Die Liste der Zerfallskanäle



## Das Entdeckungspotential

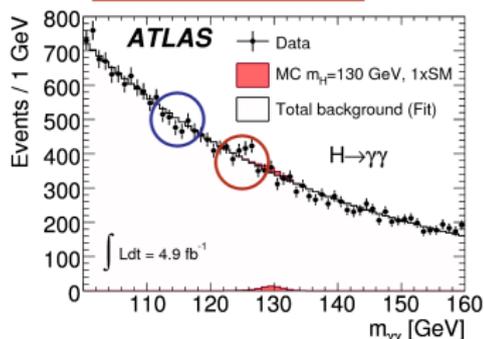


– Das ATLAS Entdeckungspotential ist besser als  $10 \sigma$  für ein Jahr mit Design-Luminosität.

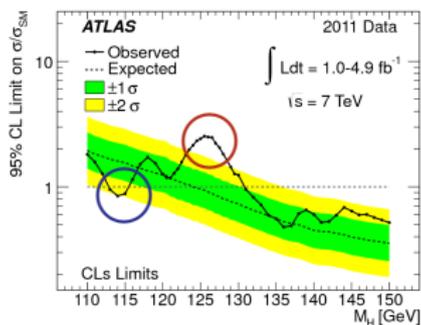
**Das Standard Model Higgs-Boson kann uns am LHC wohl nicht verborgen bleiben.**

## Die Hinweise aus den 2011 Daten

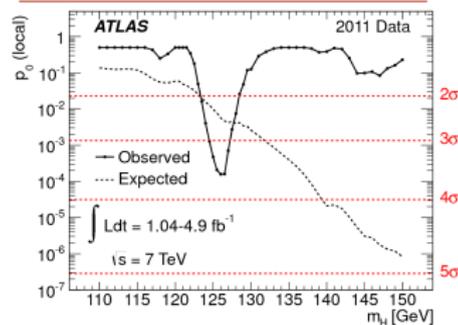
### Der Kanal $H \rightarrow \gamma\gamma$



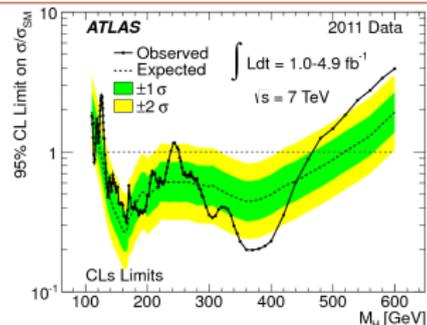
### Der Bereich kleiner Massen



### Eine Untergrundfluktuation?



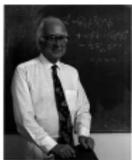
### Kombinierte Ausschlussgrenzen

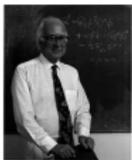


Diese Hinweise reichen noch nicht. Die 2012 Daten werden gerade ausgewertet.

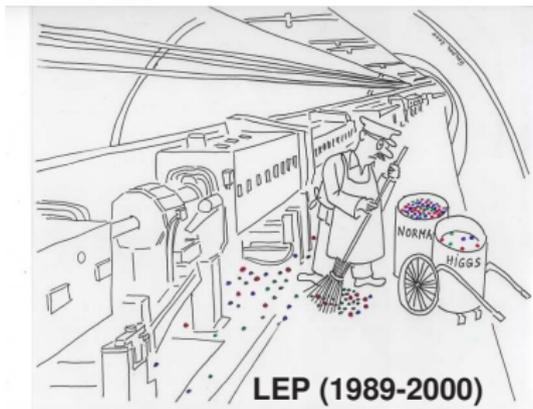
## Anstelle einer Zusammenfassung

### Peter Higgs



Was so  begann, ...

... nahm so



LEP (1989-2000)  
Tevatron (1992-2011)

seinen Lauf, und endet ...



... LHC (2010 - ?)  
vielleicht so

### Karl Gustav von Schweden

?



## Eine unvollständige Liste interessanter Links



Dieser Vortrag

<http://www.mpp.mpg.de/~nisius/welcomeaux/lehre.html>

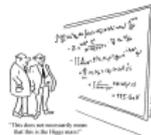


Die Startseite der Deutschen Teilchenphysik

<http://www.teilchenphysik.de>

Ein Lernprogramm der Universität Erlangen

<http://www.solstice.de/teilchenphysik/>



Fun with ..., eine Sammlung von Cartoons von Prof. C. Grupen

<http://www.hep.physik.uni-siegen.de/~gruppen>



Physik mit Musik, der LHC Rap von Katie MCA Alpine (alpinecat)

<http://www.youtube.com/watch?v=j50ZssEojtM>

**Danke für die Aufmerksamkeit ... und ... viel Spass beim Weiterlesen.**