

Von der Entdeckung zur Präzisionsphysik Top und Higgs am LHC

Antrittsvorlesung
10. Juli 2013

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik, Karlsruher Institut für Technologie

Entdeckung



Physiker = Schatzsucher:
Wie gut ist „gut genug“?

Entdeckung

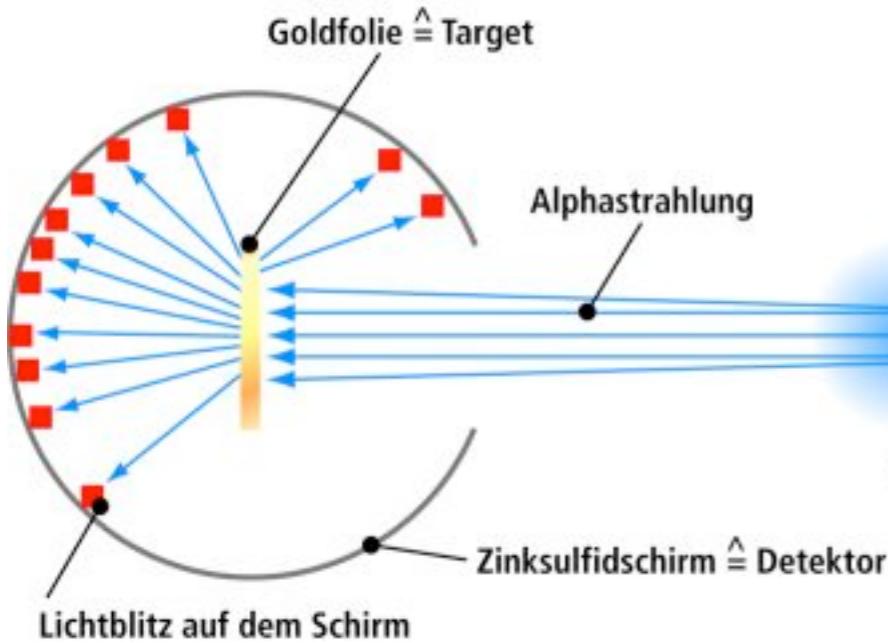
Präzision

Physiker = Uhrmacher
Jedes Detail zählt!

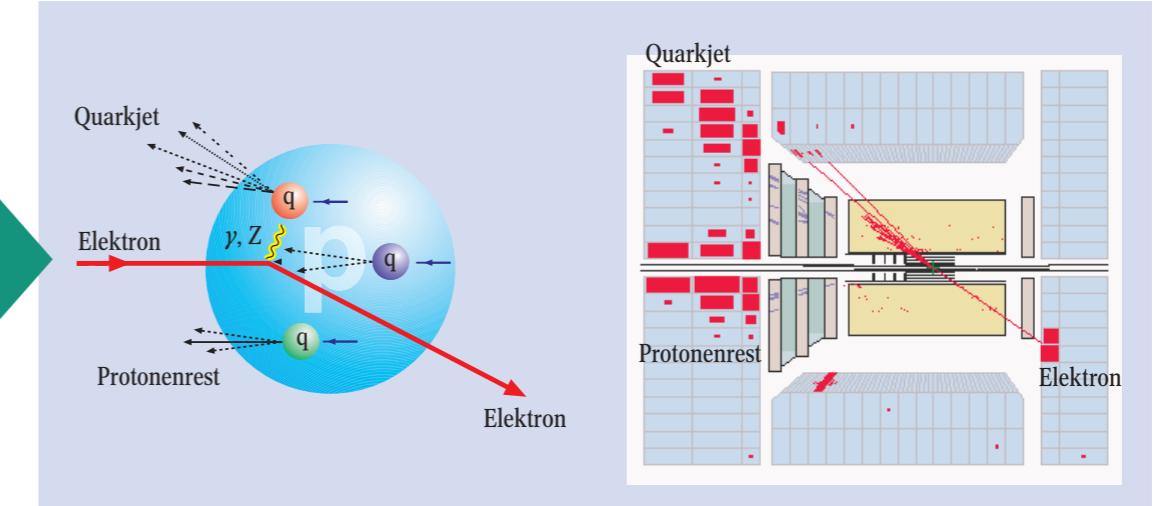
[R. Baumgarten]

Physiker = Schatzsucher:
Wie gut ist „gut genug“?

Von der Entdeckung zur Präzision



[www.wellderphysik.de]



[Klanner, Schörner-Sadenius, Physik Journal, Mai 2006]

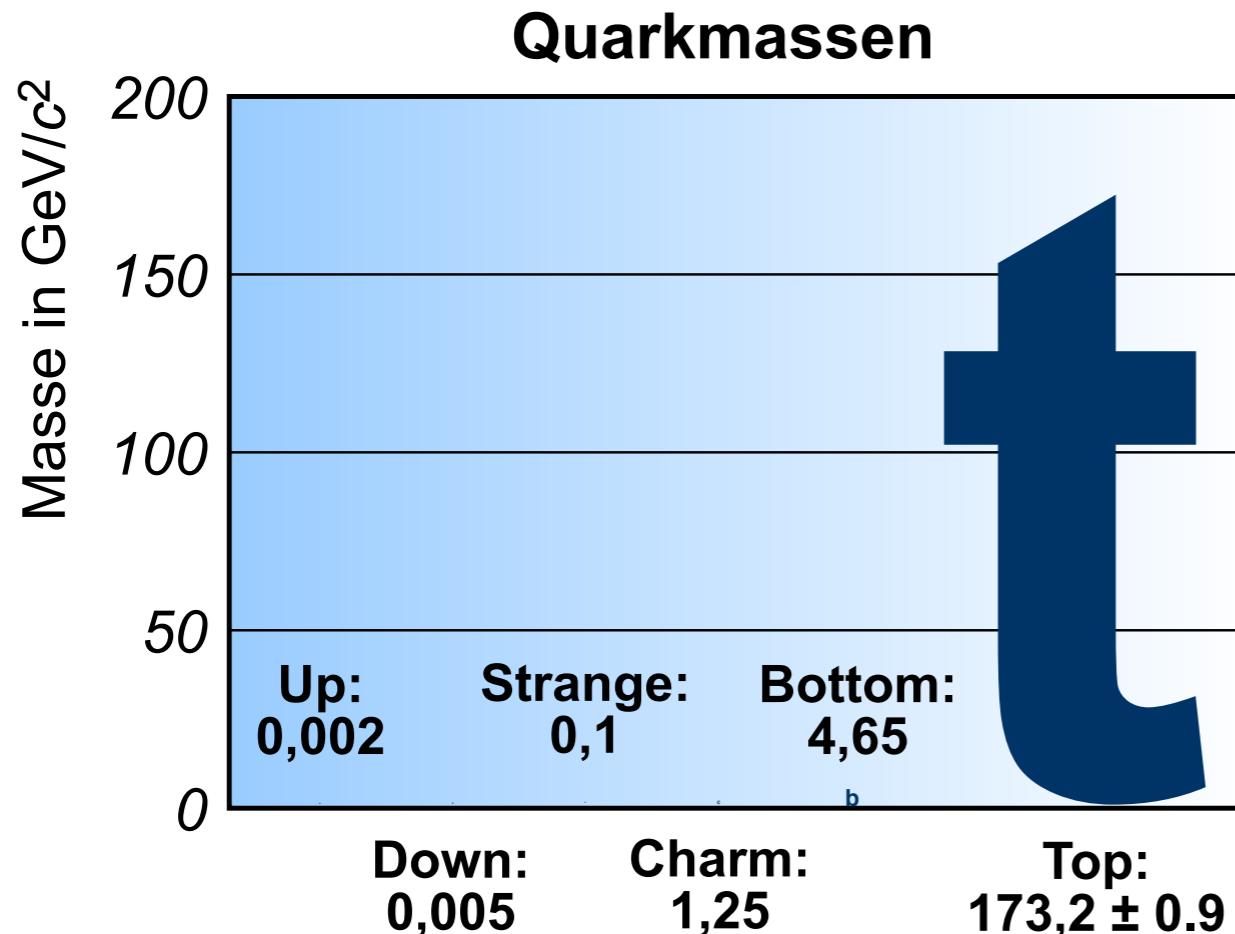
■ Historisches Beispiel: Struktur der Materie

- Rutherford-Experiment: Atom = kompakter Kern + Hülle
- Tiefinelastische Streuung (SLAC → HERA → LHC): Proton = Quarks + Gluonen

■ Aktuelle Entwicklungen:

- Top-Entdeckung am Tevatron → Präzisionsphysik mit Top-Quarks am LHC
- Higgs-Boson-Entdeckung am LHC → Vorbereitung von Präzisionsmessungen

Massen der Elementarteilchen



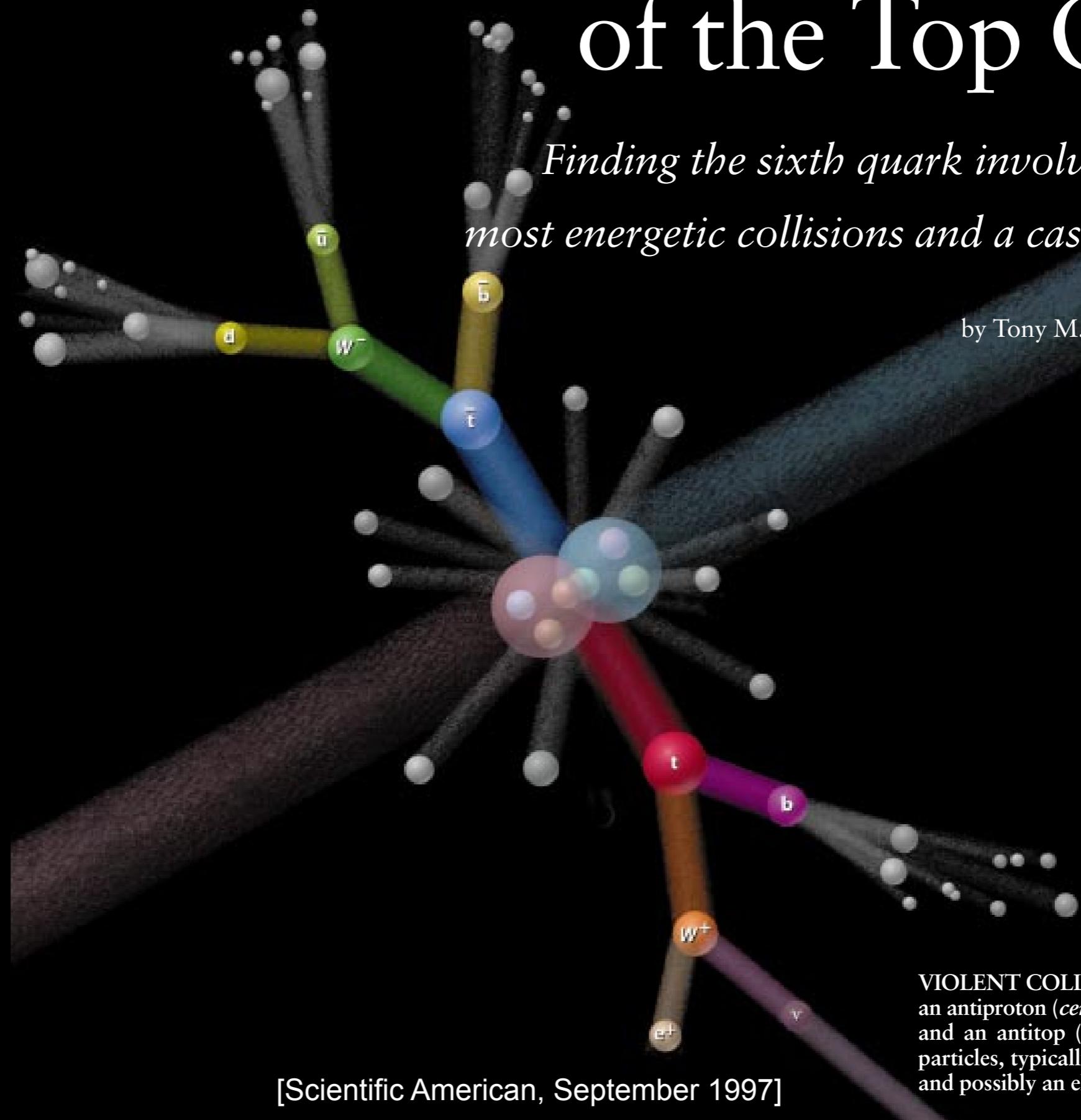
- Higgs-Mechanismus: Massen der Elementarteilchen durch Kopplung an Higgs-Feld
- Higgs-Mechanismus erklärt nicht, welche Masse Teilchen besitzen
- Standardmodell: 6 Quarks, stark unterschiedliche Massen
- Besonders interessant: Top-Quark – fast 40-mal schwerer als Bottom-Quark

Eigenschaften des Top-Quarks?
Zusammenspiel von Top-Quark und Higgs-Boson?

The Discovery of the Top Quark

Finding the sixth quark involved the world's most energetic collisions and a cast of thousands

by Tony M. Liss and Paul L. Tipton



VIOLENT COLLISION between a proton and an antiproton (*center*) creates a top quark (*red*) and an antitop (*blue*). These decay to other particles, typically producing a number of jets and possibly an electron or positron.

The Discovery of the Top Quark

Finding the sixth quark involved the world's most energetic collisions and a cast of thousands

by Tony M. Liss and Paul L. Tipton

Die Entdeckung von gestern ...



[Scientific American, September 1997]

VIOLENT COLLISION between a proton and an antiproton (*center*) creates a top quark (*red*) and an antitop (*blue*). These decay to other particles, typically producing a number of jets and possibly an electron or positron.

The Discovery of the Top Quark

Finding the sixth quark involved the world's most energetic collisions and a cast of thousands

by Tony M. Liss and Paul L. Tipton

Die Entdeckung von gestern ...
... ist heute das Signal

[Scientific American, September 1997]

VIOLENT COLLISION between a proton and an antiproton (*center*) creates a top quark (*red*) and an antitop (*blue*). These decay to other particles, typically producing a number of jets and possibly an electron or positron.

The Discovery of the Top Quark

Finding the sixth quark involved the world's most energetic collisions and a cast of thousands

by Tony M. Liss and Paul L. Tipton

Die Entdeckung von gestern ...

... ist heute das Signal

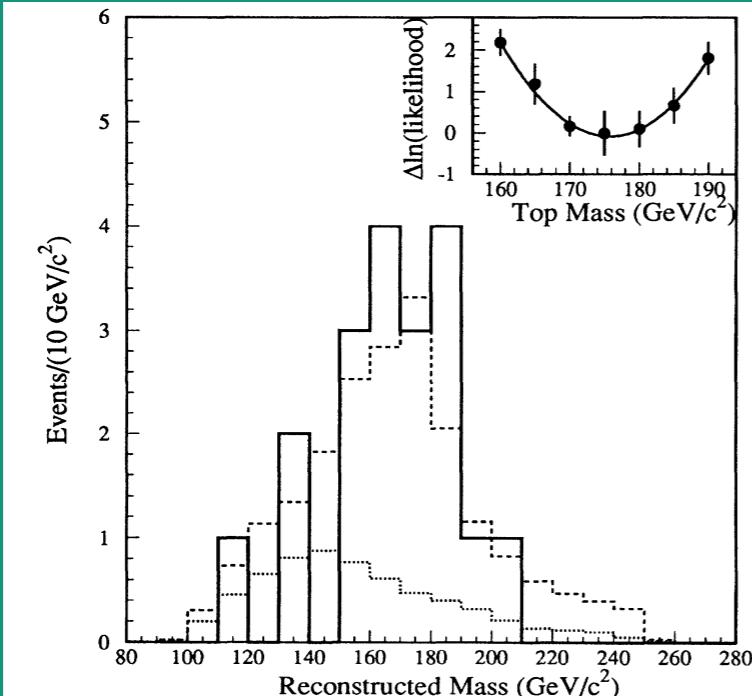
... ist morgen die Kalibrationsquelle

[Scientific American, September 1997]

VIOLENT COLLISION between a proton and an antiproton (*center*) creates a top quark (*red*) and an antitop (*blue*). These decay to other particles, typically producing a number of jets and possibly an electron or positron.

Top-Quarks am Tevatron

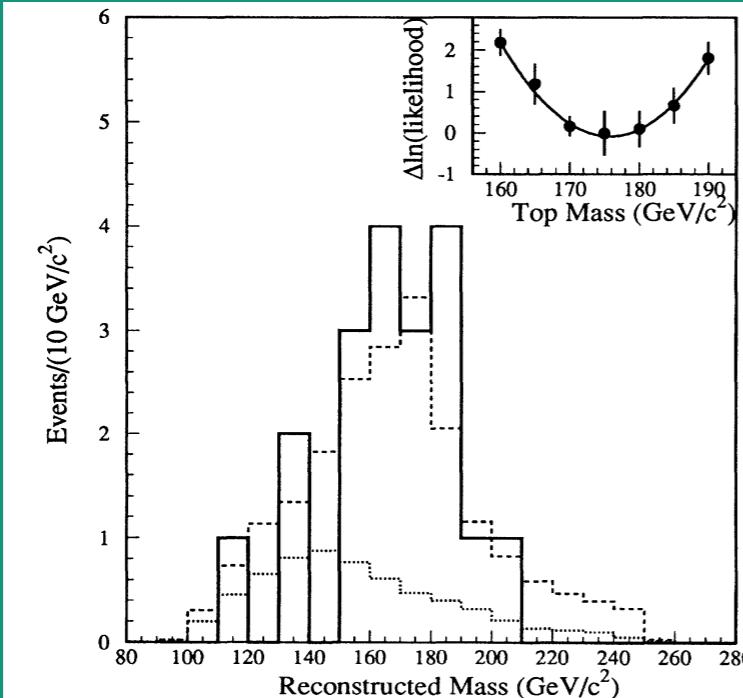
1995: Top-Quark-Entdeckung



[PRL 74 (1995) 2627]

Top-Quarks am Tevatron

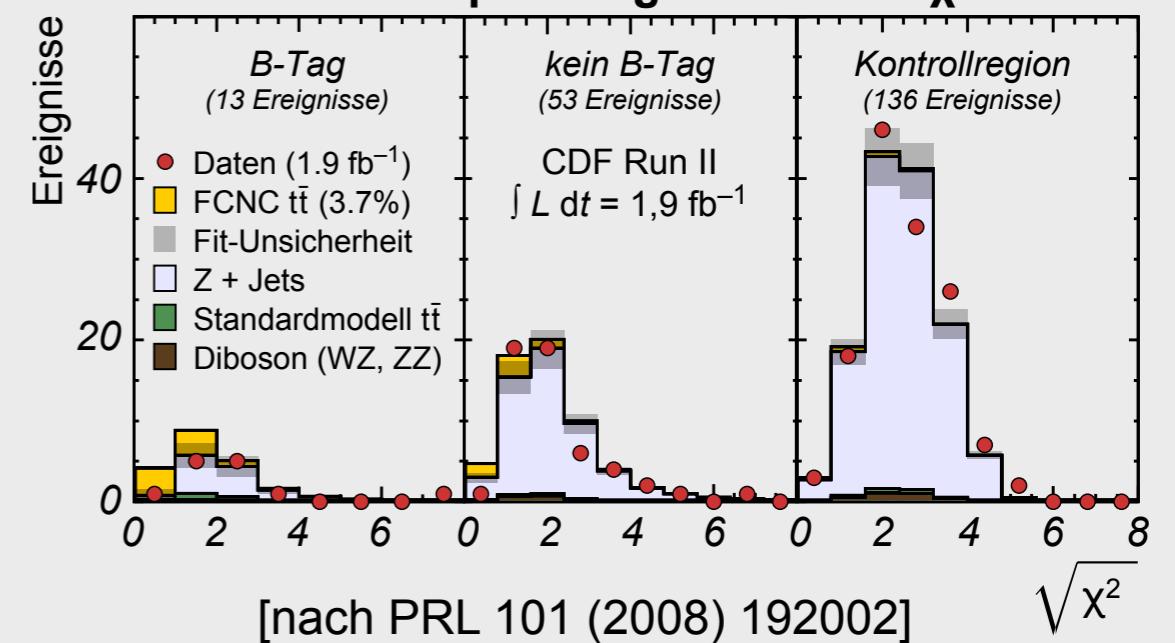
1995: Top-Quark-Entdeckung



[PRL 74 (1995) 2627]

2008: Flavorverletzende Neutrale Ströme?

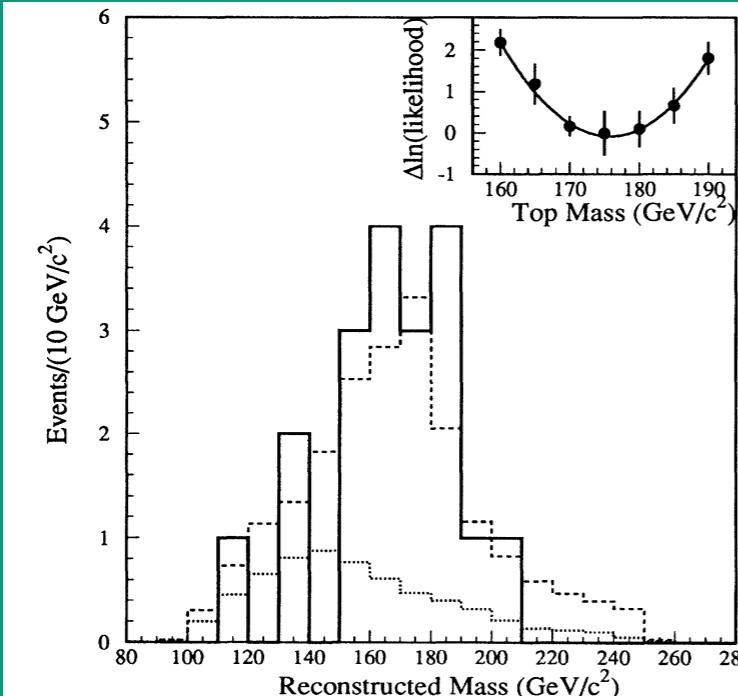
Beste Anpassung an Massen- χ^2



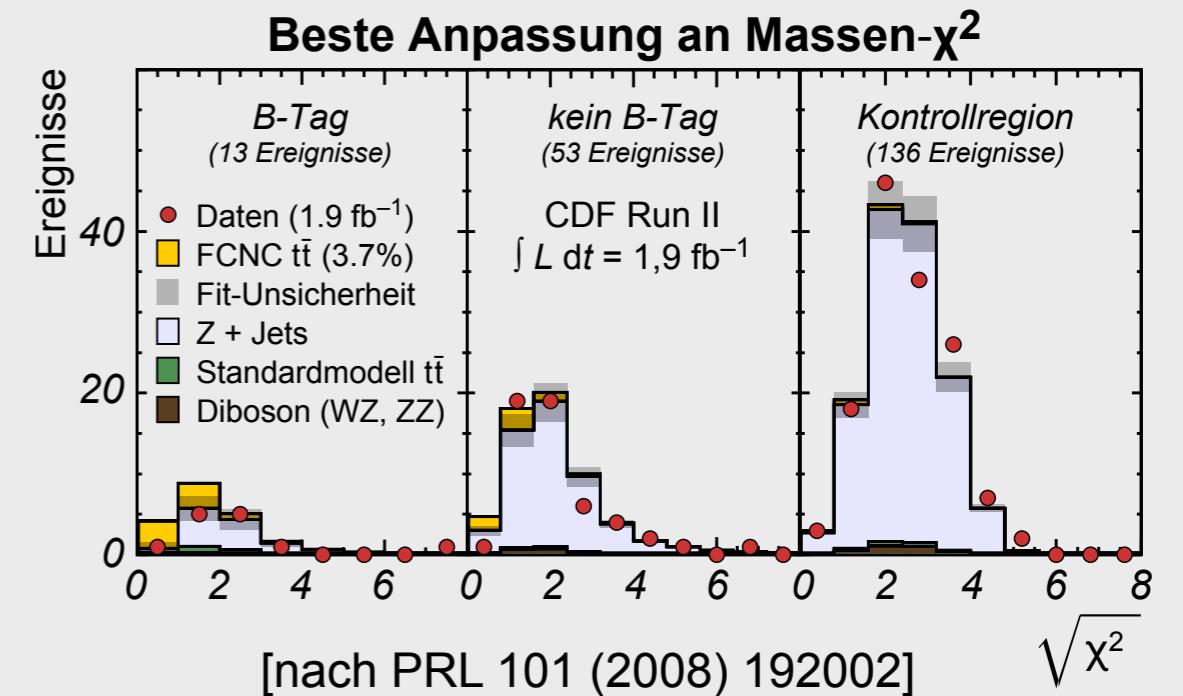
[nach PRL 101 (2008) 192002]

Top-Quarks am Tevatron

1995: Top-Quark-Entdeckung



2008: Flavorverletzende Neutrale Ströme?

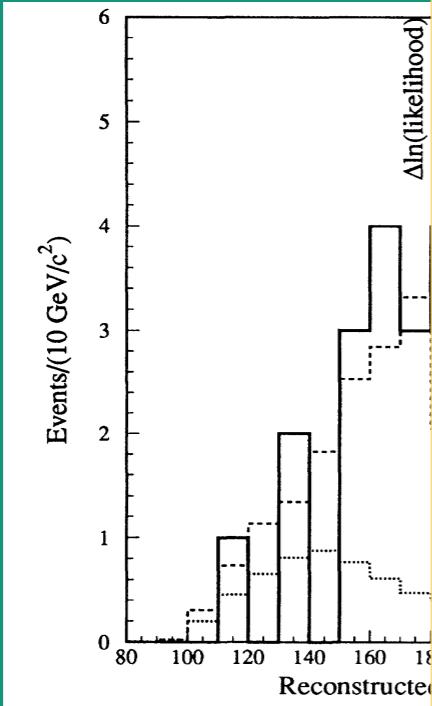


Viele weitere Resultate

Totale und differenzielle Wirkungsquerschnitte, Einzeltop-Produktion, Ladung, Lebensdauer, Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie, W-Boson-Polarisation, Suche nach Neuer Physik, ...

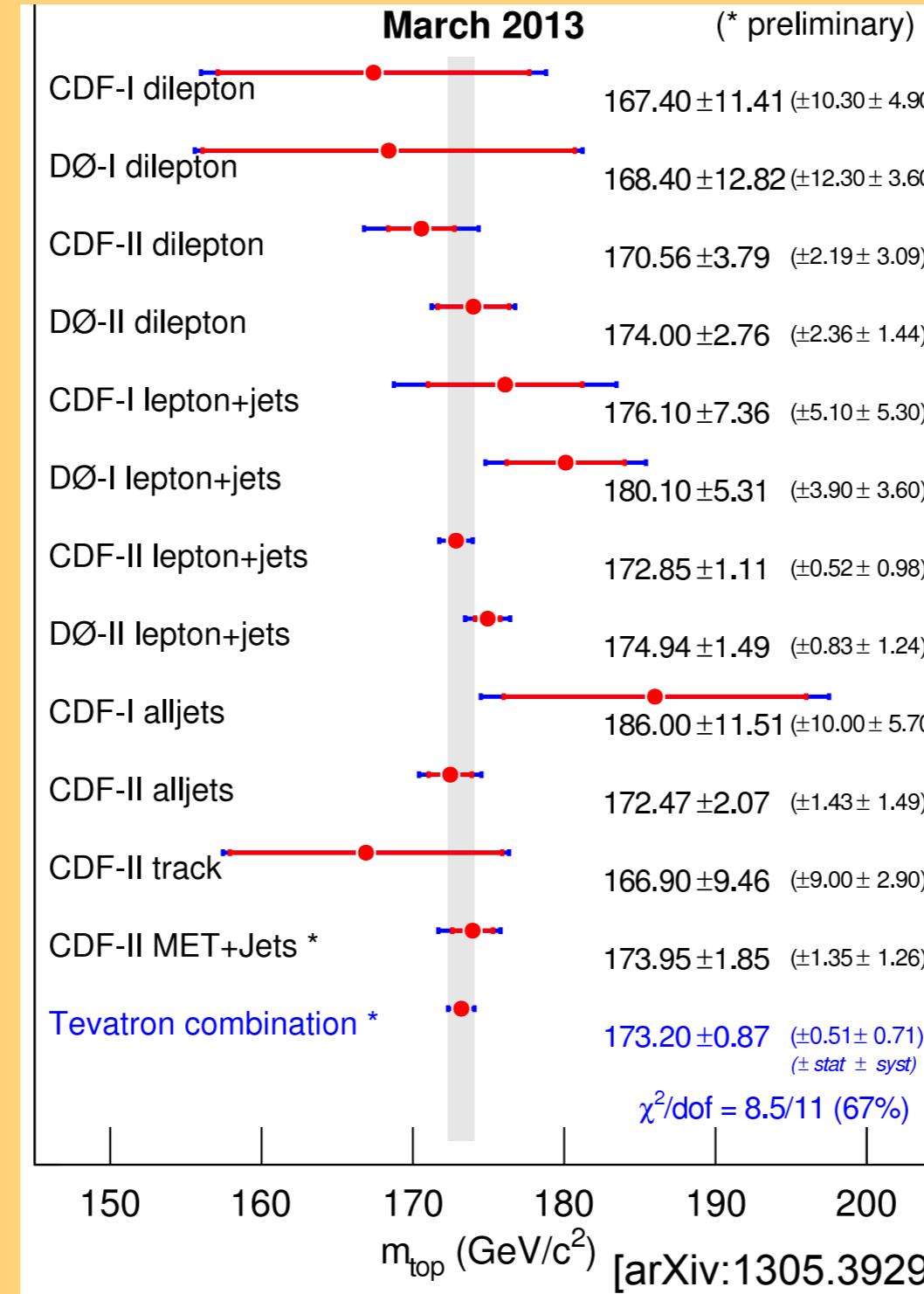
Top-Quarks am Tevatron

1995: Top-Quark



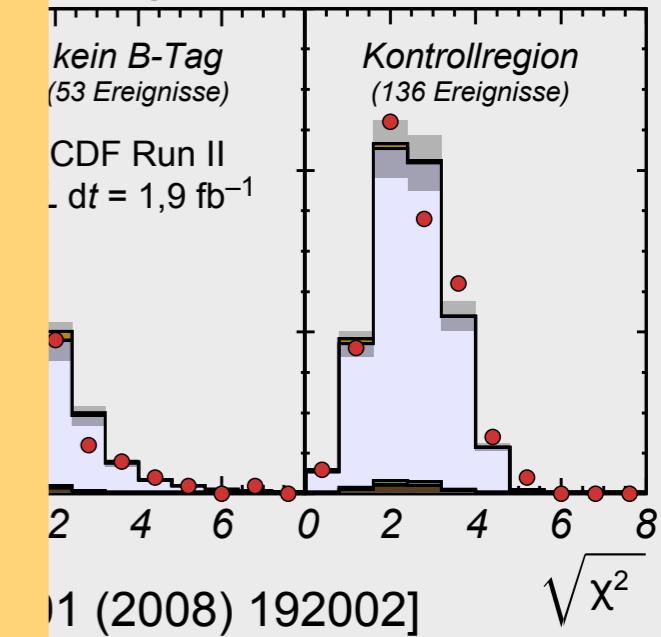
Totale und direkte Lebensdauer

Das Tevatron-Vermächtnis: Top-Masse



ende Neutrale Ströme?

Überprüfung an Massen- χ^2

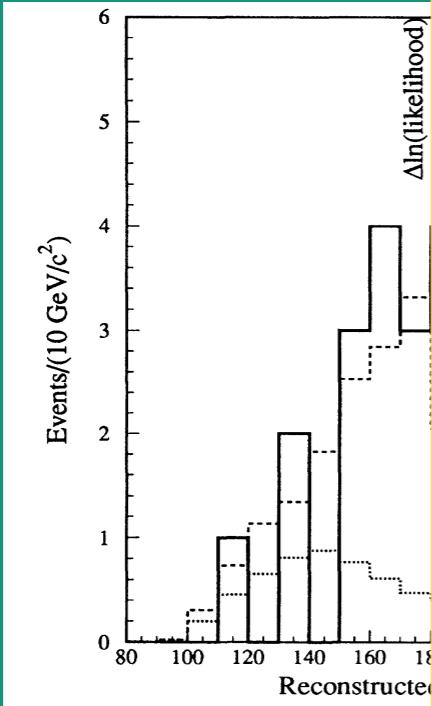


[2001 (2008) 192002] $\sqrt{\chi^2}$

Massenbestimmung, Ladung, Spinbestimmung, Isospin, Suche

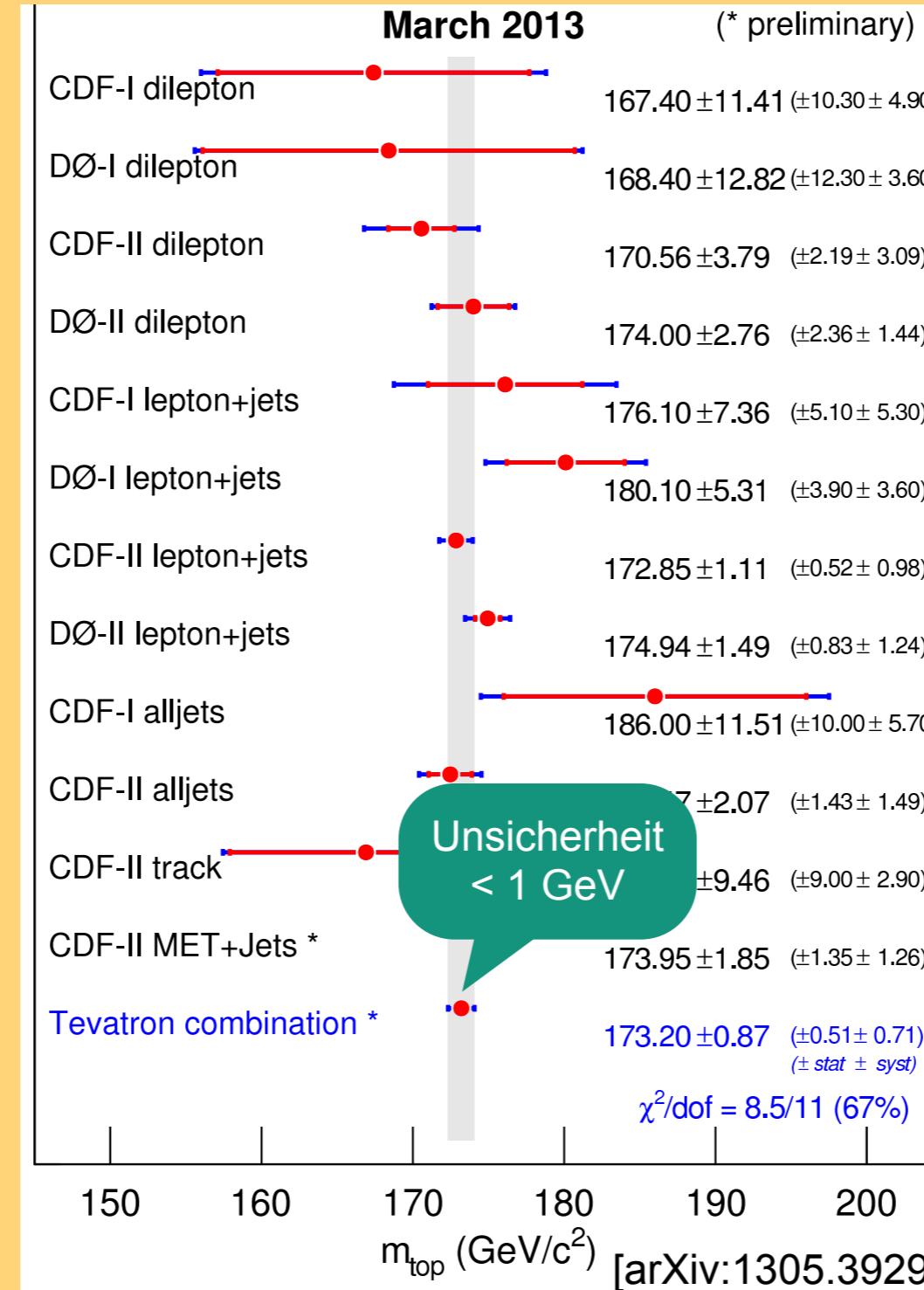
Top-Quarks am Tevatron

1995: Top-Quark



Totale und direkte Lebensdauer

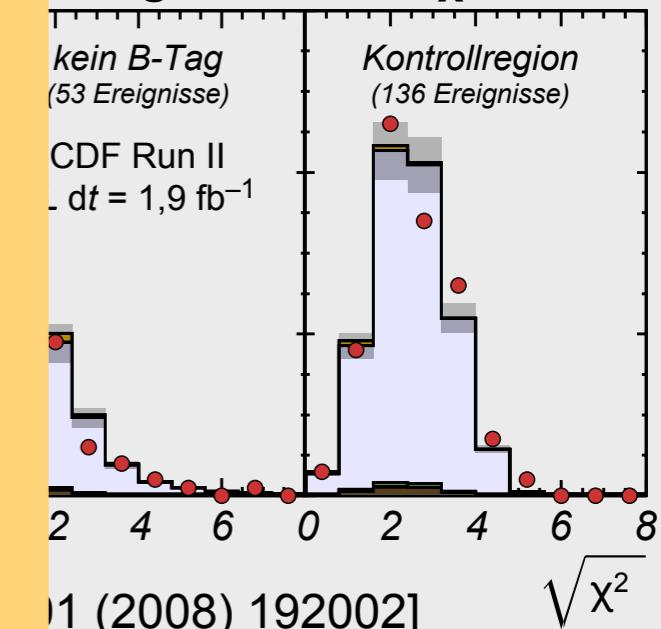
Das Tevatron-Vermächtnis: Top-Masse



Unsicherheit
 $< 1 \text{ GeV}$

ende Neutrale Ströme?

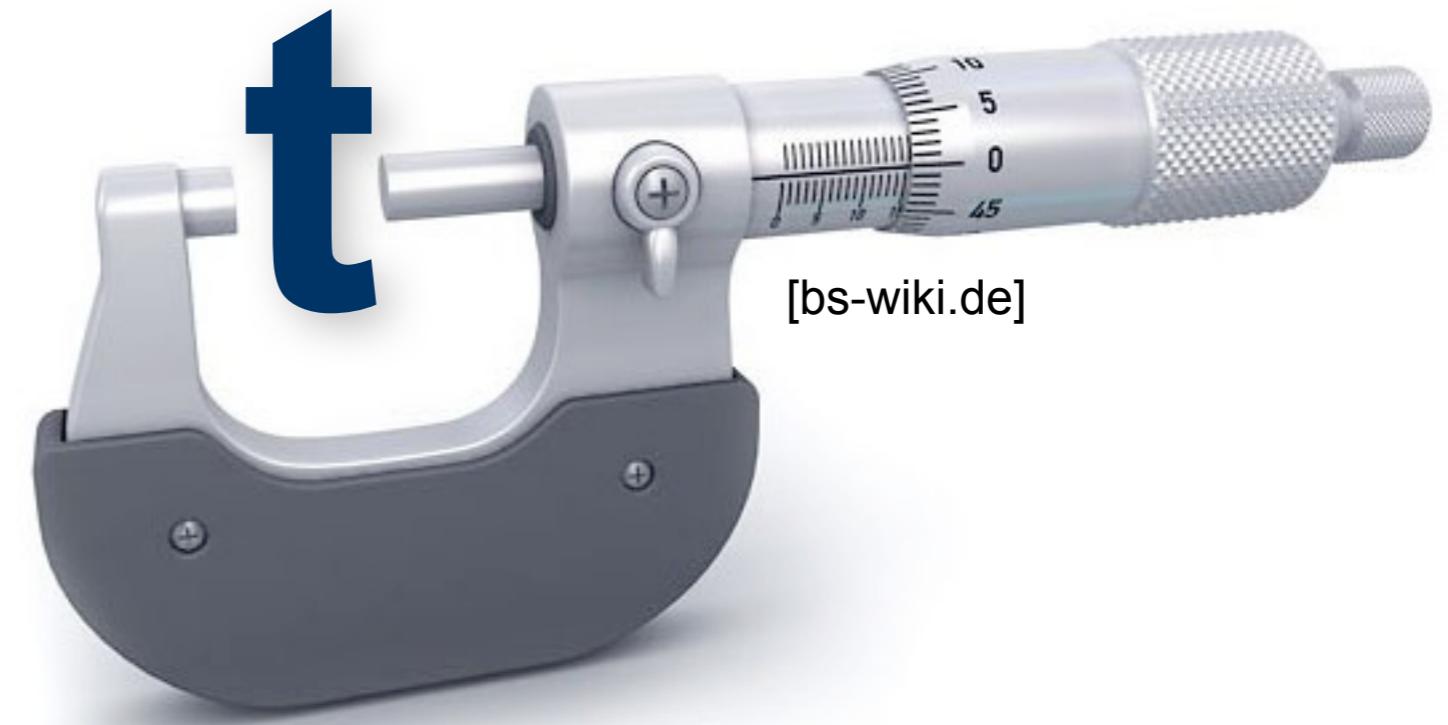
ssung an Massen- χ^2



tion, Ladung, sation, Suche

Top-Quarks am LHC

- Sommer 2010: „Erste Top-Quarks in Europa“
- Ab Winter 2010/2011:
Präzisionsmessungen
der Top-Quark-Antiquark-Produktion, Top-Eigenschaften, ...
- Schlüsselmessung: **absolute** Produktionsrate
→ Herausforderung: Kontrolle systematischer Unsicherheiten
- Verbesserte theoretische Rechnungen, Höhepunkt 2013:
 $t\bar{t}$ -Produktion in **nächst-nächstführender Ordnung** QCD-Störungstheorie (NNLO)



[bs-wiki.de]

Der Fortschritt in Zahlen

| | Autoren | Siliziumdetektor | Rekonstruierte Top-Quarks (Lepton+Jets, 1 b-Tag) |
|----------------------------|---------|-------------------------------------|--|
| Tevatron Run I (1992–1996) | 400 | 0.7 m ² 46.000 Kanäle | 25 |



Der Fortschritt in Zahlen

| | Autoren | Siliziumdetektor | Rekonstruierte Top-Quarks (Lepton+Jets, 1 b-Tag) |
|--------------------------------|---------|-------------------------------------|--|
| Tevatron Run I (1992–1996) | 400 | 0.7 m ² 46.000 Kanäle | 25 |
| Tevatron Run II (2001–2011) | 600 | 6 m ² 720.000 Kanäle | 2000 |



Der Fortschritt in Zahlen

| | Autoren | Siliziumdetektor | Rekonstruierte Top-Quarks (Lepton+Jets, 1 b-Tag) |
|--------------------------------|---------|---|--|
| Tevatron Run I (1992–1996) | 400 | 0.7 m ² 46.000 Kanäle | 25 |
| Tevatron Run II (2001–2011) | 600 | 6 m ² 720.000 Kanäle | 2000 |
| LHC Run I (2009–2012) | 2500 | 200 m ² 75.000.000 Kanäle | 150000 |

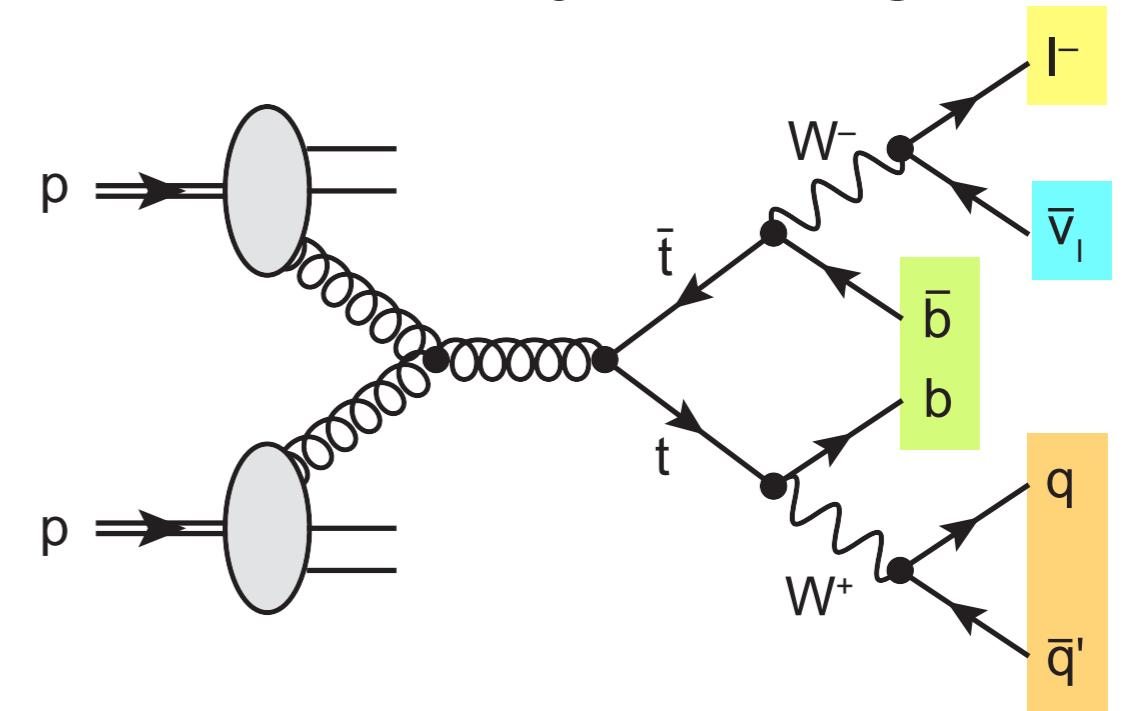


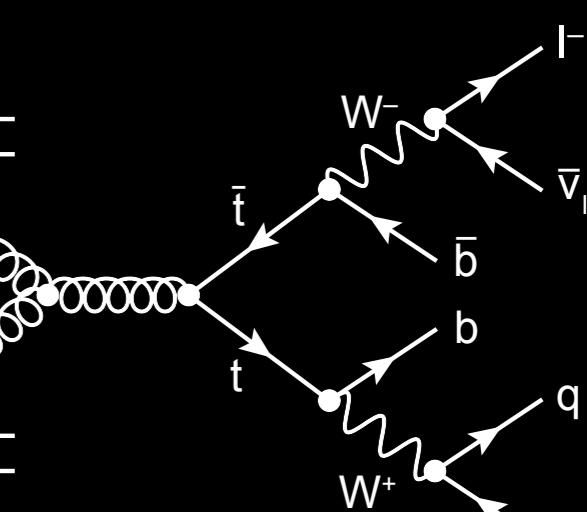
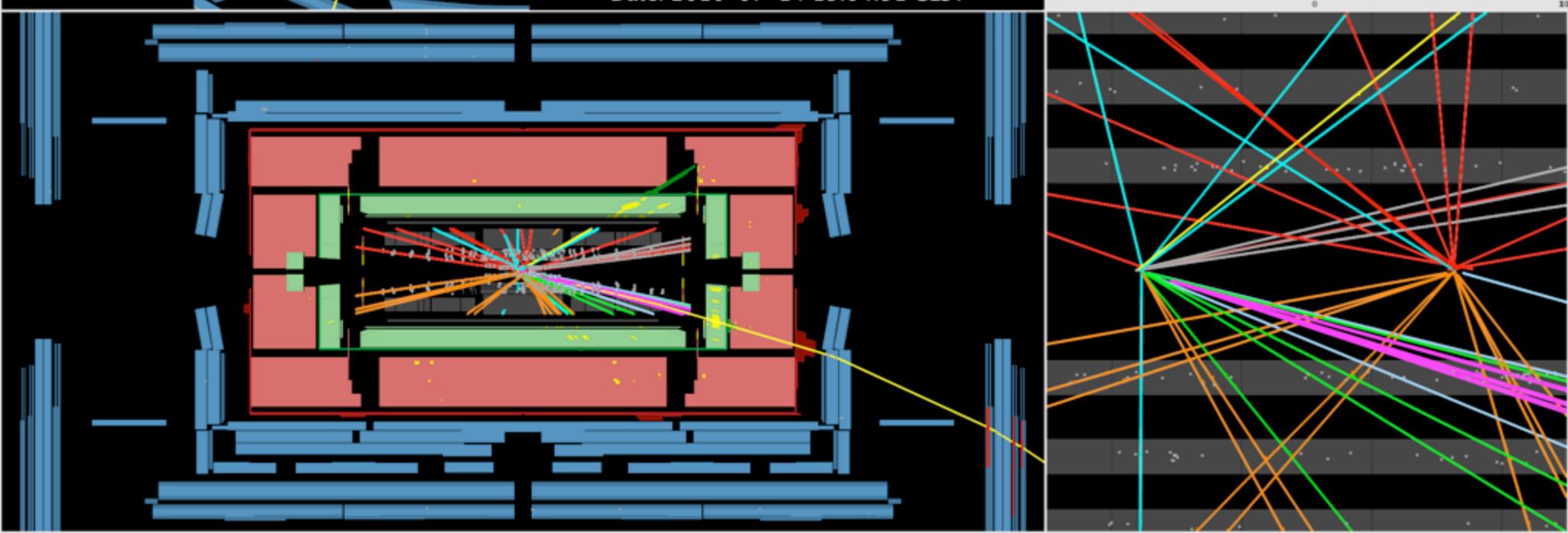
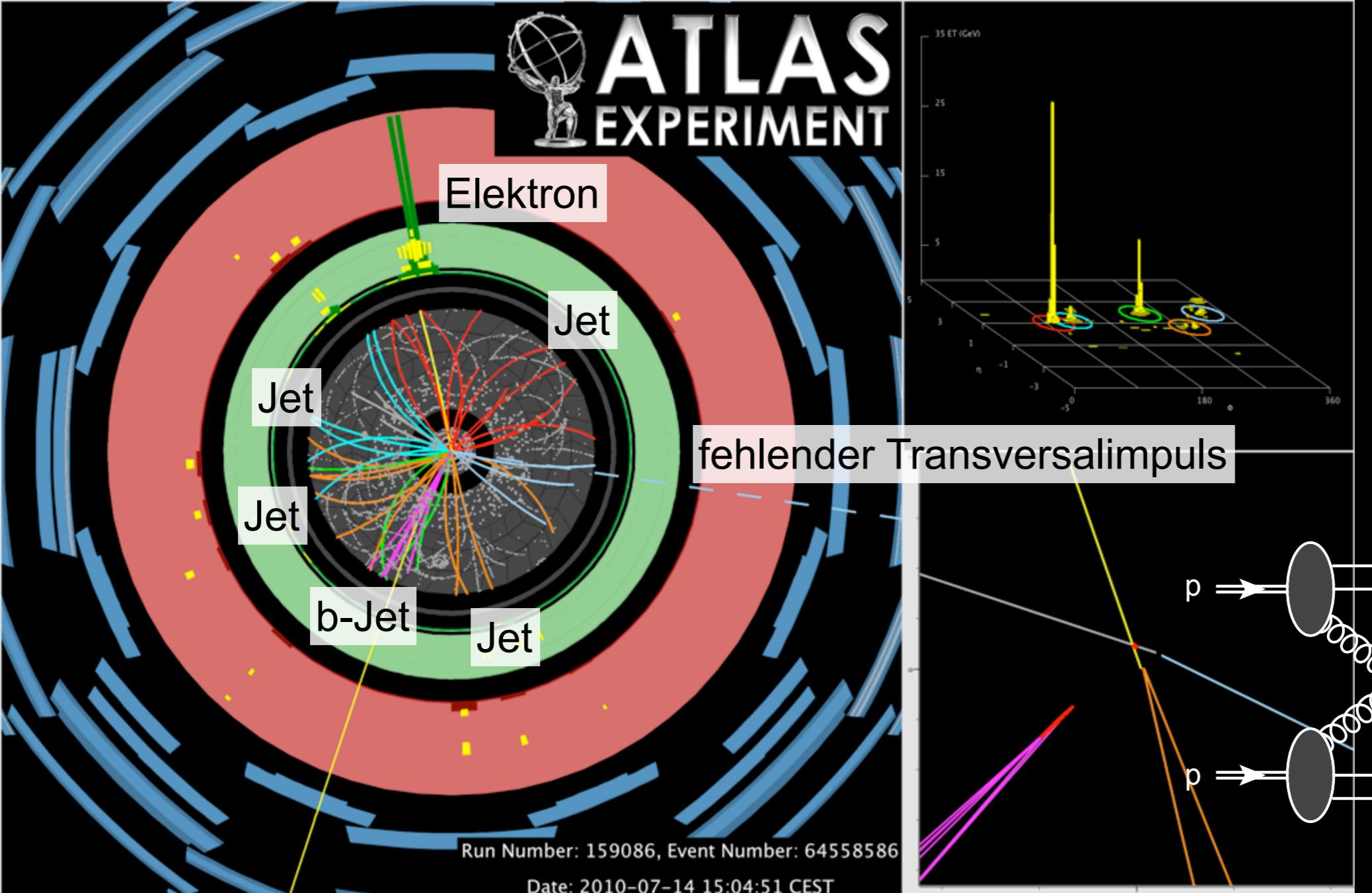
außerdem: Qualität der theoretischen Rechnungen und Simulationsprogramme, Größe der Analyseteams, Zahl der Variablen in Likelihoodanpassungen, ...

Präzise Produktionsrate

- Signatur eines $t\bar{t}$ -Zerfalls im **Lepton+Jets-Kanal**
 - Isoliertes **geladenes Lepton**
→ Online-Selektion
 - **Neutrino**: indirekte Rekonstruktion über fehlenden Transversalimpuls
 - **Vier Quarks**: Bündel von Hadronen („Jets“)

Lepton+Jets: Feynman-Diagramm

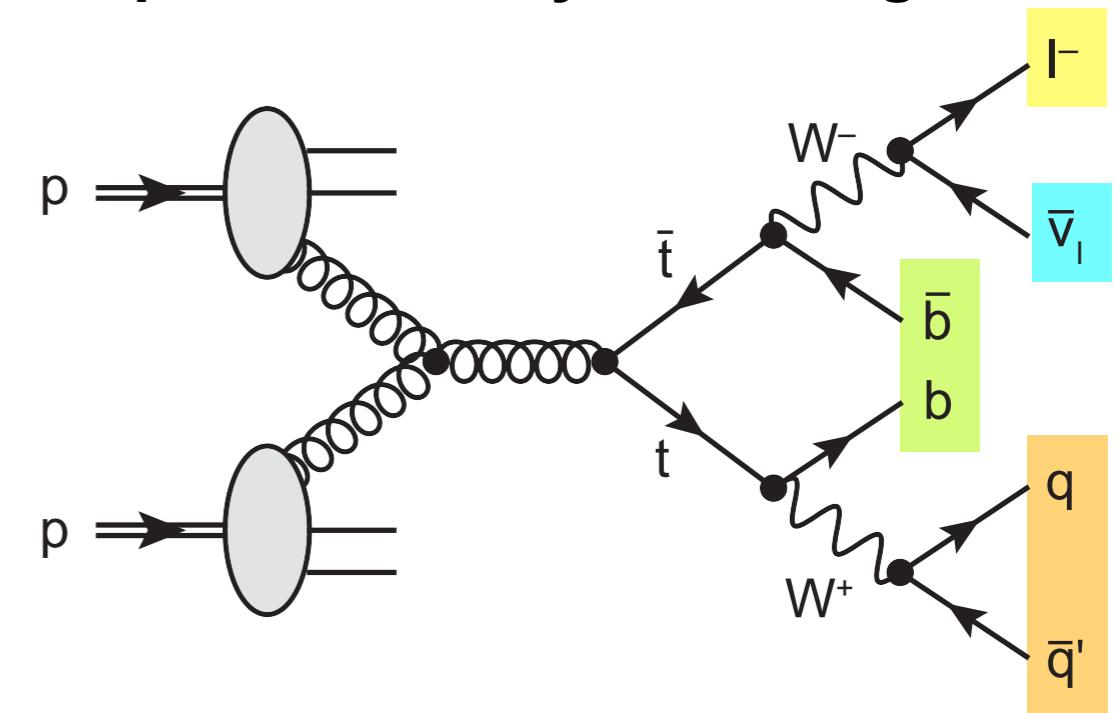




Präzise Produktionsrate

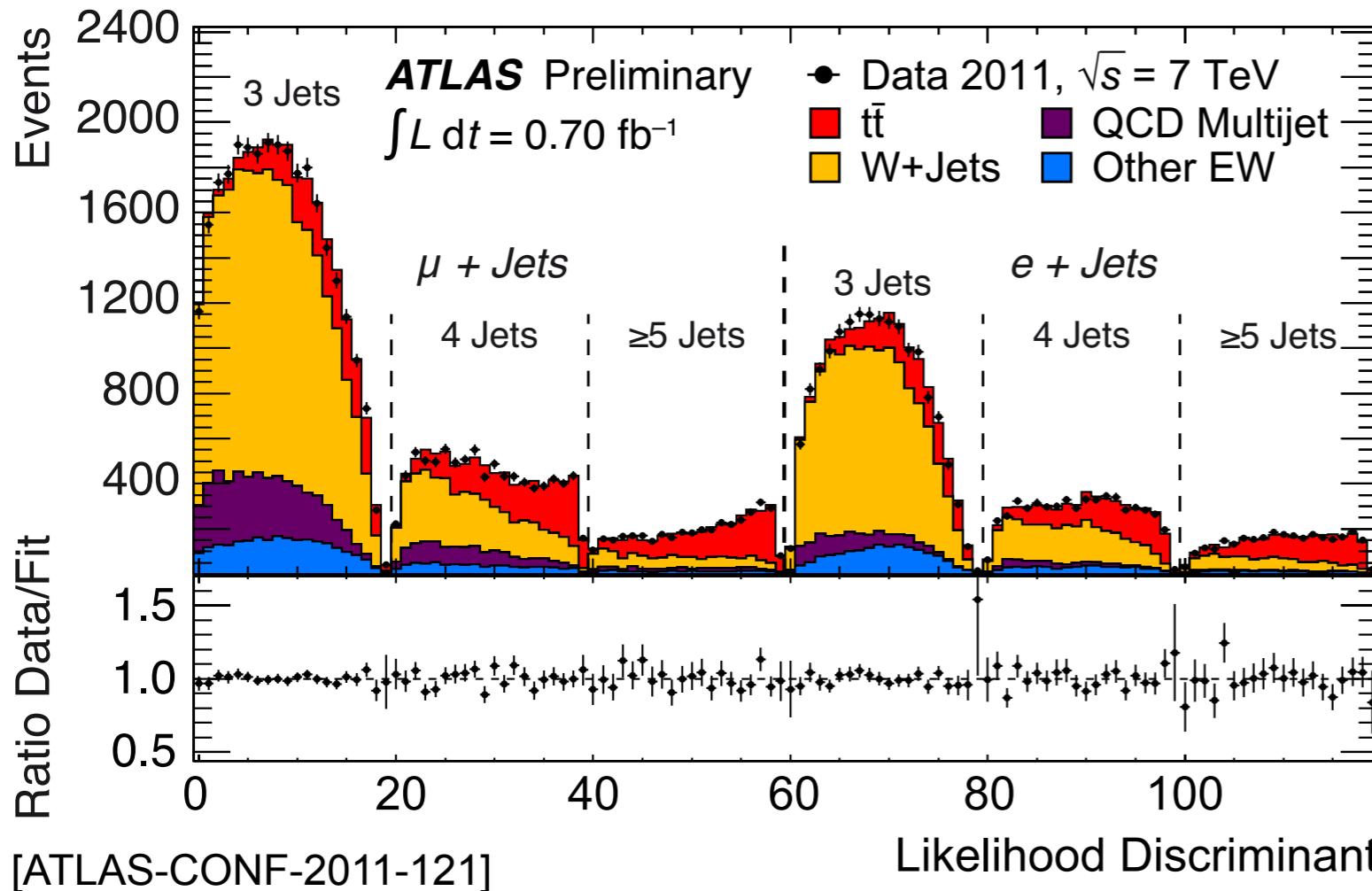
- Signatur eines $t\bar{t}$ -Zerfalls im **Lepton+Jets-Kanal**
 - Isoliertes **geladenes Lepton**
→ Online-Selektion
 - **Neutrino**: indirekte Rekonstruktion über fehlenden Transversalimpuls
 - **Vier Quarks**: Bündel von Hadronen („Jets“)

Lepton+Jets: Feynman-Diagramm



- Trennung von $t\bar{t}$ -Signal und Untergrund über **Kinematik** des Ereignisses
 - Top-Zerfallsprodukte im Schnitt **energetischer** als Untergrund
 - Geringe Top-Geschwindigkeit
→ (relativ) **isotrope** Verteilung der Zerfallsprodukte im Detektor
 - Zusammengefasst in Likelihood-Diskriminante

Präzise Produktionsrate



- Aufwändige Anpassungsrechnung:
39 Parameter für Normierung und Form von Signal und Untergrund
- Vorteil: systematische Unsicherheiten mit Daten beschränkt

$$\sigma_{t\bar{t}} = 179.0^{+9.8}_{-9.7} (\text{stat.+syst.}) \pm 6.6 (\text{lumi}) \text{ pb}$$

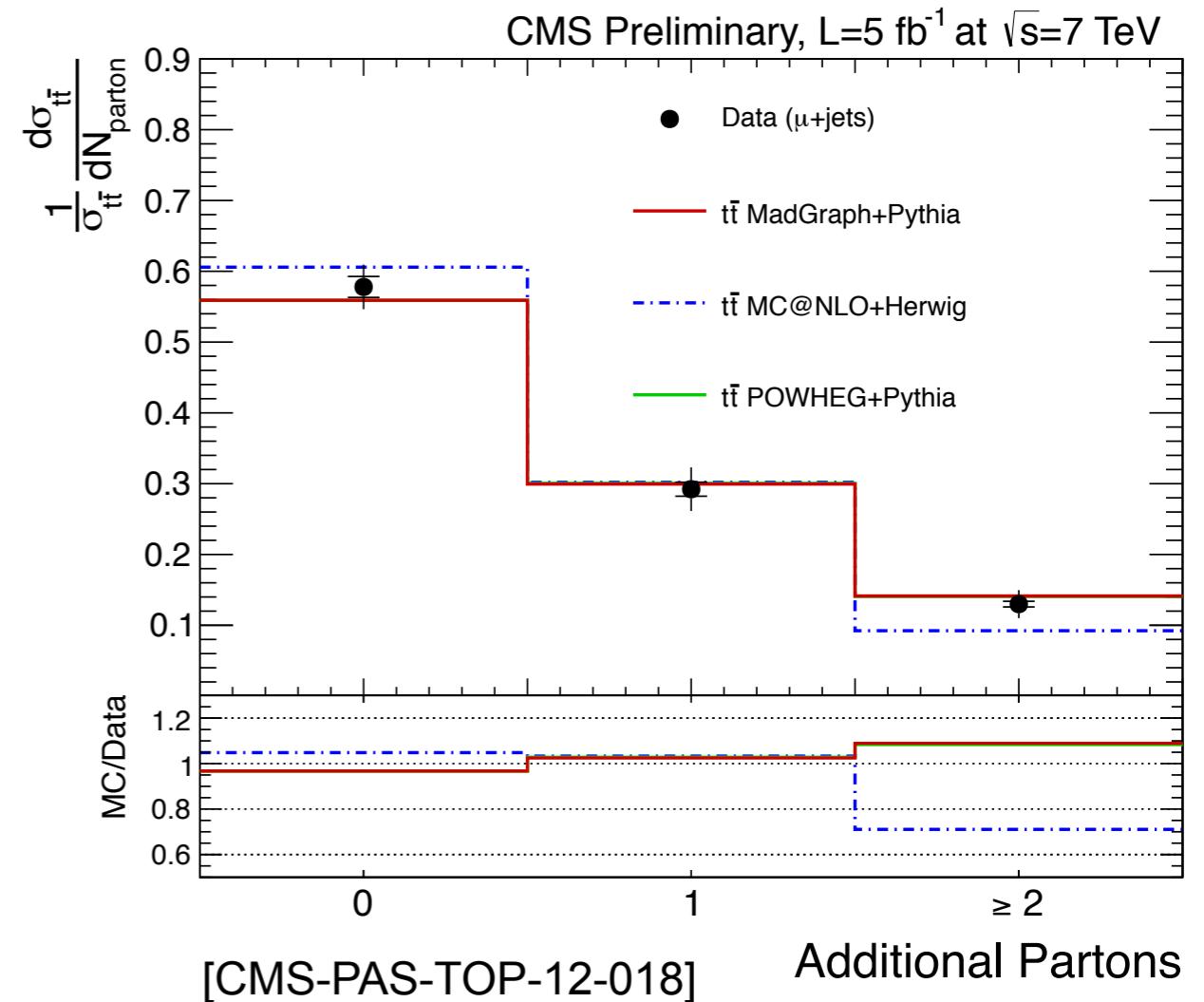
Relative Unsicherheit: 6.6%
 Theoretische Vorhersage 2013: (NNLO+NNLL): 4.4%

Top-Paare + Jets

The LHC is a „jetty” place. (J. Huston, MSU)

- Hohe Energie am LHC:
Abstrahlung **zusätzlicher Jets**
sehr wahrscheinlich
- $t\bar{t}$ -Produktion mit zusätzlichen Jets
 - Präzisionsphysik mit komplizierten **Multijet-Endzuständen**
 - Herausforderung für Experiment und Theorie/Simulation
- Top-Paare + Jets als „Vorübung“
 - Suche nach Neuer Physik
 - Assozierte $t\bar{t}$ -Higgs-Produktion

Top-Produktionsrate als Funktion zusätzlicher Abstrahlung



CERN, 4. Juli 2012: das (ein?) Higgs-Boson

CERN, 4
科技日报

SCIENCE AND TECHNOLOGY DAILY
2012年7月7日 星期二 021期 今日12版 黑内彩一刊号 CN11-0707 代号 1-97
http://www.stdaily.com

2012年7月
5 星期四

最新发现与创新

本版上7月4日《科学》杂志上刊登了上期
上首次发现了Higgs玻色子的一种理论化
的证据。CERN科学家们发现了一种新的
粒子，其质量大约在125-126GeV之间，
但CERN表示需要更多的数据来确认
它就是Higgs玻色子。

时政简报

欧核中心称新发现粒子与“上帝

希格斯玻色子最新证据被认为是30年

来最重大的发现之一

本报讯 (记者徐静) 昨天凌晨7时43分

欧洲核子研究组织(CERN)宣布

他们首次发现了“上帝粒子”希格斯玻

子。这是继1964年物理学家彼得·希格斯

提出这一理论后，人类第一次在实验室

中找到该粒子。据新华社电

本报综合消息

温家宝主持召开国务院常务会

议，部署2011年度中央预算执行等审

计查出问题整改工

作，听取全国社

会保监资金审计情

况汇报

□习近平会见泰

国外长素拉蓬

□李克强会见葡

萄牙国务部长兼外

长波塔斯

(均据新华社)

为您导读

○科技强军

自古英雄出少年

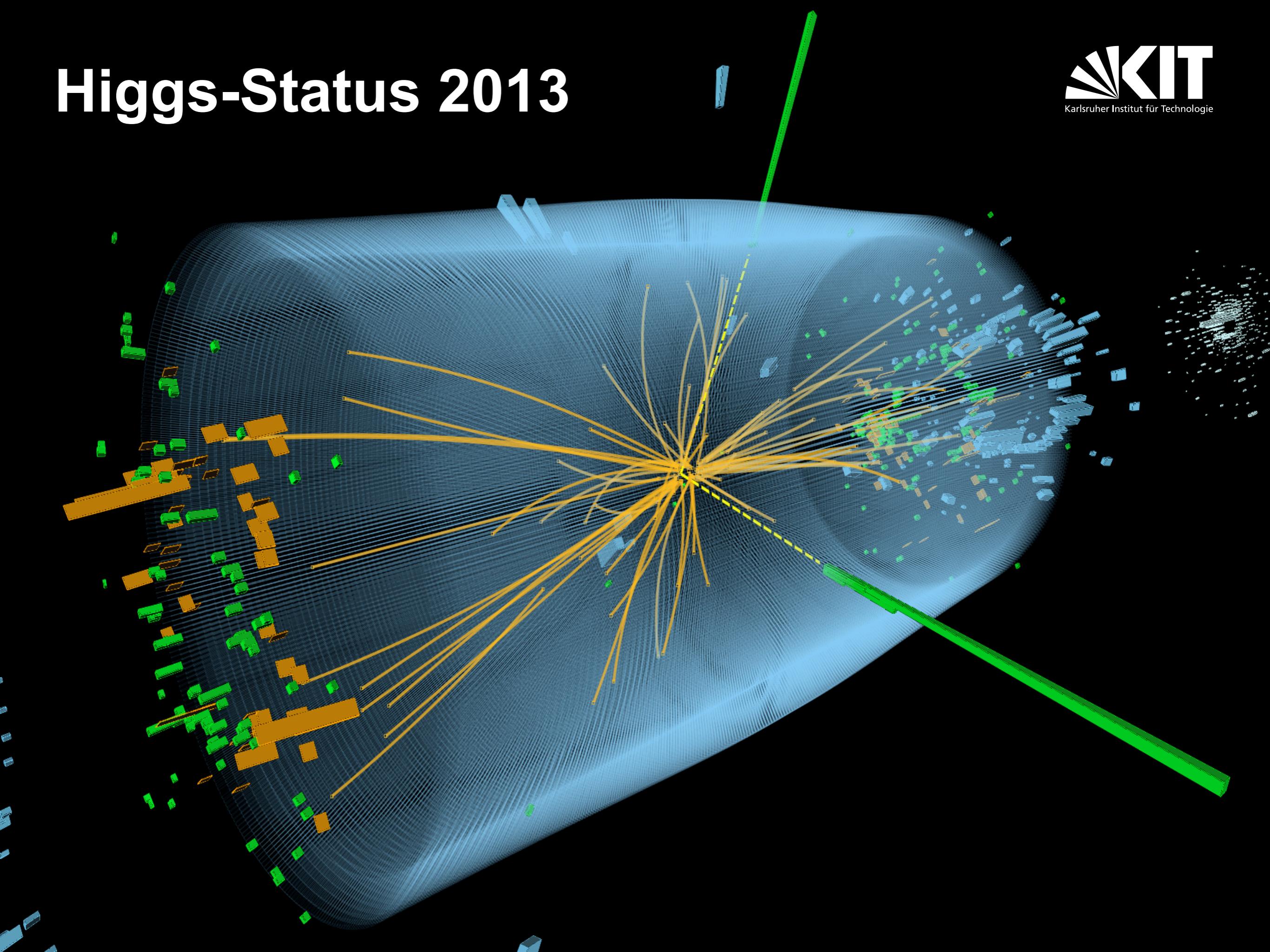
○用兵

大破

解放日报

解放军报

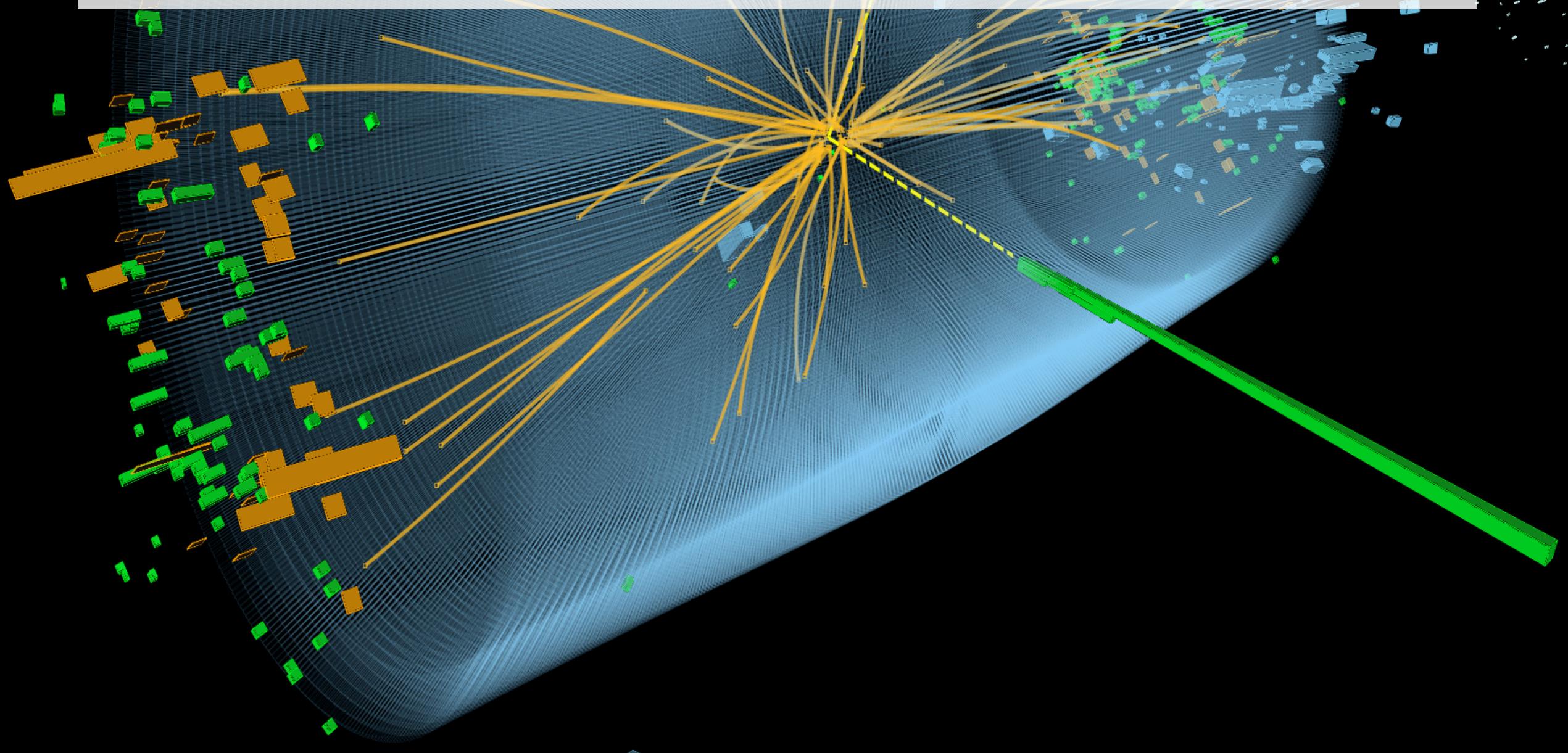
Higgs-Status 2013



Higgs-Status 2013

■ Zeitliche Entwicklung

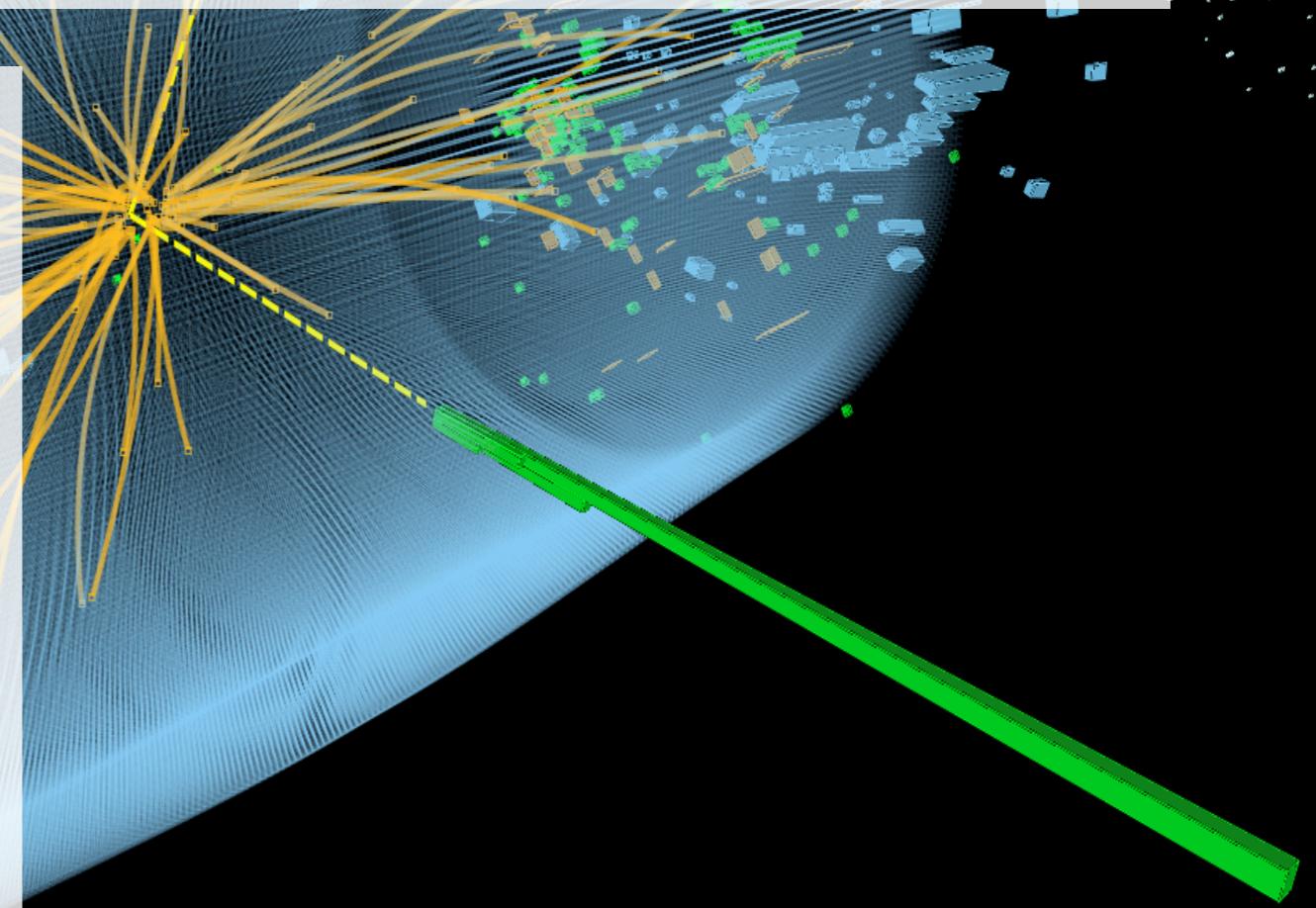
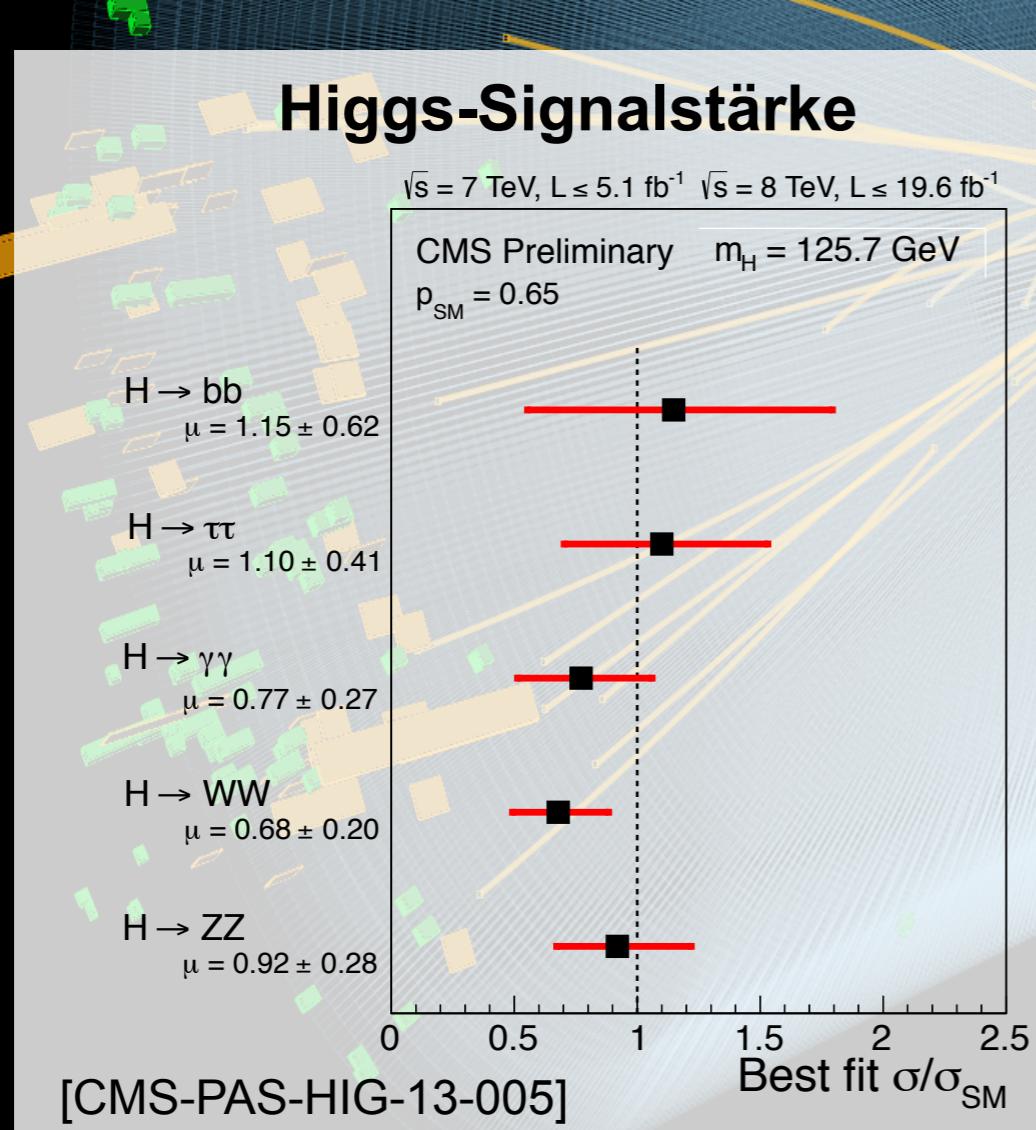
- Juli 2012: Entdeckung eines *Higgs-artigen* Teilchens
- März 2013: gefundenes Teilchen ist *ein* Higgs-Boson, Higgs-Spin
- Juli 2013: mehr Zerfallskanäle, genauere Messungen



Higgs-Status 2013

■ Zeitliche Entwicklung

- Juli 2012: Entdeckung eines *Higgs-artigen* Teilchens
- März 2013: gefundenes Teilchen ist *ein* Higgs-Boson, Higgs-Spin
- Juli 2013: mehr Zerfallskanäle, genauere Messungen

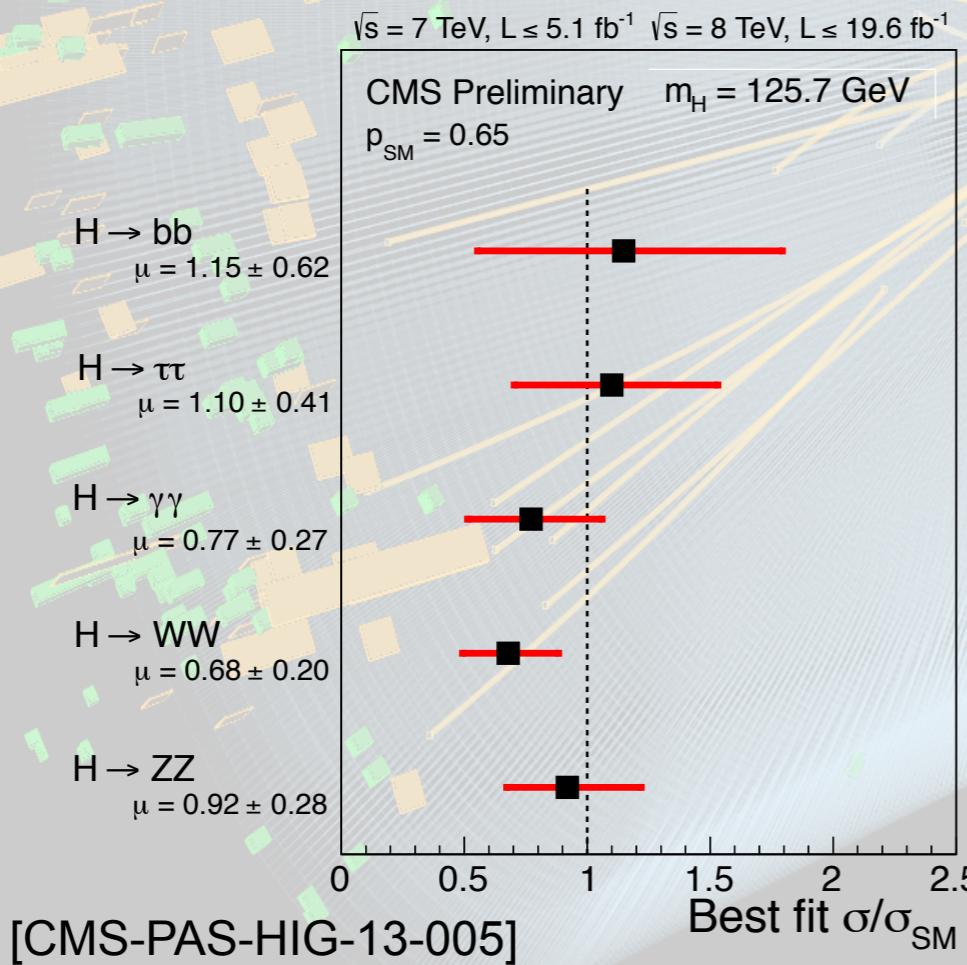


Higgs-Status 2013

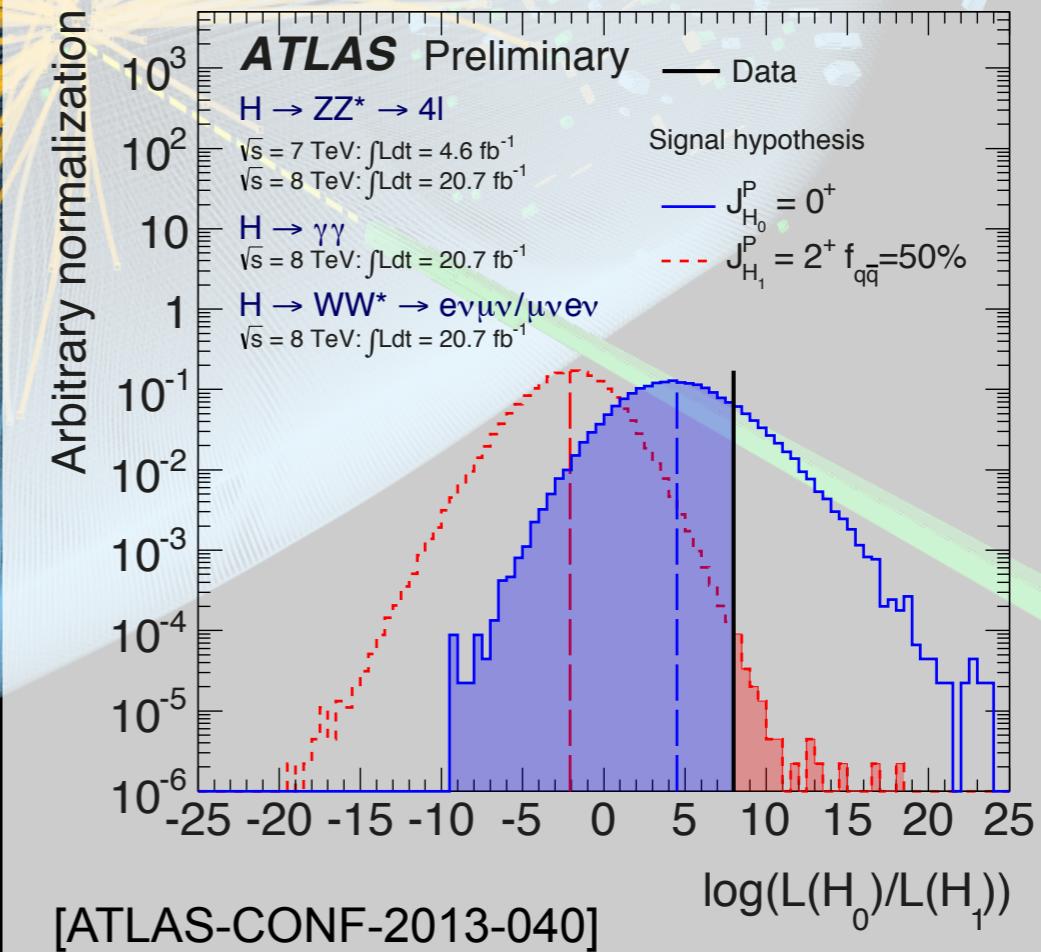
■ Zeitliche Entwicklung

- Juli 2012: Entdeckung eines *Higgs-artigen* Teilchens
- März 2013: gefundenes Teilchen ist *ein* Higgs-Boson, Higgs-Spin
- Juli 2013: mehr Zerfallskanäle, genauere Messungen

Higgs-Signalstärke

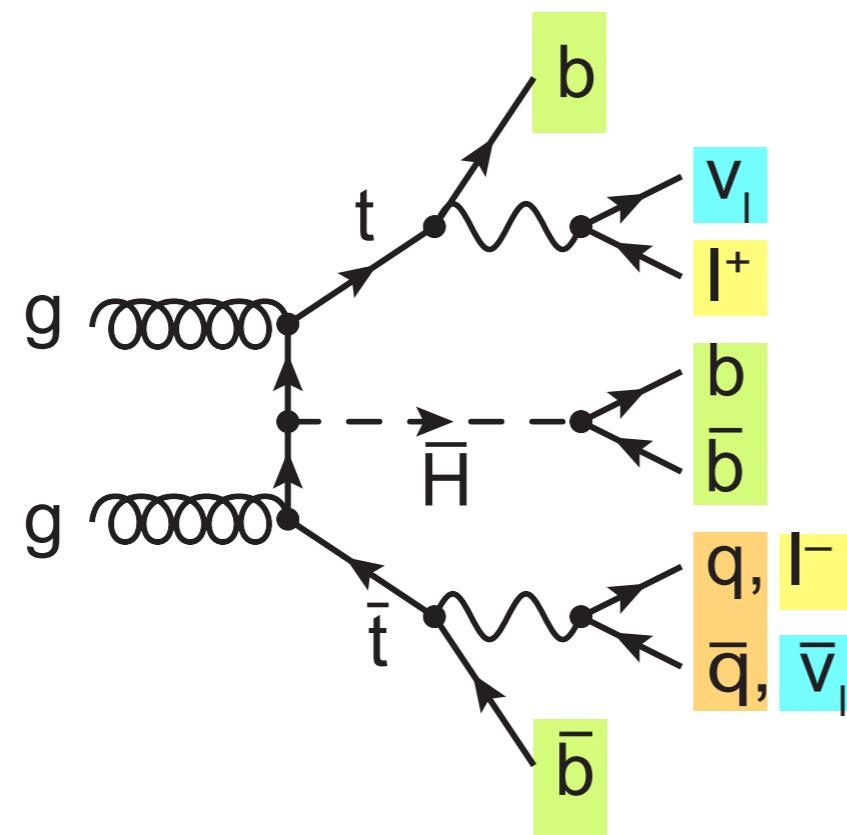


Hypothesentest: Spin 0 oder 2



Assoziierte ttH-Produktion

- Frage: Massen der Fermionen **wirklich** durch Higgs-Mechanismus erzeugt („Yukawa-Kopplung“)?
 - Top = schwerstes Fermion → **stärkste** Kopplung
 - ttH-Produktionsrate $\sim |\text{Top-Higgs-Yukawa-Kopplung}|^2$ → **direkte** Messung
- Herausfordernde experimentelle Signatur, z. B. Zerfall $H \rightarrow b\bar{b}$



Lepton
 Neutrino
 6 Jets
 4 davon aus b-Quarks
as messy as it gets...

Assoziierte ttH-Produktion

„Bewegte Geschichte“

2001: vielversprechender Kanal
(Drollinger, Müller)

Assoziierte ttH-Produktion

„Bewegte Geschichte“

2001: vielversprechender Kanal
(Drollinger, Müller)

2008: $t\bar{t}+b\bar{b}$ -Untergrund zu groß
(Bredenstein et al.)

Assoziierte ttH-Produktion

„Bewegte Geschichte“

2001: vielversprechender Kanal
(Drollinger, Müller)

2008: $t\bar{t}+b\bar{b}$ -Untergrund zu groß
(Bredenstein et al.)

2008: Rettung durch Jet-Substruktur
(Butterworth et al.)

Assoziierte ttH-Produktion

„Bewegte Geschichte“

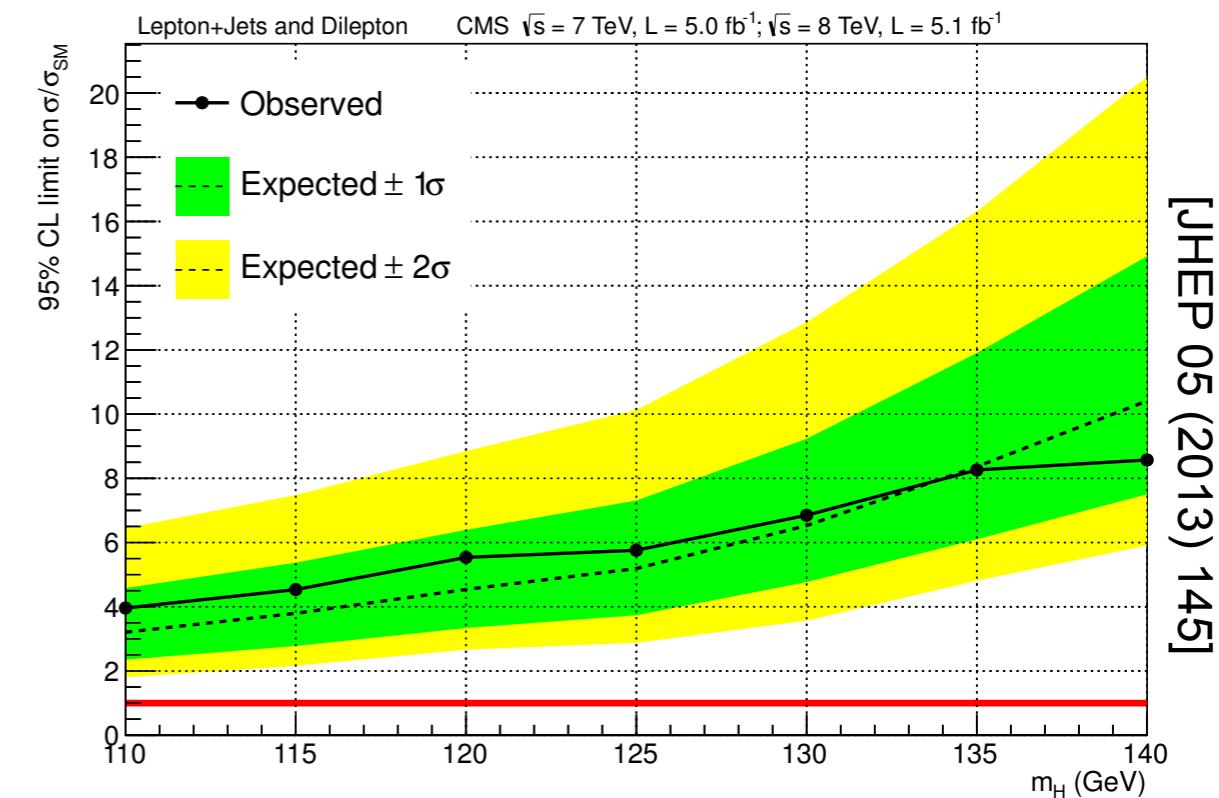
2001: vielversprechender Kanal
 (Drollinger, Müller)

2008: $t\bar{t}+b\bar{b}$ -Untergrund zu groß
 (Bredenstein et al.)

2008: Rettung durch Jet-Substruktur
 (Butterworth et al.)

2013: Signal noch nicht klar etabliert,
 Vorbereitung für Datennahme 2015

Ausschlussgrenzen für ttH-Produktion



Assoziierte ttH-Produktion

„Bewegte Geschichte“

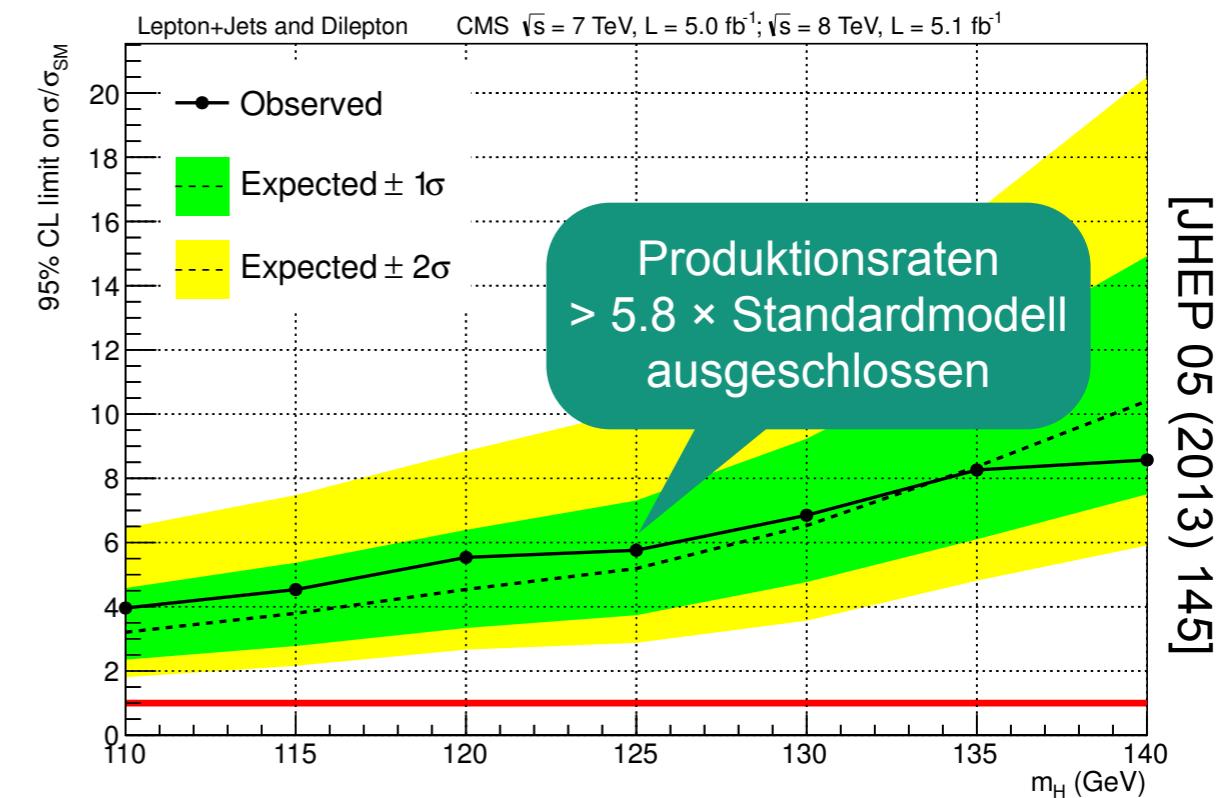
2001: vielversprechender Kanal
 (Drollinger, Müller)

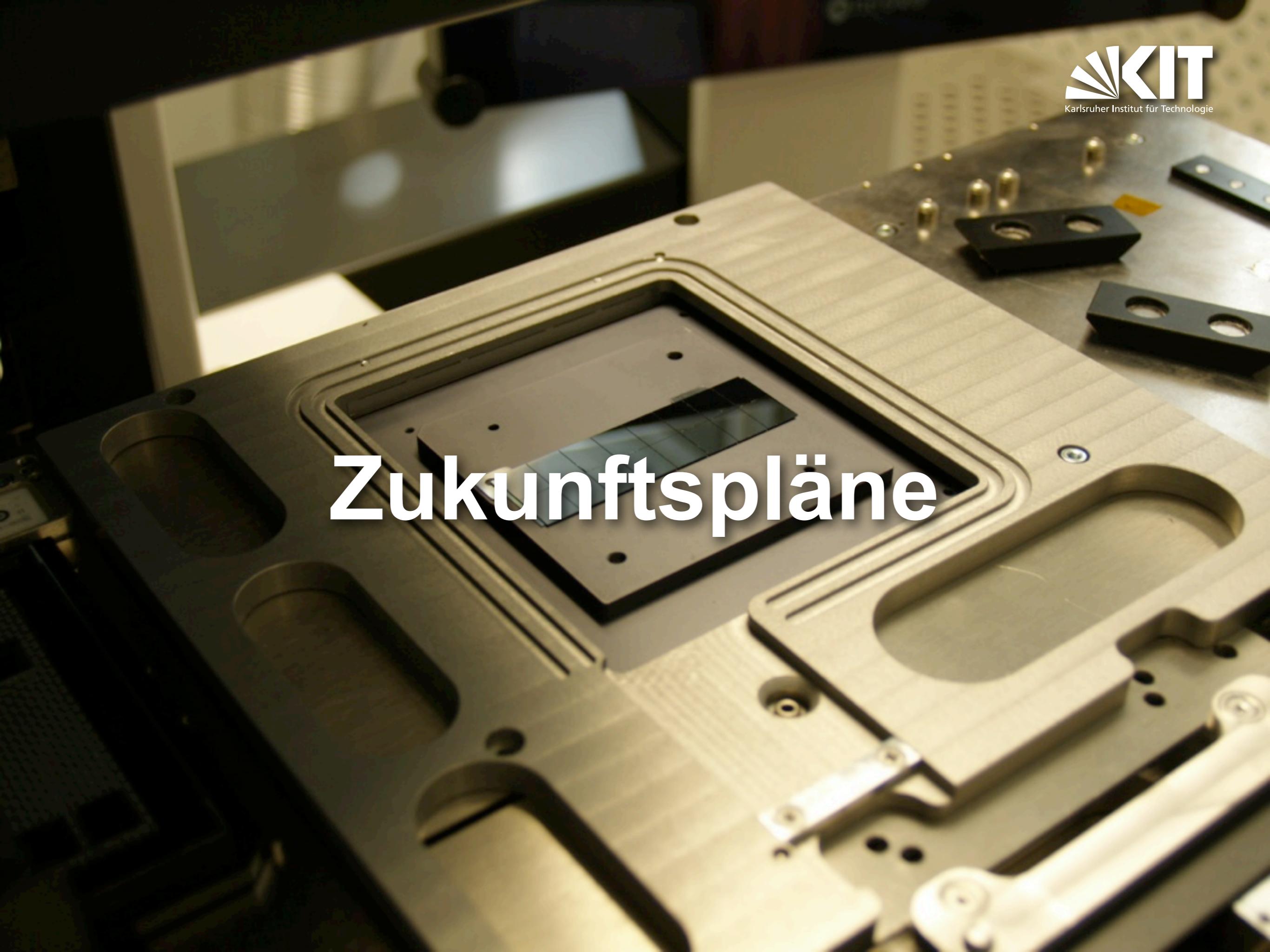
2008: $t\bar{t}+b\bar{b}$ -Untergrund zu groß
 (Bredenstein et al.)

2008: Rettung durch Jet-Substruktur
 (Butterworth et al.)

2013: Signal noch nicht klar etabliert,
 Vorbereitung für Datennahme 2015

Ausschlussgrenzen für ttH-Produktion





Zukunftspläne

Europäische Strategie 2013

LHC: Physikprogramm bis 2030

Europe's top priority should be the exploitation of the full potential of the LHC, including the high-luminosity upgrade of the machine and detectors with a view to collecting ten times more data than in the initial design, by around 2030.



[aus CERN-Council-S/106, verabschiedet vom CERN-Council, 30. Mai 2013]

Europäische Strategie 2013

LHC: Physikprogramm bis 2030

Europe's top priority should be the exploitation of the full potential of the LHC, including the high-luminosity upgrade of the machine and detectors with a view to collecting ten times more data than in the initial design, by around 2030.



Weitere Studien zu Beschleunigern bei höchsten Energien

CERN should undertake design studies for accelerator projects in a global context, with emphasis on proton-proton and electron-positron high-energy frontier machines.

[aus CERN-Council-S/106, verabschiedet vom CERN-Council, 30. Mai 2013]

Europäische Strategie 2013

LHC: Physikprogramm bis 2030

Europe's top priority should be the exploitation of the full potential of the LHC, including the high-luminosity upgrade of the machine and detectors with a view to collecting ten times more data than in the initial design, by around 2030.



Weitere Studien zu Beschleunigern bei höchsten Energien

CERN should undertake design studies for accelerator projects in a global context, with emphasis on proton-proton and electron-positron high-energy frontier machines.

Komplementär zum LHC: Elektron-Positron-Linearbeschleuniger

There is a strong scientific case for an electron-positron collider, complementary to the LHC, that can study the properties of the Higgs boson and other particles with unprecedented precision and whose energy can be upgraded.

[aus CERN-Council-S/106, verabschiedet vom CERN-Council, 30. Mai 2013]

Zukunftspläne am LHC

LHC ab 2015: Datennahme bei Designenergie

- Neues Suchfenster für Physik jenseits des Standardmodells → Entdeckungen?
- Präzisionsphysik mit Top und Higgs
- Verbesserte Instrumentierung,
z. B. neuer Silizium-Pixeldetektor ab 2017

Zukunftspläne am LHC

LHC ab 2015: Datennahme bei Designenergie

- Neues Suchfenster für Physik jenseits des Standardmodells → Entdeckungen?
- Präzisionsphysik mit Top und Higgs
- Verbesserte Instrumentierung,
z. B. neuer Silizium-Pixeldetektor ab 2017

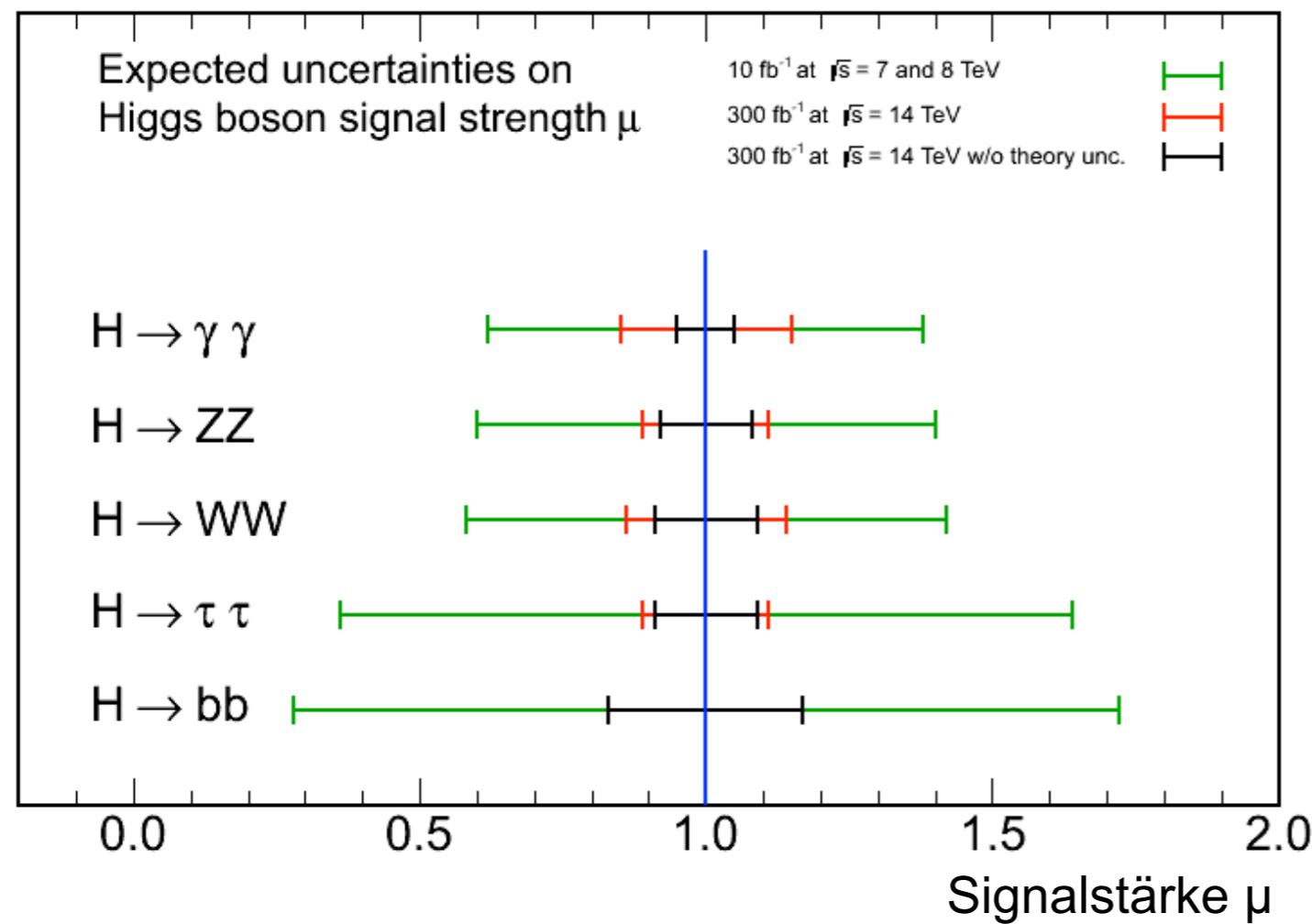
LHC jenseits von 2020: Hochluminositätsphase

- Datensatz verzehnfacht → noch höhere Präzision
- Weitere Entdeckungen? Mechanismus der elektroschwachen Symmetriebrechung?
- Weiter verbesserte Instrumentierung:
Detektoren vollständig überarbeitet

Higgs-Zukunftserwartungen

Genauigkeit der Messung der Produktionsrate
in wichtigsten Higgs-Zerfallskanälen

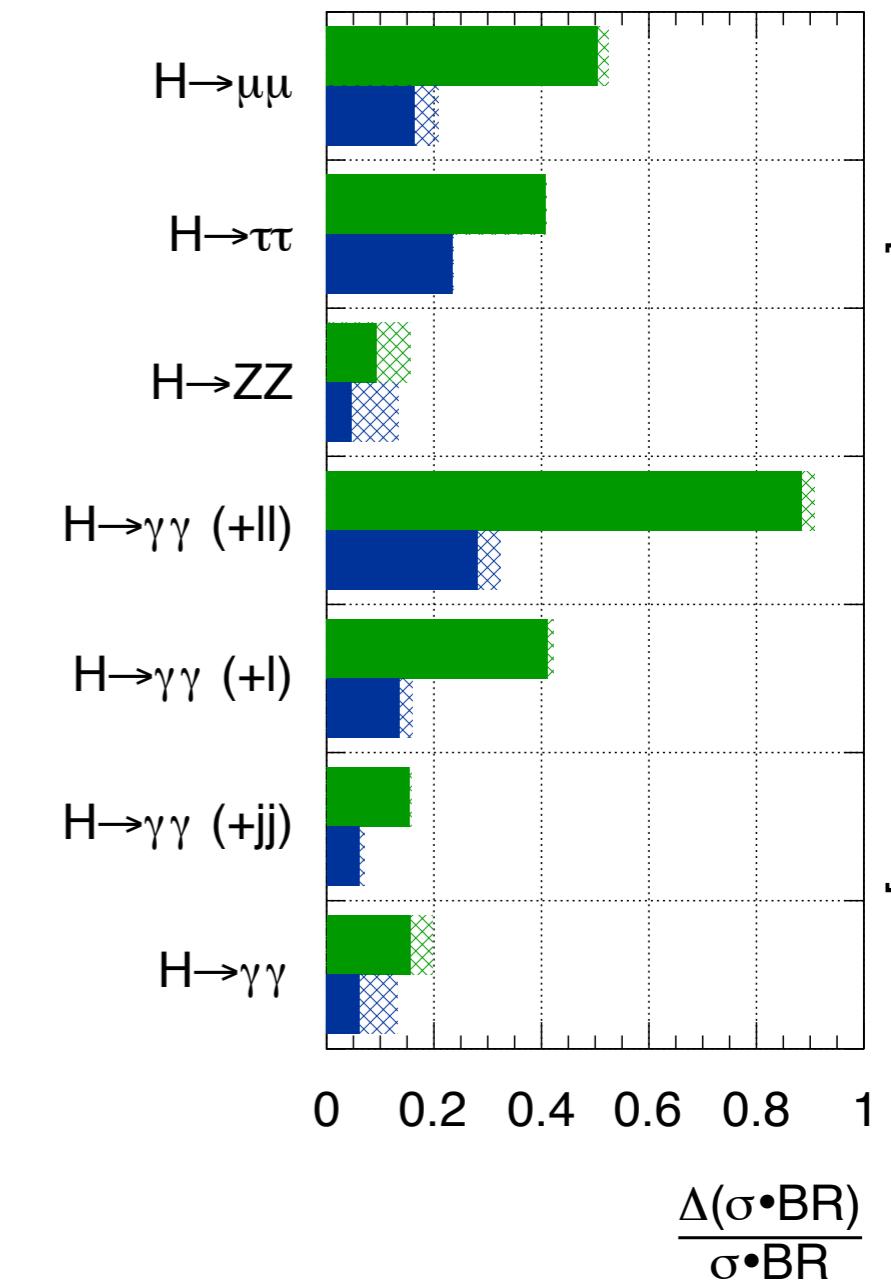
CMS Projection



[<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/HigProjectionEsg2012TWiki>]

ATLAS Preliminary (Simulation)

$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}: \int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}; \int L dt = 3000 \text{ fb}^{-1}$

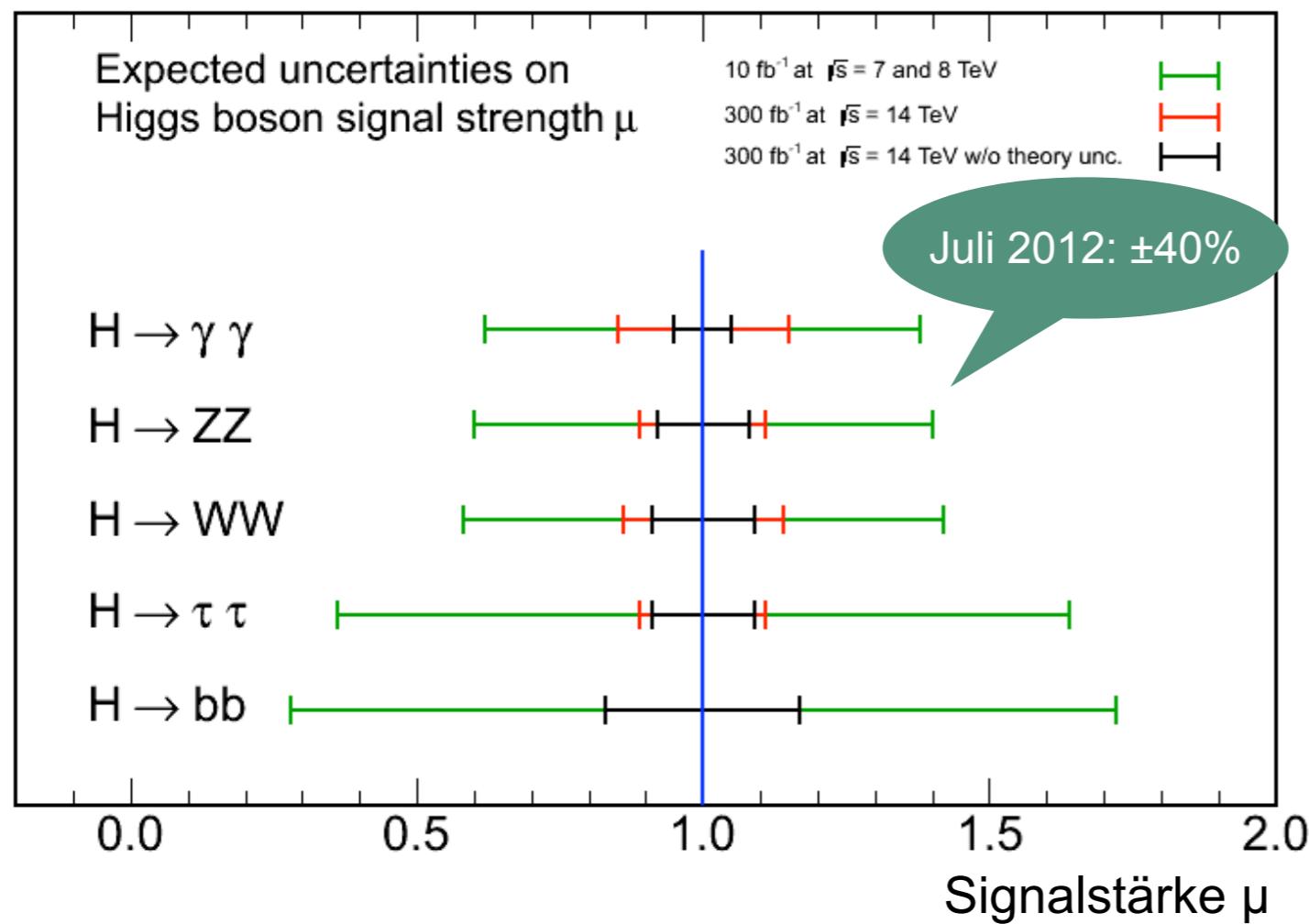


[ATLAS-PUB-PHYS-2012-001]

Higgs-Zukunftserwartungen

Genauigkeit der Messung der Produktionsrate
in wichtigsten Higgs-Zerfallskanälen

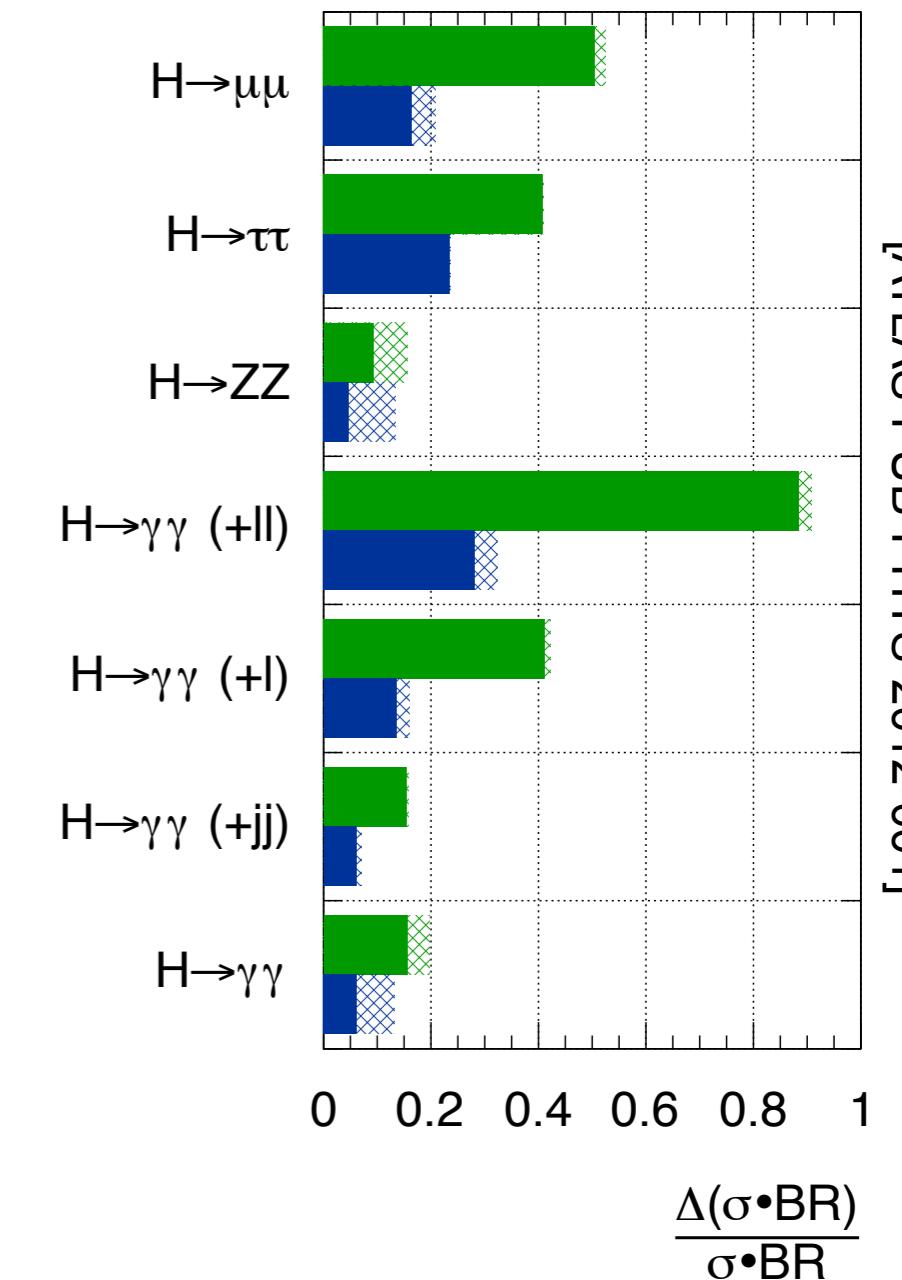
CMS Projection



[<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/HigProjectionEsg2012TWiki>]

ATLAS Preliminary (Simulation)

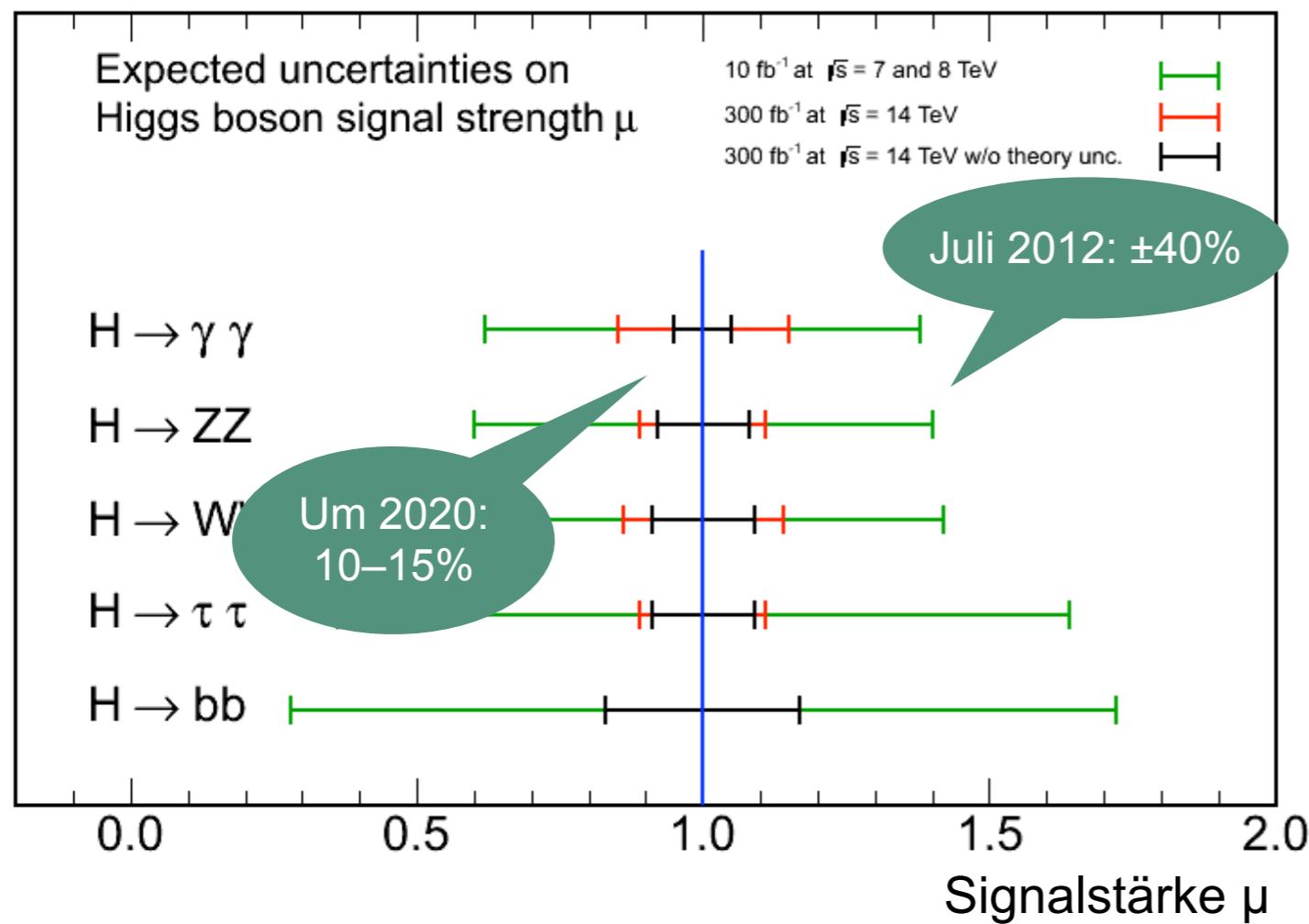
$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}: \int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}; \int L dt = 3000 \text{ fb}^{-1}$



Higgs-Zukunftserwartungen

Genauigkeit der Messung der Produktionsrate
in wichtigsten Higgs-Zerfallskanälen

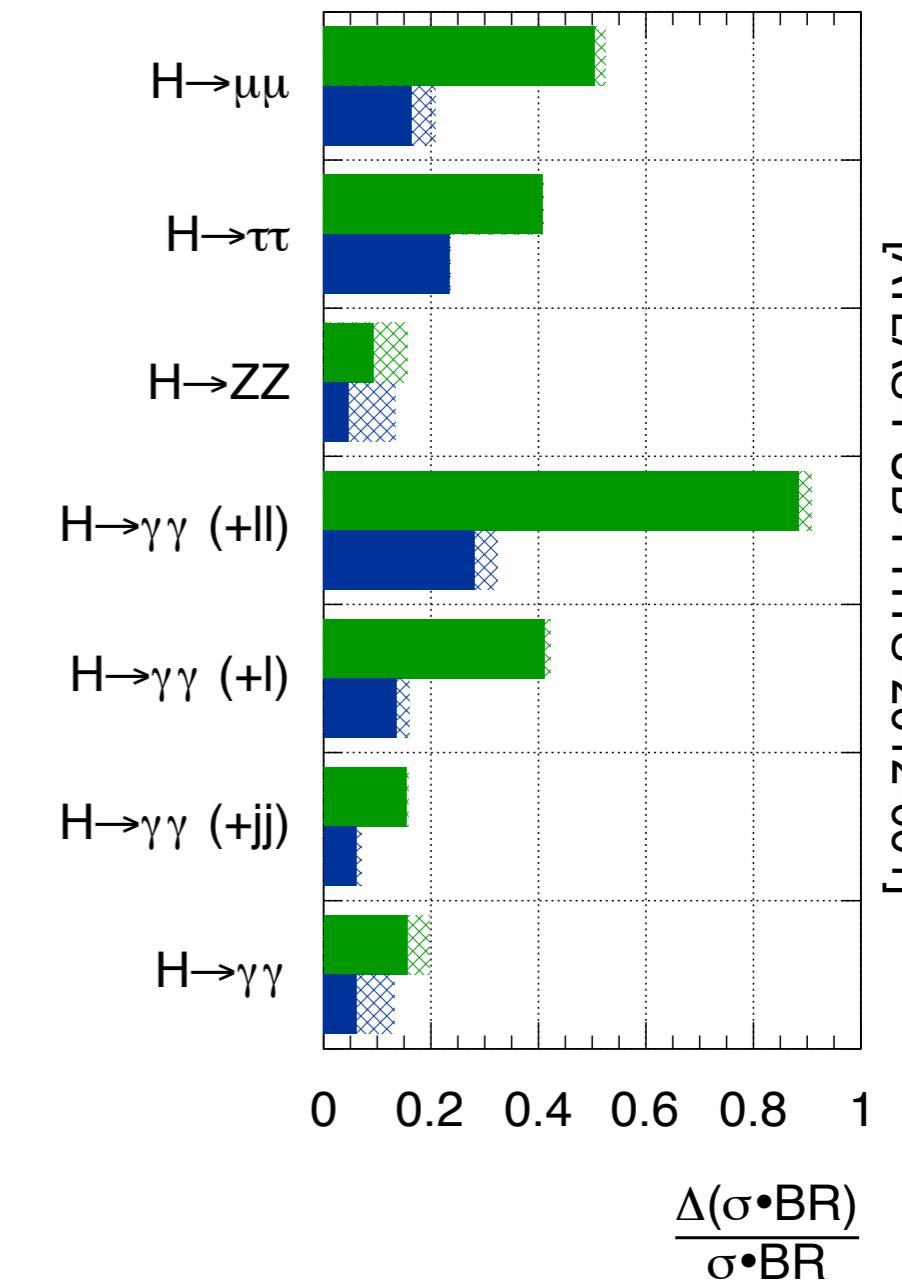
CMS Projection



[<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/HigProjectionEsg2012TWiki>]

ATLAS Preliminary (Simulation)

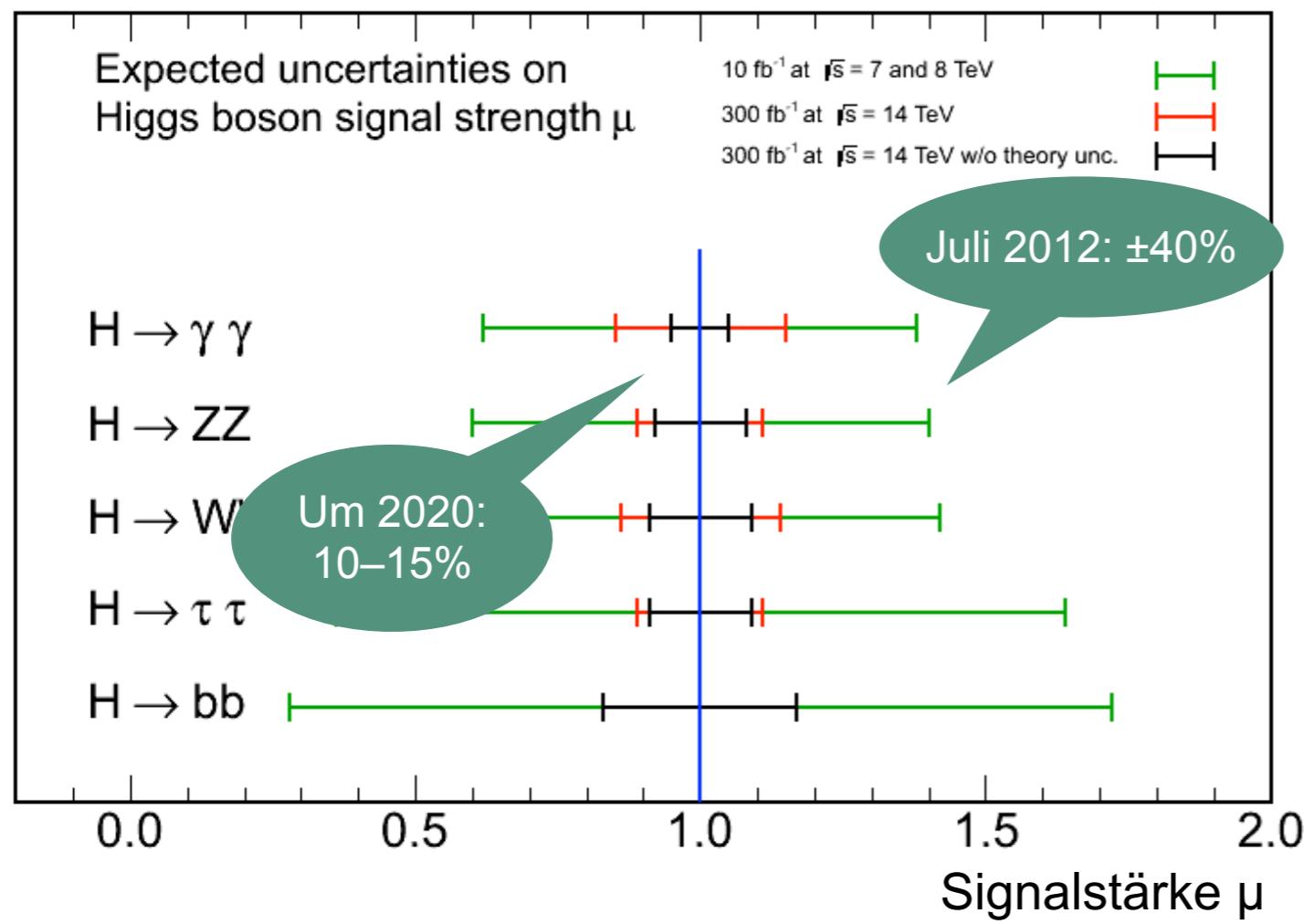
$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}: \int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}; \int L dt = 3000 \text{ fb}^{-1}$



Higgs-Zukunftserwartungen

Genauigkeit der Messung der Produktionsrate
in wichtigsten Higgs-Zerfallskanälen

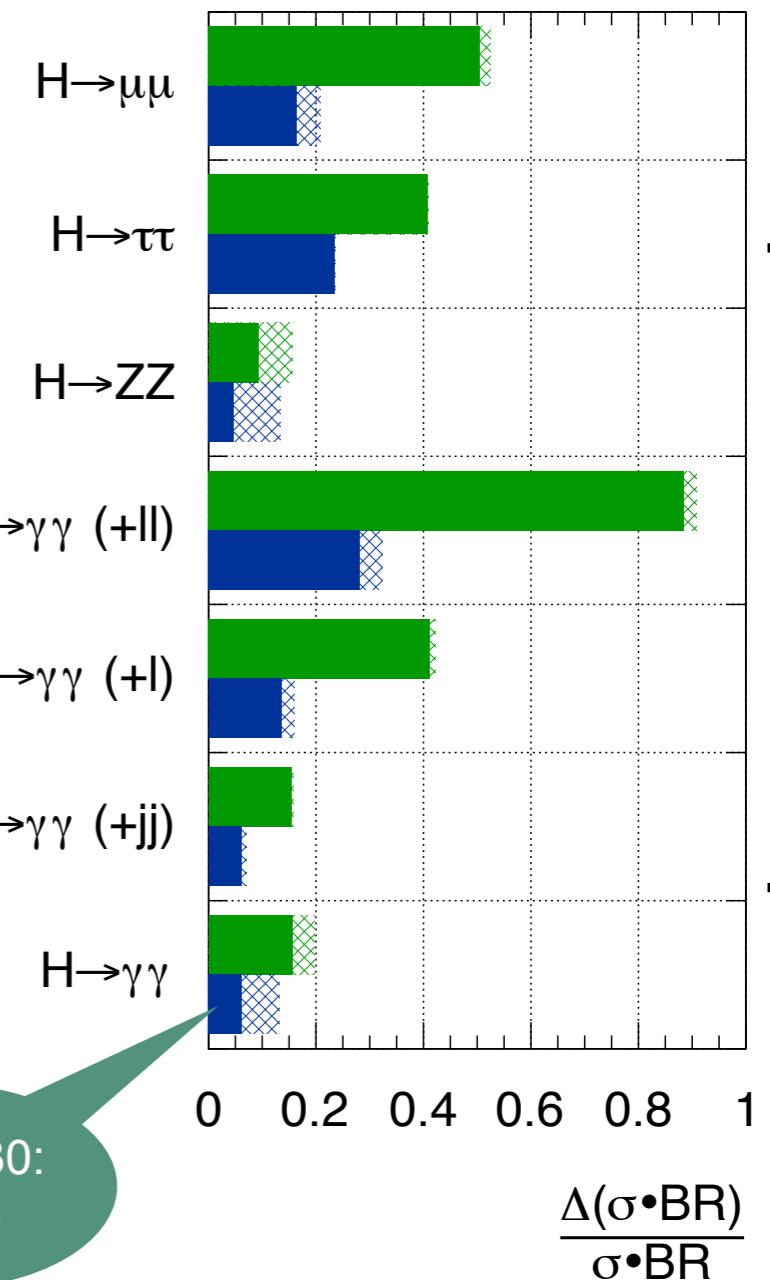
CMS Projection



[<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/HigProjectionEsg2012TWiki>]

ATLAS Preliminary (Simulation)

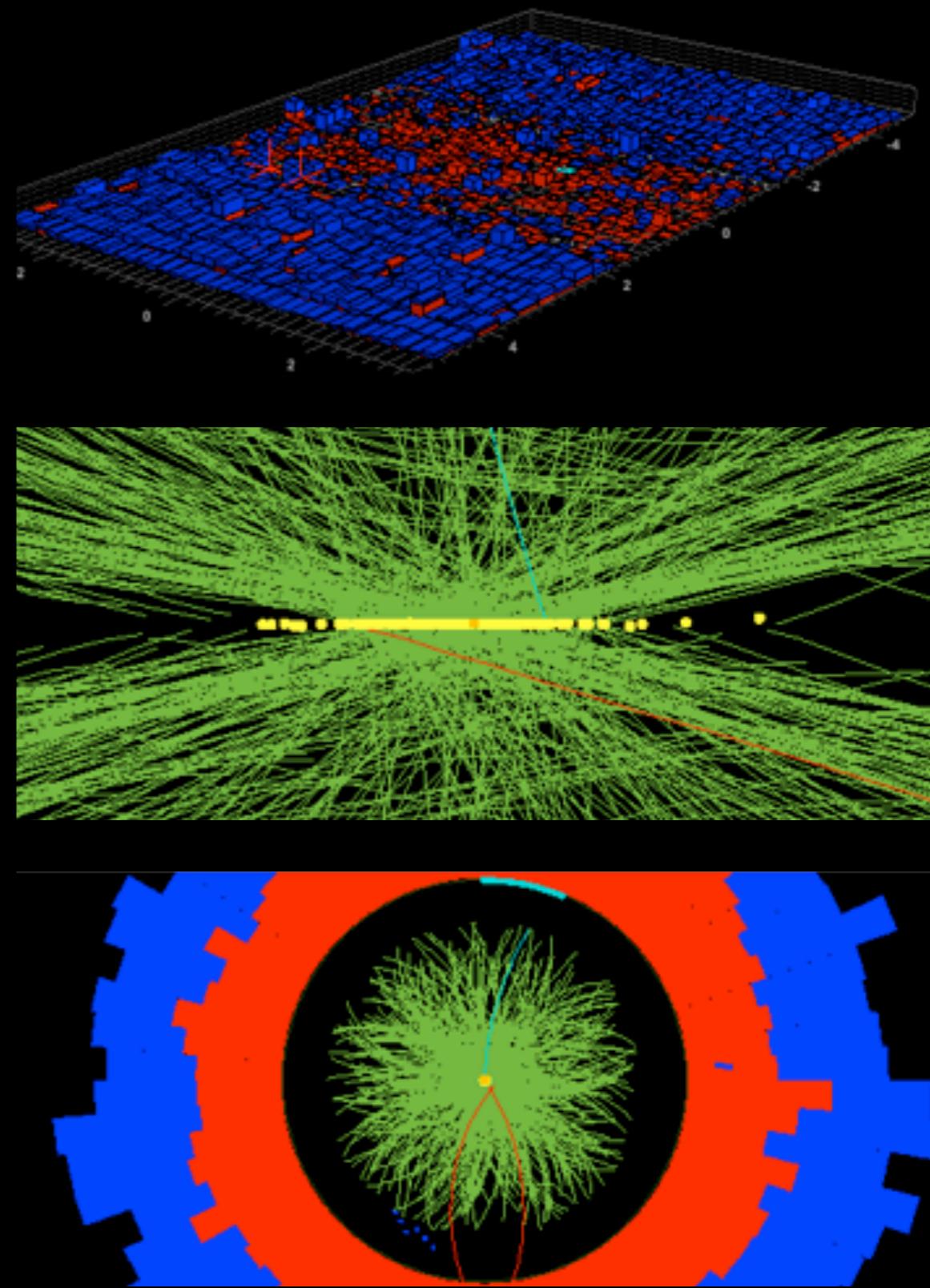
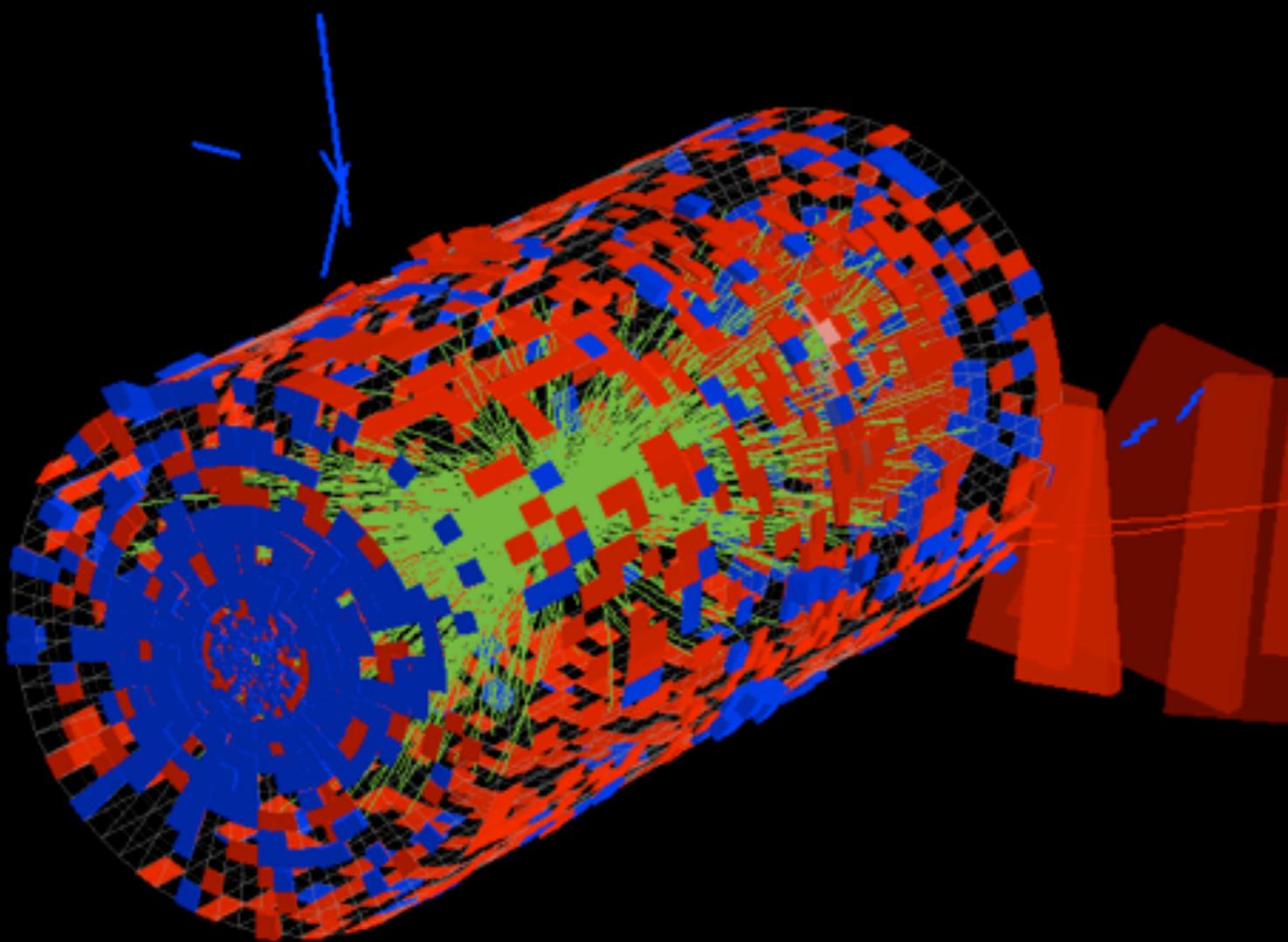
$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}: \int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}; \int L dt = 3000 \text{ fb}^{-1}$



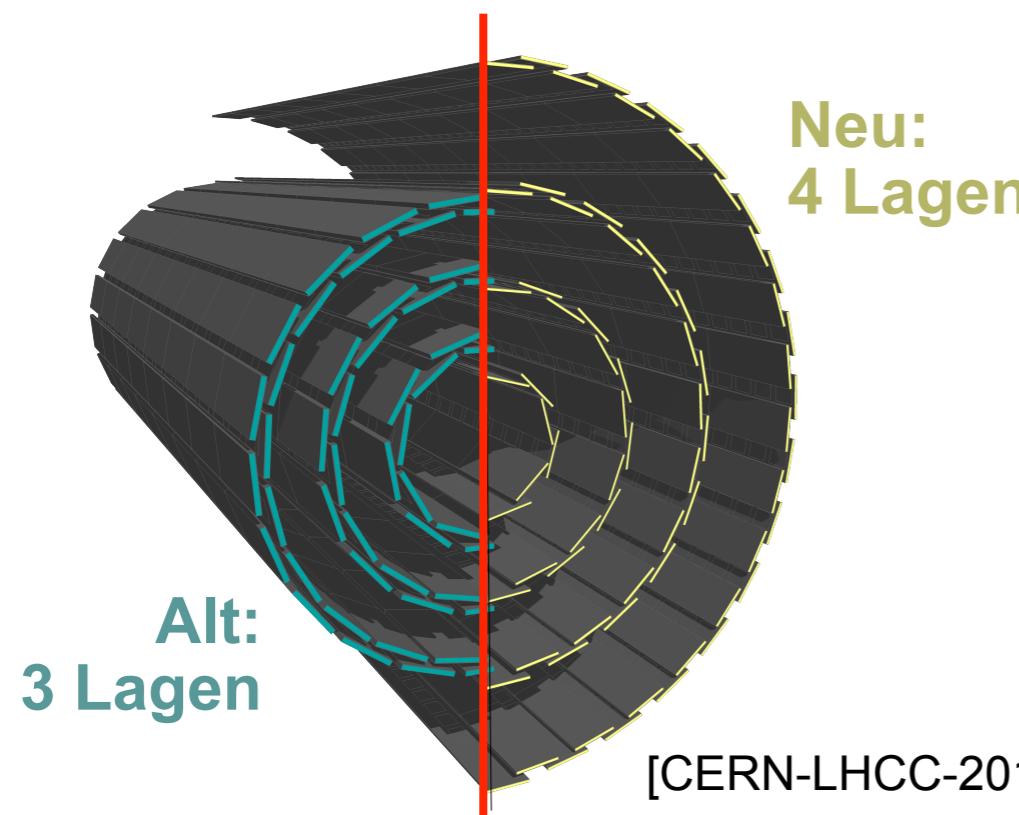
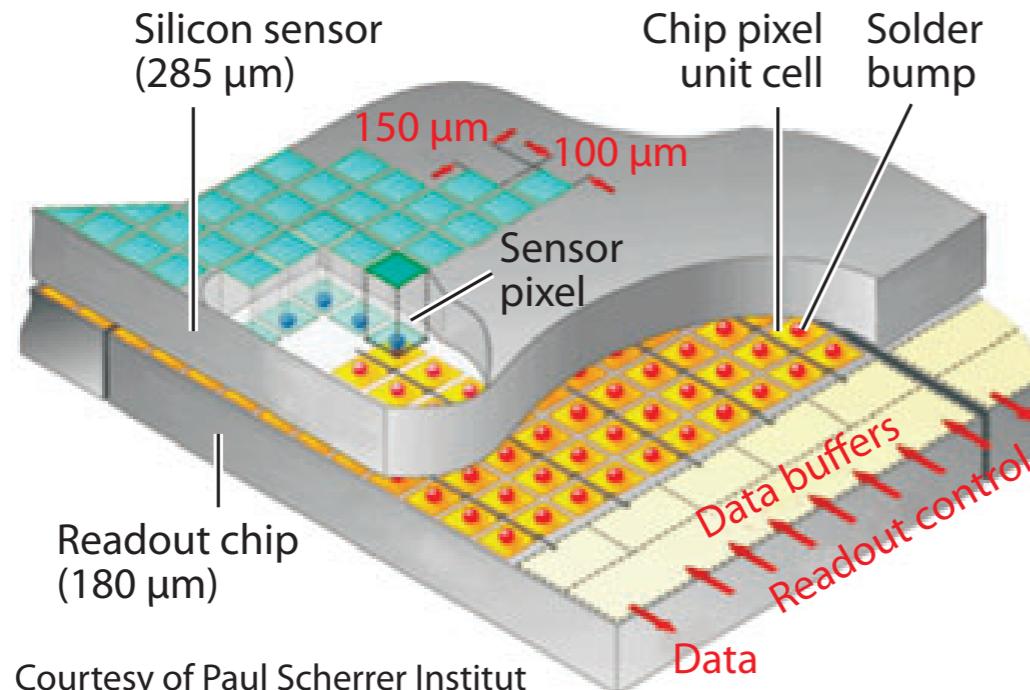
[ATLAS-PUB-PHYS-2012-001]

Herausforderung Pileup

Test 2012: 78 rekonstruierte
gleichzeitige pp-Kollisionen



Neuer CMS-Pixeldetektor



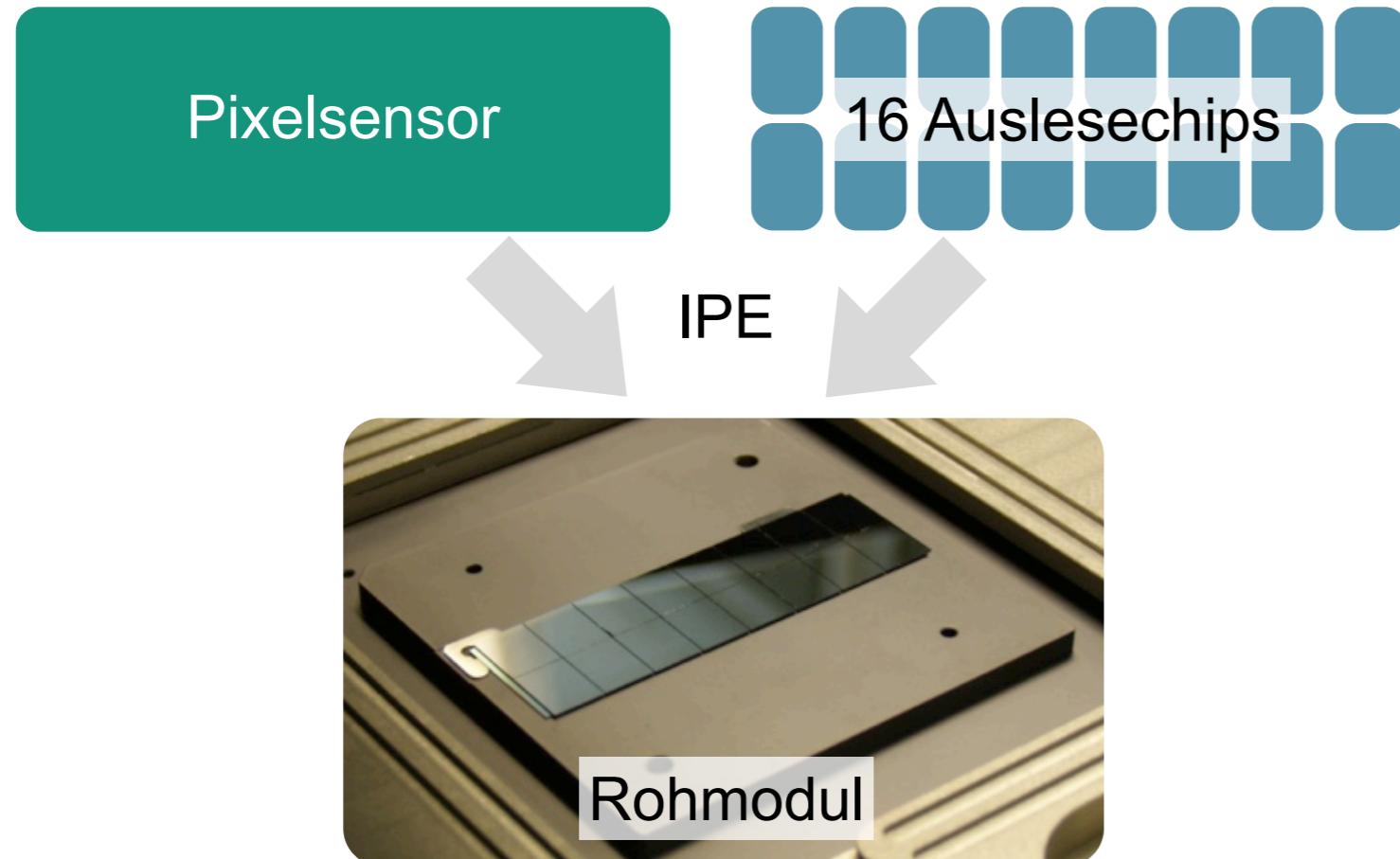
- Verwendung: präzise Rekonstruktion von **Spuren geladener Teilchen** und deren Ursprungsorten
- Technologie: **Hybrid-Pixeldetektoren** (Sensor + separater Auslesechip)
- Neuer Pixeldetektor 2017
 - Neue **vierte Detektorlage**, trotzdem weniger Material als derzeit
 - IEKP und IPE: **Bau von Pixelmodulen** für Hälften der neuen vierten Lage

Produktion von Pixelmodulen

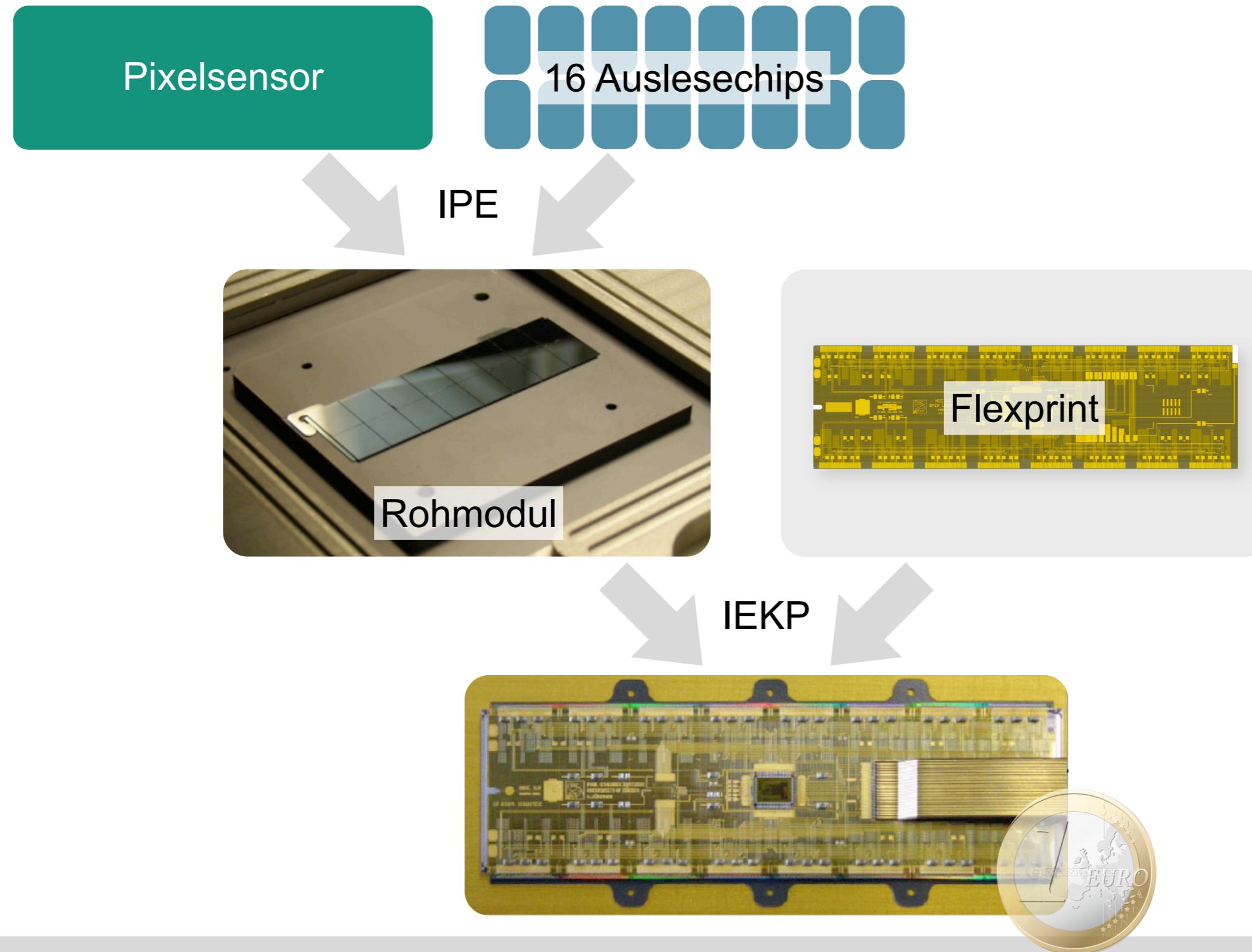
Pixelsensor



Produktion von Pixelmodulen



Produktion von Pixelmodulen



Zusammenfassung

- Teilchenphysik: Wechselspiel von Entdeckung und Präzision
 - LHC heute: Ära der Präzisions-Top-Physik
 - Higgs: derzeit am Übergang zur Präzisionsphysik

- Zukunftspläne am LHC: höhere Luminosität
 - Verbesserte Detektoren und verbesserte Analysen → Präzision
 - Weitere Entdeckungen?

Herzliche Einladung zum

Stehempfang im Gaede-Foyer