

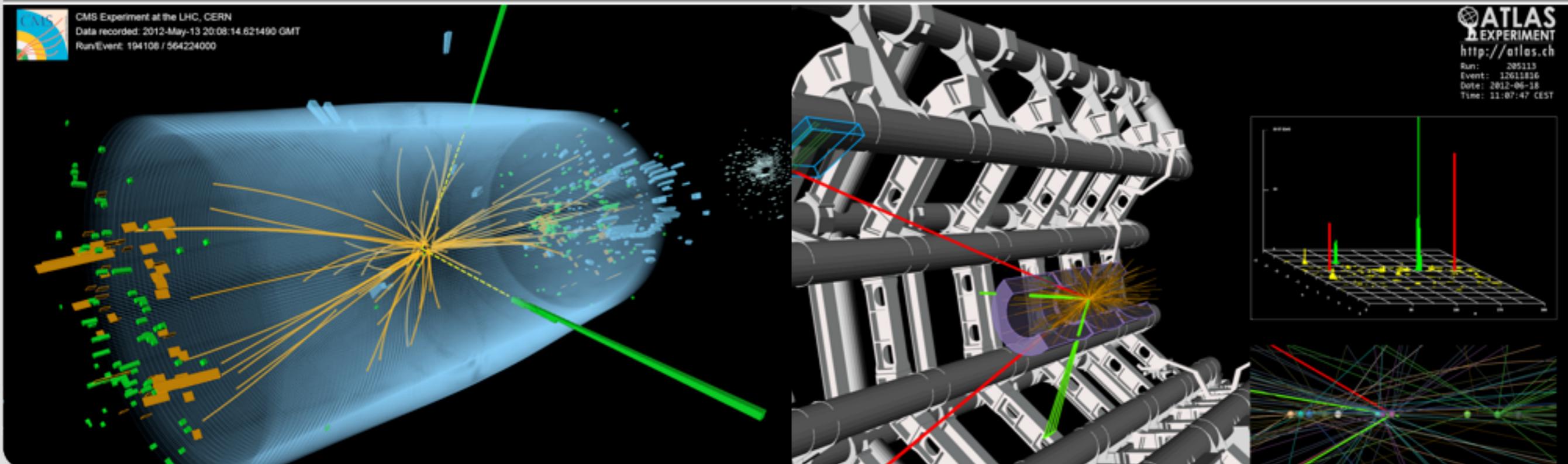
Kleinste Teilchen und höchste Energien

Die Suche nach dem Higgs-Boson am Large Hadron Collider

Thomas-Mann-Gymnasium Stutensee
12. April 2013

Ulrich Husemann

Institut für Experimentelle Kernphysik, Karlsruher Institut für Technologie



Wer bin ich?

Promotion

Siegen 2005

HERA-B-Experiment am Deutschen
Elektronen-Synchrotron DESY



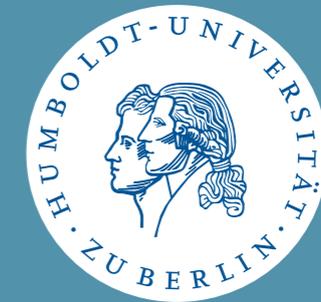
Postdoc

Rochester, Yale (2005–2008)

CDF-Experiment am Fermi National
Accelerator Laboratory, Chicago

Nachwuchsgruppenleiter

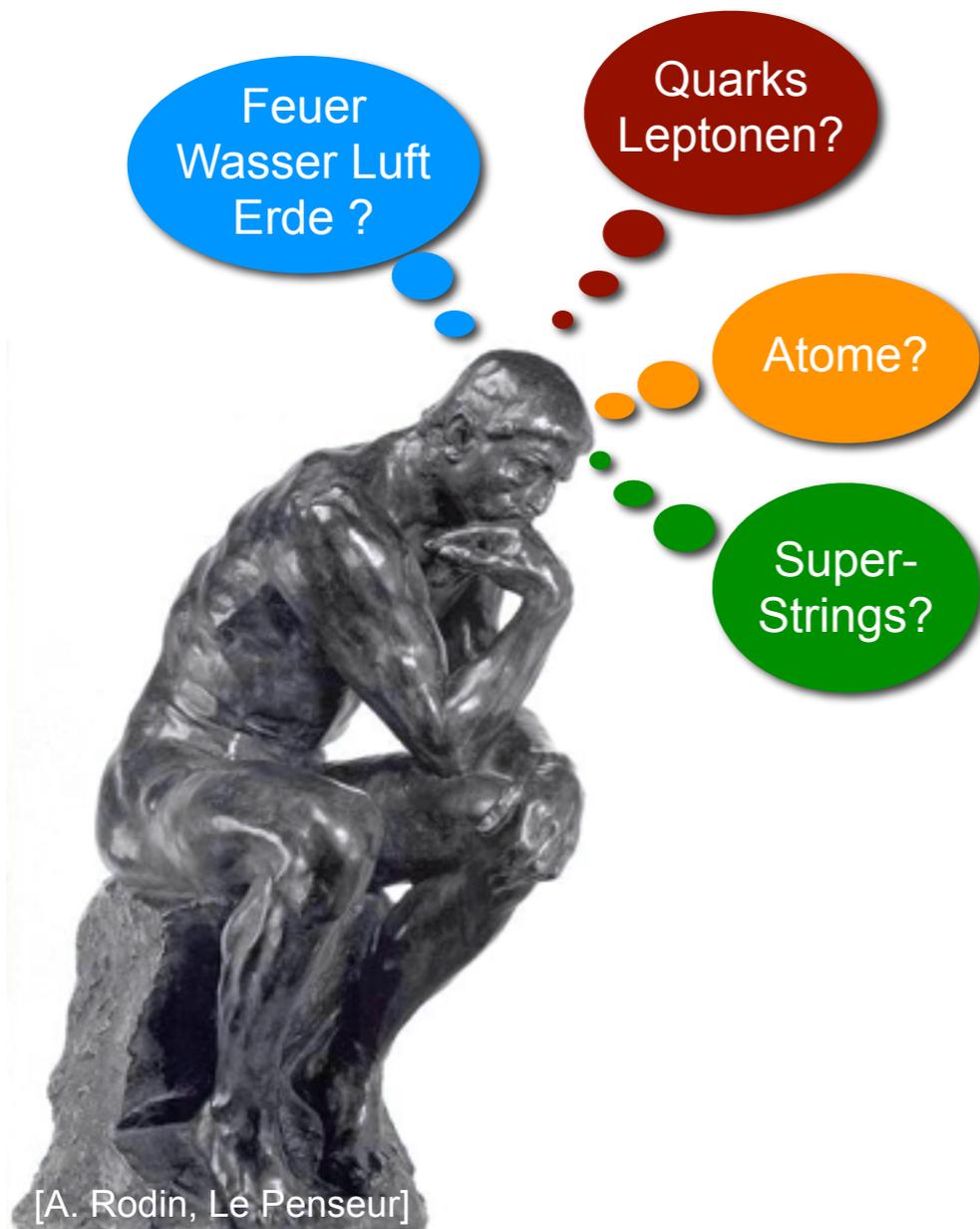
DESY und HU Berlin (2008–2013)
ATLAS-Experiment am CERN, Genf



Professor

Karlsruher Institut für Technologie,
Experimentelle Kernphysik (seit Juli 2011)
CMS-Experiment am CERN, Genf

Faszination Teilchenphysik



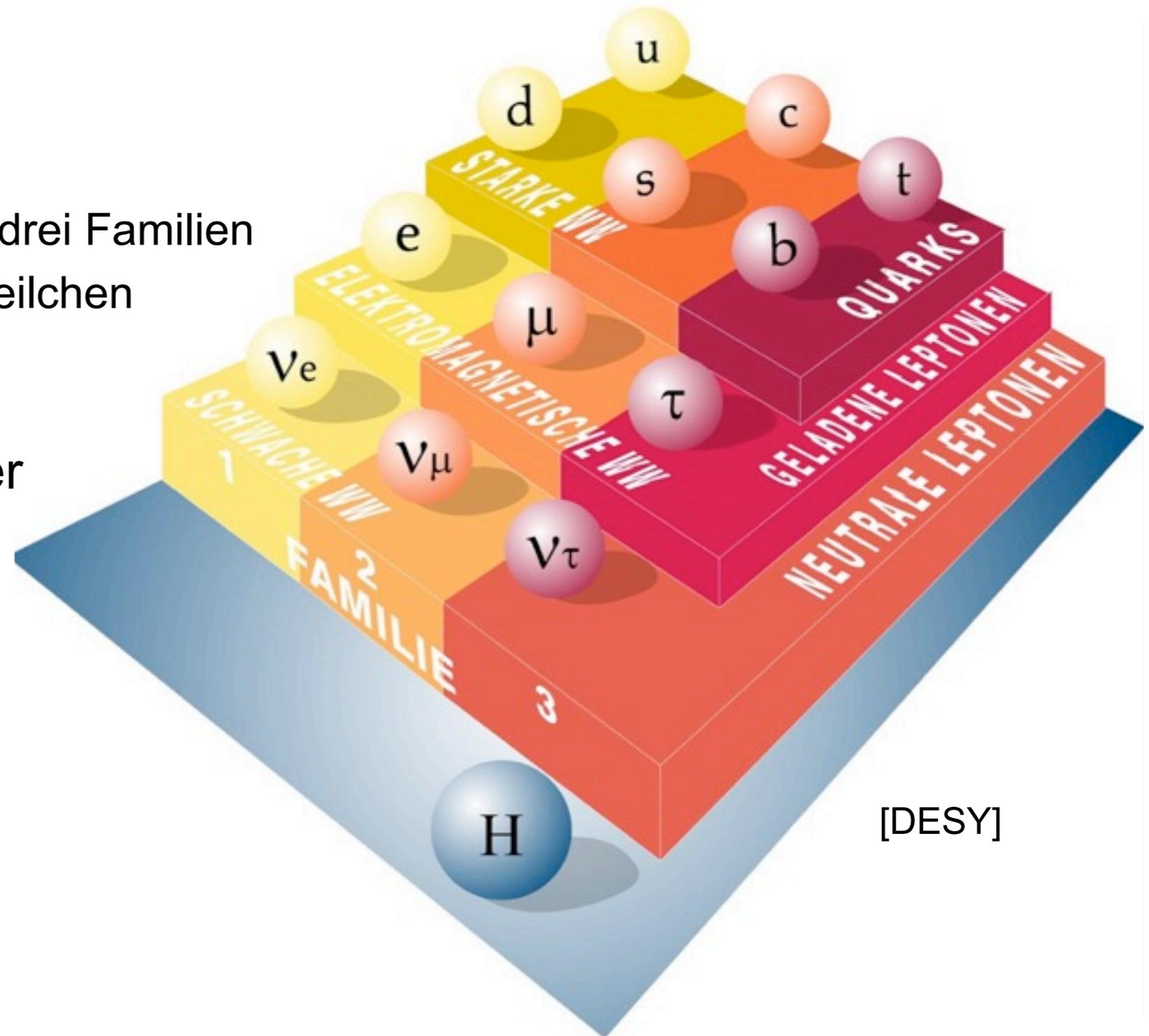
- **Physik** – wie ist unsere Welt aufgebaut?
 - Was sind die fundamentalen Bausteine unserer Welt?
- **Technologie** – wie funktioniert das?
 - Riesige Nachweisgeräte, μm -Präzision
 - Verarbeitung der Datenflut
- **Gesellschaft**
 - ... und wozu ist das alles gut?
 - Neues Weltbild, vgl. Quantenmechanik?
 - Internationale Zusammenarbeit
 - Spin-offs → direkter wirtschaftlicher Nutzen

Das Standardmodell der Teilchenphysik

- Seit 1960er Jahren: „Standardmodell der Teilchenphysik“
 - 12 Elementarteilchen in drei Familien
 - Zu jedem Teilchen: Antiteilchen
 - Drei Kräfte

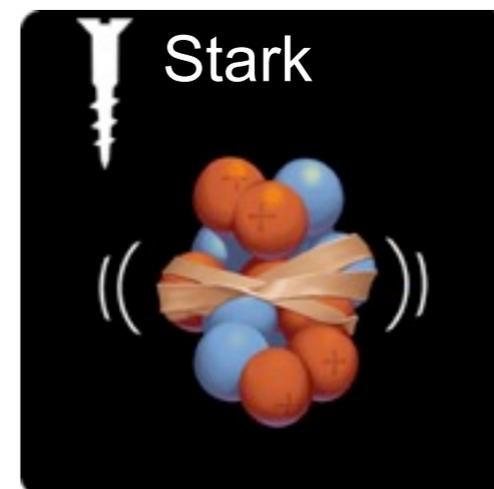
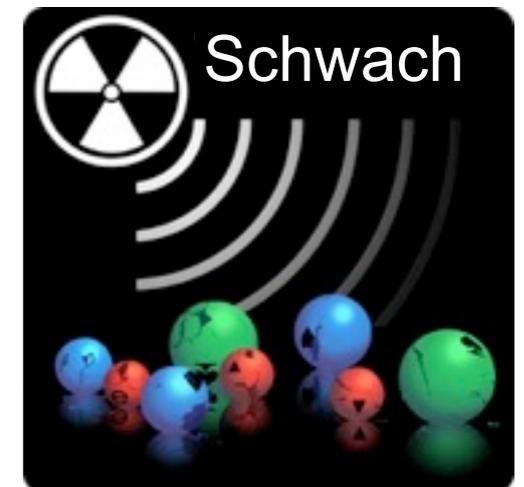
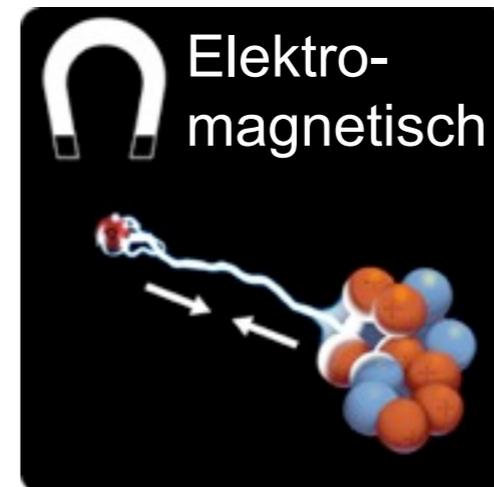
- Experimentell mit großer Genauigkeit **bestätigt**

- Juli 2012: Hinweise auf das **Higgs-Boson**



Kräfte im Standardmodell

- Kräfte („Wechselwirkungen“):
Austausch von Überträgerteilchen mit Spin 1 („Eichbosonen“)
 - **Starke** Wechselwirkung
→ Eichbosonen: 8 Gluonen
 - **Elektromagnetische** Wechselwirkung
→ Eichboson: Photon
 - **Schwache** Wechselwirkung
→ Eichbosonen: $W^{\pm-}$, Z-Bosonen
- **Vereinigung** der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung:
elektroschwache Wechselwirkung



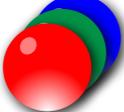
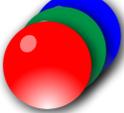
[<http://www.particlephysics.ac.uk/>]

Teilchen im Standardmodell

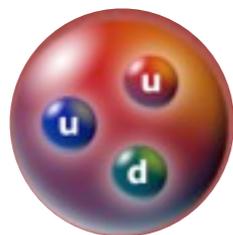
Die Leptonen

	Elektrische Ladung		Elektrische Ladung
Elektron	 $-1 e$	Elektron-Neutrino	 0
Myon	 $-1 e$	Myon-Neutrino	 0
Tau	 $-1 e$	Tau-Neutrino	 0

Die Quarks

	Elektrische Ladung		Elektrische Ladung
Down	 $-1/3 e$	Up	 $+2/3 e$
Strange	 $-1/3 e$	Charm	 $+2/3 e$
Bottom	 $-1/3 e$	Top	 $+2/3 e$

Proton



Neutron



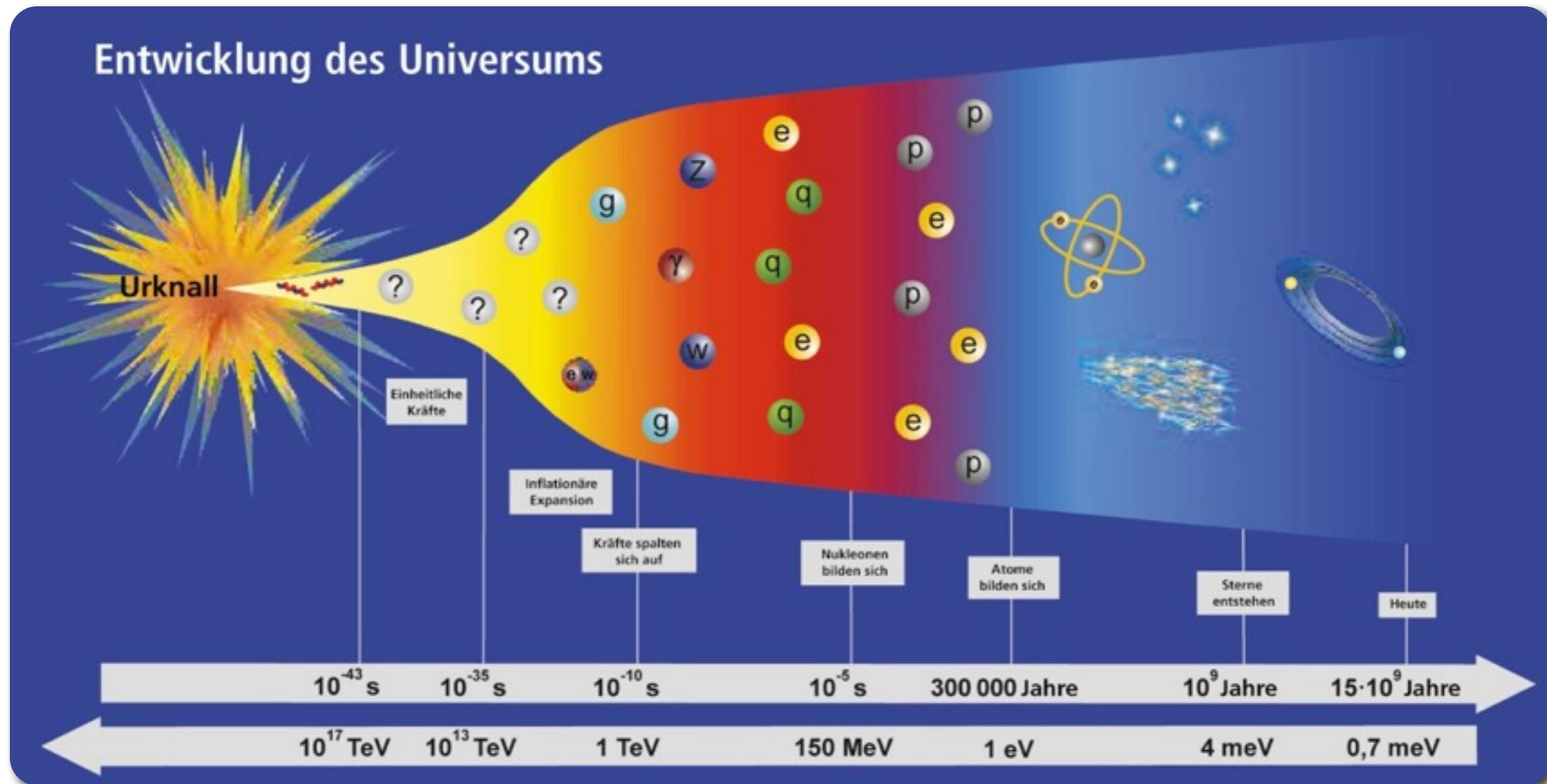
Pion



[<http://www.scifun.ed.ac.uk/>]

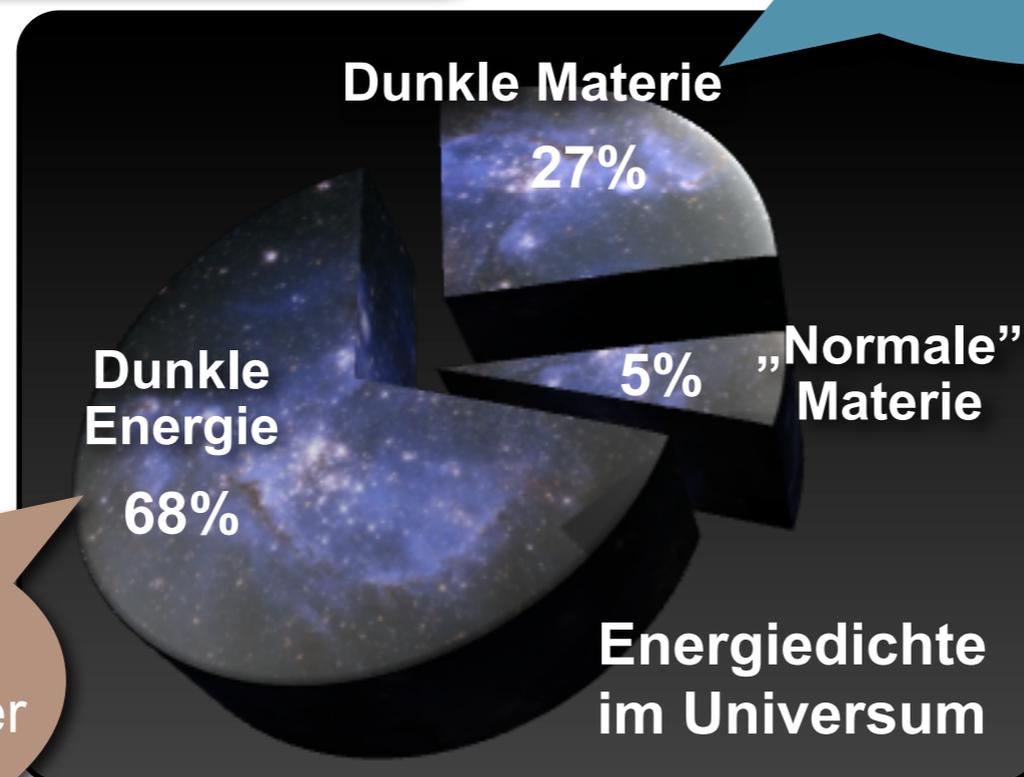
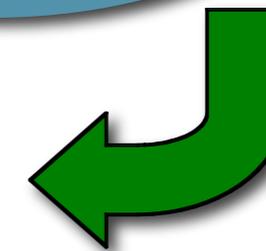
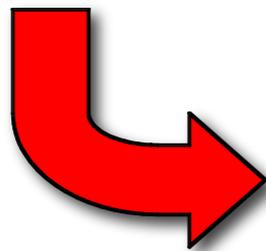
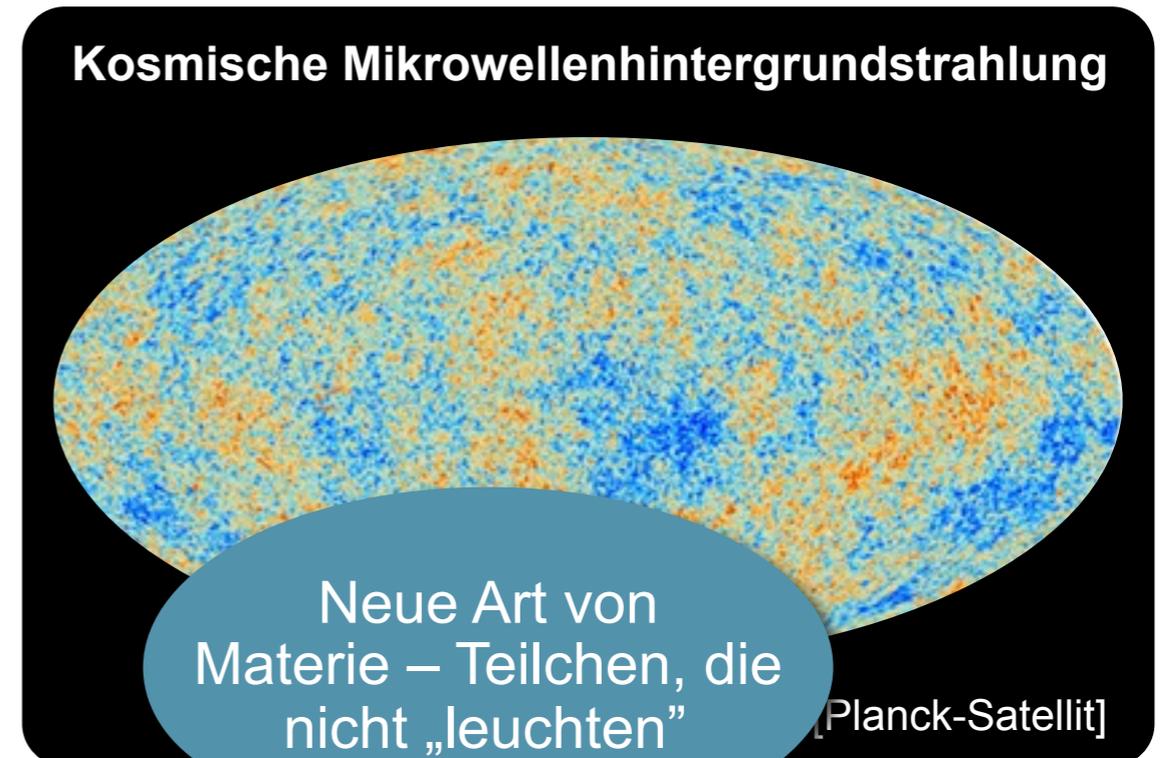
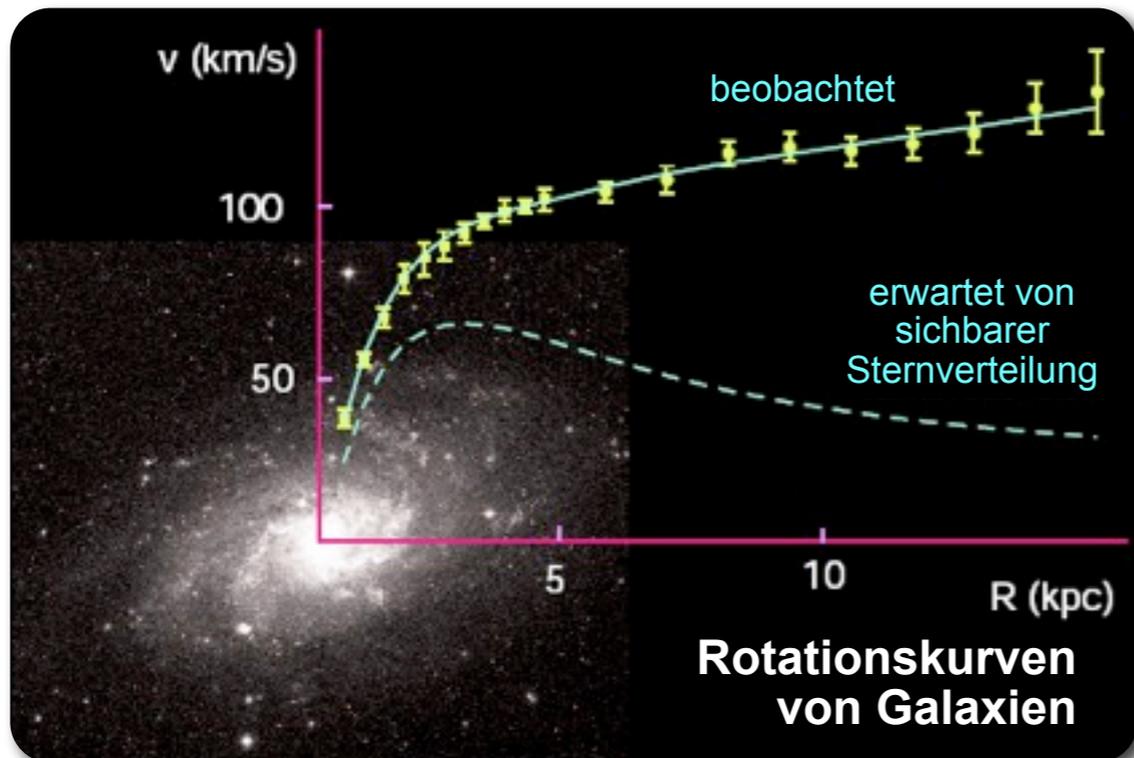
- Alle Teilchen: **Fermionen** (Spin 1/2)
- Elektrische Ladung:
 - Leptonen: **ganzzahlig**
 - Quarks: **gebrochenzahlig**
- Starke Kraft: „**Confinement**“
 - Keine freien Quarks, Bindung zu Hadronen = Baryonen + Mesonen
 - Baryonen: **Quark + Quark + Quark**
 - Mesonen: **Quark-Antiquark-Paar**
- Vorkommen in der Natur:
 - Alle Materie auf der Erde: Teilchen der **1. Familie**
 - 2. und 3. Familie dennoch **wichtig**: z. B. kosmische Strahlung, Quantenkorrekturen

Das Standardmodell der Kosmologie



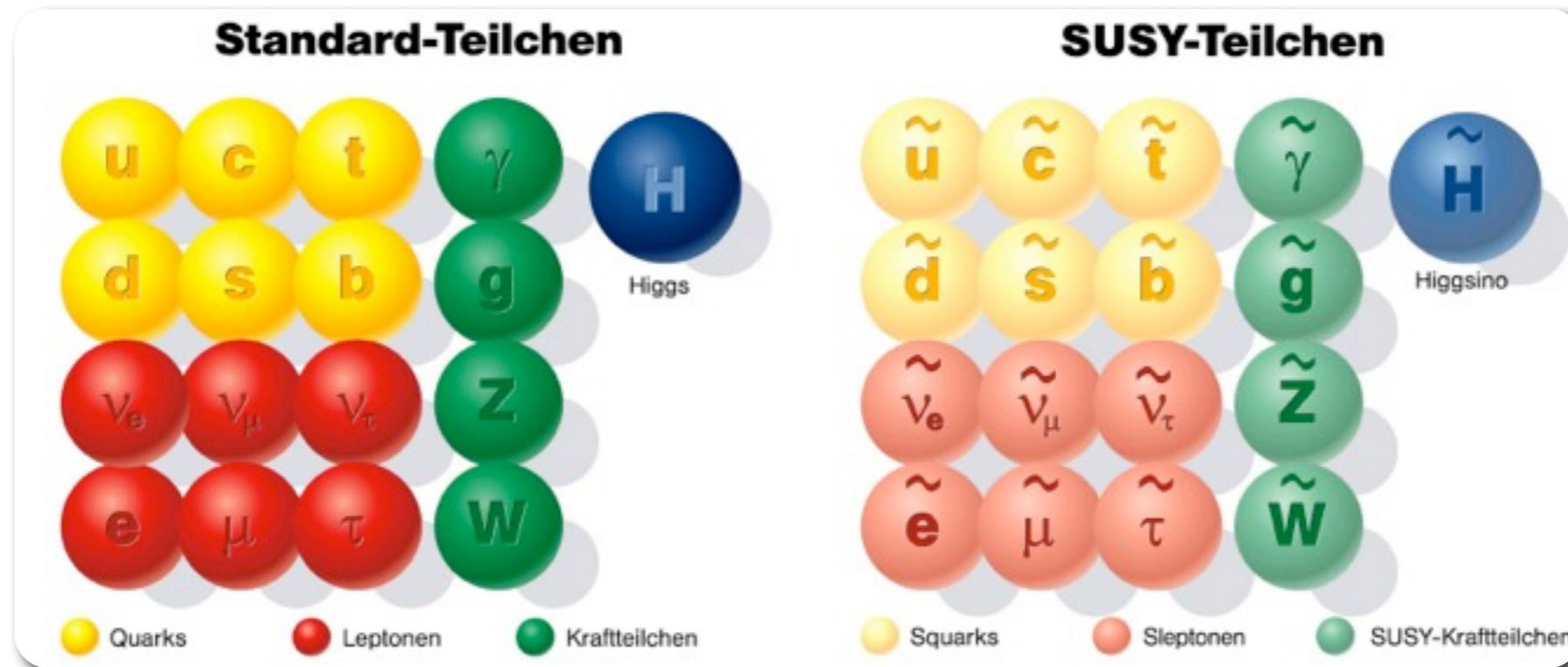
- Seit ca. 15 Jahren: **konsistentes Modell** von der Entwicklung des Universums seit dem Urknall → „Standardmodell der Kosmologie“
- Passen Teilchenphysik und Kosmologie zusammen?

Dunkle Materie und Dunkle Energie



Unbekannte Energieform, die das Universum auseinander treibt

Lösungsideen?



[DESY]

■ Supersymmetrie („SUSY“)?

- Die „letzte noch fehlende Symmetrie“ in der Natur: **Spiegelteilchen** zu jedem Teilchen im Standardmodell
- Keine Hinweise auf SUSY, einfachste Formen bereits von LHC ausgeschlossen

■ Zusätzliche Raumdimensionen?

- Keine Hinweise am LHC (z. B. mikroskopische schwarze Löcher)

Die Nadel im Heuhaufen



Hunts Needle in a Haystack

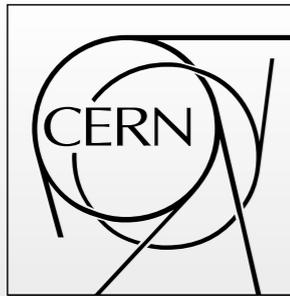
HOW LONG does it take to find a needle in a haystack? Jim Moran, Washington, D. C., publicity man, recently dropped a needle into a convenient pile of hay, hopped in after it, and began an intensive search for (a) some publicity and (b) the needle. Having found the former, Moran abandoned the needle hunt.

- Erzeugung und Nachweis **neuer Elementarteilchen** in Kollisionen bekannter Elementarteilchen „im Labor“
 - Neue Elementarteilchen vermutlich **sehr schwer**
 - Prozesse mit neuen Elementarteilchen **sehr selten**

- Lösung: Experimente an **Teilchenbeschleunigern**
 - Beschleuniger: höchste mögliche **Energie** und **Kollisionsrate**
 - Experimente: **effizienter Filter** für seltene neue Prozesse

Der Large Hadron Collider

Was ist CERN?



CERN = Europäisches Teilchenphysiklabor
Weltweit **größtes Labor für Teilchenphysik**, gegründet 1954
Historischer Name: „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire“
2400 Angestellte, fast 10000 Gäste (>100 Nationalitäten)

Genfer
See

Jura-Gebirge

8,5 km

Standort Prévessin
(Frankreich)

Beschleunigerkomplex
(ca. 100 m unter der Erde)

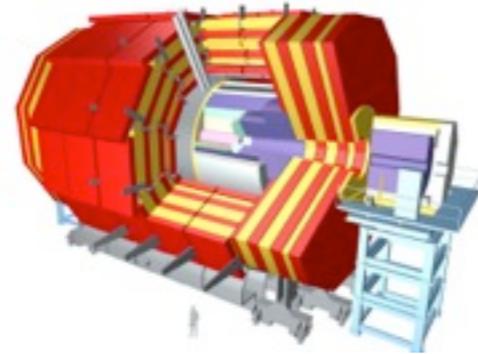
Standort Meyrin (Schweiz)

LHC-Beschleuniger:
Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen

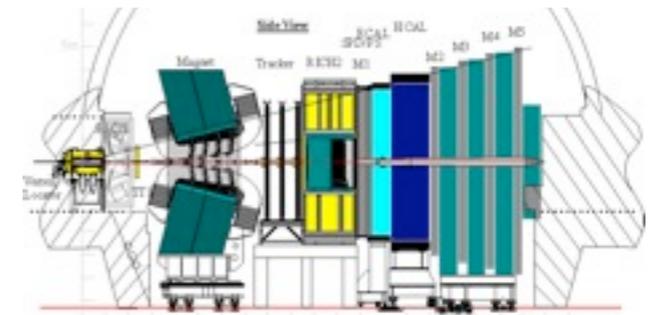


Hadri

CMS-Experiment:
Vielzweckexperiment



LHCb-Experiment:
Symmetrie Materie/Antimaterie



ALICE-Experiment:
Schwerionenphysik



ATLAS-Experiment:
Vielzweckexperiment

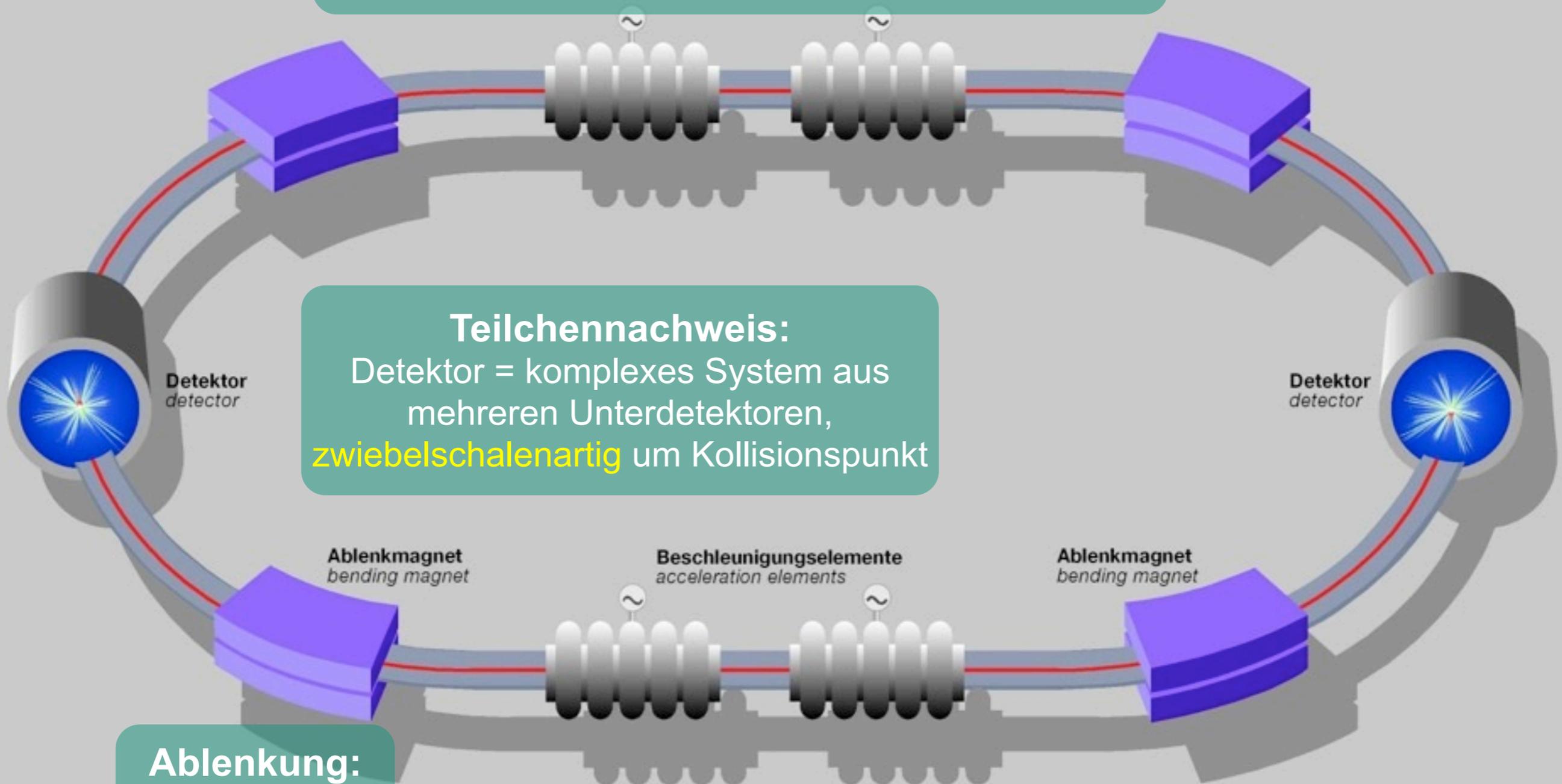


Prinzip des Teilchenbeschleunigers

Beschleunigung:
Elektrische Wechselfelder in **Hohlraumresonatoren**

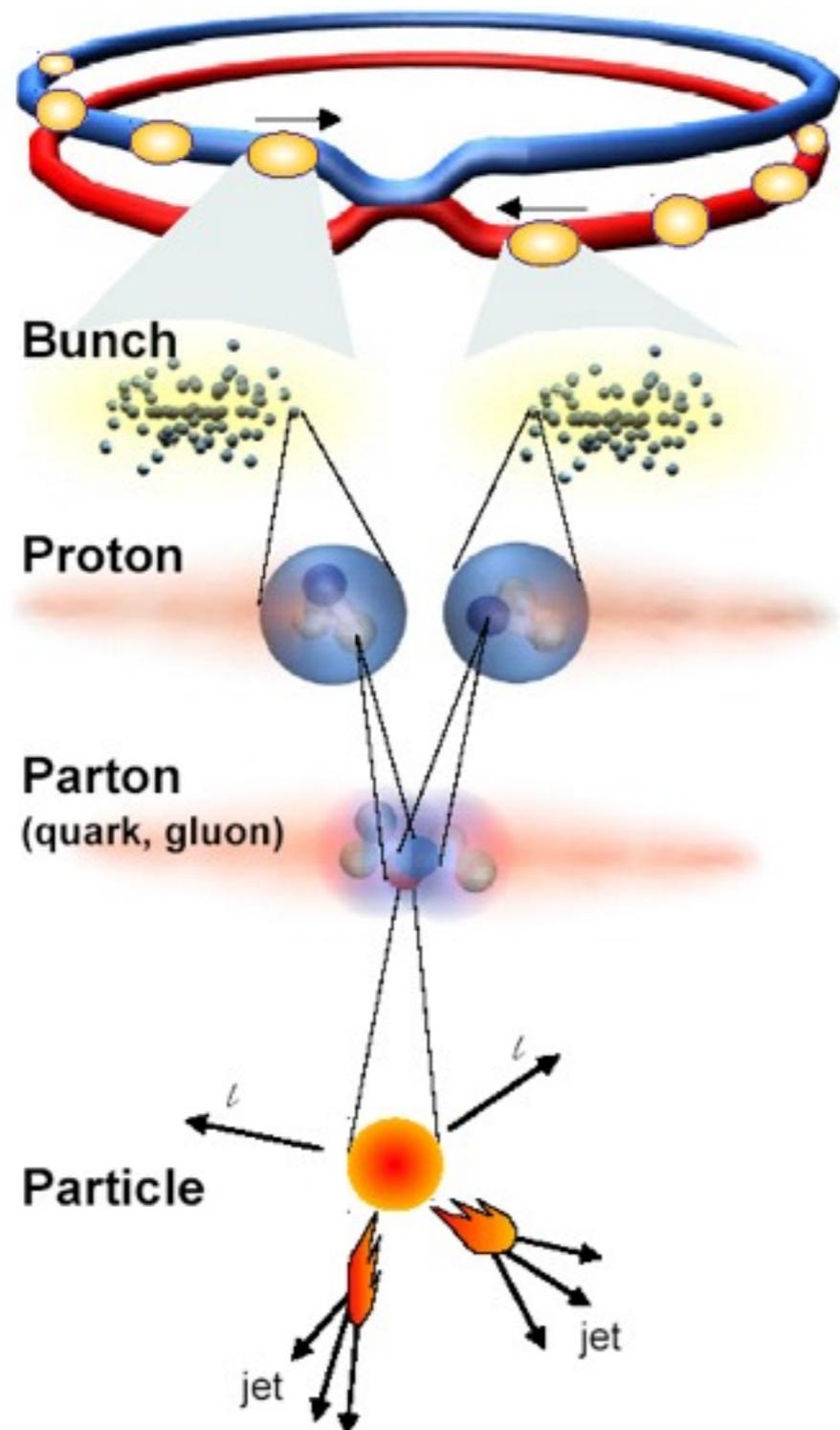
Teilchennachweis:
Detektor = komplexes System aus mehreren Unterdetektoren,
zwiebelschalenartig um Kollisionspunkt

Ablenkung:
Dipolmagnete



[DESY]

Proton-Proton-Kollisionen am LHC



- Proton-Proton-Kollisionen
 - Protonenpakete treffen sich 20 Millionen Mal pro Sekunde
 - Ca. 30 Kollisionen pro Zusammentreffen
→ **0,6 GHz Kollisionsrate**
 - Experimente: 300-600 interessanteste Kollisionen pro Sekunde aufgezeichnet
 - Gesamtzahl der aufgezeichneten Ereignisse 2010-1012: ca. **2 Milliarden**

- Ein Higgs-Boson alle 3,5 Milliarden Kollisionen produziert (nicht nachgewiesen!)

Impulsmessung

Energiemessung

Teilchenidentifikation

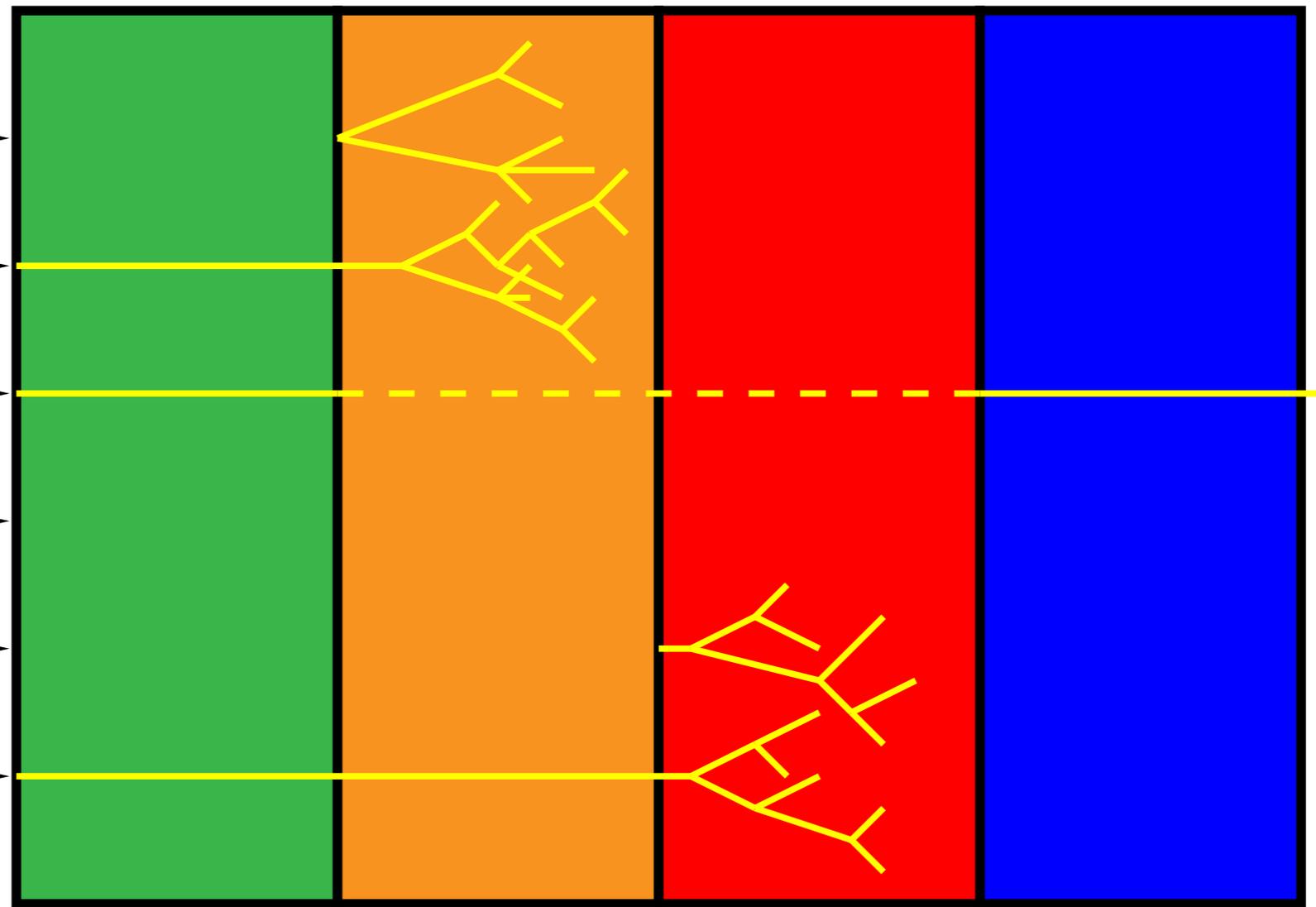
Spurdetektor
(„Tracking“)

Kalorimeter
elektromagnetisch hadronisch

Myondetektor

Zerfallsprodukte der Kollision

Photon
Elektron/Positron
Myon
Neutrino
Neutron
Pion, Proton

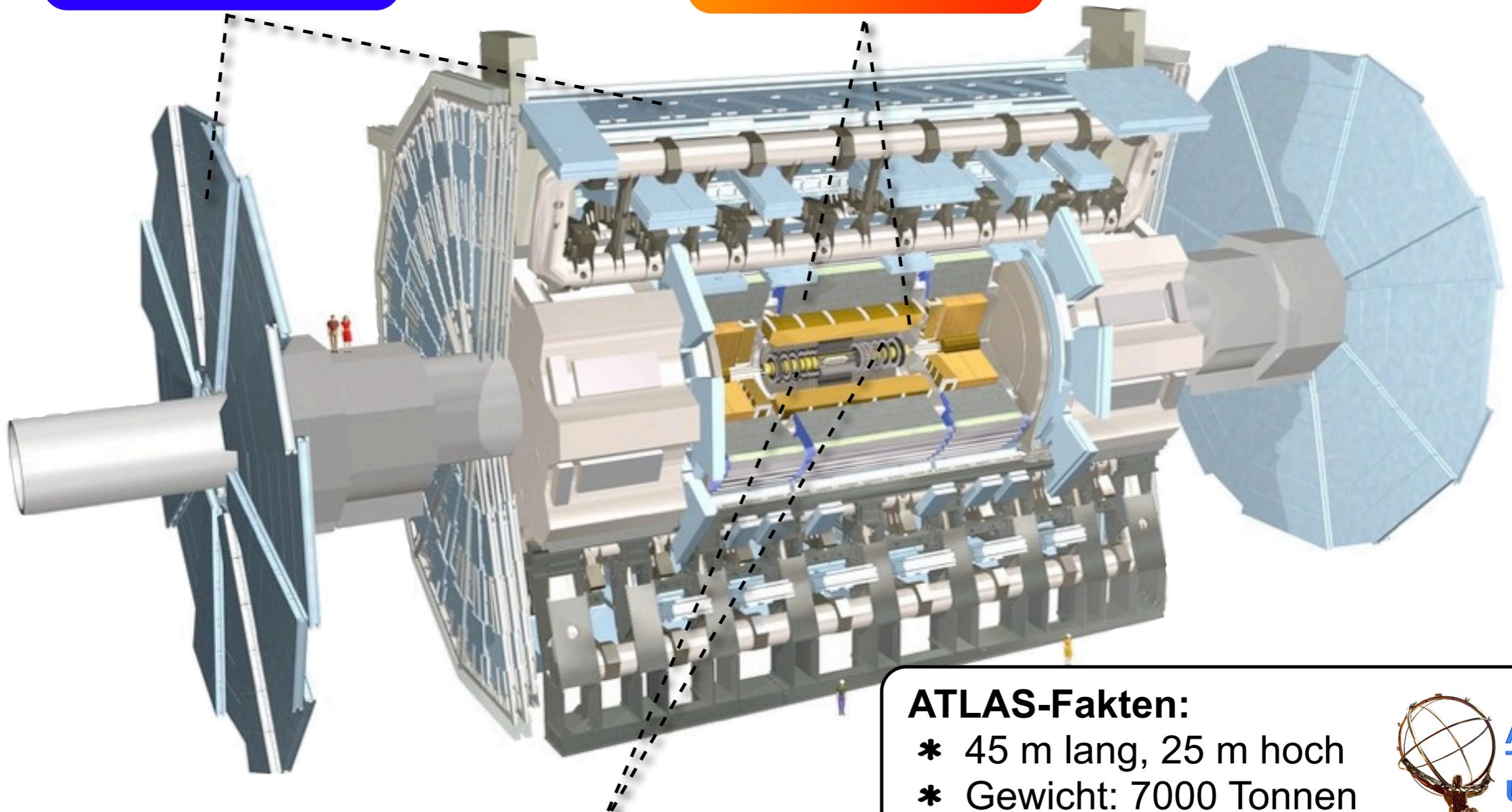


„Innen“

„Außen“

Myon-Detektor

Kalorimeter



Spurdetektoren

ATLAS-Fakten:

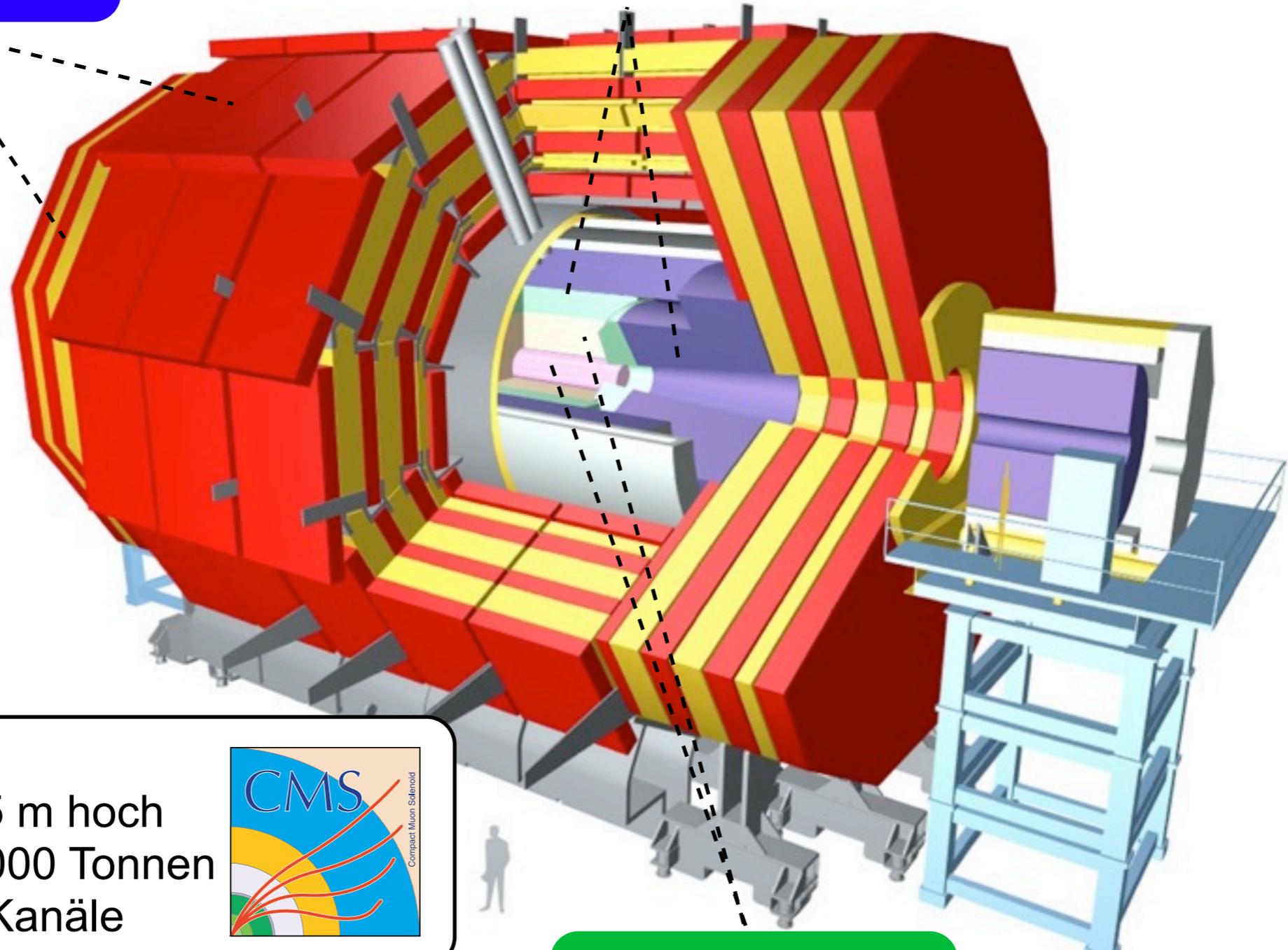
- * 45 m lang, 25 m hoch
- * Gewicht: 7000 Tonnen
- * 100 Millionen Kanäle



CMS – Der Compact Muon Solenoid

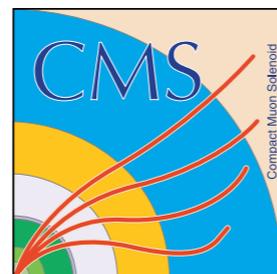
Myon-Detektor

Kalorimeter



CMS-Fakten:

- * 21 m lang, 15 m hoch
- * Gewicht: 14.000 Tonnen
- * 80 Millionen Kanäle



Spurdetektoren

Suche nach dem Higgs-Boson

Warum ist Masse so wichtig?

- Fragen an die Natur:
 - Warum haben Elementarteilchen Masse? (→ Higgs-Mechanismus)
 - Warum sind die Massen so wie sie sind? (→ ???)
- Gedankenexperiment: **was wäre wenn...**

Veränderung	Konsequenz
... Masse des Elektrons 10× größer	Atome viel größer, Menschen 20 Meter groß
... Masse des d-Quarks Null (oder leichter als Masse des u-Quarks)	Protonen instabil, kein Wasserstoff, Neutronen stabil („kosmisches Billard“)
... Masse des W-Bosons kleiner als in der Natur	Kernfusion in Sternen läuft schneller ab, Sonne wäre schon „abgebrannt“

Der Higgs-Mechanismus

- Problem: Teilchen im Standardmodell „eigentlich“ masselos
- Lösung: Higgs-Mechanismus
 - Einführung eines neuen Quantenfeldes
 - Masse durch Kopplung an Feld
- Mitte der 1960er Jahre: Idee „lag in der Luft“
 - Publiziert von: Brout, Englert; Guralnik, Hagen, Kibble; Higgs
 - Neues Feld → neues Teilchen (P. Higgs)



Higgs: die Party-Analogie

Wie Elementarteilchen Masse bekommen:

Prominente betritt den Raum, wird von Gästen umringt, kommt nur langsam voran → Trägheit = Masse



[D. Miller]

Higgs: die Party-Analogie

Wie das Higgs-Teilchen Masse bekommt:

Gerücht verbreitet sich langsam (Trägheit = Higgs-Masse)

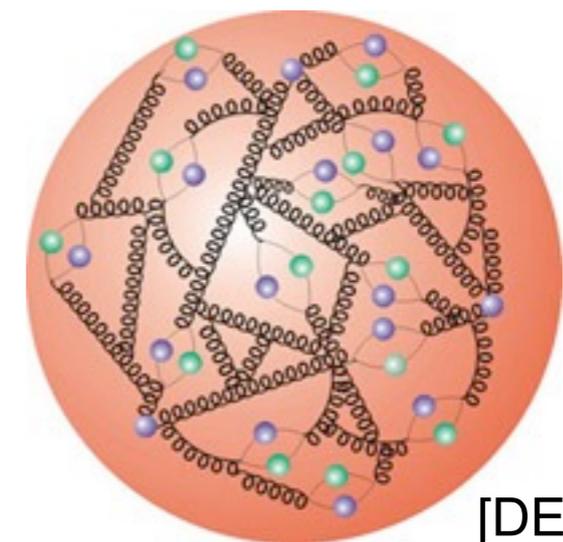


[D. Miller]

Übrigens...

- Protonen und Neutronen:
zusammengesetzte Teilchen
 - Drei „Valenzquarks“
 - Zusätzlich: „Seequarks“ und Gluonen

- Masse des Protons
 - 1% aufgrund Massen der Quarks
 - 99% aus kinetischer und Bindungsenergie
($E = mc^2$)



[DESY]

Das Neueste vom Higgs-Boson



- 4. Juli 2012:
 - „CERN experiments observe particle consistent with long-sought Higgs boson” (CERN-Pressemitteilung)
 - Erste große Entdeckung am LHC
 - Kompatibel mit Higgs-Boson des Standardmodells

- 14. März 2013
 - „New results indicate that particle discovered at CERN is a Higgs boson” (CERN-Pressemitteilung)
 - Genauere Untersuchungen mit mehr Daten
 - Teilchen könnte eines von mehreren Higgs-Bosonen sein

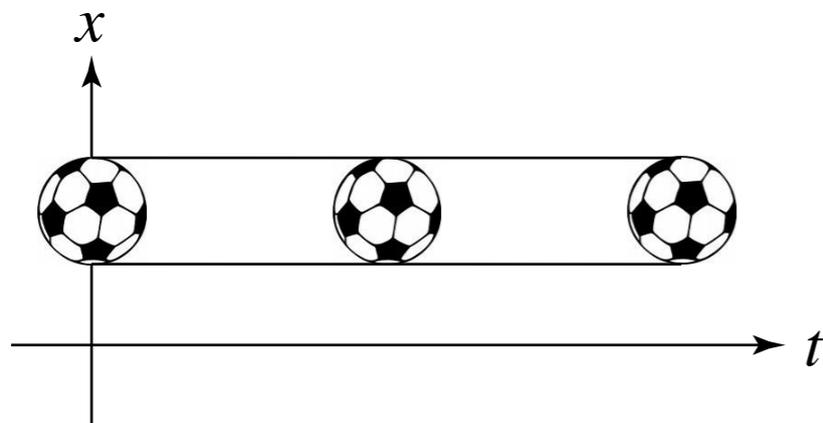
SAY GOD PARTICLE



**ONE MORE
GODDAMN TIME**

Feynman-Diagramme

■ Weltlinie eines Fussballs



R.P. Feynman

■ Elemente von Feynman-Diagrammen:



Fermion-Linien
(Antiteilchen: rückwärts in der Zeit)



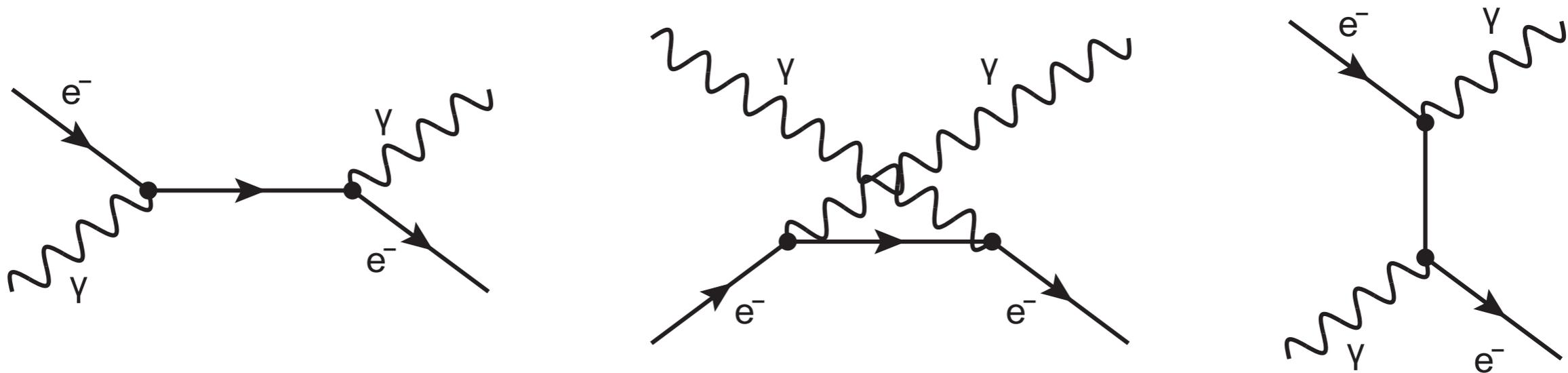
Boson-Linie



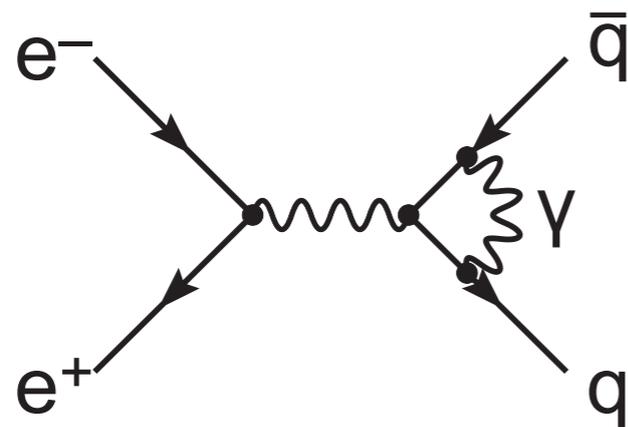
Vertex
(Rechenregel: $\sqrt{\alpha}$ pro Vertex)

Feynman-Diagramme: Beispiele

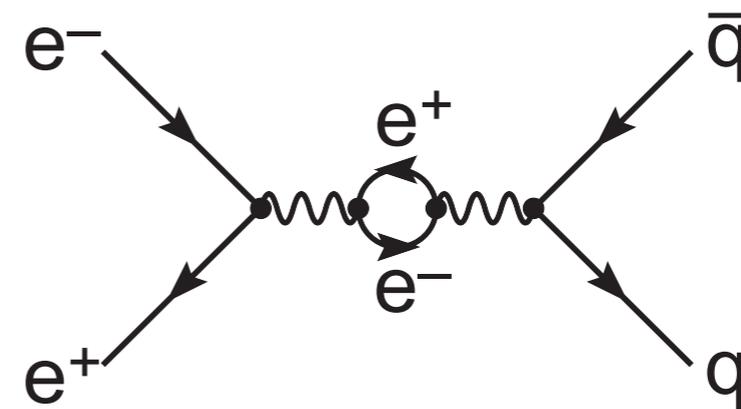
- Compton-Streuung: drei unterschiedliche Feynman-Diagramme



- Korrekturen höherer Ordnung (in α): Schleifendiagramme („Loops“)



Vertexkorrektur



Vakuumpolarisation

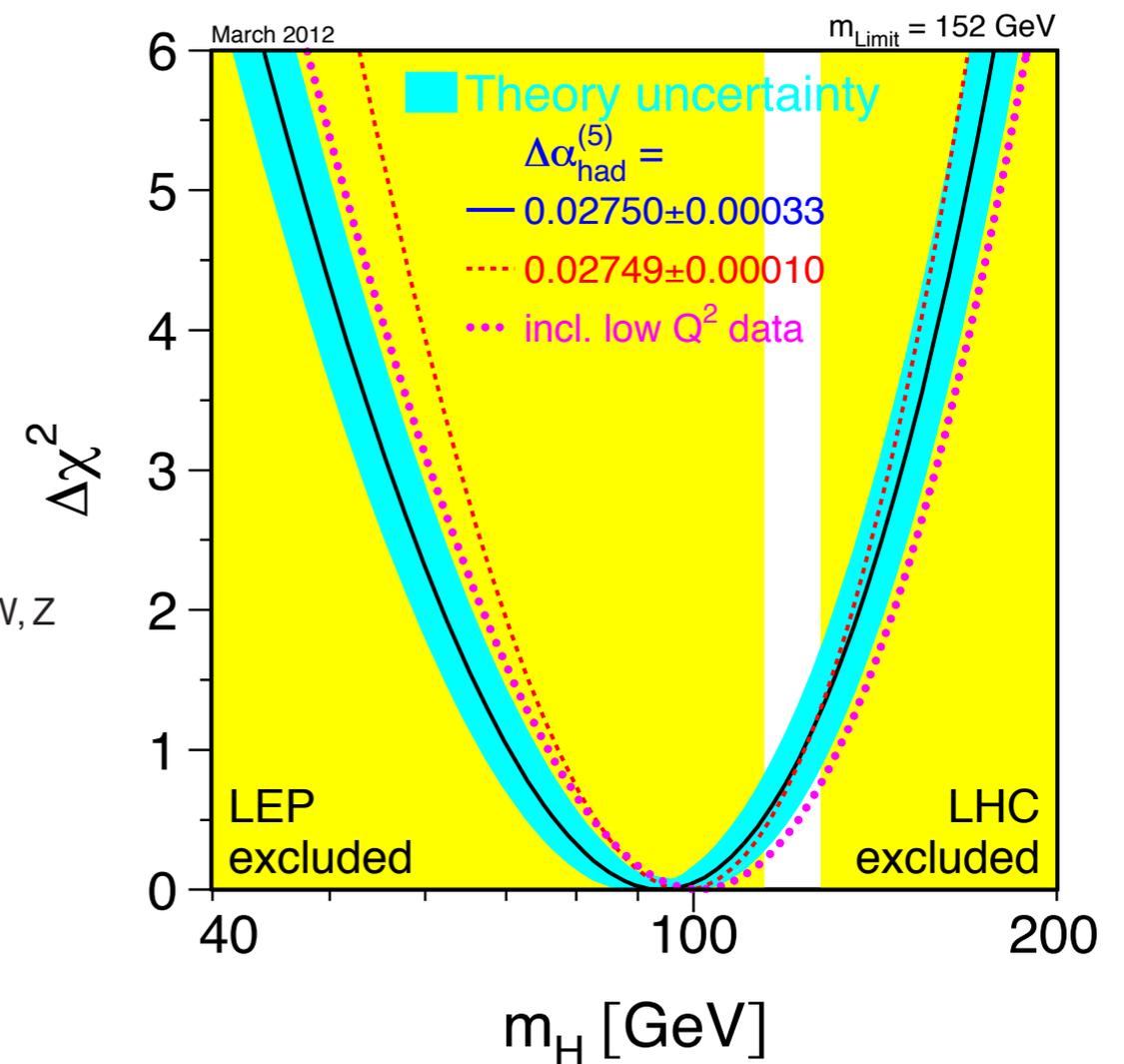
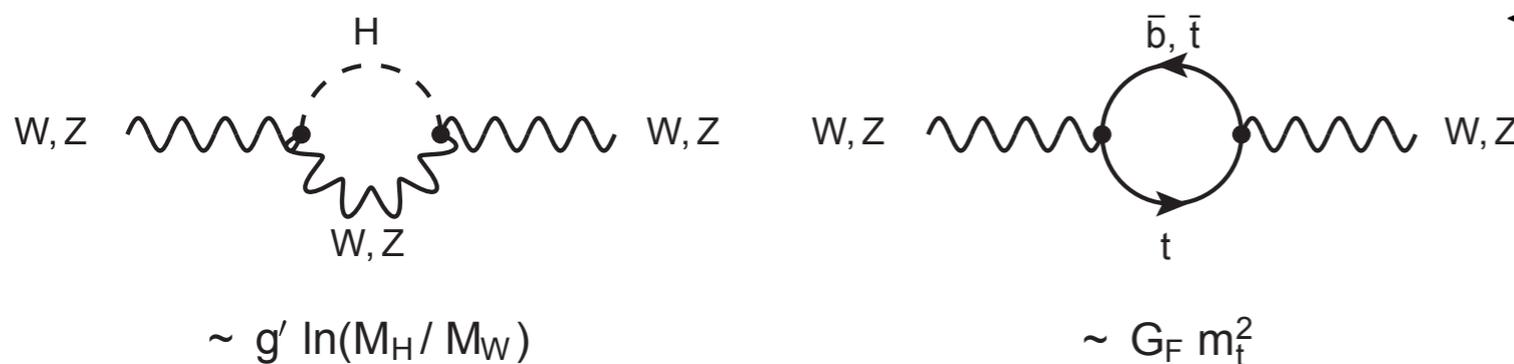
Indirekte Schranken: Theorie & Präzisionsdaten

- Higgs-Mechanismus funktioniert nur stabil, wenn Higgsmasse zwischen ca. **120–200 GeV/c²**



Blue-Band-Plot

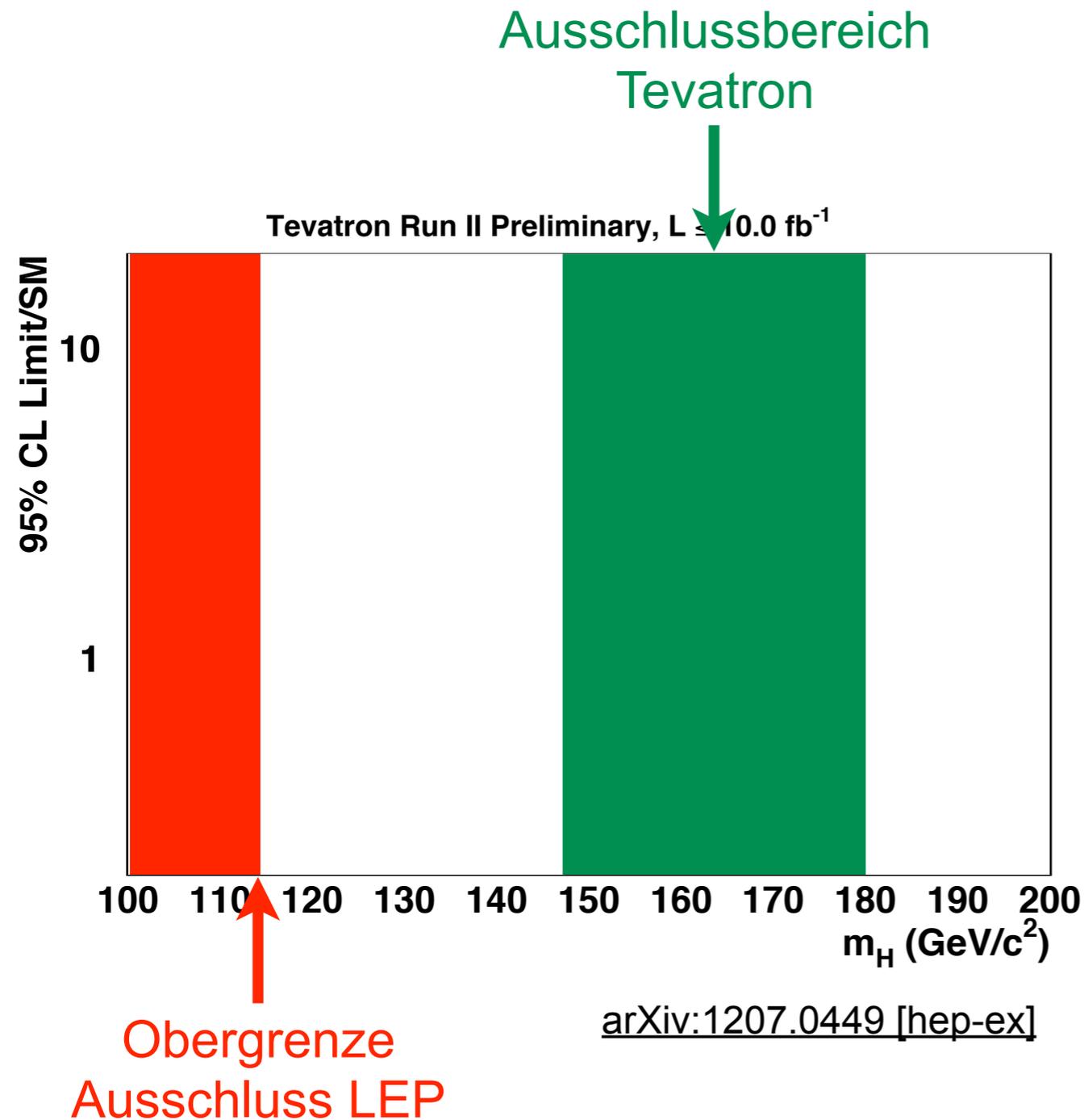
- Standardmodell: Massen der Elementarteilchen über **Quantenfluktuationen** verknüpft
- Falls alle anderen Parameter bekannt: Schranke auf Masse des Higgs-Bosons



[<http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>]

- Präzisionsdaten (u. a. LEP, Tevatron): Higgs-Masse **kleiner als 152 GeV/c²**

Direkte Suchen vor dem LHC-Start



- LEP (CERN, 1990–2000)
 - Speicherring für Elektronen und Positronen im heutigen LHC-Tunnel
 - Masse **größer als 114 GeV/c²**
 - Limitiert durch Maximalenergie des Beschleunigers

- Tevatron (1985–2011)
 - Speicherring für Protonen und Antiprotonen, Energien 8× kleiner als bei LHC 2012
 - Massen **zwischen 147 GeV/c² und 180 GeV/c²** ausgeschlossen
 - Limitiert durch Größe des Datensatzes

Vorhang auf für den LHC



Kontrollraum des CMS-Experiments



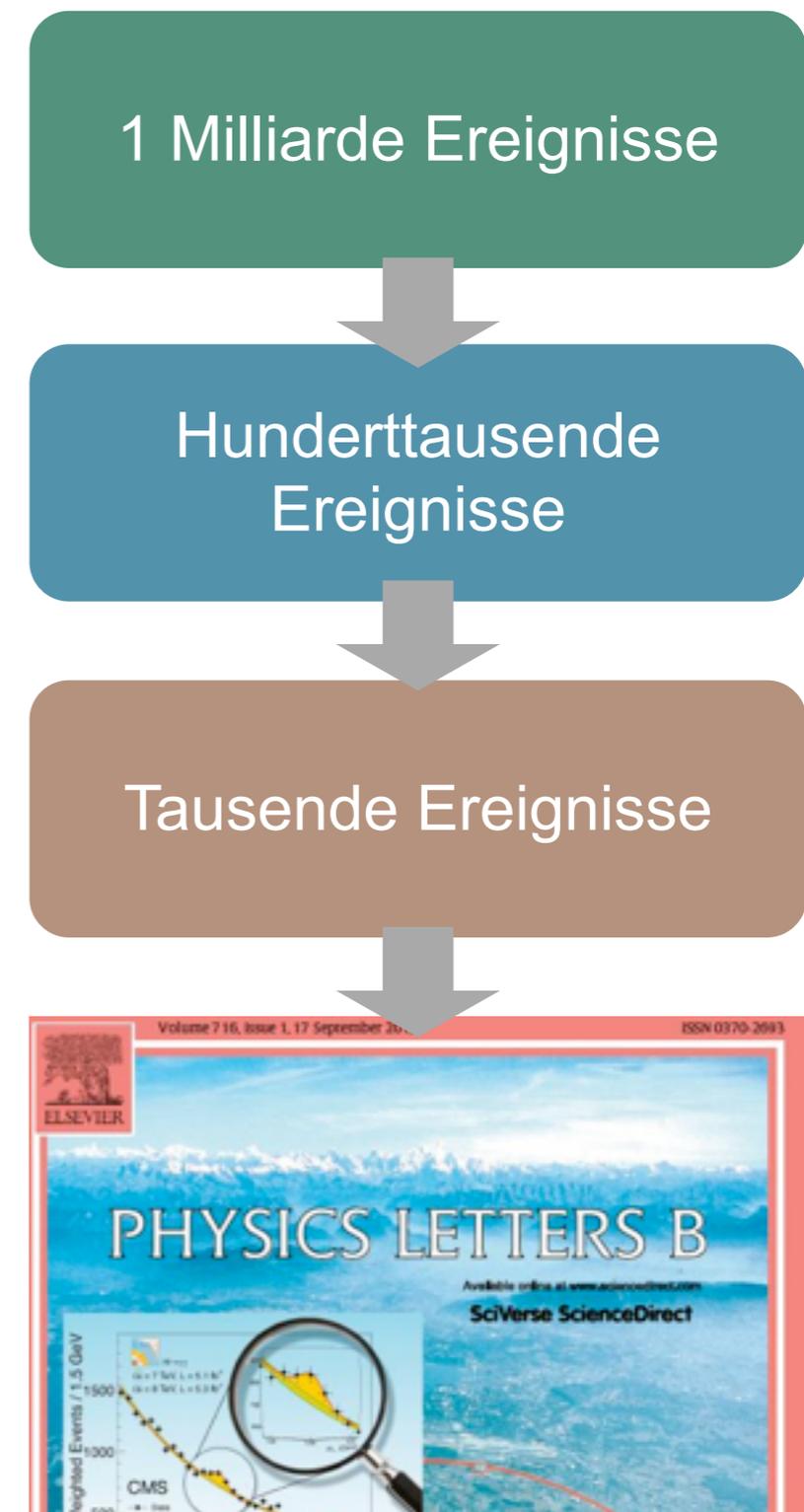
Betrieb des LHC und der Experimente:

- Dreischichtbetrieb
- 24 Stunden am Tag, 7 Tage pro Woche
- Winterpause für Wartungsarbeiten

Analyse der Daten

- Ablauf einer Datenanalyse (schematisch)
 - Vorselektion der Daten nach Qualität
→ zentral am CERN
 - Auswahl von Ereignissen
→ Grid-Computing (u. a. KIT)
 - Statistische Analyse
→ Lokale Computer-Cluster

- Veröffentlichung der Resultate
 - Ggf. Vorveröffentlichung als Konferenzbeitrag
 - Endgültige Veröffentlichung in Fachzeitschrift



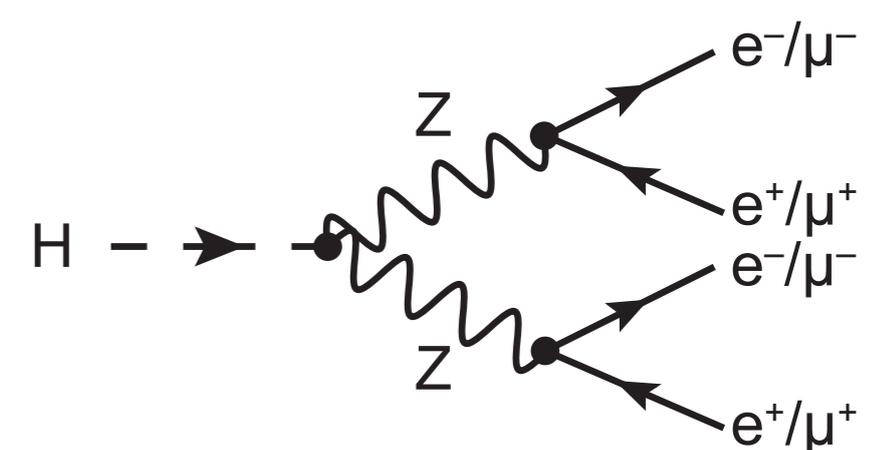
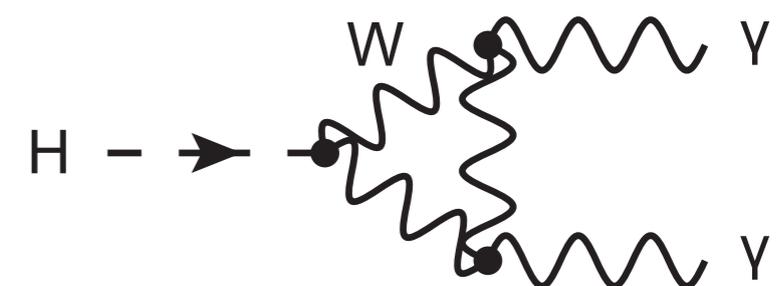
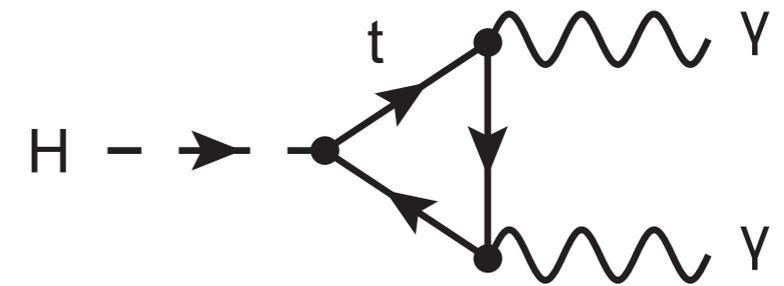
Higgs-Zerfälle

- Erste Ziele der Higgs-Analyse am LHC
 - Entdeckung
 - Erste Eigenschaften: Produktionsrate und Masse

- Higgszerfall in **zwei Photonen**
 - Relativ geringe Rate
 - Sehr gute Massenbestimmung

- Higgszerfall in **vier Leptonen**
 - Higgs-Zerfall in zwei Z-Bosonen, beide Z-Bosonen zerfallen in e^+e^- oder $\mu^+\mu^-$
 - Relativ geringe Rate
 - Wenig Untergrund, sehr gute Massenbestimmung

- Signale auch in anderen Kanälen beobachtet



Was ist Invariante Masse?

- Elementarteilchen bewegen sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit c → spezielle Relativitätstheorie
- Ort x und Zeit t
 - „Relativ“ → abhängig vom Bezugssystem
 - Zusammenhang: „Raumzeit“
 - Abstände s in der Raumzeit: unabhängig vom Bezugssystem („invariant“)

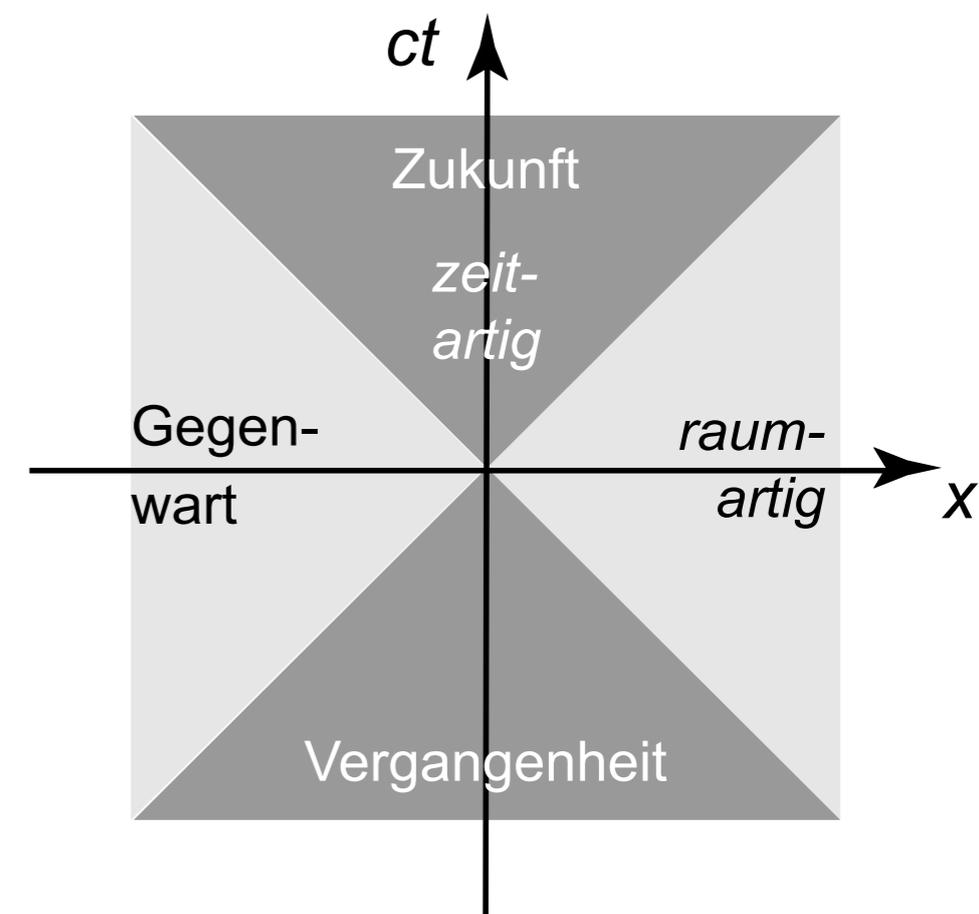
$$s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2$$

- Energie E und Impuls p
 - Zusammenhang analog zu Ort und Zeit
 - Invariante Größe: (Ruhe-)Masse des Teilchens

$$m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$$

→ Massen aus Energien und Impulsen bestimmbar

Minkowski-Diagramm



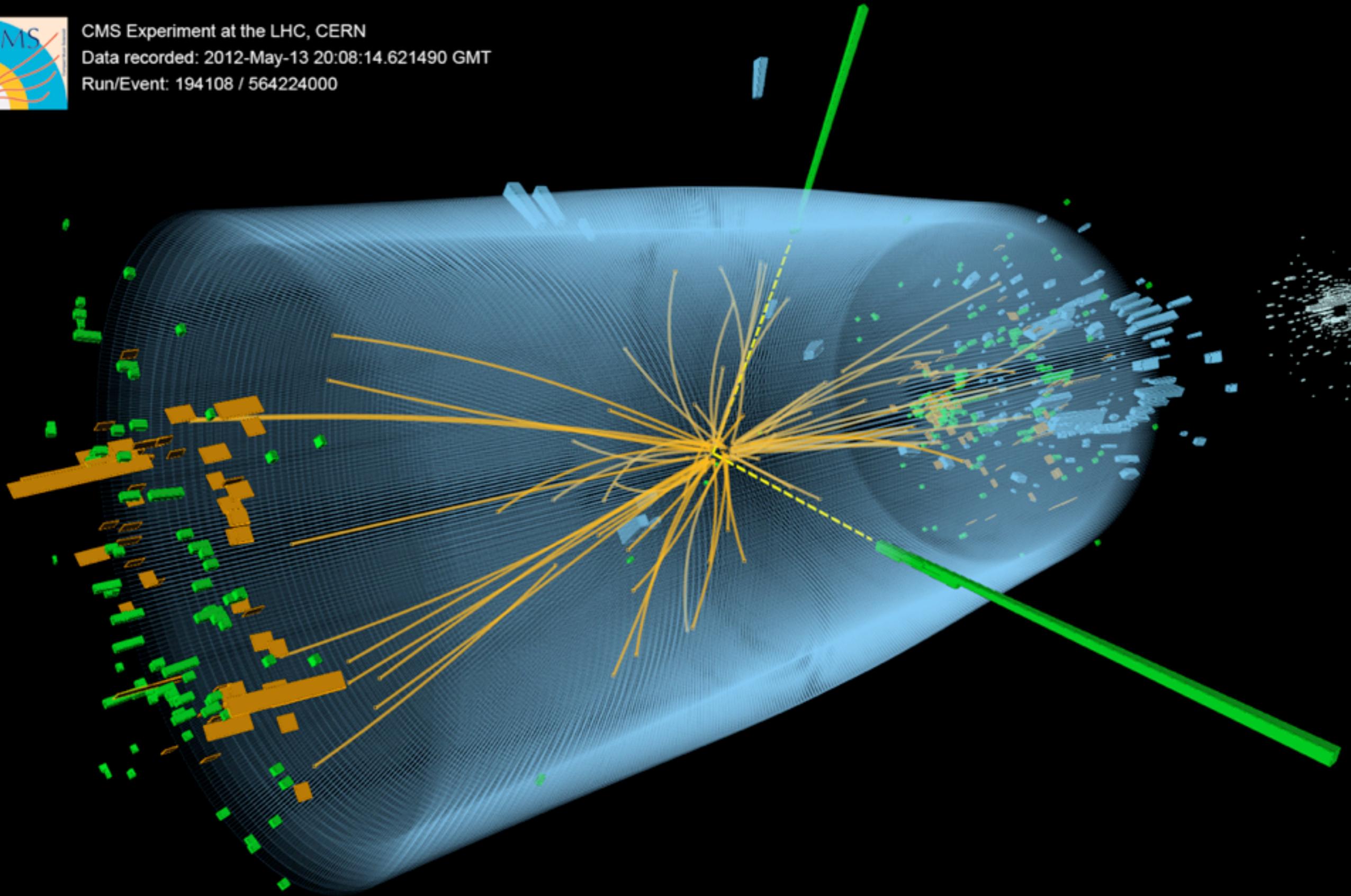
Higgs-Zerfall in zwei Photonen



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT

Run/Event: 194108 / 564224000

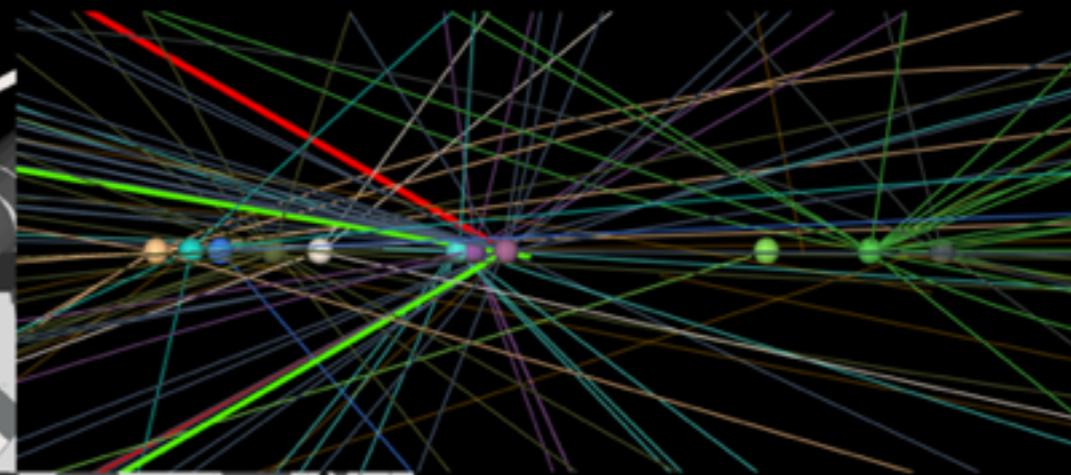
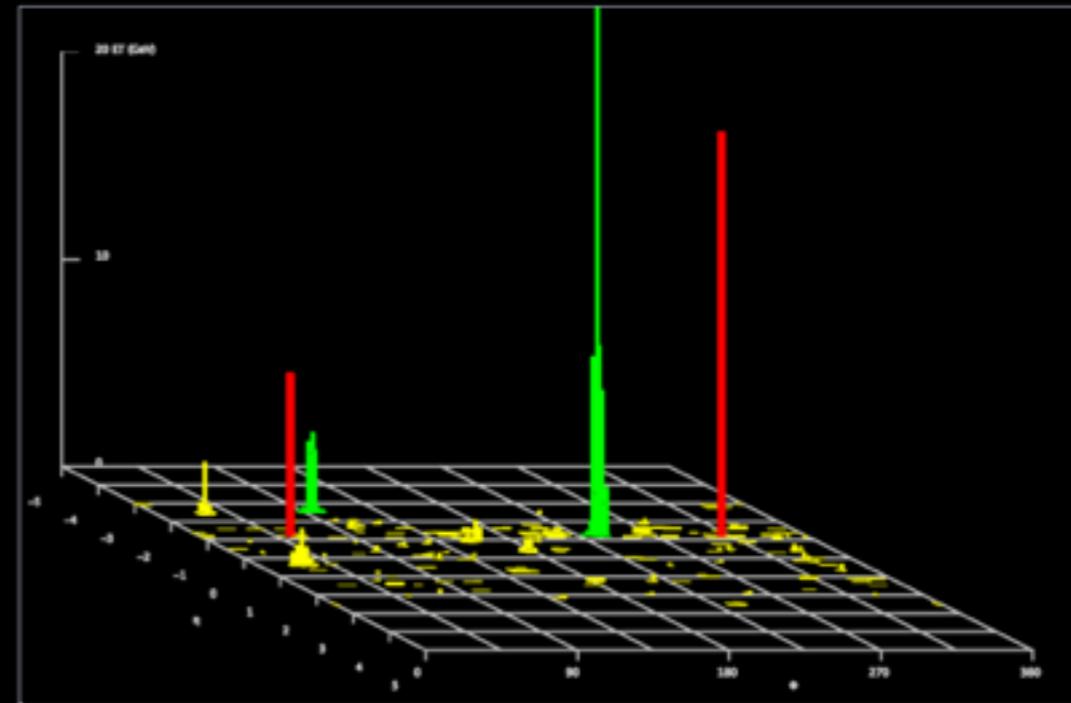
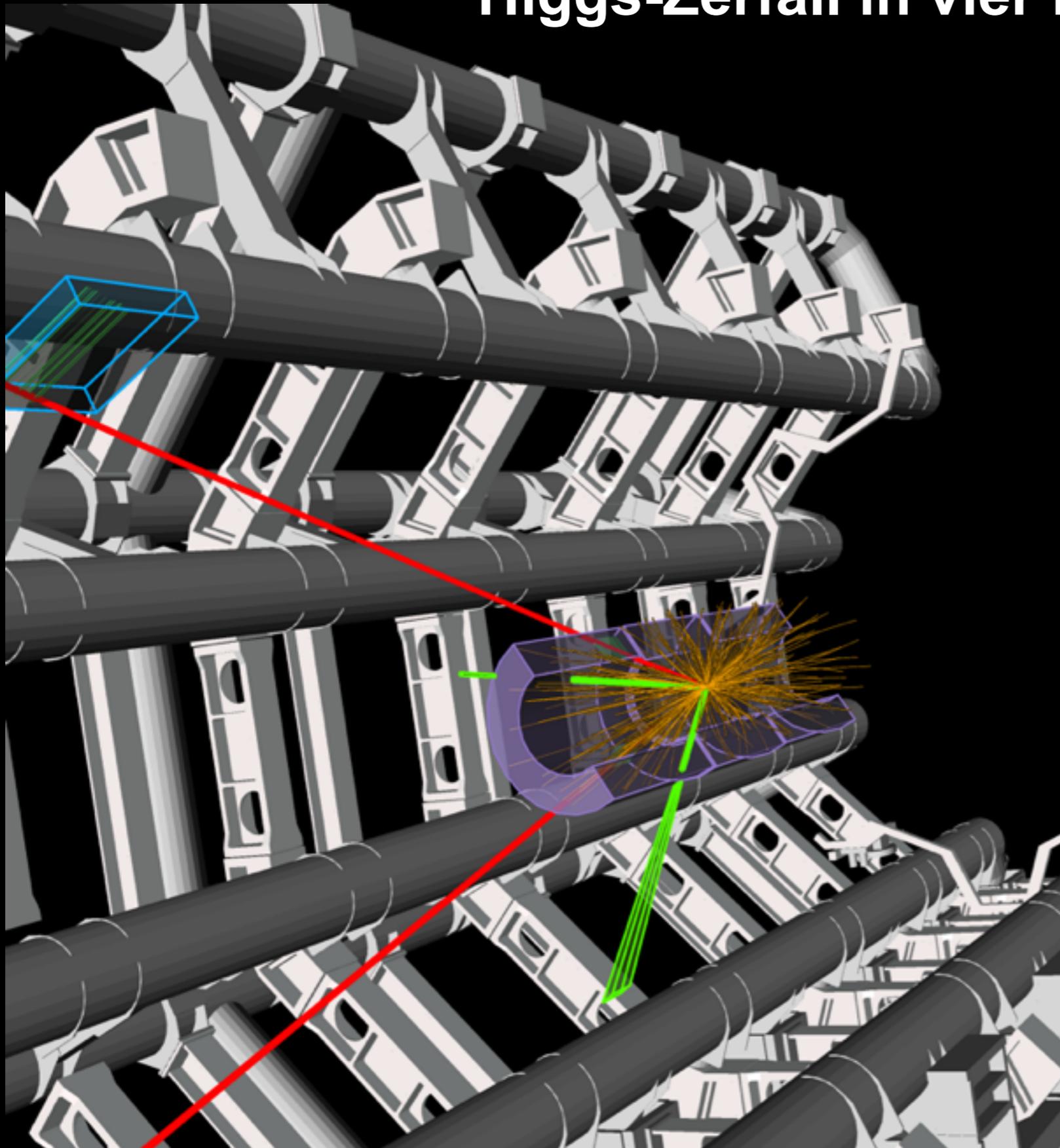


Higgs-Zerfall in vier Leptonen

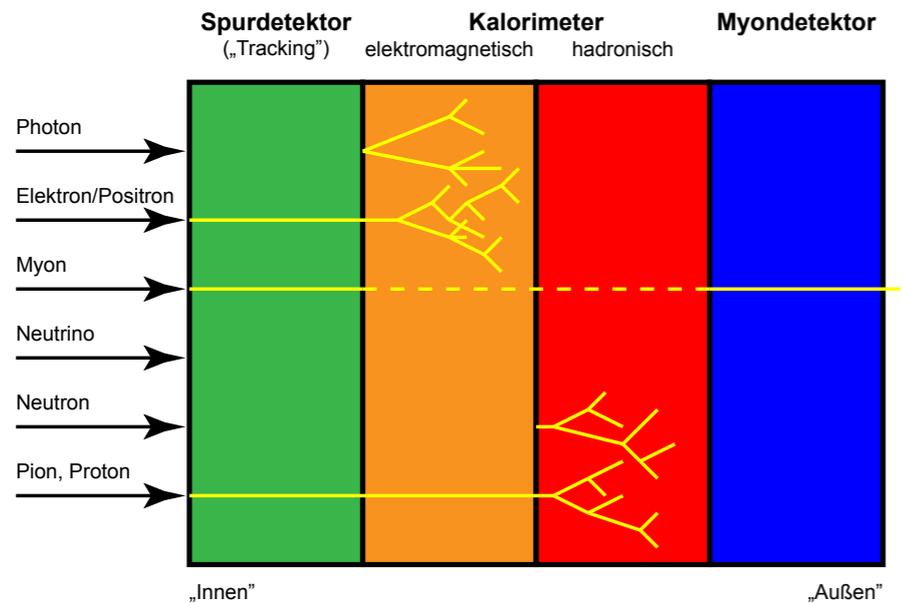
 ATLAS
EXPERIMENT

<http://atlas.ch>

Run: 205113
Event: 12611816
Date: 2012-06-18
Time: 11:07:47 CEST



Higgs-Zerfall in vier Leptonen

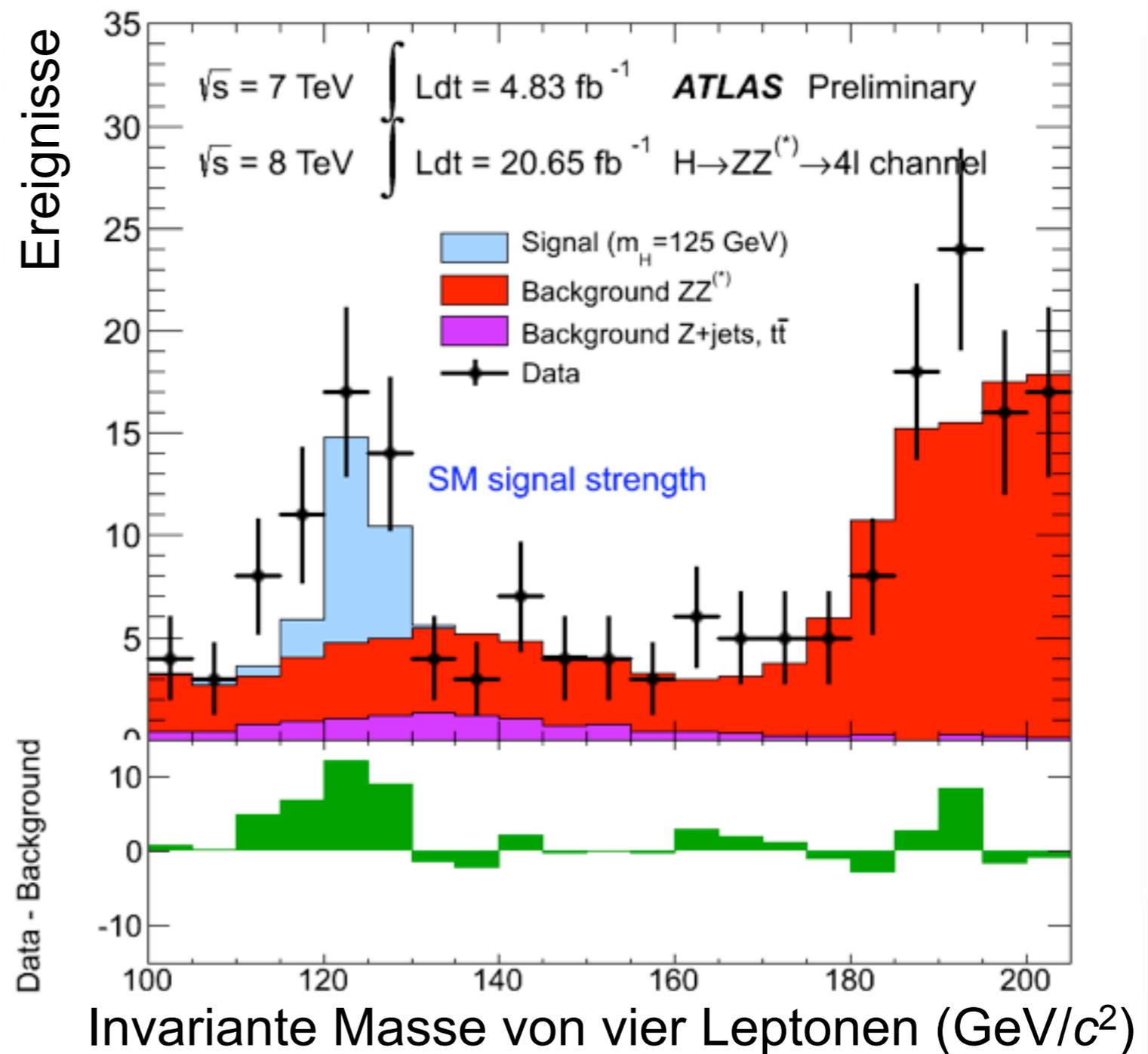


Nachweis:

- Myonen: Spurdetektor und Myondetektor
- Elektronen: Spurdetektor und elektromagnetisches Kalorimeter

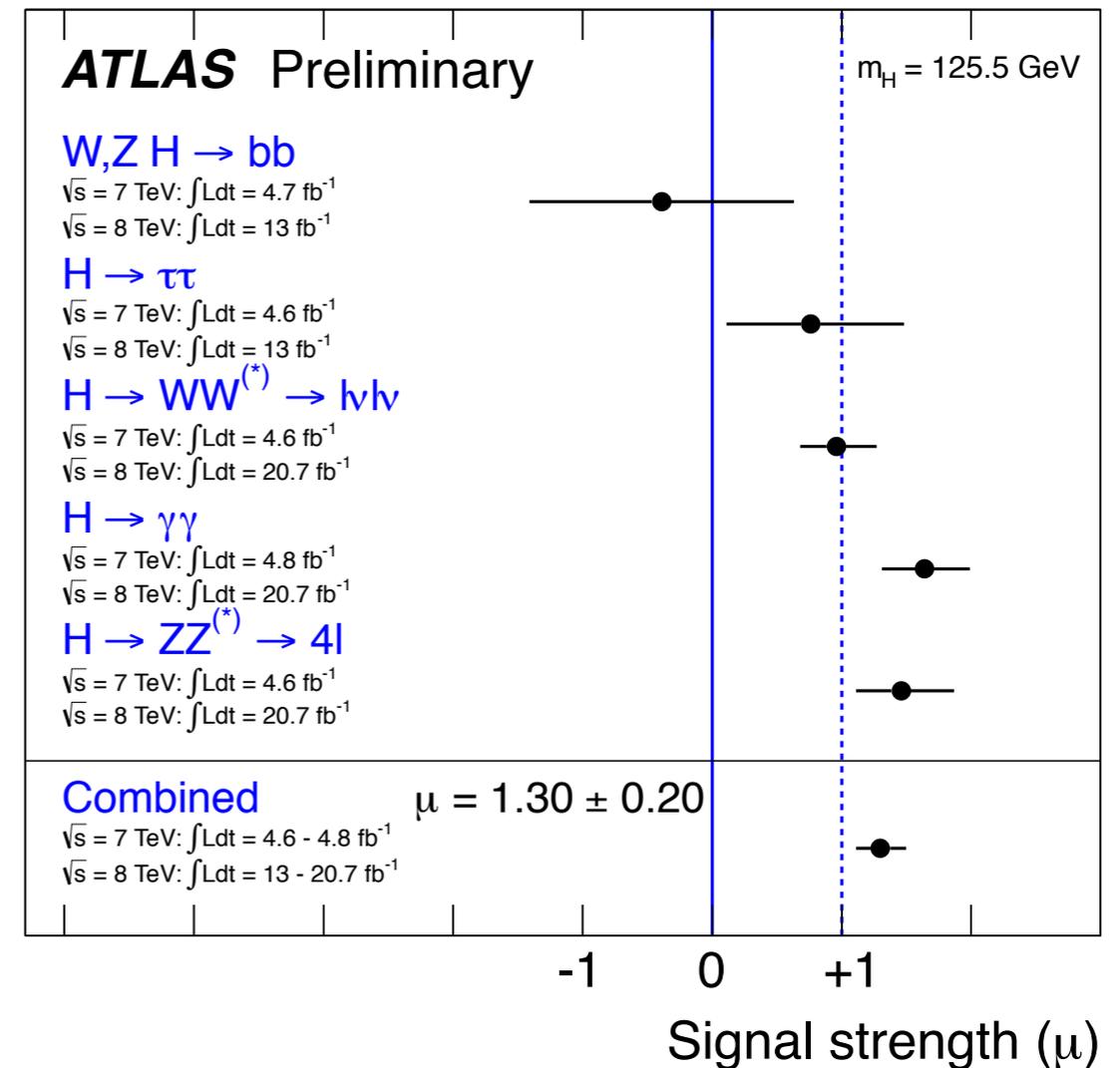
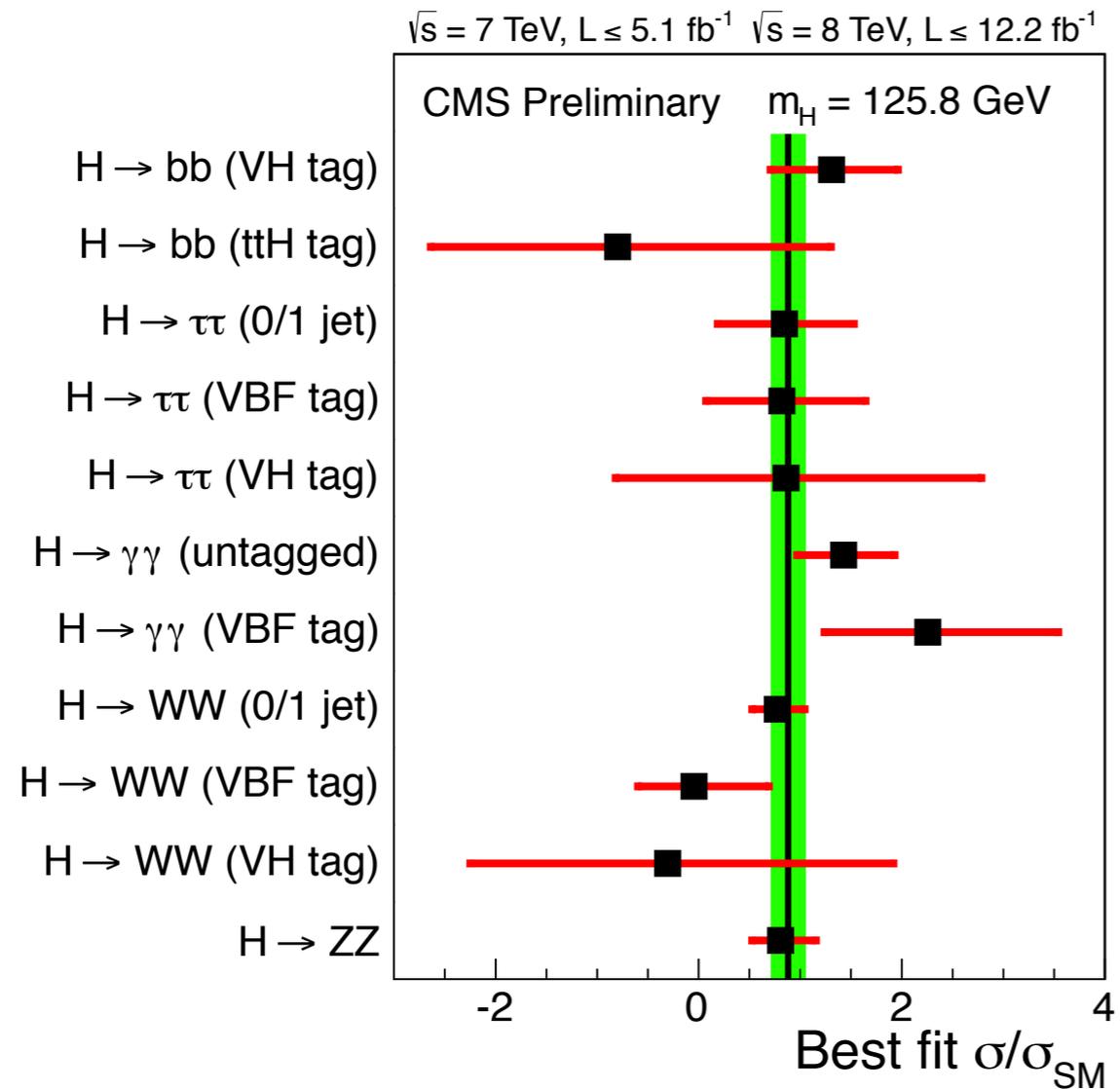
Herausforderung:

- Wenige Signalereignisse



[<https://twiki.cern.ch/twiki/pub/AtlasPublic/HiggsPublicResults/>]

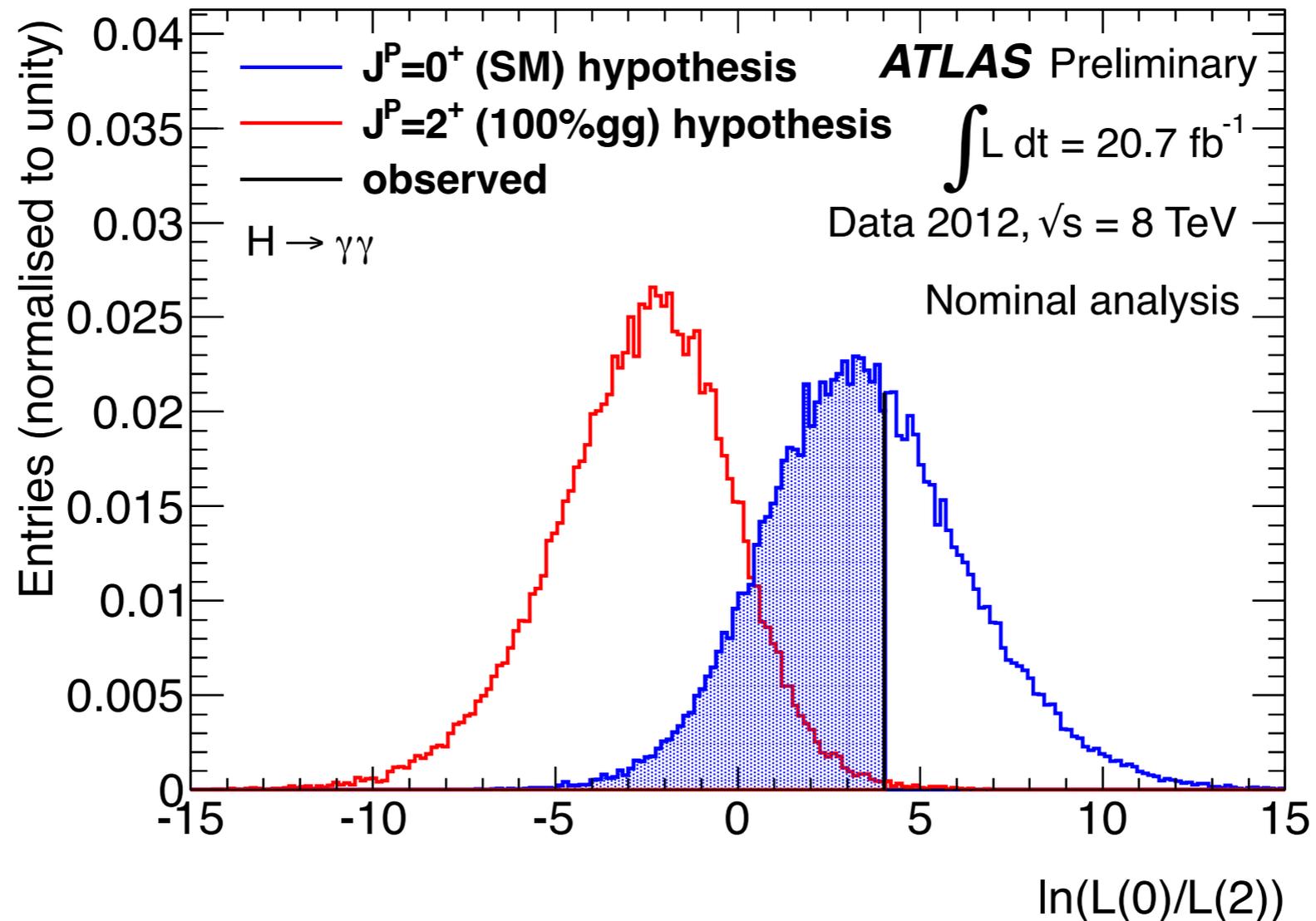
Produktionsrate des Higgs-Bosons



Produktionsraten in allen Kanälen mit Erwartung vom Standardmodell verträglich ($\mu = 1$).

Zerfall in zwei Photonen: erhöhte Rate?

Weitere Higgs-Eigenschaften: Spin



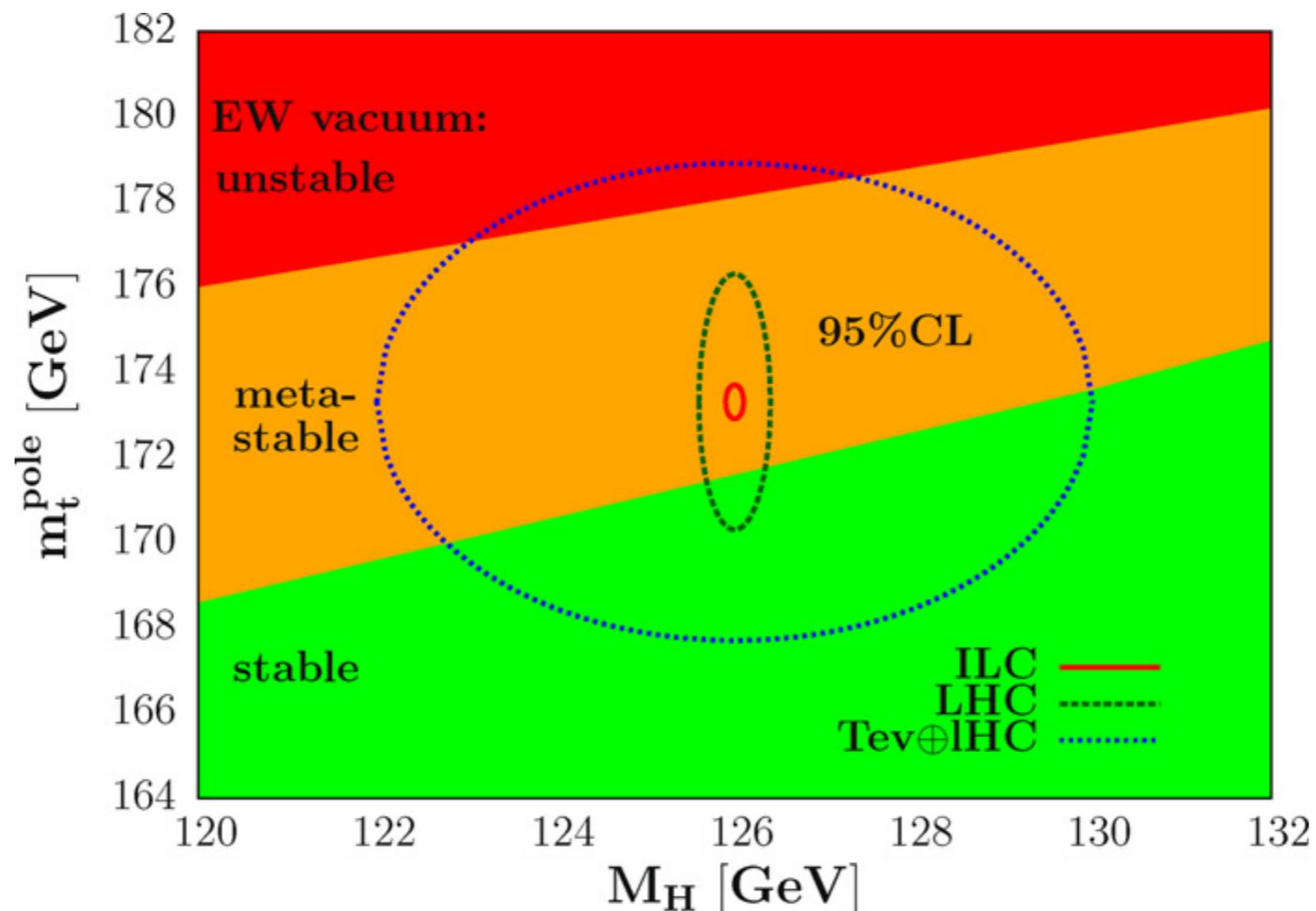
<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2013-029/>

■ Spin des Higgs-Bosons

- Spin kann nur 0 oder 2 sein (Zerfall in zwei Photonen)
- Hypothesentest: Daten bevorzugen Spin 0 über Spin 2
- Bedeutung **fundamentaler Spin-0-Teilchen** in der Natur?

Weitere Higgs-Eigenschaften

- Higgs-Masse und Stabilität des Higgs-Mechanismus
 - Gemessene Higgs- und Top-Quark-Massen: Higgs-Mechanismus “metastabil”
 - Bedeutung für **Entwicklung des Universums?**

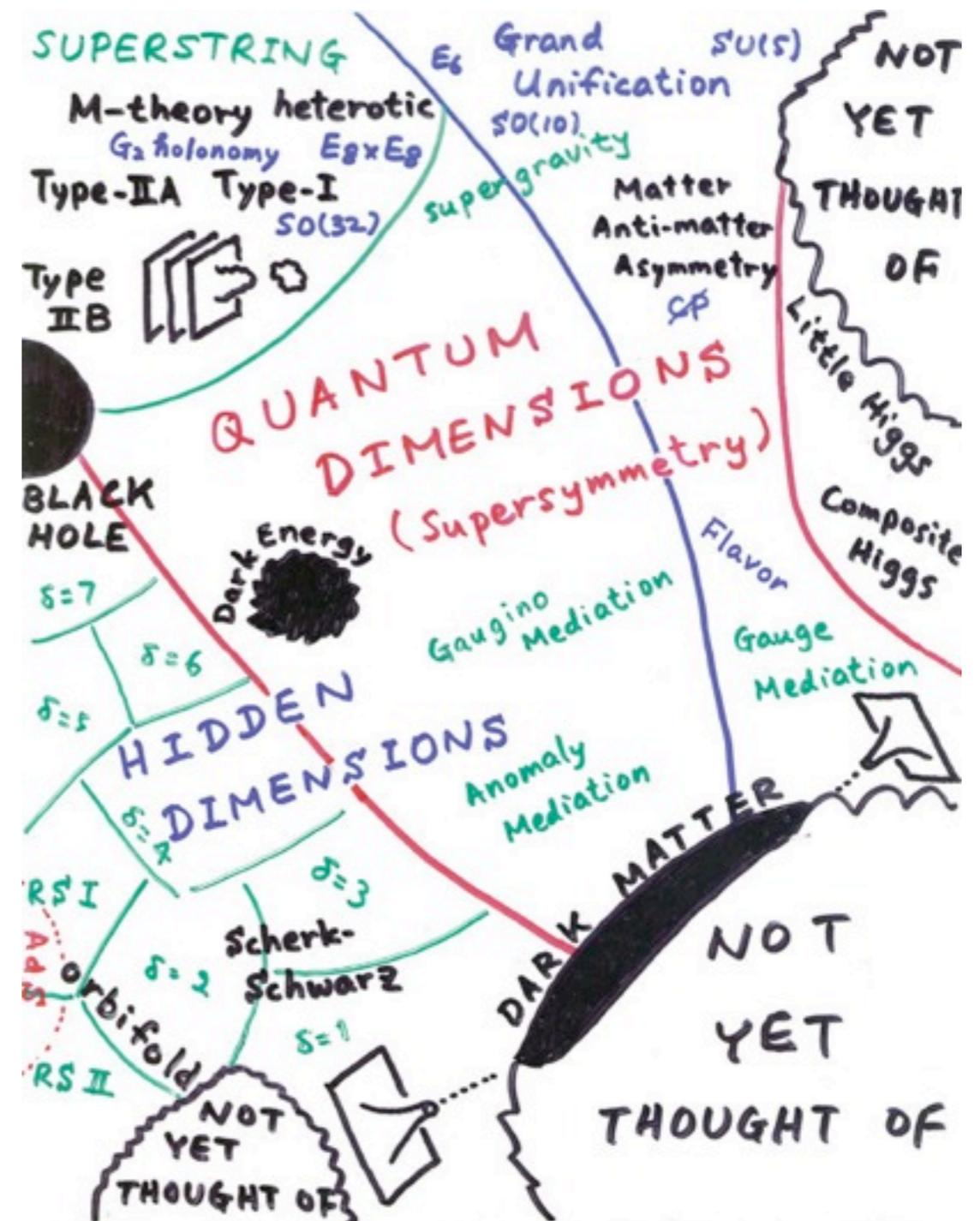


[Phys. Lett. B716 (2013) 214]

Ausblick

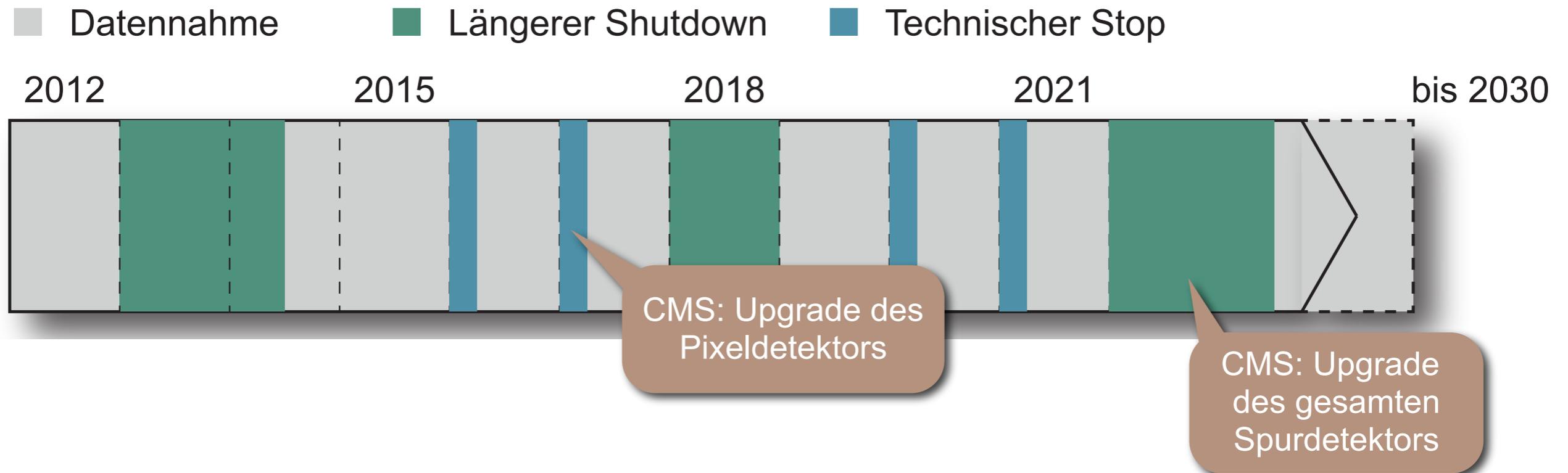
Quo vadis, LHC?

- Breites Forschungsprogramm
 - Untersuchung des Higgs-Bosons
 - Präzisionsmessungen im Standardmodell
 - Suche nach neuer Physik: Supersymmetrie? Extra-Dimensionen? Etwas, an das wir bisher nicht gedacht hatten???
- Neue Entdeckungen benötigen
 - höhere Energien und/oder
 - höhere Kollisionsraten
 - Upgrade des LHC und der Experimente



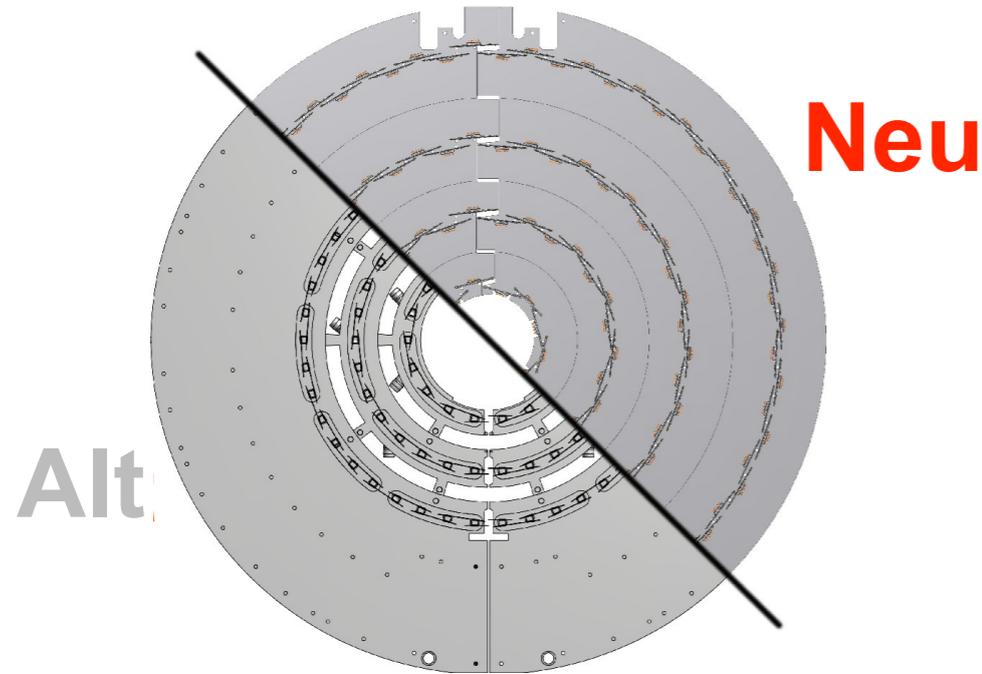
[H. Murayama]

Zukunftspläne



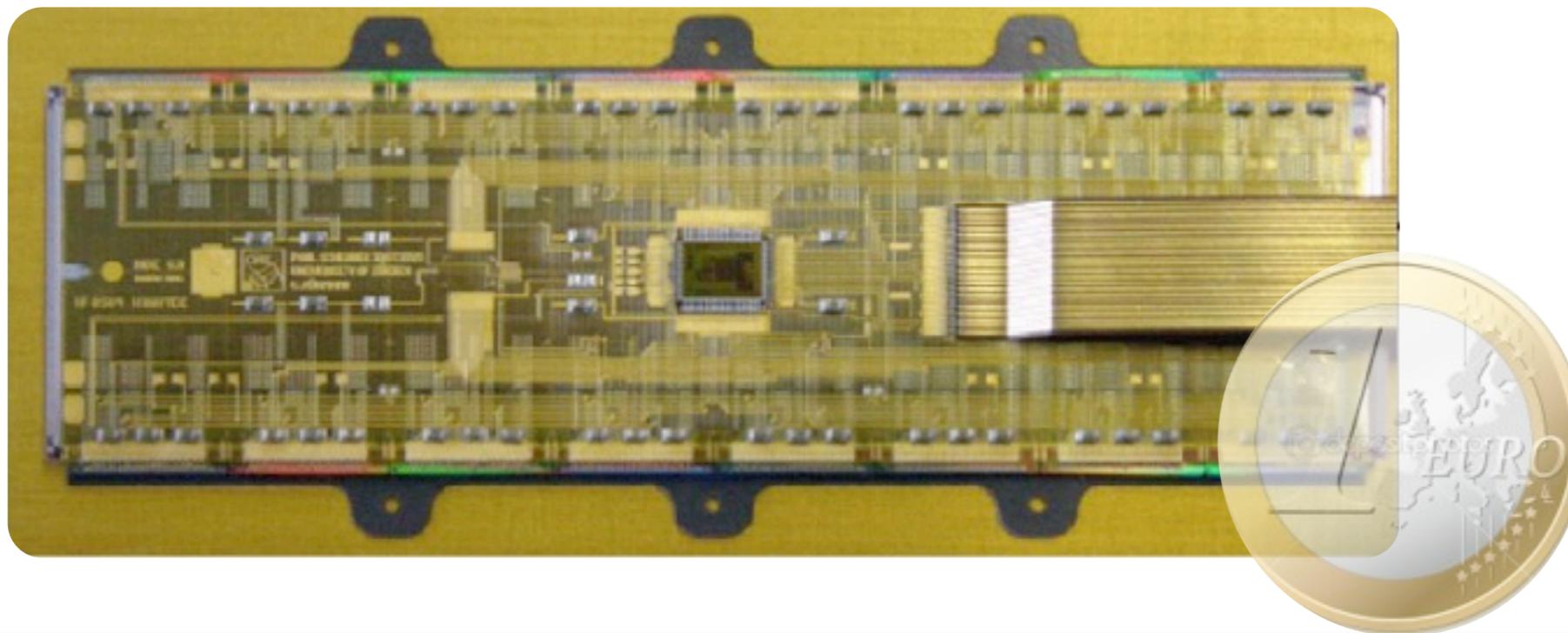
- Datennahme am LHC geplant bis 2030
- Seit Februar 2013: Shutdown zum Ausbau des LHC zur Designenergie
- Zwei weitere Shutdowns 2018 und 2022/23: höhere Datenrate, verbesserte Detektoren

CMS-Upgrade am KIT: Neuer Pixeldetektor



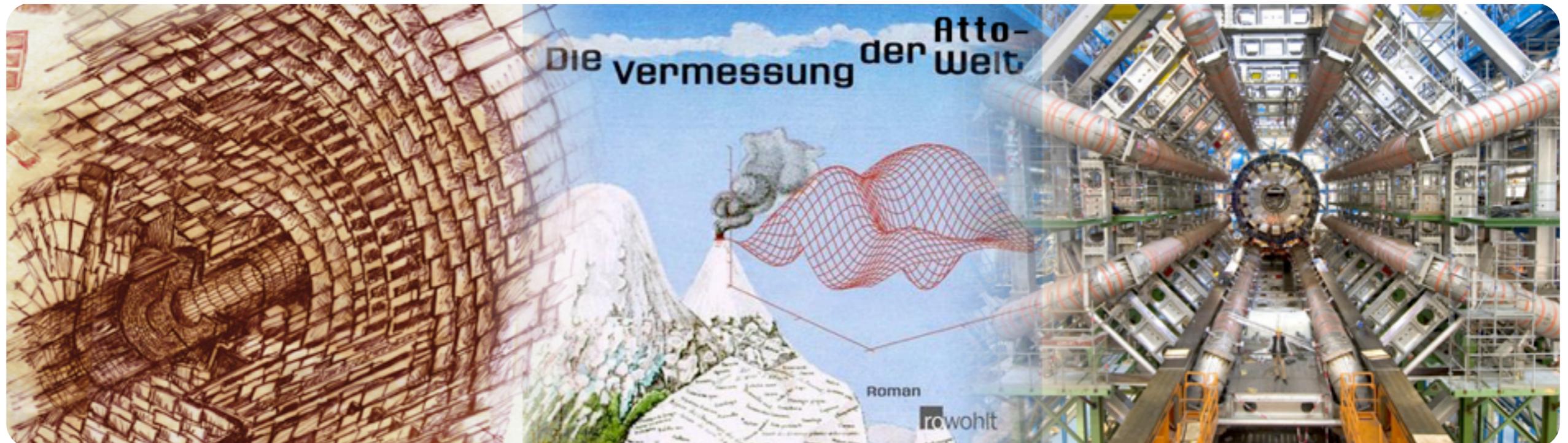
- Phase 1: neuer verbesserter Silizium-Pixeldetektor
- KIT: Produktionszentrum für etwa 400 Detektormodule
- Derzeit: Vorbereitung der Produktion
- Einbau 2016/2017

[S. Streuli, PSI]



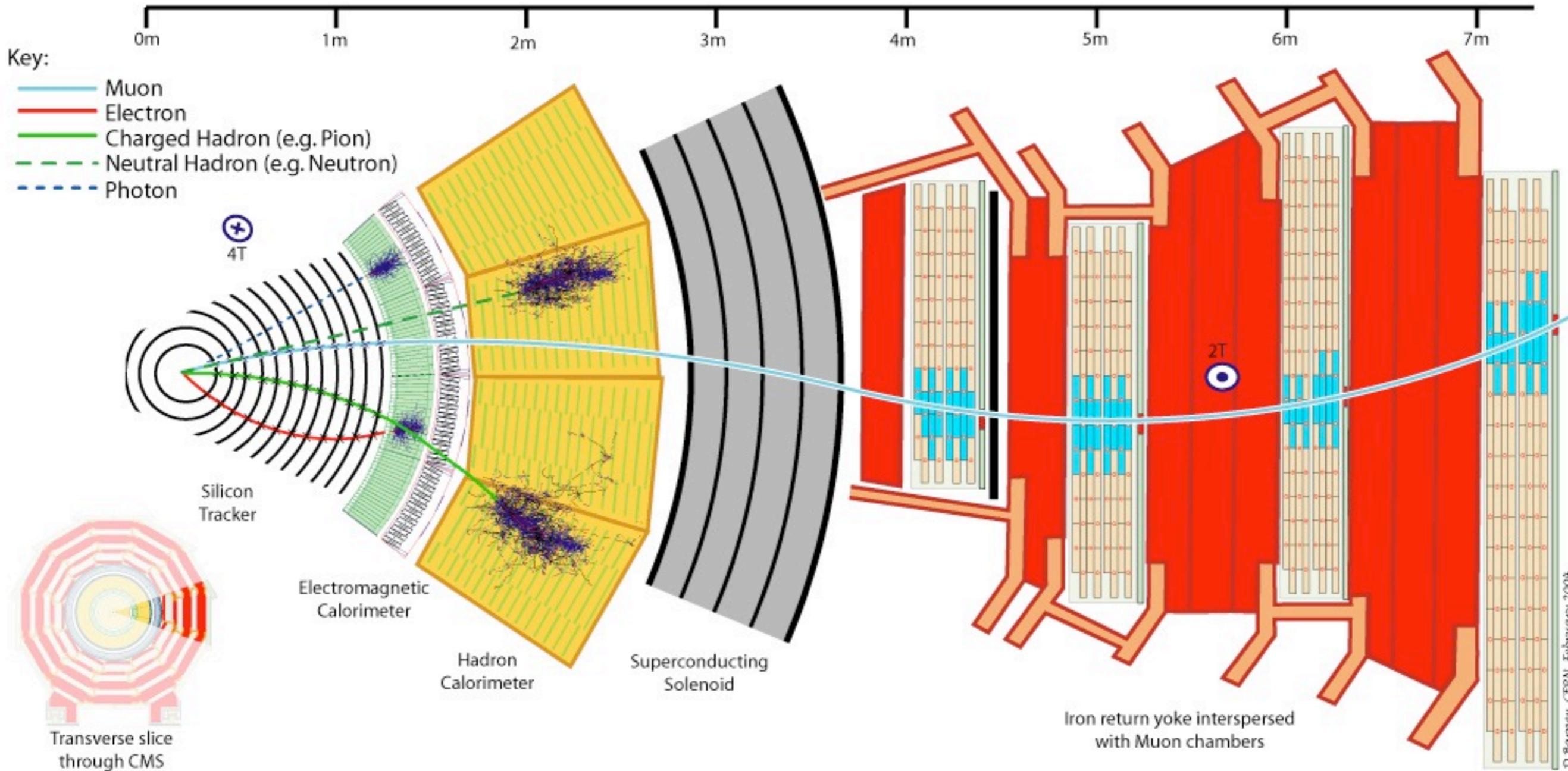
Zusammenfassung

- Ein (das?) Higgs-Boson am LHC → **Triumph der Wissenschaft**
 - Fast 50 Jahre alte Idee: Higgs-Mechanismus und Higgs-Teilchen
 - Fast 30 Jahre und 10000 Personen: Planung, Aufbau und Messungen am LHC
- Das Beste kommt noch: höhere Energien, viel mehr Daten



Zusatzfolien

Teilchennachweis im CMS-Detektor



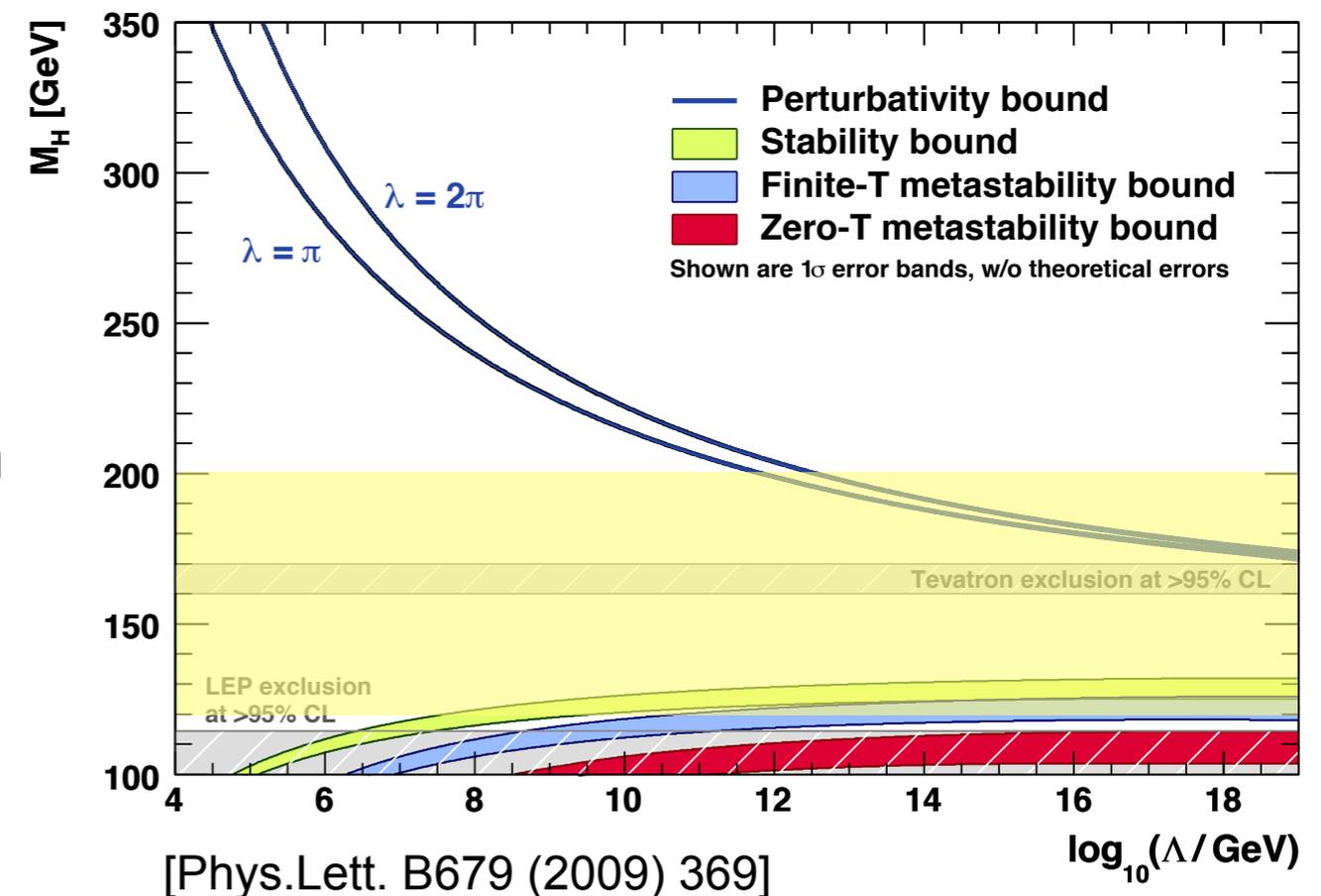
Higgs-Boson: Theoretische Vorhersagen

■ Higgs-Mechanismus im Standardmodell

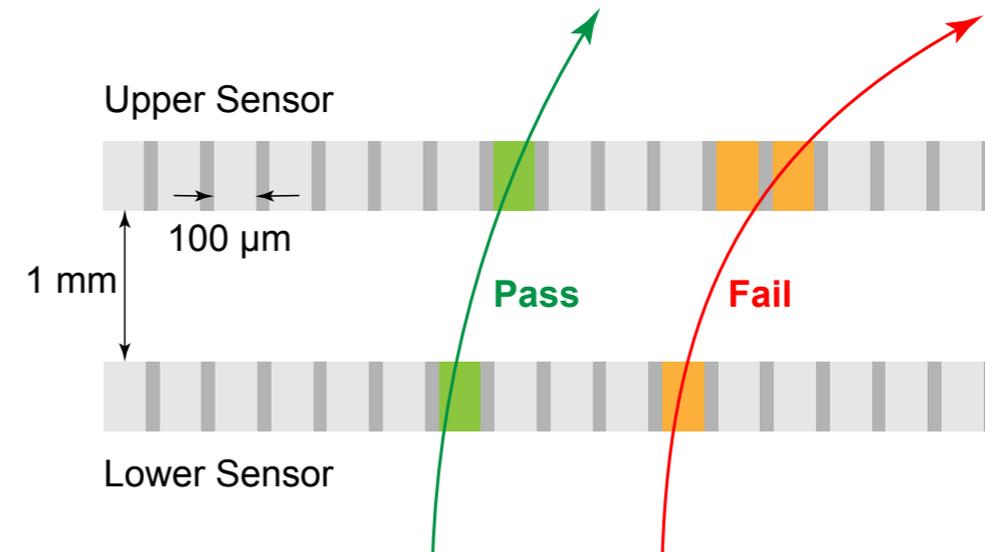
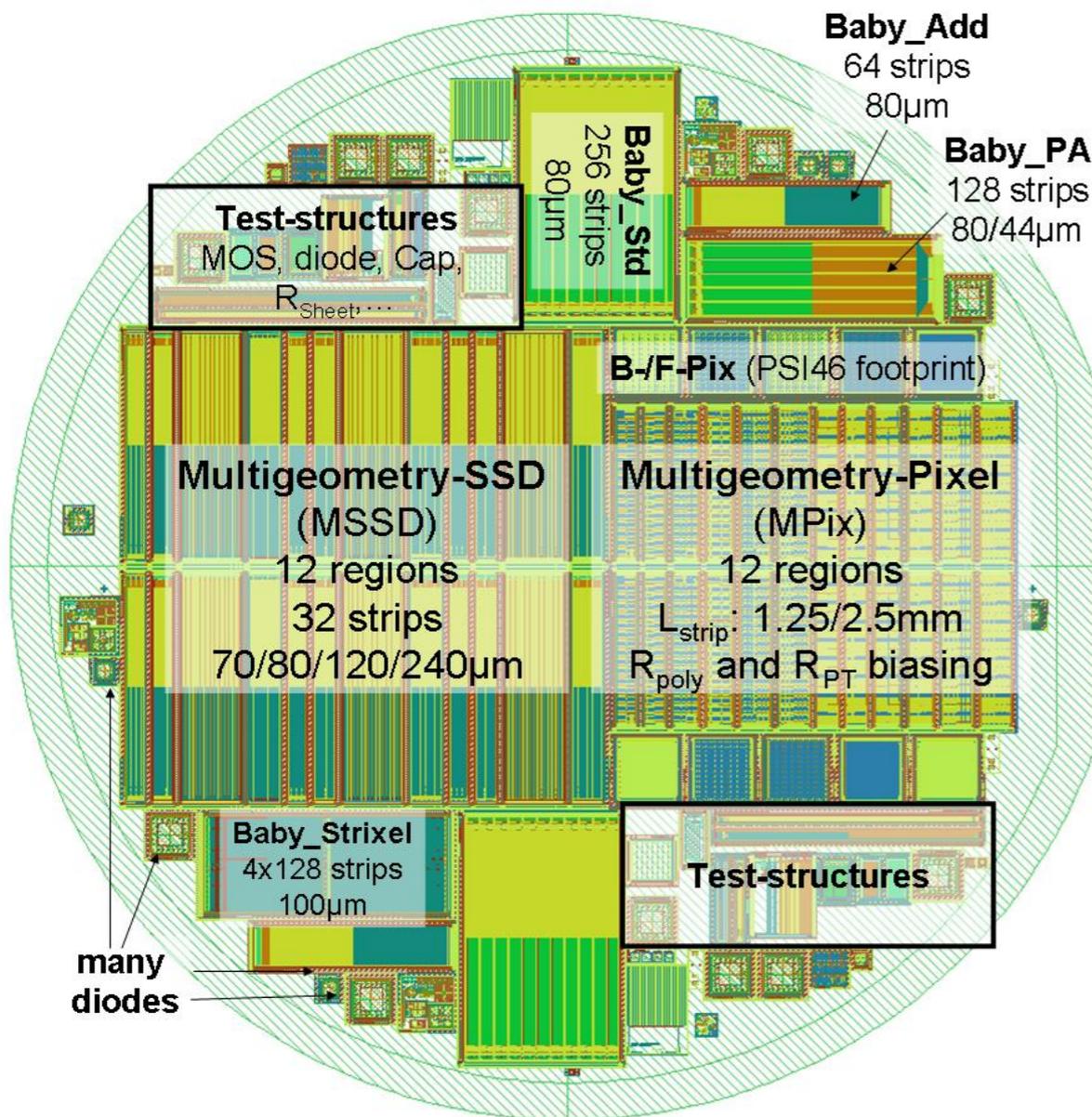
- Einfachste Art, Elementarteilchen Masse zu geben
- Ein neues Teilchen: Higgs-Boson mit Spin 0 („skalares Teilchen“)
- Masse des Higgs-Bosons nicht vorhergesagt
- Falls Masse bekannt: alle weiteren Eigenschaften festgelegt (Produktionsmechanismus, Zerfälle, ...)

■ Schranken auf die Higgs-Masse

- Obere Schranke: Kopplung des Higgs an sich selbst zu stark
- Untere Schranke: Mechanismus der Massenerzeugung bricht zusammen
- Erwartete Higgs-Masse:
120–200 GeV/c²



HPK-Kampagne: Test-Wafer



- Phase 2: kompletter Spurdetektor ersetzt
- Neues Konzept: frühes Verwerfen uninteressanter Spuren
- KIT: Untersuchung neuer strahlungsresistenter Siliziummaterialien, erste Prototypen